



SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering

32nd Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering

October 26th 2022, Bratislava, Slovakia

SPEKTRUM
STU

© Slovak University of Technology in Bratislava,
Faculty of Civil Engineering, 2022



Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave
vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU, Mýtna 30, 811 07 Bratislava v roku 2022

Zostavil a graficky upravil Andrej Bisták
Fotografia na titulnej strane z výstavby budovy Stavebnej fakulty zo zbierky Archívu STU

Publikácia neprešla korektúrou.

Prvé vydanie
615 strán

ISBN 978-80-227-5251-0

www.svf.stuba.sk

PROLOGUE

Dear Readers:

You have received proceedings containing scientific papers from the conference of PhD. students of the Faculty of Civil Engineering of STU Bratislava, which is annually held under the title “Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering”. The year 2022 was the thirty-second year of this PhD. conference.

Creative scientific work is an inherent part of doctoral studies. It can be said that doctoral studies should prepare students for an individual’s scientific work. The mission of science is to unveil unknown rules, arrive at new solutions to problems, or create new original findings, ones that are not known anywhere in the world. However, the mission of science is also to make these new findings available to professionals in other fields, so that these findings can be used for the welfare of all human beings. Therefore, in doctoral studies it is not just theoretical research which is important, but also the acquisition of new scientific facts and the scientific experiment itself. An integral part of doctoral studies is to train and support the ability to define a scientific problem, set scientific goals, and suggest a method for the solution of the problem and prepare an experiment. Students should then be able to analyse their results and reach adequate conclusions. They should also be trained to be able to present their results and defend them before a professional scientific community.

The aim of this conference is to contribute to the acquisition and training of the mentioned skills of PhD. students. The PhD. students present the outcomes of their theses in sections created according to their study fields. As the conference is competitive, the best papers are evaluated and should motivate the doctoral students to engage in more intensive scientific work.

An important condition for high-quality scientific work is an adequate scientific infrastructure along with first-class laboratories and equipment. Recently, a significant investment into laboratories has been realised by STU. Within the University Scientific Park Project, the Faculty of Civil Engineering has been provided with high-quality laboratory equipment and devices. Some laboratories have been refurbished. We believe that the better quality of the Faculty’s research base will be reflected in the better quality of papers presented by our PhD. students. We expect that the creation of a scientific infrastructure will also lead to better scientific work at the Faculty and result in better conditions for the scientific work of our doctoral students. This should give them new incentives and desire to undertake scientific research.

This conference would not be possible without the active participation of the doctoral students, as well as the hard work of the teachers, supervisors, and organisers of the conference, who devoted a lot of their time and energy to it. Our appreciation should also go to the chairmen and members of the boards in the sections and to the experienced professors who, by their advice and comments, guide the further scientific work of PhD. students and, as such, contribute to the better quality of their theses. We would like to thank all those who participated in this conference – the doctoral students, organisers, supervisors, and members of the boards.

Stanislav Unčík
dean

THE LIST OF REVIEWERS

Ing. Matúš Bakoň, PhD.
Ing. Gabriel Bálint, PhD.
Ing. Kristína Baloghová, PhD.
Ing. Andrej Bartók, PhD.
prof. Ing. Emília Bednárová, PhD.
prof. Ing. Juraj Bilčík, PhD.
doc. Ing. Viktor Borzovič, PhD.
Ing. Lukáš Bosák, PhD.
Ing. Filip Bránický, PhD.
Ing. Ján Brodniansky, PhD.
Ing. Peter Buday, PhD.
prof. Ing. Milan Čistý, PhD.
Ing. Lea Čubanová, PhD.
Ing. Jakub Čurpek, PhD.
Ing. Marek Ďubek, PhD.
Ing. Michal Franek, PhD.
doc. RNDr. Peter Frolkovič, PhD.
doc. Ing. Katarína Gajdošová, PhD.
Ing. Robert Geisse, PhD.
Mgr. Štefan Gyürki, PhD.
MSc. Jooyoung Hahn, PhD.
prof. Ing. Jaroslav Halvonik, PhD.
doc. RNDr. Angela Handlovičová, PhD.
prof. Ing. Kamila Hlavčová, PhD.
Ing. Jaroslav Hrudka, PhD.
prof. Ing. Ivan Chmúrny, PhD.
Ing. Ján Ilko, PhD.
doc. Ing. Rastislav Ingeli, PhD.
Ing. Martin Jamnický, PhD.
Ing. Tatjana Janošková, PhD.
Ing. Tomáš Klas, PhD.
prof. Ing. Silvia Kohnová, PhD.
Ing. Michal Kollár, PhD.
prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD.
prof. RNDr. Miloslav Kopecký, PhD.
doc. Ing. Daniela Koudelková, PhD.
doc. Ing. Michal Krajčík, PhD.
Ing. Martin Kubáň, PhD.
Ing. Eliška Kučová
Ing. Mária Kurčová, PhD.
Ing. Katarína Lamperová, PhD.
Ing. Marek Macák, PhD.
Ing. Martin Magura, PhD.
Ing. Martina Majorošová, PhD.
doc. Ing. Marián Marčiš, PhD.
Ing. Zuzana Némětová, PhD.
Ing. Martin Orfánus, PhD.
Ing. Adela Palková, PhD.
Ing. Juraj Papčo, PhD.
Seol Ah Park, MSc.
prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.
Ing. arch. Ing. Roman Ruhig, PhD.
doc. Ing. Tibor Schlosser, CSc.
Ing. Miloš Slivanský, PhD.
doc. Ing. Róbert Sonnenschein, PhD.
doc. Ing. Zuzana Straková, PhD.
Ing. Alena Struhárová, PhD.
Ing. Monika Šivecová
doc. Ing. Andrej Škrinár, PhD.
prof. RNDr. Ivona Škultétyová, PhD.
doc. Ing. Július Šoltész, PhD.
Ing. Patrik Šťastný, PhD.
Ing. Zuzana Štefunková, PhD.
doc. Ing. arch. Eva Vojteková, PhD.
doc. Ing. Roman Výleta, PhD.
Ing. Réka Wittmanová, PhD.
Ing. Lukáš Zelem, PhD.

THE SCIENTIFIC BOARD

prof. Ing. Jana Frankovská, PhD.

prof. Ing. Jozef Hraška, PhD.

prof. Ing. Alojz Kopáček, PhD.

prof. Ing. Viliam Macura, PhD.

prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc.

prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.

prof. Ing. Ján Szolgay, PhD.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

THE COORDINATING BOARD

doc. Ing. Peter Makýš, PhD.

Ing. Antónia Laščeková

Mgr. Ľubica Michalíková

The publication has not been corrected.

CONTENT

APPLIED MATHEMATICS

Ivona Hrivová

TRIADS OF REGULAR MAPS ON GENERALIZED DIHEDRAL GROUPS AND THEIR PRODUCTS.....13

Juraj Kalafut

O EXISTENCII PERIODICKÝCH OSCILÁCIÍ V NESPOJITÝCH DYNAMICKÝCH SYSTÉMOCH.....19

Katarína Lacková, Peter Frolkovič

VON NEUMANNOVA ANALÝZA STABILITY UPWIND NUMERICKEJ SCHÉMY APLIKOVANEJ NA ROVNICU ÚROVŇOVEJ MNOŽINY S KRIVOSTNÝM ČLENOM24

Karol Mikula, Aneta A. Ožvat, Mária Šibíková

HOW TO DISTINGUISH NATURAL AND PLANTED RIPARIAN FORESTS BY THE GRAPH-LAPLACIAN31

Mária Somorovská, Zuzana Krivá

IMAGE SEGMENTATION OF MACROPHAGES BASED ON A LOCAL ADAPTIVE THRESHOLDING AND A SUBJECTIVE SURFACE METHOD.....36

Dagmar Žáková, Peter Frolkovič

THIRD-ORDER ACCURATE COMPACT IMPLICIT NUMERICAL SCHEME FOR LINEAR ADVECTION EQUATION43

Michal Žeravý, Peter Frolkovič

HIGH RESOLUTION COMPACT IMPLICIT METHOD FOR NUMERICAL SOLUTION OF EULER EQUATIONS49

BUILDING TECHNOLOGY

Maryna Babenko

ŠTÚDIUM MIKROŠTRUKTÚRY SLAMY A PERSPEKTÍVY JEJ APLIKÁCIE AKO SUBSTRÁTU PRE STAVEBNÉ MATERIÁLY NA BÁZE MYCÉLIA.....56

Terézia Cabanová

SPEKTRÁLNA ANALÝZA TERMO-OPTICKÝCH PARAMETROV TRANSPARENTNÝCH FASÁDNYCH PRVKOV S APLIKOVANÝM PCM.....62

Dominika Húdoková

OVERENIE PARAMETRA STI V AKUSTICKOM PROGRAME ODEON.....69

Muhammad Faisal Junaid

BIOBASED PHASE CHANGE MATERIALS AND APPLICATION IN BUILDING
;ENERGY SAVING CAMPAIGN76

Štefan Krištofič

PROPOZÍCIA NABÍJACEJ INFRAŠTRUKTÚRY PRE ELEKTRICKÉ MECHANIZMY
Z HEADISKA PREVÁDZKOVÝCH POTRIEB ZARIADENIA STAVENISKA83

Michal Kuruc

TESTOVACIA METÓDA NA SVETELNÚ PRIEPUSTNOSŤ SVETLA STAVEBNÝCH
MATERIÁLOV A KOMPONENTOV91

Lukáš Lederer

PROGNÓZOVANIE VÝVOJA CIEN STAVEBNÝCH MATERIÁLOV A PRÁC97

Milan Švolík

ANALÝZA ČIASTOČNÉHO ODDEBNENOVANIA STROPNÝCH KONŠTRUKCIÍ A
STATICKÝCH PODPIER Z POHLADU OPTIMALIZÁCIE VYUŽITIA 104

Adam Uhlík

POROVNANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ CEMENTOVÝCH ZMESÍ
PRE 3D TLAČ V STAVEBNÍCTVE 112

Ivan Vavřík

PÔSOBENIE DEBNENIA NA VZHLAD BETÓNU 119

GEODESY AND CARTOGRAPHY

Ján Brindza

VÝVOJ NÍZKO-NÁKLADOVÉHO MERACIEHO SYSTÉMU A JEHO TESTOVANIE..... 127

Andrej Hideghéty

VERIFICATION OF CAMERA STABILITY FOR TIME-BASE PHOTOGRAMMETRY 135

Lukáš Kubica

POROVNANIE L_1 A L_2 REGRESIE PRI MODELOVANÍ InSAR ČASOVÝCH RADOV 147

Peter Kysel'

KOMPLEXNÁ OBNOVA VKMČ S LOKÁLNymi POSUNMI V KATASTRÁLNOM
ÚZEMÍ GALOVANY 154

Laura Pénzešová

POHLAD NA ZAČIATKY PANDÉMIE COVID-19 POMOCOU KONTINUÁLNYCH
GRAVIMETRICKÝCH MERANÍ 162

LANDSCAPING

Viktória Gáspár

VPLYV KLIMATICKÝCH ZMIEN NA PREMENLIVOSŤ ETÁŽÍ
LESNÝCH SPOLOČENSTIEV 172

Timea Petrová

PROJEKTOVANIE PRVKOV ZELENEJ INFRAŠTRUKTÚRY MESTSKÉHO PROSTREDIA
NA ÚZEMÍ ANTROZEME..... 179

Barbora Považanová

VYHODNOTENIE SUCHA V POVODÍ PARNEJ..... 187

Viera Rattayová

ČASOVÁ A PRIESTOROVÁ DISTRIBÚCIA HODNÔT REFERENČNEJ
EVAPOTRANSPIRÁCIE NÍŽINNÝCH OBLASTÍ SLOVENSKA 197

THEORY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY OF BUILDINGS

Viktória Állóová

FAKTORY VPLYVAJÚCE NA VNÚTORNÉ PROSTREDIE SKLENÍKOV A ICH VPLYV
NA ENERGETICKÚ NÁROČNOSŤ 204

Barbora Junasová

OPTIMALIZÁCIA SYSTÉMOV SÁLAVÉHO VYKUROVANIA A CHLADENIA
V OBNOVOVANÝCH BUDOVÁCH 210

Veronika Mučková

PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA A ANALÝZA FRAGMENTOV OBVODOVÉHO PLÁŠŤA
S APLIKÁCIOU AKTÍVNEJ TEPELNEJ OCHRANY..... 218

Martina Mudrá

SIMULÁCIA PRIEBEHU OPERATÍVNEJ TEPLoty V BYTOVOM DOME
NAPOJENOM NA SÚSTAVU CZT 226

Anna Predajnianska

EXPERIMENTÁLNE MERANIE A ANALÝZA PREVÁDZKY BAZÉNA TERMÁLNEHO
KÚPALISKA 235

Martin Sokol

SIMULÁCIA TLAKOVÝCH POMEROV V SPLAŠKOVOM ODPADOVOM POTRUBÍ
PRI POUŽITÍ RÔZNYCH TYPOV TVAROVIEK..... 244

Tomáš Strenk

KVALITA VNÚTORNÉHO PROSTREDIA V BYTOVÝCH DOMOCH PO KOMPLEXNEJ
OBNOVE 251

Pavol Štefanič

VÝPOČET INTENZITY VÝMENY VZDUCHU PROSTREDNÍCTVOM
STOPOVACIEHO PLYNU PRI PRIRODZENOM VETRANÍ 257

Eva Svarcová , Dragos-Ioan Bogatu , Jun Shinoda, Ongun B. Kazanci

METHODOLOGY OF CALCULATION FOR THE RADIANT PANEL WITH PHASE CHANGE MATERIAL..... 263

THEORY AND STRUCTURES OF BUILDINGS

Alžbeta Danková

VYUŽITIE ENERGIE SLNEČNÉHO ŽIARENIA INTEGRÁCIU SOLÁRNYCH SYSTÉMOV DO FASÁDY BUDOVY..... 270

Jakub Hanzl

VÝCHODISKÁ PRE NÁVRH ZANIKNUTÉHO ZASTREŠENIA HISTORICKÉHO OBJEKTU PRI RÔZNYCH STATICKÝCH SITUÁCIÁCH..... 277

Mário Chlaň

PRINCÍP FUNGOVANIA DYNAMICKEJ ČASTI AUTONÓMNEJ OKENNEJ KONŠTRUKCIE..... 289

Tomáš Josai

ANALÝZA VPLYVU VÝŠKY PREKÁŽKY NA DENNÚ OSVETLENOSŤ V MODELI POD UMELOU OBLOHOU..... 295

Martina Kalivodová

ADAPTÁCIA FORIEM VERNAKULÁRNEJ ARCHITEKTÚRY - PASÍVNE STRATÉGIE PRE TEPELNÝ KOMFORT: MEDZIPRIESTOR..... 305

Kristína Kaniková

PREHLAD MERACÍCH ZARIADENÍ POUŽITÝCH NA KVANTIFIKÁCIU DVOJITÝCH TRANSPARENTNÝCH FASÁD A PRÍPRAVA NA MERANIE 314

Matúš Krajčík

MERANIE INTERIÉROVEJ KONCENTRÁCIE RADÓNU V MIESTNOSTI VYUŽÍVAJUCEJ VETRANIE SO SPÄTNÝM ZÍSKAVANÍM TEPLA..... 327

Silvia Križanová

DYNAMICKÉ ZASKLENIA S MIKROTIENIDLAMI..... 334

Simona Michalisková

VYHODNOTENIE MIERY ÚČINNOSTI TECHNOLOGIE PREVETRÁVANÝCH PODLÁH..... 341

Eva Mišovychová

POROVNANIE TEPLoty VNÚTORNÉHO VZDUCHU A KONCENTRÁCIE OXIDU UHOENATÉHO V PODZEMNOM PARKOVISKU SO VZDUCHOVOU CLONOU A BEZ NEJ 348

Nora Naddourová

OBNOVA MESTSKEJ TRŽNICE V NITRE - OKENNÉ KONŠTRUKCIE..... 358

Martin Poliak

ANALÝZA GEOMETRIE STYKU RUINY SO ZASTREŠENÍM..... 365

Robert Provazník

ANALÝZA POJMOV A PROCESOV TÝKAJÚCICH SA UHLÍKOVO NEUTRÁLNYCH
BUDOV 373

Zuzana Šišková

SÚČASNÍ MAJITELIA STAVIEB VÍL A RODINNÝCH DOMOV Z MEDZIVOJNOVÉHO
OBDOBIA. STOTOŽNENIE/NESTOTOŽNENIE SO STAVBOU 379

Martin Zagyi

POROVNANIE POVRCHOVÝCH TEPLÔT MEDZI JEDNOPLÁŠŤOVOU
A VEGETAČNOU STRECHOU 391

THEORY AND STRUCTURES OF CIVIL ENGINEERING WORKS

Jaroslav Baran

PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA VPLYVU PREDPÄTIA NA ŠMYKOVÚ ODOLNOSŤ
PREDPÄTÝCH NOSNÍKOV 399

Stanislav Blaho

ČIASTOČNÉ VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNEJ ŠTÚDIE PRVKOV
VYSTUŽENÝCH GFRP VÝSTUŽOU PRI DLHODOBOM NAMÁHANÍ..... 405

Daniel Čereš

ŠMYKOVÉ SPOJENIE MEDZI NADBETONÁVKOU A PÔVODNOU LOKÁLNE
PODOPRETOU DOSKOU 411

Klara Freudenberger

PRÍPOJ STROPNEJ DOSKY K NOSNÍKU PRI HYBRIDNÝCH SÚSTAVÁCH Z KRÍŽOM
LEPENÉHO LAMELOVÉHO DREVA A OCELE 417

Jakub Gašpárek, Lukáš Húlek

PRAVDEPODOBNOSTNÁ PREDIKCIA KONTAMINÁCIE BETÓNU SIMULÁCIOU
ZOHĽADŇUJÚCOU PROBLÉM POHYBLIVÝCH HRANÍC 424

Natália Gregušová

ANALÝZA MODELOV PRE URČENIE MAXIMÁLNEJ ODOLNOSTI V PRETLAČENÍ
LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK..... 432

Roman Herda

ŠKRUPINOVÉ KONŠTRUKCIE VOENÝCH TVAROV 439

Matej Jurgoš

ÚVODNÉ VYHODNOTENIE PILOTNÉHO EXPERIMENTU NA ŠMYKOVÉ A OHYBOVÉ
NAMÁHANIE NOSNÍKOV Z BETÓNU Z RECYKLOVANÉHO KAMENIVA..... 445

Veronika Knapcová

VPLYV POUŽITIA RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETÓNU NA ODOLNOSŤ
BETÓNOVÝCH STĹPOV 451

Denis Kopásek, Jakub Gašpárek

POZNATKY NADOBUDNUTÉ Z DIAGNOSTÍK MOSTOV NA SLOVENSKU..... 459

Silvia Martinkovičová

TYPOLOGIA A HISTÓRIA TESÁRSKYCH SPOJOV..... 468

Martin Marton

KALIBRÁCIA VALIDÁCIA A VERIFIKÁCIA NUMERICKÉHO MODELU NA ZÁKLADE
EXPERIMENTÁLNYCH TESTOV 474

Maroš Mojto

SIMULÁCIA NASÚVANÉHO SPOJA POUŽITÉHO VO VETERNEJ TURBÍNE..... 482

Adrián Ondák

VPLYV MNOŽSTVA RECYKLOVANÉHO BETÓNOVÉHO KAMENIVA NA DLHODOBÉ
VLASTNOSTI PRVKOV Z RECYKLOVANÉHO BETÓNU 490

Lucia Ondrašínová

UPLATNENIE FAKTORA EKVIVALENTNÉHO POŠKODENIA λ PRI POSÚDENÍ
ŽELEZNIČNÝCH MOSTOV NA ÚNAVU 496

Ján Pecka

PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA ZOSILNENIA ŠTÍHLÝCH ŽELEZOBETÓNOVÝCH STĹPOV
APLIKÁCIU CFRP MATERIÁLOV 504

Jaroslav Prokop

EXPERIMENTÁLNE OVEROVANIE BETÓNOVÝCH VZORIEK VYSTUŽENÝCH
RECYKLOVANÝMI OCELOVÝMI VLÁKNAMI 511

Juraj Slavkov

VLASTNOSTI HORNINOVÉHO PROSTREDIA OVPLYVŇUJÚCE NÁVRH
ENERGETICKÝCH GEOKONŠTRUKCIÍ 517

Michaela Štefanovičová

TEORETICKÁ ANALÝZA NOSNÍKOV VYSTUŽENÝCH GFRP
NAMÁHANÝCH OHYBOM..... 523

Matej Šulík

OBRYSOVÉ KRIVKY 532

Jakub Takács

PREPOJENIE NÁVRHU MINIMÁLNEJ ŠÍRKY CHODNÍKA S FUNKČNÝMI
ÚROVNĀMI..... 538

Bahman Zarazvand

NUMERICKÉ MODELOVANIE PRESTUPU TEPLA V HORIZONTÁLNOM GSHP 544

WATER RESOURCES ENGINEERING

Milica Aleksić

IMPLEMENTATION OF SOIL MOISTURE SATELLITE DATA ON SELECTED
CATCHMENT IN SLOVAKIA ON THE PROCESS OF HYDROLOGY MODELLING 551

Wael Almikaeel

HYDROLOGICKÁ PREDPOVEĎ SUCHA POMOCOU MODELU SVM..... 557

Miroslav Kandra

MODELOVANIE VODNEJ BILANCIE DOLNÉHO HRONA: PROBLEMATIKA
KVANTIFIKÁCIE ODTOKU ZO SUBPOVODÍ..... 563

Anna Liová

ANALÝZA PARAMETROV PRIETOKOVÝCH VĽN A ZOSTROJENIE KONTROLNÝCH
VĽN PRE POSUDZOVANIE BEZPEČNOSTI NÁDRŽÍ..... 569

Jakub Mydla

NÁVRH RETENČNÝCH PRIESTOROV V POVODIACH ULIČKY A UBLIANKY 576

Maksim Portnov

RAINWATER IN THE CONTEXT OF MODERN URBAN INFRASTRUCTURE
AND THE IMPACT ON THE RECIPIENT 582

Gergely Rózsa

VYUŽITIE CIRKULÁRNEJ EKONOMIKY PRI TECHNOLOGII ČISTENIA
KOMUNÁLNYCH ODPADOVÝCH VÔD NA DOSIAHNUTIE ENERGETICKEJ
A UHLÍKOVEJ NEUTRALITY..... 587

Zuzana Sabová

VYHODNOTENIE ZMIEN VYBRANÝCH CHARAKTERISTÍK MINIMÁLNYCH
PRIEMERNÝCH DENNÝCH PRIETOKOV DO BUDÚCNOSTI VO VYBRANÝCH
POVODIACH NA SLOVENSKU 592

Marek Šutúš

POROVNANIE VARIANTOV PREPADOVEJ HRANY V ODLAĤOVACEJ KOMORE
POMOCO CFD SIMULÁCIÍ..... 599

Matúš Tomaščík

VYUŽITIE MODELU USLE2D PRI HODNOTENÍ ERÓZNEJ OHROZENOSTI ÚZEMIA
POMOCO USLE V PROSTREDÍ GIS..... 604

Patrik Václavik

MOŽNOSTI POSÚDENIA ÚČINNOSTI INJEKČNEJ CLONY V PODLOŽÍ PRIEHRADY
NOSICE Z HĽADISKA NAJNOVŠÍCH POZNATKOV 610

APPLIED MATHEMATICS

*Ivona Hrivová*¹

Study: Applied Mathematics, 3rd year of study

TRIADS OF REGULAR MAPS ON GENERALIZED DIHEDRAL GROUPS AND THEIR PRODUCTS

TRIÁDY REGULÁRNYCH MÁP SO ZOVŠEOBECNENOU DIHEDRÁLNOU GRUPOU AUTOMORFIZMOV A ICH SÚČINY

Abstract

We construct and analyse orientably-regular maps built as products of regular maps on a generalized dihedral groups.

Key words

Orientably-regular map, automorphism group, generalized dihedral group, direct product, dual map, Petrie-dual map

1. Introduction

A *graph* is a 1-dimensional CW-complex in which vertices are identified with 0-cells and edges with 1-cells in a way that each edge is homeomorphic to a closed unit interval. A *map* is a cellular decomposition of a connected surface, where the 0-cells and 1-cells form the underlying graph of the map, and the 2-cells are the faces of the map. By a *surface*, we will mean a connected Hausdorff topological space in which each point has an open neighbourhood homeomorphic to an open disc. A *symmetry* of a map is an automorphism of its underlying graph that preserves faces.

The main object of our interest are “the most symmetrical” maps which are called regular. A *regular map* is a cellular embedding of a connected graph on a compact surface, with the property that the automorphism group of the embedding is transitive on the flag set of the embedded graph. For any two flags of a cellularly embedded graph there exists at most one automorphism of the embedding that takes one flag onto the other. Therefore, transitivity in the above definition implies regularity of the group, called *the map automorphism group*. For more details on this topic and terminology see [3].

Let M be a regular map with automorphism group $Aut(M)$. Let f be a flag of M bordering an edge e , containing a vertex v and being contained in a face F . By regularity, there are unique map automorphisms r_0 , r_1 and r_2 taking f onto the flag incident with f along the edge e , across the edge e , and through the corner. The particular flag is mapped to the unique third flag distinct from f and incident with e , containing v and being contained in F . The three automorphisms are involutory, acting as reflections in the three sides of f . The compositions r_1r_2 , r_1r_0 and r_0r_1 are rotations about v of order, say, k , about the centre of F of order, say, l , and about the centre of e of order 2 respectively. The concrete map M is then of a type (l, m) , where m is the valency of v (and hence of any other vertex of M) and l is the face length of F (and hence of any other face of M). By

¹ Mgr. Ivona Hrivová, Department of Mathematics and Descriptive Geometry, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

connectivity, the three involutions generate the automorphism group of M , leading to its presentation of the form

$$Aut(M) = \langle r_0, r_1, r_2 | r_0^2, r_1^2, r_2^2, (r_0 r_1)^l, (r_1 r_2)^m, (r_0 r_2)^2, \dots \rangle. \quad (1)$$

Conversely, any abstract group G generated by three involutions, two of which commute, can be presented in the form equivalent to (1) as

$$G = \langle a, b, c | a^2, b^2, c^2, (bc)^k, (ba)^l, (ac)^2, \dots \rangle. \quad (2)$$

A group G is the automorphism group of a regular map M , which we will denote by $Map(G)$ or $Map(a, b, c)$. Its flag set may be identified with the set of elements of G and its edges, vertices and faces may be identified with the left cosets $\langle a, c \rangle$, $\langle b, c \rangle$ and $\langle a, b \rangle$. The group G then acts as the automorphism group of $Map(G)$ by left multiplication. *The type* of a regular map of valency k and face length l will be the ordered pair (k, l) . See [3].

For a regular map $M = Map(G) = Map(a, b, c)$ for a group G presented as in (2), its carrier surface is orientable if and only if the group $\langle ab, bc \rangle$ has index two in G . *The Petrie dual* of M is the map $P(M) = Map(a', b', c')$ where $a' = ac, b' = b$ and $c' = c$, and *the dual* of M is the map $D(M) = Map(a'', b'', c'')$ where $a'' = c, b'' = b$ and $c'' = a$. For more details see [2].

2. A triad of regular maps from generalized dihedral groups

Beyond Abelian groups the simplest non-trivial groups to consider are perhaps the generalized dihedral groups. For any even n and any $k \pmod n$ such that $k^2 \equiv 1 \pmod n$, the generalized dihedral group $D(n, k)$ of order $2n$ is defined by the presentation

$$D(n, k) = \langle r, t | r^n, t^2, trtr^{-k} \rangle. \quad (3)$$

This group can be extended by an automorphism c of order 2 inverting r and commuting with t , which means with the properties $crc = r^{-1}$ and $ctc = t$, giving a group $D^*(n, k)$ with presentation

$$D^*(n, k) = \langle r, t, c | r^n, t^2, c^2, (rc)^2, (tc)^2, trtr^{-k} \rangle. \quad (4)$$

Letting $b = rc$ and $a = rt$, the presentation (4) defines a regular map

$$M_{n,k} = Map(G) = Map(a, b, c) = Map(tc, rc, c)$$

for the group $G = D^*(n, k) = \langle a, b, c \rangle$ introduced in (4). By the above definitions, its Petrie dual is the map $P(M_{n,k}) = Map(tc, rc, c)$ and its dual is $D(M_{n,k}) = Map(c, rc, tc)$.

Our interest is in the product $M_{n,k} \times P(M_{n,k}) \times D(M_{n,k})$ of the three regular maps, defined by the subgroup of $G \times G \times G$ for $G = D^*(n, k) = \langle a, b, c \rangle$ generated by the involutions (a, a', a'') , (b, b', b'') and (c, c', c'') in the sense of the above definitions of the Petrie dual and the dual. Since we have $a = tc$ and $b = rc$ it follows that

$$(a, a', a'') = (tc, t, c), (b, b', b'') = (rc, rc, rc) \text{ and } (c, c', c'') = (c, c, tc).$$

We have a good reason why we choose the product of the three maps in the given order and we comment on this later.

To sum up, letting $G = D^*(n, k)$ as above and letting α, β and γ be elements of $G \times G \times G$ defined by $\alpha = (tc, t, c), \beta = (rc, rc, rc)$ and $\gamma = (c, c, tc)$, we are interested in determining the subgroup $H = \langle \alpha, \beta, \gamma \rangle$ of $G \times G \times G$ and the regular map $Map(H) = Map(\alpha, \beta, \gamma)$.

3. A special Abelian normal subgroup

We begin our analysis by identifying a large Abelian normal subgroup of H . Let $u = (\beta\gamma)^2, v = (\alpha\beta)^2$ and $w = \alpha(uv)\alpha$, and let $K = \langle u, v, w \rangle$.

This group is Abelian. Now we will proceed with established normality of this group. With some effort and time one can show that all elements $aua, \beta u \beta, \gamma u \gamma, av\alpha, \dots, \beta w \beta, \gamma w \gamma$ belong to K because all of them can be expressed as triples with all elements being in a form of some power of r . We will demonstrate this for $aua, \beta u \beta, \gamma u \gamma$; the rest can be done in the similar way:

$$\begin{aligned} au\alpha &= (t, 1, tc)(c, c, c)(r^{-k-1}, r^{-2}, r^{k-1})(t, 1, tc)(c, c, c) = (tcr^{-k-1}tc, cr^{-2}c, tccr^{k-1}tcc) = \\ &= (r^{k+1}, r^2, r^{-k+1}) \\ \beta u \beta &= (r, r, r)(c, c, c)(r^{-k-1}, r^{-2}, r^{k-1})(r, r, r)(c, c, c) = (rcr^{-k-1}rc, rcr^{-2}rc, rcr^{k-1}rc) = \\ &= (r^{k+1}, r^4, r^{-k+1}) \\ \gamma u \gamma &= (c, tc, c)(r^{-k-1}, r^{-2}, r^{k-1})(c, tc, c) = (cr^{-k-1}c, tcr^{-2}tc, cr^{k-1}c) = (r^{k+1}, r^{2k}, r^{1-k}) \end{aligned}$$

We may therefore consider the quotient groups H/K and let $A = \alpha K, B = \beta K$ and $C = \gamma K$. Obviously, A, B, C are involutions and $(AB)^2 = (BC)^2 = (AC)^2 = 1$. By extra arguments, it can be shown that neither of these relations collapses, and so the group

$$H/K = \langle A, B, C | A^2, B^2, C^2, (AB)^2, (BC)^2, (AC)^2 \rangle.$$

is isomorphic to $Z_2 \times Z_2 \times Z_2$ and hence has the order 8.

4. The automorphism group of the product of maps in the triad

The structure of the Abelian normal subgroup $K = \langle u, v, w \rangle$ will be determined by an appropriate modification of the procedure leading to the Smith normal form used in identification of quotients of products of infinite cyclic groups.

We have

$$\begin{aligned} u &= (\beta\gamma)^2 = (r^2, r^2, r^{k+1}) \\ v &= (\alpha\beta)^2 = (r^{-(k+1)}, r^{k-1}, r^{-2}) \\ w &= \alpha(uv)\alpha = (r^{1-k}, r^{k+1}, r^{1-k}) \end{aligned}$$

Since r is of an (even) order n , say, $n = 2m$ the orders of each of u, v and w .

So that $K = \langle u, v, w \rangle$ is a subgroup of $Z_m \times Z_m \times Z_m$. To start the process, we record just the triples of exponents on r in a matrix form, exactly as one does in determining quotients of products of infinite

cyclic groups with the help of Smith matrix. Using row operations, we will subsequently produce equivalent matrices resembling the process of getting towards the Smith normal form (but we will stop earlier). On the left-hand side of the intermediate matrices we will also indicate the elements of K corresponding to the rows. So, we begin with the matrix

$$\begin{matrix} u \\ v \\ w \end{matrix} \begin{pmatrix} 2 & 2 & k+1 \\ -(k+1) & k-1 & -2 \\ 1-k & k+1 & 1-k \end{pmatrix}$$

We multiply the row u by $x \in C_n$ such that $2x = k+1$ and add this multiple to row v . For our calculations let $\varepsilon \in \{0,1\}$ be uniquely determined by $k^2 - 1 = (2\delta + \varepsilon)n$ for a suitable d , which means that $(\text{mod } n)$, we have $\frac{(k^2-1)}{2} = \varepsilon \frac{n}{2}$. Note that, interpreting $k+1$ and $x = \frac{(k+1)}{2} + \delta \frac{n}{2}$ as integers for $\delta \in \{0,1\}$, we have $(k+1)x = \frac{(k+1)^2}{2} + (k+1)\delta \frac{n}{2}$. Since $k+1$ is even, the last expression $(\text{mod } n)$ is equal to $\frac{(k^2-1)}{2} + (k+1)$, which, further reduced $(\text{mod } n)$, is equal to $\varepsilon \frac{n}{2} + k+1$. So, when $(k+1)x$ is added to the third coordinate in the row v we obtain $k-1 + \varepsilon \frac{n}{2}$. This row operation, which is in the group K equivalent to multiplying v by the x -th power of u (and so replacing the row v by the row $u^x v$), gives an equivalent matrix

$$\begin{matrix} u \\ u^x v \\ w \end{matrix} \begin{pmatrix} 2 & 2 & k+1 \\ 0 & 2k & k-1 + \varepsilon n/2 \\ 1-k & k+1 & 1-k \end{pmatrix}$$

We now multiply the row u by $y \in C_n$ such that $2y = k-1$ and add this multiple to the row w . As integers, we have $(k+1)y = \frac{(k^2-1)}{2}$ plus some multiple of n , and $(\text{mod } n)$ this gives $\varepsilon \frac{n}{2}$; so, when $(k+1)y$ is added to the third coordinate in the row w we obtain $1-k + \varepsilon \frac{n}{2}$. This row operation, equivalent in K to multiplying w by the y -th power of u (and so replacing the row w by the row $u^y w$), produces an equivalent matrix

$$\begin{matrix} u \\ u^x v \\ u^y w \end{matrix} \begin{pmatrix} 2 & 2 & k+1 \\ 0 & 2k & k-1 + \varepsilon n/2 \\ 0 & 2k & 1-k + \varepsilon n/2 \end{pmatrix}$$

Adding the negative of the row marked $u^x v$ to the row marked $u^y w$ gives further an equivalent matrix (which, in K means replacing the element $u^y w$ with $(u^x v)^{-1} u^y w = u^{y-x} v^{-1} w$)

$$\begin{matrix} u \\ u^x v \\ u^{y-x} v^{-1} w \end{matrix} \begin{pmatrix} 2 & 2 & k+1 \\ 0 & 2k & k-1 + \varepsilon n/2 \\ 0 & 0 & 2(k-1) \end{pmatrix}$$

We have another simplification $u^{y-x} = u^{-1}$ because $2y - 2x = -2$, so, $(\text{mod } n)$, we have $y-x = -1$ or $y-x = -1 + \frac{n}{2}$, but u has order $\frac{n}{2}$. Finally, we may multiply the second row by k (since it is coprime with n), and change the sign of the third row (meaning taking the k -th power of $u^x v$ and inverting $u^{-1} v^{-1} w$, which will give an equivalent matrix

$$\begin{matrix} u \\ (u^x v)^k \\ uvw^{-1} \end{matrix} \begin{pmatrix} 2 & 2 & k+1 \\ 0 & 2 & k-1 + \varepsilon n/2 \\ 0 & 0 & 2(k-1) \end{pmatrix}$$

We may stop at this point; what we obtained is an upper triangular matrix with the main diagonal satisfying the divisibility condition of the Smith normal form. Since the order of 2 and $2k$ are the same in C_n , the last form of our matrix shows that the group $K = \langle u, v, w \rangle$ is also generated by u , $u^x v$ and uvw^{-1} , of respective orders m , m , and $\frac{n}{\gcd(n, 2k-2)}$. Because of the upper triangular form and the main diagonal satisfying the Smith divisibility condition this means that

$$|K| = \frac{n}{2} \times \frac{n}{2} \times \frac{n}{\gcd(n, 2k-2)} = \frac{n^3}{4\gcd(n, 2k-2)}.$$

Letting $m = \frac{n}{\gcd(n, 2k-2)}$, our derivation also implies that K has a presentation of the form

$$K = \langle u, v, w | u^{\frac{n}{2}}, v^{\frac{n}{2}}, w^{\frac{n}{2}}, [u, v], [u, w], [v, w], (uvw^{-1})^m \rangle$$

and the last relator is redundant (giving $K \cong Z_m \times Z_m \times Z_m$) if and only if, $m = \frac{n}{2}$, that is if and only if $\gcd(n, 2k-2) = 2$.

The reason why in the product we chose to have Petrie dual appearing before the dual is that things develop nicely in the second column of the above matrices - and this is the column corresponding to the Petrie dual.

In the conclusion of Section 3 we saw that the order of H/K is 8. This together with findings in this section leads to the following result.

Theorem: Let $n = 2r$ and $k^2 \equiv 1 \pmod{n}$. The order of the group H , and hence the order of the automorphism group of the product of maps $M_{n,k} \times P(M_{n,k}) \times D(M_{n,k})$, the structure of H has the form

$$H \cong (Z_2 \times Z_2 \times Z_2) \cdot (Z_r \times Z_r \times Z_m),$$

where $m = \frac{n}{\gcd(n, k-1+\epsilon n/2)}$.

Let us point out, that the dot in this case means a general product of groups.

5. Conclusion

We have established some details about the structure of the automorphism group of a product of a triads of regular maps on generalized dihedral groups.

In our forthcoming investigation we will study external symmetries of such a product, i.e., its dualities and possible exponents.

Acknowledgement

The author acknowledges support of this research by the VEGA Research Grants 1/0238/19 and 1/0206/20.

References

- [1] D. Archdeacon, M. Conder and J. Širáň, Kaleidoscopic regular maps with trinity symmetry, *Trans. Amer. Math. Soc.* 366 (2014) 4491–4512.
- [2] M. Conder, Y.S. Kwon and J. Širáň, On external symmetry groups of regular maps, In: *Rigidity and symmetry*, *Fields Inst. Commun.*, 70, Springer, New York, 2014, 87–96.
- [3] J. Širáň, How symmetric can maps on surfaces be?. In: *Surveys in Combinatorics* (S. R. Blackburn, S. Gerke and M. Wildon, Eds.), *London Math. Soc. Lect. Notes* 409, Cambridge Univ.Press (2013), 161–238

Juraj Kalafut¹

Študijný program: Aplikovaná matematika, 1. ročník

O EXISTENCII PERIODICKÝCH OSCILÁCIÍ V NESPOJITÝCH DYNAMICKÝCH SYSTÉMOCH

EXISTENCE OF PERIODICAL OSCILATIONS IN NON-CONTINUOUS DYNAMICAL SYSTEMS

Abstract

The article is dealing with consequences of existence of a periodic orbit in slowly varying dynamical systems, defined by non-continuous system of ordinary differential equations. Moreover it studies the conditions for preservation of periodic orbit in case of a change of a parameter, when in dynamical system occurs a sliding motion in points of discontinuity.

Klíčové slová / Key words

Dynamický systém; Filippovský systém; Periodické trajektórie.

1. Úvod

V tomto článku sa venujeme, ako o tom svedčí aj názov, problematike singulárnych nespojitých dynamických systémov. V tejto širokej oblasti matematiky je našim hlavným cieľom zamerať sa na podmienky zachovania periodických trajektórií v takýchto systémoch, pričom sa zameriavame na špecifický typ singularity. V anglickej literatúre sú tieto systémy označované pojmom slowly varying dynamical systems.

Problematika nespojitosti a singularity v dynamických systémoch tvorí jednu z otvorených aj keď veľmi diskutovaných otázok v tejto oblasti. Rovnako tak je zrejmé, že z praktického hľadiska existujú oblasti, pre ktoré je spojitá teória nedostačujúca a práve v nich sa ukazuje význam takejto nespojitej teórie.

2. Predpoklady²

Pripomeňme si základnú definíciu dynamického systému.

Definícia 2.1. (*Dynamický systém*) Nech $X \subset \mathbb{R}^n$ je množina stavov a R je množina reálnych čísel, potom sa vývojový operátor $\Phi(x, t): X \times R \rightarrow X$ nazýva dynamický systém, ak spĺňa nasledovné podmienky:

1. $\Phi(x, 0) = x \quad \forall x \in X$

¹ Juraj, Kalafut, Mgr., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

² Poznatky, tvrdenia a definície pochádzajú z [1], [2] a [4], pokiaľ nie je uvedené inak

$$\Phi(x, t + s) = \Phi(\Phi(x, t), s) \quad \forall x \in X \quad \forall t, s \in R.$$

Množina $\{ \Phi(x, t) \mid \forall t \in R \}$ sa nazýva trajektória prechádzajúca bodom x .

V dynamickom systéme nazývame trajektóriu spĺňajúcu nasledujúcu vlastnosť $\Phi(x, t) = \Phi(x, t + T) \forall t \in R$, pre nejaké $T > 0$ periodickou trajektóriou. Je zrejmé, že keď daná identita platí pre nejaké T , tak platí aj pre jeho ľubovoľný celočíselný násobok, preto periódu takejto trajektórie definujeme, ako najmenšie kladné T , pre ktoré je splnená vyššie uvedená identita. Niekedy hovoríme aj o T -periodickej trajektórii, aby sme zdôraznili dĺžku jej periódy.

Špeciálne sa v našom prípade obmedzíme na prípad, keď $X = R^n$. Navyše sa budeme naprieč celým článkom zaoberať dynamickými systémami danými systémom autonómnych obyčajných diferenciálnych rovníc, teda náš dynamický systém budeme uvažovať ako riešenie rovnice danej $\dot{x} = f(x)$, kde $x \in R^n$, kde \dot{x} označuje deriváciu $\partial_t \Phi(x, t)$ v bode $x \in R^n$ a v ľubovoľnom čase $t \in R$.

Ďalej budeme charakterizovať funkciu f , na ktorú položíme isté podmienky nespojitosti, na to však, aby sme ich mohli definovať, potrebujeme si ešte zaviesť ďalšiu terminológiu.

Definícia 2.2 (Počastiach spojitě zobrazenie) Nech je zobrazenie dané konečným počtom spojitých zobrazení $x \mapsto f_i(x)$, $x \in \Omega_i$, pričom $\{\Omega_i\}_{i=1}^m$ je systém neprázdnych, otvorených, navzájom disjunktných, súvislých podmnožnín v R^n a navyše ich zjednotenie je husté v R^n , potom toto zobrazenie nazývame počastiach spojitě. Definujeme ešte hranicu medzi Ω_i a Ω_j , ak $i \neq j$, ako $\Omega_i^j = \bar{\Omega}_i \cap \bar{\Omega}_j$, kde $\bar{\Omega}_i$ označuje uzáver množiny Ω_i . Množinu Ω_i^j nazývame hranicou medzi Ω_i a Ω_j .

Zrejme v týchto prípadoch je Ω_i^j $(n-1)$ -rozmerná varieta alebo prázdna množina. Pre naše potreby budeme potrebovať, aby funkcia f bola počastiach spojitou funkciou v zmysle vyššie uvedenej definície. Navyše budeme potrebovať, aby príslušná f_i má na hranici konečnú limitu a táto limita na hranici je spojitá. Potom pre jednoduchosť budeme na ňu referovať ako na príslušné $f_i(x)$ pre $x \in \Omega_i^j$. Navyše nech pre tieto body z hranice platí $f_i(x) \neq f_j(x)$. V tom prípade hovoríme o takzvaných Filippovských systémoch. V našom prípade sa pre jednoduchosť obmedzíme na prípad dvoch oblastí. Označme ich Ω_+ a Ω_- a ich hranicu Ω_0 . Ďalej uvažujme, že v každom bode hranice vieme definovať jej normálový vektor. Tento normálový vektor v bode $A \in \Omega_0$ označíme v_A^+ , keď smeruje von z oblasti Ω_+ a analogicky v_A^- . Potom zjavne, ak je trajektória riešením počiatkovej úlohy $x(0) = x_0 \in \Omega_+$ a zároveň prechádza bodom A , nutne musí byť splnená podmienka:

$$f_+(A) \cdot v_A^+ \geq 0, \tag{2.1}$$

kde $f_+(A)$ je dobre definované na základe predošlých predpokladov. Teraz sa pokúsime charakterizovať body hranice na základe funkčných hodnôt funkcie f a normálového vektora hranice.

Definícia 2.3.

- Množinu bodov hranice, ktoré spĺňajú podmienku $(v_x^+ \cdot f_+(x))(v_x^- \cdot f_-(x)) < 0$ nazývame regiónom tranzverzality a podmienku nazývame podmienkou tranzverzality.
- Množinu bodov hranice, ktoré spĺňajú v oboch prípadoch nasledujúce nerovnosti: $v_x^+ \cdot f_\pm(x) > 0$ a $v_x^- \cdot f_\pm(x) > 0$ nazývame regiónom atraktívneho klzu, prípadne klzania.
- Množinu bodov, ktoré v oboch prípadoch spĺňajú opačné nerovnosti, t.j.: $v_x^+ \cdot f_\pm(x) < 0$ a $v_x^- \cdot f_\pm(x) < 0$ nazývame regiónom odpudzujúceho klzu.

Ďalej sa v našej práci budeme zaoberať viac teóriou v regiónoch atraktívneho klzu. Región odpudzujúceho klzu nie je s rastúcim časom dosiahnuteľný pre žiadnu z trajektórií, nakoľko nie je splnená podmienka (2.1). Dôležitou je otázka ako charakterizovať tok v regióne klzu, nakoľko zjavne $f_-(x) \neq \partial_t \Phi(x, 0) \neq f_+(x)$. Ak chceme skúmať a charakterizovať správanie toku v regióne klzu a aj na základe očakávaných vlastností, je potrebné si zdefinovať nový systém diferenciálnych rovníc. Jeden zo spôsobov nám ponúka Filippovova konvexná metóda daná rovnicami:

$$f_0(x) = (1 - \alpha(x))f_+(x) + \alpha(x)f_-(x)$$

$$\alpha(x) = \frac{v_x^+ \cdot f_+(x)}{v_x^- \cdot f_-(x) + v_x^+ \cdot f_+(x)}$$

Takto definované f_0 zabezpečuje, že tok zostáva v regióne klzu. Definujme si teraz región klzu nasledovným spôsobom $O = \{x \in \Omega_0 | \alpha(x) \in (0, 1)\}$ a potom $\partial O = \bar{O} \setminus O$.

3. Zachovanie periodických trajektórií v autonómnych systémoch pri klzavom prechode cez hranicu

V tejto kapitole budeme uvažovať nasledujúci systém obyčajných diferenciálnych rovníc:

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (3.1)$$

$$\dot{y} = \epsilon g(x, y), \quad (3.2)$$

kde $g \in C(R^n \times R^m, R^m)$ a f je počastiach spojitá funkcia z $R^n \times R^m$ do R^n . A nech $h(x)$ je spojito-diferencovateľná funkcia z R^n do R a 0 je jej regulárna hodnota. Potom označme $\Omega_+ = \{x \in R^n | h(x) > 0\}$. Analogicky definujeme Ω_-, Ω_0 . Ďalej nech f je separátne spojitá na Ω_+ a Ω_- a teda všetky body nespojitosti funkcie f sa nachádzajú v množine Ω_0 . Navyše budeme predpokladať, že časť hranice Ω_0 je tvorená regiónom atraktívneho klzu O . Ďalej predpokladajme, že tento región O je ohraničená a jednosúvislá množina (aj keď tieto podmienky nie sú nevyhnutné). Vďaka ohraničenosti O a spojitosti f_+ a f_- pozdĺž hranice O môžeme konštatovať existenciu neprázdneho $\partial O \subset \Omega_0$, kde platí: $(\nabla h(x) \cdot f_+(x))(\nabla h(x) \cdot f_-(x)) = 0$.

Kvôli jednoznačnosti budeme predpokladať, že nulovosť v tomto krajnom bode nenadobúdajú obe funkcie súčasne.

Predpokladajme, že v tomto systéme pre $\epsilon = 0$ existuje periodická trajektória γ , s nasledovnými vlastnosťami:

- γ je T -periodická trajektória
- $x_0 \in \gamma, x_0 \in \partial O$ a navyše pre jednoduchosť $x_0 = x(0)$
- $\exists x_h \in \gamma \cap O$, taký, že platí $x_h = x(t_h)$, kde $t_h = \min(t > 0 | x(t) \in O)$
- $\partial_t \Phi(x_0, t_h) \cdot \nabla h(x_h) \neq 0$
- $\forall t \in (0, t_h): h(\gamma(t)) \neq 0$
- $\forall t \in [t_h, T): \gamma(t) \in O$.

Bez ujmy na všeobecnosti sa budeme zaoberať situáciou, keď $\nabla h(x_0) \cdot f_+(x_0) = 0$. Z čoho plynie, za predpokladu splnenia aj ostatných vlastností, že $\gamma \subset \bar{\Omega}_+$. Navyše predpokladajme, že $\partial_{v_{x_0}} f_+(x_0) > 0$, kde $\partial_{v_{x_0}}$ označuje deriváciu v smere vektora v_{x_0} . Tento vektor leží v dotykovej rovine k Ω_0 , pričom vektor v_{x_0} je normálový k ∂O v bode x_0 smerujúci von z oblasti O , a kvôli jednoznačnosti jednotkový, aj keď posledný predpoklad nevyhnutne nutný nie je. Potom môžeme zaviesť nasledujúce tvrdenie:

Veta 3.1. Nech sú splnené predošlé predpoklady na trajektóriu γ , potom existuje okolie bodu $(x_0; y_0)$, označme ho $B((x_0; y_0); \delta)$, interval $(-\epsilon_0; \epsilon_0)$ a zobrazenie $H_\epsilon: B((x_0; y_0); \delta) \cap \partial O \times (-\epsilon_0; \epsilon_0) \rightarrow \partial O$ také, že pre všetky body $(\xi; \eta)$ z daného okolia bodu $(x_0; y_0)$ a priradí bod z

∂O , ktorý dosiahne riešenie systému (3.1) a (3.2) pre príslušné ε s počiatočnou podmienkou $x(0) = \xi, y(0) = \eta$ v čase blízkom hodnote T .

Dôkaz: Označme $\mathcal{A}(\xi, \eta, \varepsilon)(t) = h(x_+(\xi, \eta, \varepsilon))(t)$, kde $x_+(\xi, \eta, \varepsilon)$ označuje x -vé súradnice trajektórie, ktorá je riešením systému daného rovnicami $\dot{x} = f_+(x, y)$ a rovnice (3.2) pre príslušné ε a s počiatočnou podmienkou, že v čase 0 sa nachádza v bode (ξ, η) . Z predpokladov je zrejmé, že existuje t_h , pričom platí, že $h(x_+(x_0, y_0, 0)(t_h)) = h(x_h) = 0$ a teda aj $\mathcal{A}(x_0, y_0, 0)(t_h) = 0$. Ďalej z predpokladu, že nastáva kĺzanie pri prechode cez Ω_0 dostávame:

$$\partial_t \mathcal{A}(x_0, y_0, 0)(t_h) = \nabla h(x_h) \cdot f_+(x_h, y_0) > 0,$$

a tak sú splnené predpoklady vety o implicitnej funkcii, z ktorej zisťujeme existenciu $\delta_h, \varepsilon_h, \alpha_h > 0$ a zobrazenia $\tau_h: (B((x_0, y_0), \delta_h) \cap \partial O) \times (-\varepsilon_h, \varepsilon_h) \rightarrow (t_h - \alpha_h, t_h + \alpha_h)$, ktoré priradí trajektórii vychádzajúcej z okolia bodu (x_0, y_0) a z hranice ∂O čas, v ktorý sa po prvý krát znova objaví v oblasti Ω_0 . Nech teraz B^* označuje hladkú reálnu funkciu bodov z Ω_0 , pričom platí že $B^*(x, y) = 0$ práve vtedy, keď $(x, y) \in \partial O$ a $\nabla B^*(x_0, y_0) = v_{x_0}$ a označme $\mathcal{B}(\xi, \eta, \varepsilon)(t) = B^*(x_0(\xi, \eta, \varepsilon), y(\xi, \eta, \varepsilon))$, kde $x_0(\xi, \eta, \varepsilon)$ označuje riešenie začiatkovej úlohy danej bodom (ξ, η) v oblasti O potom:

$$\partial_t \mathcal{B}(x_h, y_0, 0)(T - t_h) = \partial_{v_{x_0}} f_+(x_0) > 0,$$

vd'aka čomu zisťujeme platnosť predpokladov vety o implicitnej funkcii a existenciu $\delta_*, \varepsilon_*, \alpha_* > 0$ a zobrazenia $\tau_*: (B((x_h, y_0), \delta_*) \cap O) \times (-\varepsilon_*, \varepsilon_*) \rightarrow (T - t_h - \alpha_*, T - t_h + \alpha_*)$. Zložením týchto dvoch zobrazení pre vhodné $\varepsilon_0, \delta, \alpha$ už len definujeme finálne zobrazenie $H_\varepsilon(\xi, \eta)$ z tvrdenia ako hodnotu zobrazenia $x_0(x_+(\xi, \eta, \varepsilon)(\tau_h(\xi, \eta, \varepsilon)), y(\xi, \eta, \varepsilon)(\tau_h(\xi, \eta, \varepsilon)), \varepsilon)$ v čase: $\tau_*(x_+(\xi, \eta, \varepsilon)(\tau_h(\xi, \eta, \varepsilon)), y(\xi, \eta, \varepsilon)(\tau_h(\xi, \eta, \varepsilon)), \varepsilon)$.

□

Zjavne sa v tomto prípade jedná o istú analógiu Poincarého zobrazenia. Z tejto vety nám však vyplýva aj zaujímavý dôsledok:

Dôsledok 3.2 Nech $n = 2$ a nech sú splnené predpoklady predošlej vety, potom v našom dynamickom systéme danom rovnicami (3.1), (3.2) pre $\varepsilon = 0$ existuje okolie bodu y_0 , také že pre všetky y z tohoto okolia y_0 existuje periodická trajektória prechádzajúca cez oblasť kĺzania O .

Dôkaz: Nakoľko $n = 2$, tak $\dim(\partial O \cap \{y\}) = 0$, pričom pod y uvažujeme pevnú hodnotu z okolia y_0 a množina $\partial O \cap \{y\}$ sa tak redukuje na dva body $\{(x_l^y, y), (x_p^y, y)\}$, vd'aka predpokladu ohraničenosti oblasti O . Nech navyše $x_l^y < x_p^y$. Bez ujmy na všeobecnosti predpokladajme, že bod, ktorým prechádza γ je $(x_l^{y_0}, y_0)$. A tak je zobrazenie H_0 definované na okolí bodu $(x_l^{y_0}, y_0)$ a zrejme do dostatočne malého okolia spadajú práve body (x_l^y, y) . Teda H_0 priradí bodu (x_l^y, y) nejaký bod z okolia bodu $(x_l^{y_0}, y_0)$ a z množiny $\partial O \cap \{y\}$. Zo spojitosti zobrazenia H_0 , ktoré je zjavné z vety o implicitnej funkcii, vyplýva, že H_0 k tomuto priradí bod (x_l^y, y) a zobrazenie H_0 sa tak redukuje na identické zobrazenie na celom tomto okolí.

□

Nás však zaujímajú podmienky na zachovanie periodických trajektórií v prípade, keď ε variujeme. V nasledujúcej vete budeme používať notáciu $f|_x$, kde pod týmto označením mienime x -ovú zložku funkčných hodnôt funkcie f .

Veta 3.3. Nech v dynamickom systéme existuje pre $y = y_0$ pri $\varepsilon = 0$ izolovaná periodická trajektória γ prechádzajúca bodom $(x_0, y_0) \in \partial O$ a zobrazenie $H_\varepsilon: \partial O \rightarrow \partial O$, definované ako v predošlej vete a spojitodiferencovateľné v ε , pričom platí:

$$\det(\nabla(x_0 - H_0|_x(x_0, y_0), -\partial_\epsilon H_0|_y(x_0, y_0))) \neq 0.$$

Potom existuje $\epsilon_0 > 0$, tak, že pre všetky $\epsilon \in (-\epsilon_0, \epsilon_0)$ existuje periodická trajektória v systéme (3.1), (3.2).

Dôkaz: Uvažujme nasledovné zobrazenie $\mathcal{H}_\epsilon = I - H_\epsilon: \partial O \rightarrow R^{n+m-2}$. Zrejme $\mathcal{H}_0(x_0, y_0) = 0$. Nech (x, y) je nejaký bod z okolia (x_0, y_0) a ϵ je dostatočne malé, potom:

$$\mathcal{H}_\epsilon(x, y) = (x - H_{\epsilon|_x}(x, y); y - H_{\epsilon|_y}(x, y)).$$

Rozvinutím druhej rovnice podľa ϵ v okolí bodu $\epsilon = 0$ dostávame:

$$\mathcal{H}_\epsilon(x, y)|_y = y - H_{\epsilon|_y}(x, y) = y - y - \epsilon \left(\partial_\epsilon H_0|_y(x, y) \right) + o(\epsilon^2) = -\epsilon \partial_\epsilon H_0|_y(x, y) + o(\epsilon^2).$$

Zjavne ak $\mathcal{H}_\epsilon(x, y) = 0$, potom príslušným bodom prechádza periodická trajektória. Využitím predošlého výsledku zistujeme, že v našom prípade sa tento problém pre y -zložku redukuje na: $\partial_\epsilon H_0(x, y) + o(\epsilon) = 0$. Zdefinujme teraz nasledujúce zobrazenie:

$$\mathcal{H}_\epsilon^*(x, y) = (x - H_{\epsilon|_x}(x, y); \partial_\epsilon H_0(x, y) + o(\epsilon)).$$

Pripomíname, že pre $\epsilon \ll 1$ je nulovosť \mathcal{H}_ϵ ekvivalentná s nulovosťou \mathcal{H}_ϵ^* . Nech navyše:

$$\det(\nabla \mathcal{H}_\epsilon^*(x_0, y_0)) = \det\left(\nabla(x_0 - H_0|_x(x_0, y_0), \partial_\epsilon H_0|_y(x_0, y_0))\right) \neq 0,$$

potom sú splnené predpoklady vety o implicitnej funkcii a teda existuje $\epsilon_0 > 0$ dostatočne malé a zobrazenie $M: (-\epsilon_0, \epsilon_0) \rightarrow \partial O$, také že: $\mathcal{H}_\epsilon^*(M(\epsilon)) = 0$ pre všetky $\epsilon \in (-\epsilon_0, \epsilon_0)$. Z toho vyplýva že pre všetky ϵ z daného intervalu existuje periodická trajektória v okolí bodu (x_0, y_0) . \square

4. Záver

V tomto článku sme sa zaoberali podmienkami na zachovanie periodických trajektórií v dynamickom systéme riadeného systémom obyčajných rovníc s nespojitou pravou stranou, kde pre konštantný y existovala periodická trajektória, ktorá prechádzala cez body nespojitosti takzvaným kĺzavým prechodom. Skúmali sme aj podmienky zachovania tejto trajektórie pokiaľ y budeme postupne variovať pomocou obyčajných diferenciálnych rovníc, korigovaných ϵ .

Na výsledky získané v tomto článku bude vhodné nadviazať štúdiom rovníc, kde $\dot{y} = \frac{y}{\epsilon}$.

Literatúra

- [1] M. di Bernardo, C. J. Budd, A. R. Champneys, P. Kowalczyk. Piecewise-smooth Dynamical Systems: Theory and Applications. London: Springer-Verlag, 2008. 978-1-84628-039-9
- [2] M. Medved'. Dynamické systémy. Bratislava : Univerzita Komenského, 2000. 80-223-1346-7
- [3] M. Fečkan, M. Pospíšil, On the bifurcation of periodic orbits in discontinuous systems: Communications in Mathematical Analysis, Vol. 8, No. 1, str. 87-108, 2010
- [4] A. F. Filippov. Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1998
- [5] C. Chicone. Ordinary Differential Equations with Applications. Springer-Verlag, 2006. 0-387-30769-9

Katarína Lacková¹, Peter Frolkovič²

Študijný program: Aplikovaná matematika, ročník: 2.

Von Neumannova analýza stability upwind numerickej schémy aplikovanej na rovnicu úrovňovej množiny s krivostným členom

Von Neumann stability analysis of upwind numerical scheme applied to level set equation with small curvature term

Abstract

We are proposing a novel semi-implicit numerical scheme that allows one to efficiently solve the advection equation with a small curvature term. In the following, we will find a strict stability condition for the scheme using von Neumann stability analysis and support the result on various numerical experiments.

Kľúčové slová / Key Words

Stability analysis; von Neumann; level set equation; curvature

1. Mathematical model

1.1 Non-stationary formulation

We consider the following non-stationary formulation of level set equation [6]:

$$\partial_t \phi(\mathbf{x}, t) + a(\mathbf{x})(1 - \epsilon\kappa)|\nabla\phi(\mathbf{x}, t)| = 0, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2, \quad t \in [0, T], \quad (1)$$

with the initial condition, $\phi(\mathbf{x}, 0) = \phi^0(\mathbf{x})$, where ϕ^0 is a signed distance function. From now on, we will omit function arguments for simplicity. Furthermore, we assume that the speed in normal direction $a > 0$ and the coefficient $\epsilon = \epsilon(\kappa)$ (that depends on the curvature κ) is small enough for the advection to be the dominant driving force of the model.

The function ϕ can be considered as a “level set function” of which its zero-level set implicitly represents a dynamic interface. The mean curvature κ of the interface is defined as the divergence of the normal $N = \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|}$ resulting in the following relation [6]:

$$\kappa = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \right), \quad (2)$$

which we can rewrite as $\kappa = (\partial_x \phi^2 \partial_{yy} \phi - 2 \partial_x \phi \partial_y \phi \partial_{xy} \phi + \partial_y \phi^2 \partial_{xx} \phi) / |\nabla\phi|^3$ with the lower index representing the partial derivatives.

2. Numerical diskretization

Throughout this article, we will work on a simple Cartesian grid in a square computational domain $\Omega = [x_L, x_R] \times [y_L, y_R]$. We denote by N the number of grid points on each axis, therefore, the natural spatial discretization step in our mesh is $h = (x_R - x_L)/(N - 1) = (y_R - y_L)/(N - 1)$.

¹ Katarína Lacková, Ing., Slovenská Technická Univerzita, SvF, Bratislava

² Peter Frolkovič, doc. RNDr., PhD., Slovenská Technická Univerzita, SvF, Bratislava

The resulting discretized computational domain will then consist of N^2 points denoted (x_k, y_l) for $k, l \in 0, 1, \dots, N - 1$. Consequently, the numerical solution and its derivatives will carry the indices i and j in the following manner $\phi_{k,l} \approx \phi(x_k, y_l)$.

2.1 Linearization by semi-implicit time discretization

Equation (1) is non-linear. In this section we will define a simple linearization that will facilitate the scheme analysis and that might be further used to numerically solve equation (1) as a system of linear equations, instead of nonlinear ones.

The main idea of the linearization is to denote

$$u := \frac{\partial_x \phi}{|\nabla \phi|} \quad v := \frac{\partial_y \phi}{|\nabla \phi|} \quad (3)$$

where u and v consist of partial derivatives on a regular Cartesian grid. Consequently, $u^2 + v^2 = 1$ and the advective term can be rewritten as follows:

$$|\nabla \phi| = u \partial_x \phi + v \partial_y \phi. \quad (4)$$

Therefore, the advective term can be formally viewed as a directional derivative in the direction given by the unit vector (u, v) . This will be especially useful for the stability analysis of the final semi-implicit scheme. Additionally, the curvature term will have the following form:

$$\kappa |\nabla \phi| = u^2 \partial_{yy} \phi + v^2 \partial_{xx} \phi - 2uv \partial_{xy} \phi \quad (5)$$

Combining (4) and (5) we obtain the following form of equation (1):

$$\partial_t \phi + a(u \partial_x \phi + v \partial_y \phi) - a\epsilon(u^2 \partial_{yy} \phi + v^2 \partial_{xx} \phi - 2uv \partial_{xy} \phi) = 0, \quad (6)$$

which can be considered a linear equation for fixed values u and v .

In general, the discretized equation (6) has the following form:

$$\begin{aligned} \phi_{k,l}^n - \phi_{k,l}^{n-1} + \tau a_{k,l} (\tilde{u}_{k,l} \partial_{x'} \phi_{k,l}^n + \tilde{v}_{k,l} \partial_{y'} \phi_{k,l}^n) \\ - \tau \epsilon a_{k,l} (u_{k,l}^2 \partial_{yy} \phi_{k,l}^n + v_{k,l}^2 \partial_{xx} \phi_{k,l}^n - 2u_{k,l} v_{k,l} \partial_{xy} \phi_{k,l}^n) = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

where $\tilde{u}_{k,l} = \sqrt{2}(u_{k,l} + v_{k,l})/2$ and $\tilde{v}_{k,l} = \sqrt{2}(-u_{k,l} + v_{k,l})/2$, τ is the time step and $\partial_{x'} \phi_{k,l}^n, \partial_{y'} \phi_{k,l}^n$ are advection terms discretized on a locally rotated grid by 45° counterclockwise [1], see Figure 1. The values $u_{k,l}, v_{k,l}$ are obtained from the solution in time $\phi_{k,l}^{n-1}$ using, e.g., Rouy-Tourin scheme [6].

3. Von Neumann Stability Analysis

In the following section, we will derive the stability condition via von Neumann stability analysis of the proposed scheme implementing semi-implicit discretization in time. For this purpose, we denote $c := \frac{\tau a}{h}$, $e := \frac{\epsilon}{h}$. We will omit spatial indexing in $a_{k,l}, u_{k,l}, v_{k,l}, \tilde{u}_{k,l}$ and $\tilde{v}_{k,l}$.

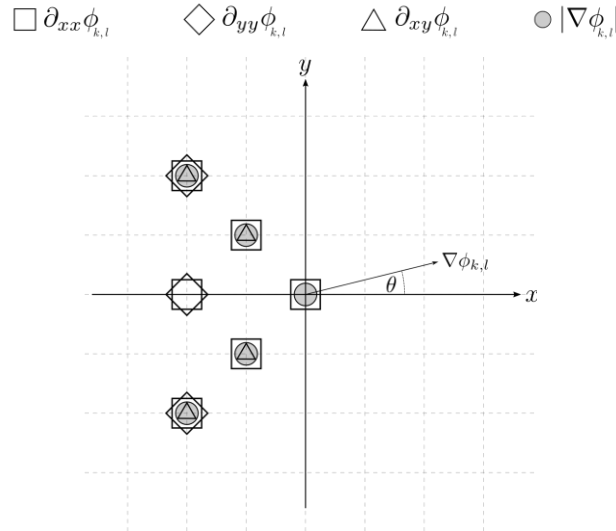


Figure 1: Local stencil for the approximation of the advection term and the second order derivatives for different θ values, where θ [2] is the angle between gradient $\nabla\phi_{k,l}$ and the axis x and $-22.5^\circ < \theta < 22.5^\circ$.

For $\theta \in (-22.5^\circ, 22.5^\circ)$ the scheme (7) takes the following form:

$$\begin{aligned} \phi_{k,l}^n = \phi_{k,l}^{n-1} &+ \frac{c}{2\sqrt{2}} \left(\tilde{u}(3\phi_{k,l}^n - 4\phi_{k-1,l-1}^n + \phi_{k-2,l-2}^n) + \tilde{v}(-\phi_{k-2,l+2}^n + 4\phi_{k-1,l+1}^n - 3\phi_{k,l}^n) \right) \\ &- ce \left(\frac{1}{4}(u^2 - 2uv + v^2)\phi_{k-2,l-2}^n + \frac{1}{2}(-u^2 + v^2)\phi_{k-2,l}^n + (uv - v^2)\phi_{k-1,l-1}^n \right) \\ &+ \frac{1}{4}(u^2 + 2uv + v^2)\phi_{k-2,l+2}^n - (uv + v^2)\phi_{k-1,l+1}^n + v^2\phi_{k,l}^n \end{aligned} \quad (8)$$

The advection and curvature terms in (8) are approximated by finite differences of the second and first order of convergence, respectively [8].

We define the numerical solution $\phi_{k,l}^n$ by a component of the Fourier series [4] as $\phi_{k,l}^n = \hat{\phi}^n e^{ixk+iy l}$, where $i^2 = -1$ and $x, y \in [0, 2\pi]$. Substituting the previous definition of our numerical solution into the scheme (8) we obtain the amplification factor G , given as $G = \frac{\hat{\phi}^{n+1}}{\hat{\phi}^n}$.

$$\begin{aligned} G = & 1/\left(\frac{1}{4}c e^{-2i(x+y)}(\sqrt{2}\tilde{u} - e(u-v)^2) + \frac{1}{2}c e^{-2ix}(u-v)(u+v) \right. \\ & \left. - c e^{-i(x+y)}(\sqrt{2}\tilde{u} + e(u-v)v) + c e^{-i(x-y)}(e v(u+v) + \sqrt{2}\tilde{v}) \right) \\ & - \frac{1}{4}c e^{-2i(x-y)}(e(u+v)^2 + \sqrt{2}\tilde{v}) + \left(1 + \frac{1}{4}c(3\sqrt{2}\tilde{u} - 4e v^2 - 3\sqrt{2}\tilde{v}) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

For the scheme to be stable, the absolute value of (9) must hold $|G| \leq 1$. Since the stencil is symmetric, we can assume that the stability conditions will be the same for $\theta \in (-22.5^\circ, 0^\circ]$ and $\theta \in [0^\circ, 22.5^\circ)$. Therefore, in this case, we can substitute $v = \sqrt{1-u^2}$. Expanding the complex expression (9) and deriving the absolute value $|G|$, we obtain a fraction. Any fraction in absolute value is less than or equal to 1 when the difference between its denominator and its numerator is greater than or equal to 0. Consequently, we obtain the following inequality:

where

$$\begin{aligned}
 A = & 2 + 3cu + 2ce(-1 + u^2) + ce(-1 + 2u^2) \cos(2x) + c(-e + u) \cos^2 x \cos(2y) \\
 & - 4c \cos x \cos y \left(u + e(-1 + u^2) + 2e u \sqrt{1 - u^2} \sin x \sin y \right) \\
 & + c \left[(e - u) \cos(2y) \sin^2 x \right. \\
 & \left. + \sqrt{1 - u^2} (4(1 + eu) \sin x \sin y - \sin(2x) \sin(2y)) \right]
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 B = & (1 + 2eu) \sqrt{1 - u^2} \cos^2 x \cos y \sin y \\
 & - \cos x \left[(e + (e - u) \cos(2y)) \sin x + eu^2 \sin(2x) + 2(1 + eu) \sqrt{1 - u^2} \sin y \right] \\
 & - \cos y \sin x \left[2(u + e(-1 + u^2)) + (1 + 2eu) \sqrt{1 - u^2} \sin x \sin y \right].
 \end{aligned} \tag{12}$$

To make the inequality true, we need to compensate for the negative value of 4 in (10). Note that when $(x, y) \in \left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \left(\frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right), \left(\frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right)$, the term B is equal to 0 and is consequently not helpful. Therefore, we consider only the value of A without the help of B , so we require $A \geq 2$. The term A for $x = \frac{\pi}{2}$ and $y = \frac{\pi}{2}$ takes the form:

$$\begin{aligned}
 \hat{A} := & A \left(x = \frac{\pi}{2}, y = \frac{\pi}{2} \right) \\
 = & 2 - 3ce + 4cu + 2ce u^2 + 4c \sqrt{1 - u^2} + 4ce u \sqrt{1 - u^2} \\
 & - ce(-1 + 2u^2),
 \end{aligned} \tag{13}$$

and $(\hat{A})^2 \geq 4$ must be met. Hence,

$$\begin{aligned}
 -3ce + 4cu + 2ce u^2 + 4c \sqrt{1 - u^2} + 4ce u \sqrt{1 - u^2} - ce(-1 + 2u^2) = \\
 2 \left(u + \sqrt{1 - u^2} \right) + e \left(-1 + 2u \sqrt{1 - u^2} \right) \geq 0.
 \end{aligned} \tag{14}$$

From (14) we have that for $|G| \leq 1$, the value e must comply with $e \leq 2(u + \sqrt{1 - u^2}) / (1 - 2u\sqrt{1 - u^2})$. The same inequality holds for $(x, y) = \left(\frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right)$. Following analogous logic, we can derive the inequality for $(x, y) \in \left(\frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right)$. This leads to $e \leq 2(u - \sqrt{1 - u^2}) / (1 + 2u\sqrt{1 - u^2})$, which is in this case (for positive u) more restrictive than the inequality derived from (14).

Next, we study another extreme value of e . Substituting $e = 0$ into (11) we have

$$\begin{aligned}
 \tilde{A} := & A(e = 0) \\
 = & 2 + 3cu - cu(4\cos x \cos y - \cos 2x \cos 2y) \\
 & + c \sqrt{1 - u^2} (4\sin x \sin y - \sin 2x \sin 2y).
 \end{aligned}$$

Following the same logic as in (13) and (14), we proved, using the function *FindInstance* in software *Mathematica* [3], that the scheme is unconditionally stable for $e = 0$ in $[0, 2\pi] \times [0, 2\pi] \times (\cos(\pi/8), 1]$ as no point was found that would satisfy the negative inequality in the given region.

Since the expression (11) is linear with respect to e , if we can prove that (10) is valid for $e = 2(u - \sqrt{1 - u^2}) / (1 + 2u\sqrt{1 - u^2})$, then $e \leq 2(u - \sqrt{1 - u^2}) / (1 + 2u\sqrt{1 - u^2})$ is a sufficient

stability condition for this scheme. Note that the substitution for e is positive and monotonically increasing for $u \in (\cos(\pi/8), 1]$.

Firstly, we test the stability for $e = 0.634$, which is the lower boundary of the estimated stability condition for e that should hold for all $u \in (\cos(\pi/8), 1]$. Using the function *FindInstance* we can prove that for such e , the scheme is, in fact, unconditionally stable. We can therefore consider $e \leq 0.634$ as the ultimate stability condition through which the scheme is stable regardless of u .

Secondly, substituting the equality for e into (11), we need to verify if the following expression is true for all points (and not only for particular ones) $(x, y, u) \in [0, 2\pi] \times [0, 2\pi] \times (\cos \frac{\pi}{8}, 1]$.

$$\begin{aligned}
 & -\left(\sqrt{1-u^2} + 2u\left(u^2 + 2u\sqrt{1-u^2} - 1\right)\right) \sin(2x)\sin(2y) \\
 & + 4(2u^2 + 1)\sqrt{1-u^2}\sin(x)\sin(y) + 4\left(-2u^3 - 2\sqrt{1-u^2} + u\right) \cos(x)\cos(y) \\
 & + \cos(2x) \left[\left(2\sqrt{1-u^2} + u\left(2u\sqrt{1-u^2} - 1\right)\right) \cos(2y) - 2(2u^2 - 1)\left(\sqrt{1-u^2} - u\right) \right] \\
 & + 4\sqrt{1-u^2} + u\left(2u\left(\sqrt{1-u^2} + 2u\right) - 1\right) \geq 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

Such an expression is far from trivial for a simple analysis. Since not even the software was able to evaluate the validity of inequality (15), we were forced to use a numerical approach. Using the *Mathematica*'s function *NMinimize* we were able to find 7 local minima of value 0 independent of the variable u . Specifically, the points

$$(x, y) \in \{(0,0), (\pi, \pi), (2\pi, 2\pi), (0,2\pi), (2\pi, 0), (3\pi/2, \pi/2), (\pi/2, 3\pi/2)\}.$$

Furthermore, we were able to verify using the *Matlab*'s [5] Global Optimization Toolbox and the functionality *GlobalSearch* that the value 0 is in fact also the global minimum of the left side in (15). In Figure 2 we can observe the change in the shape of the function. The variable u in the given region does not affect the values or positions of all local minima.

Taking into account the numerical analysis described above, we can assume that

$$e \leq 2\left(u - \sqrt{1-u^2}\right) / \left(1 + 2u\sqrt{1-u^2}\right)$$

is a sufficient condition for the scheme (8) to be stable for an arbitrarily large time step.

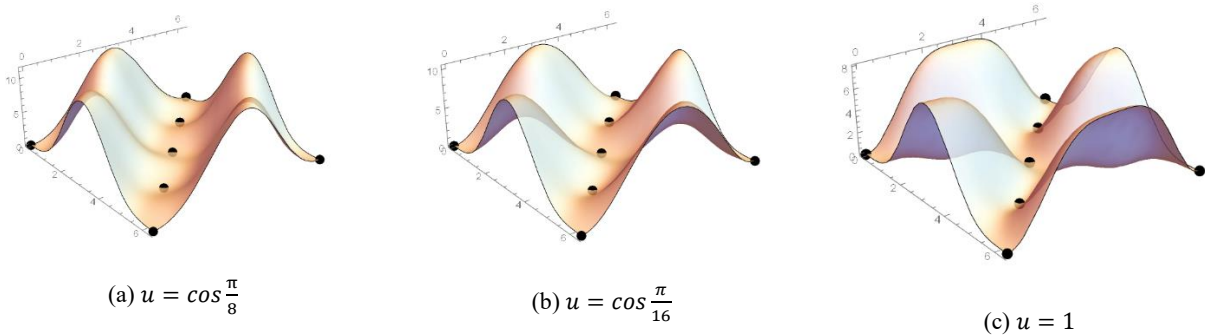


Figure 2: 3D plots of the left side in (15) for different values of u . Local minima are represented by a black dot.

3.1 Numerical experiments

In this section, we will test the stability conditions derived in the previous text. We will test the scheme (8) on an example with $a = 1$ and the initial condition as follows:

$$\phi_0(x, y) = \sqrt{(x + 11)^2 + y^2} - 10 \tag{16}$$

We will solve a given system of linear equations using the fast sweeping method [7]. Furthermore, we will set the computation domain to $\Omega = [-6,6] \times [-6,6]$. In this setup, we are practically sure that the angle θ will remain in the interval $\theta \in (-22.5^\circ, 22.5^\circ)$.

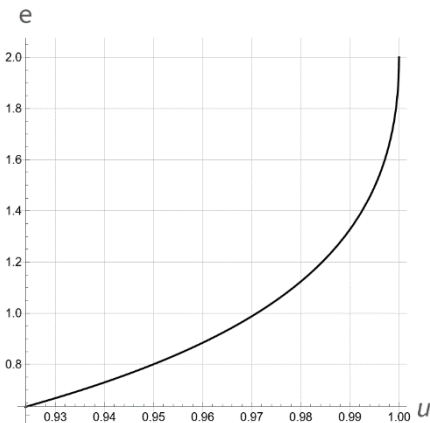


Figure 3: Graph of the stability dependence of the value u .

When we take a closer look at the stability condition $e \leq 2(u - \sqrt{1 - u^2}) / (1 + 2u\sqrt{1 - u^2})$, we can see that it depends on the direction given by the vector (u, v) in (3). Therefore, we expect that the stability condition will be more strict at the edges of the interval $\theta \in (-22.5^\circ, 22.5^\circ)$, see Figure 3. Furthermore, the fact that the stability condition does not depend on the value c suggests that when the coefficient value ϵ is compatible with the stability condition, there is no additional condition on c , see Figure 4b. This behavior is expected since for $\epsilon = 0$ we have a standard advection equation, for which the implicit scheme is unconditionally stable. However, when the stability condition is not maintained, the value c could affect the stability of the scheme, in the sense that for a smaller c , the instabilities could be “postponed” or eliminated. We will test the suggested conclusions on a series of examples.

The first experiment is shown in Figure 4. First, we set $e = 0.634$, which is the lowest possible value according to the stability condition and solve the model for different time step values τ . We can see that the stability is maintained, the numerical method converges without any difficulty, and the result looks as expected. However, once we raise the value of e to 0.68, instabilities begin to occur, and these cause a failure in the convergence of the numerical method.

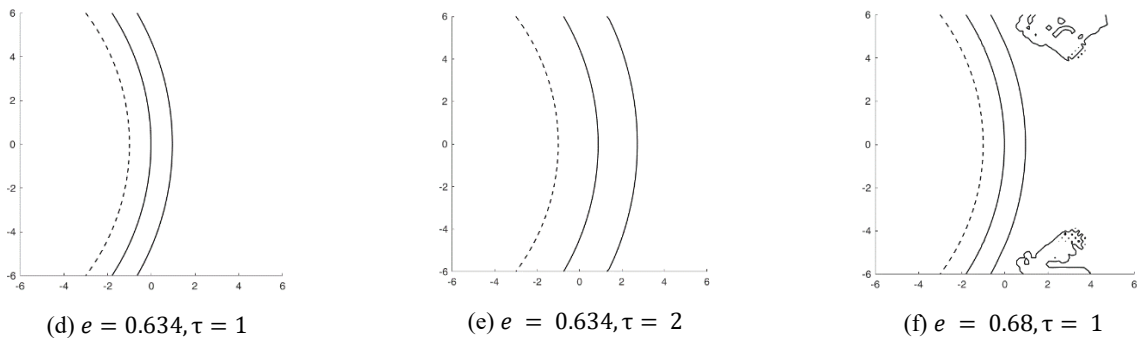


Figure 4: Plots of the zero isocontour for time steps $n \in 0,1,2$ when $h = 0.15$.

In the second experiment, we maintain a constant value $\tau = 1$ and try to solve only one time step. This approach will help us to demonstrate the way instabilities propagate depending on the value u , see Figure 5. We can see that with higher values of e , instabilities propagate from the edges of the theta interval $\theta \in (-22.5^\circ, 22.5^\circ)$ closer to the center. When $\theta = 0^\circ$ and so the value $u = 1$ (the

orientation of the numerical gradient (u, v) is closely aligned with the axis x , the numerical method is locally capable of solving the system, see Figure 5c.

The suggested experiments support the validity of the stability condition. These results will help us in the further development of the scheme and its stability.

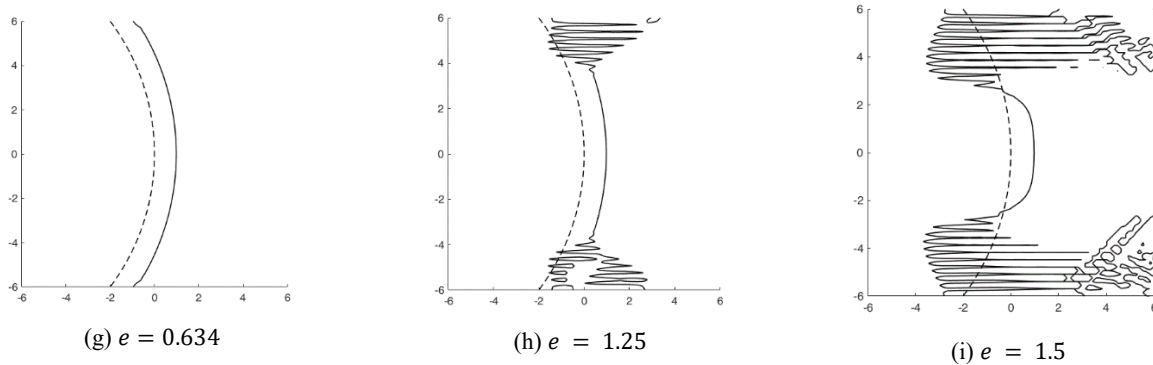


Figure 5: Pots of the zero isocontour for time steps $n \in [0, 1]$ when $\tau = 1$ and $h = 0.15$.

References:

- [1] S. AHMED, S. BAK, J. MCLAUGHLIN, and D. RENZI. A Third Order Accurate Fast Marching Method for the Eikonal Equation in Two Dimensions. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 33(5):2402–2420, January 2011. Publisher: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [2] J.-D. BENAMOU. A Compact Upwind Second Order Scheme for the Eikonal Equation. *Journal of Computational Mathematics*, 28(4):489–516, June 2010.
- [3] Wolfram Research, Inc. *Mathematica, Version 12.3 student edition*. Champaign, IL, 2022.
- [4] S. KONANGI, N. K. PALAKURTHI, and U. GHIA. von Neumann Stability Analysis of a Segregated Pressure-Based Solution Scheme for One-Dimensional and Two-Dimensional Flow Equations. *Journal of Fluids Engineering*, 138(10), July 2016.
- [5] MATLAB. *version R2022b*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2022.
- [6] S. OSHER and R. P. FEDKIW. *Level set methods and dynamic implicit surfaces*. Number v. 153 in Applied mathematical sciences. Springer, New York, 2003.
- [7] H. ZHAO. A fast sweeping method for Eikonal equations. *Mathematics of Computation*, 74(250):603–627, 2005.
- [8] X. FENG, T. LEWIS. A Narrow-Stencil Finite Difference Method for Approximating Viscosity Solutions of Hamilton--Jacobi--Bellman Equations. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 59, no. 2 (January 1, 2021): 886–924.

Karol Mikula¹, Aneta A. Ožvat¹, Mária Šibíková²

Study programme: Applied Mathematics, 3rd year of study

HOW TO DISTINGUISH NATURAL AND PLANTED RIPARIAN FORESTS BY THE GRAPH-LAPLACIAN

Abstract

In this paper we construct the mean graph-Laplacian and show its application in distinguishing the natural riparian forests of the Natura 2000 system from the planted monodominant forests with a similar species composition. The basic idea is that the natural forests are represented by much higher variability of the image intensity in satellite data than the planted ones. Using the relevancy maps calculated by the Natural Numerical Network we find the potential Natura 2000 riparian forest areas and the mean graph-Laplacian eliminates the planted forests from the relevancy maps by assigning the low or zero values to the areas with low image intensity variability.

Keywords

Laplace operator on the graphs; graph-Laplacian; numerical methods; Natura 2000; natural riparian forests; planted forests; satellite images.

1. Introduction

This paper discusses a newly developed method for distinguishing between the forest areas with indistinctive biodiversity and those of high biodiversity. The approach combines the information from the relevancy maps calculated using the Natural Numerical Network [1] and the properties of the Laplace operator constructed on the graphs. The paper shows the mathematical construction of the mean graph-Laplacian and its application in the developed method. The application of the newly developed method is in vegetation science and biodiversity research of natural riparian forests and their accurate automated identification. The main objective of this research is to find the appearance of natural riparian forests of Natura 2000 habitat and classify them correctly. To achieve the best possible classification of the natural forests of the 91E0 Natura 2000 habitat, it is necessary to differentiate between natural forests and monocultures. Since monocultures are commercially grown forests, they are not part of Natura 2000 protected habitats, and it is necessary to exclude them from the monitored, protected forests. The required data for processing are obtained from spectral bands of the Sentinel-2 European Space Agency (ESA) satellite [2]. The relevancy maps are constructed by the Natural Numerical Network implemented in the NaturaSat software [3], where the areas with the appearance of protected Natura 2000 habitats are marked. But in the relevancy maps, together with the natural forests, also the areas of planted forest with the same species composition can be labelled. To find only the natural forests, we developed the method based on the mean graph-Laplacian in combination with the relevancy maps.

¹ prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc., Ing. Aneta A. Ožvat, Department of Mathematics, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia, e-mail: mikula@math.sk, ozvat@math.sk.

² Mgr. Mária Šibíková, PhD., Plant Science and Biodiversity Center, Slovak Academy of Sciences, Institute of Botany, Dúbravská cesta 9, 845 23 Bratislava, Slovakia, e-mail: maria.sibikova@savba.sk.

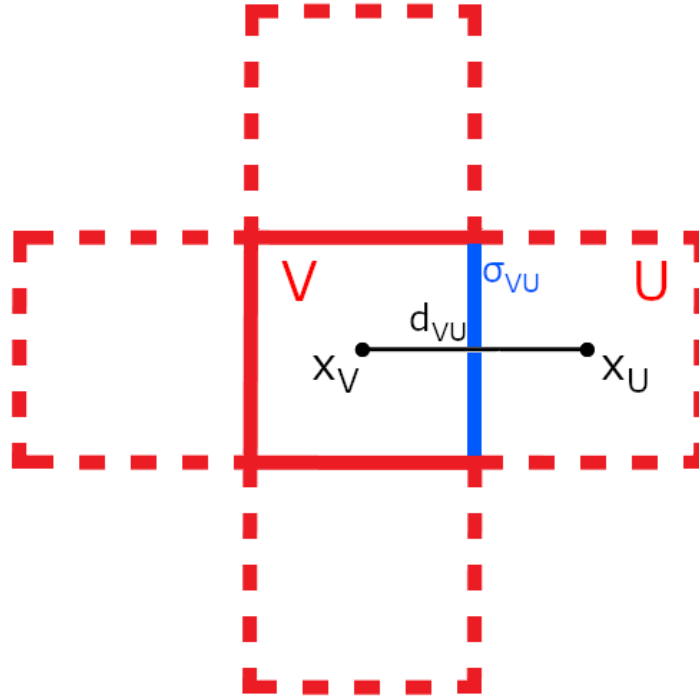


Figure 1: Motivation for definition of the Laplace operator on the graph. The finite volumes V and U with their centers x_V and x_U . The face between two finite volumes is denoted by σ_{VU} and d_{VU} represents the length of the line connecting x_V and x_U .

2. The mathematical basis

Let us have a function $f(x)$, $x \in \Omega$, representing, e.g., an image intensity in some domain $\Omega \subset \mathbb{R}^2$. Then the mean value of the "physical" Laplacian in the finite volume V , see Fig. 1, is expressed by using the Green's theorem and approximation of the normal derivative as follows

$$\frac{1}{m(V)} \int_V \Delta f \, dx = \frac{1}{m(V)} \int_{\partial V} \nabla f \cdot \vec{n} \, dS = \frac{1}{m(V)} \sum_{U \in \mathcal{N}(V)} m(\sigma_{VU}) \frac{f(x_U) - f(x_V)}{d_{VU}}, \quad (1)$$

where \vec{n} is the unit outer normal to the finite volume V , $m(V)$ is the 2D measure of the finite volume V , $\mathcal{N}(V)$ is the set of neighbouring finite volumes U for which the 1D measure of the common face $m(\sigma_{VU})$ is nonzero, and d_{VU} is the length of the line connecting the centers x_V and x_U of finite volumes V and U .

For the construction of the graph-Laplacian let us define a graph $G = (V(G), E(G))$ with N_V vertices $V(G)$ and edges $E(G)$ interconnecting the vertices [4].

Inspired by the formula (1), we can define the so-called graph-Laplacian [5]. Instead of finite volume V we consider vertex v of the graph G and its neighbouring vertices u connected with v by an edge e_{vu} . As it is usual in the graph theory, the measure of the vertex $m(v)$ as well as the measure of the face $m(\sigma_{vu})$ is set to 1, and we get the definition of the graph-Laplacian in the vertex v in the form

$$\Delta f(v) = \sum_{\substack{u \in V(G) \\ e_{vu} \in E(G)}} \frac{f(u) - f(v)}{d_{vu}}, \quad (2)$$

where d_{vu} is the length of the edge between vertices v and u . As we see, the graph-Laplacian represents a generalization of notion of the Laplace operator from physical applications to the more general topological structures such as graphs.

As we can observe, the formula (2) can be rewritten into the form

$$\Delta f(v) = \sum_{\substack{u \in V(G) \\ e_{vu} \in E(G)}} a_{vu} (f(u) - f(v)) = \sum_{\substack{u \in V(G) \\ e_{vu} \in E(G)}} a_{vu} f(u) - \sum_{\substack{u \in V(G) \\ e_{vu} \in E(G)}} a_{vu} f(v), \quad (3)$$

where $a_{vu} = 1/d_{vu}$ is a weight by which the values of $f(u)$ in neighbouring vertices are multiplied while the value $f(v)$ is multiplied by the sum of all the weights with the minus sign. In our application, we consider 5×5 pixel neighbourhood centered in the vertex (pixel) v , considering all other pixels in such neighbourhood as vertices u . Then we get the matrix of the weights multiplying the image intensities in the 5×5 neighbourhood as follows

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{8}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{8}} \\ \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{5}} \\ \frac{1}{2} & 1 & -\sum_{\substack{u \in V(G) \\ e_{vu} \in E(G)}} a_{vu} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{5}} \\ \frac{1}{\sqrt{8}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{8}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

3. Graph-Laplacian combined with relevancy maps

First, let us apply just the graph-Laplacian to the Sentinel-2 satellite image. The weight mask (4) is applied in each pixel of the Sentinel-2 image. Then, the absolute value of the graph-Laplacian is computed and rescaled into the interval $[0,1]$. The result is the graph-Laplacian grayscale map, where the high value corresponds to the high diversity of the pixel neighbourhood. This is caused by the fact that even the "physical" Laplacian gives high values for highly variable functions while it gives small values for a smoothly varying functions. The Natura 2000 forests have typically a complex character and co-occurrence of the species [6] representing a high biodiversity. We expect that the value of the graph-Laplacian can indicate a difference between natural forests with a high biodiversity and planted forests with monodominant species of regular patterns in the structure of outplanting thus with a much lower biodiversity.

However, analysing just the graph-Laplacian grayscale map of the Sentinel-2 images we observed that the highest values of the graph-Laplacian appear in city areas caused by different buildings, streets and parks in the relatively small area. When we tried to distinguish whether the forest is outplanting or natural, the accuracy was lowered because the highest graph-Laplacian in the city areas decreased the difference between graph-Laplacian values in the natural and planted forests. It became clear that we have to exclude the city areas, and more generally any area not corresponding to the riparian forest habitat, from the analysis. The so-called relevancy map created by the Natural Numerical Network [1] is able to help in this task and is included in our biodiversity analysis.

The relevancy map is a grayscale image of the same size as the Sentinel-2 image where the bright colour areas belong to the forest areas of examined habitat, and the black colour surrounds other habitats, fields, rivers, and cities. In the first row of Fig. 2, there are depicted alluvials of the Danube river on the Sentinel-2 image (left) and the relevancy map for the willow-poplar floodplain forest (right). There are also depicted segmented areas of natural forests (yellow curves) and planted forests (red curves) given by a botany expert. As we can clearly observe, the interior of the yellow segmented areas has bright colour, which means high relevancy for the habitat of softwood floodplain forest. But we can also see that the interior of the red segmented areas has bright colour, which means that these areas are also candidates for the softwood floodplain forest due to similar species composition. Since they are not natural, we have to exclude them from the Natura 2000 habitat identification.

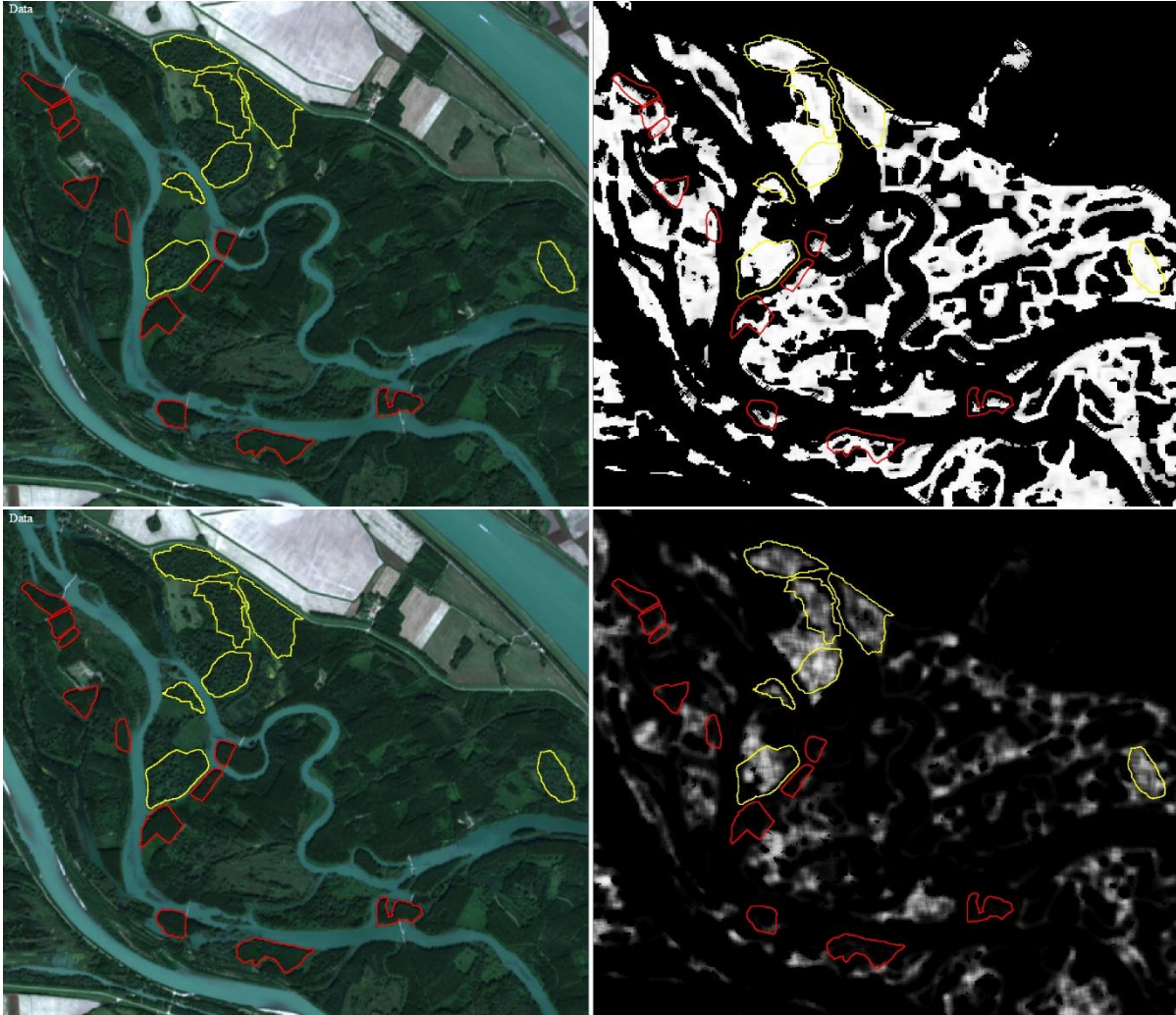


Figure 2: The comparison of the relevancy map created by the Natural Numerical Network (upper row) and the mean graph-Laplacian map (bottom row). The upper left and bottom left images depict the Sentinel-2 image. The upper right image shows the relevancy map, and the bottom right image shows the mean graph-Laplacian map. The images also depict segmented areas of natural forests (yellow segmented areas) and planted forests (red segmented areas).

Therefore, we developed the method based on the relevancy map combined with the mean graph-Laplacian. First, we calculate the relevancy map for the examined habitat in a desired location. Then the graph-Laplacian is calculated only in the pixels with nonzero values in the relevancy map, in other pixels it is set to zero. Finally, if there is zero value in the relevancy map, the value of the mean graph-Laplacian is set to zero, i.e., the pixel is set as pixel without biodiversity. If there is a nonzero value in the pixel of the relevancy map, we take the average of the graph-Laplacians in $n \times n$ neighbourhood centered in the examined pixel and value of the mean graph-Laplacian in the pixel is set to that averaged value. In numerical experiments, $n = 7$, and the mean graph-Laplacian map constructed in the above way is depicted in the bottom right picture of Fig. 2. When we compare it with the relevancy map, there is a considerable reduction of the bright colours in the planted forests with a low biodiversity. After application of the mean graph-Laplacian, the values are zero or very low in such areas. Therefore, we can observe that the interior of the red segmented areas has only black colour. On the other hand, the variability of the image intensity for natural forests is well caught by the mean graph-Laplacian, the interior of the yellow segmented areas consists of bright colour pixels, which means substantial biodiversity of the area.

4. Conclusions

In this work we presented the novel method useful for botany, vegetation science and nature conservation research, namely we developed a method for distinguishing between natural and planted monodominant forests. Motivated by the previous study of the Natura 2000 habitats, we enrich the relevancy maps [1] with the information about the outplanting type of forests. The monodominant forests are planted by humans, and the variability in the image intensity is low. The variability in the natural forests image intensity is much higher. Based on this observation, we constructed the mean graph-Laplacian well characterizing such difference in the variability. The mean graph-Laplacian grayscale map sets the black colour into the pixels with low biodiversity and we reached the goal of excluding the planted forests from the monitoring of Natura 2000 protected areas.

References

- [1] MIKULA, K., KOLLÁR, M., OŽVAT, A. A., AMBROZ, M., ČAHOJOVÁ, L., JAROLÍMEK, I., ŠIBÍK, J. and ŠIBÍKOVÁ, M.: Natural numerical networks for natura 2000 habitats classification by satellite images. *arXiv:2108.04327*. 2021.
- [2] EUROPEAN SPACE AGENCY: Sentinel 2, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products> . 2020.
- [3] MIKULA, K., ŠIBÍKOVÁ, M., AMBROZ, M., KOLLÁR, M., OŽVAT, A. A., URBÁN J., JAROLÍMEK, I. and ŠIBÍK, J.: NaturaSat - a software tool for identification, monitoring and evaluation of habitats by remote sensing techniques. *Remote Sensing* 13. 2021.
- [4] BODNY, A. and MURTY, U. S. R.: *Graph Theory*. Verlag London: Springer, 1st Edition, 2008.
- [5] FRIEDMAN, J. and JUAN-PIERRE, T.: Calculus on graphs. *arXiv:cs/0408028*. 2004.
- [6] STATE NATURE CONSERVATION SR: Natura 2000, [http://www.sopsr.sk/natura/index1.php?p=3&lang=sk\(2020\)](http://www.sopsr.sk/natura/index1.php?p=3&lang=sk(2020)).

Mária Somorovská¹, Zuzana Krivá¹

Study programme: Applied Mathematics, 2nd year of study

IMAGE SEGMENTATION OF MACROPHAGES BASED ON A LOCAL ADAPTIVE THRESHOLDING AND A SUBJECTIVE SURFACE METHOD

Abstract

In this paper, we introduce the level-set approach to segmentation of 2D macrophage images, which is based on a combination of the local adaptive thresholding method and the classical subjective surface method. The results of the demonstrated automatic approach are compared with the results of the semi-automatic Lagrangian method. These methods are compared visually and with respect to the Hausdorff distance.

Keywords

image processing; segmentation methods; thresholding; local adaptive thresholding; finite volume methods; level-set methods; macrophages

1. Introduction

Macrophage is a type of motile white blood cell and plays a significant role in immune protection and homeostasis. However, determining the exact shape of the macrophage and better understand its behavior is a challenging task due to its irregular shape, which changes over time, thinner parts, or background noise. This paper focuses on segmentation of 2D data, which contains a single macrophage and uses an automatic approach.

The automatic approach described in the paper Macrophage Image Segmentation by Thresholding and Subjective Surface Method [1] uses the initial condition of global thresholding of the Otsu's method and the method based on the entropy information considering co-occurrence matrices to the classical subjective surface segmentation method (SUBSURF). In this paper, we describe automatic approach which uses local adaptive thresholding method with the classical SUBSURF method. Local adaptive thresholding means that for each pixel threshold value is calculated for neighborhood, which is passed to the method as parameter.

The paper is divided into two main sections. In the first section, mathematical models used for segmentation are explained. In the beginning, two local adaptive thresholding methods, Bernsen and Niblack methods are described. The combination of these two methods is later used for the classical SUBSURF method as an initial condition and as input parameter for the calculation of edge detector.

The second part contains the demonstration of the obtained results. For this purpose, five macrophage image data were selected, and each macrophage has a different shape or background noise. This section has a visual comparison of the thresholding methods and result of the classical SUBSURF with semi-automatic Lagrangian approach [5] and quantitatively comparison with respect to the Hausdorff distance [4].

¹ doc. RNDr. Zuzana Krivá, PhD., Ing. Mária Somorovská., Department of Mathematics, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia, e-mail: somorovska@math.sk, kriva@math.sk.

2. Mathematical Models

2.1 Hybrid Niblack-Bernsen Thresholding Method

This method [3] is considered as a local adaptive thresholding method, which means, that for each pixel $I(u, v)$ of the image data is corresponding threshold value $Q(u, v)$ calculated. To determine the threshold value $Q(u, v)$ for each pixel $I(u, v)$ in neighborhood $R(u, v)$, contrast condition is defined by the Bernsen method and the threshold value $Q(u, v)$ is calculated by the equation defined by Niblack method.

The Bernsen method, which defines the contrast condition, uses the difference between maximum and minimum intensity value in neighborhood $R(u, v)$. If

$$I_{min}(u, v) = \min_{(i,j) \in R(u,v)} I(i, j), \quad (1)$$

$$I_{max}(u, v) = \max_{(i,j) \in R(u,v)} I(i, j), \quad (2)$$

are minimum and maximum values of intensity in strictly given neighborhood $R(u, v)$ with center in (u, v) , then the threshold value is calculated as arithmetic mean of minimum and maximum values of intensity $Q(u, v)$ calculated as

$$Q(u, v) = \frac{I_{min}(u, v) + I_{max}(u, v)}{2}. \quad (3)$$

To decide whether the pixel belongs to an object or a background, the local contrast $c(u, v) = I_{max}(u, v) - I_{min}(u, v)$ is greater than predefined value c_{min} . To be able to evaluate threshold values for each pixel in the neighborhood mask m needs to be chosen.

The Niblack method evaluates the threshold $Q(u, v)$, by using the sum of the mean $\mu_R(u, v)$ and the standard deviation $\sigma_R(u, v)$ as

$$Q(u, v) = \mu_R(u, v) + \kappa \sigma_R(u, v). \quad (4)$$

The local threshold is given by multiplying standard deviation $\sigma_R(u, v)$ with constant $\kappa \geq 0$. Local values of standard deviation $\sigma_R(u, v)$ are defined as

$$\sigma_R(u, v) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in R(u,v)} (I(i, j) - \overline{I(i, j)})^2}, \quad (5)$$

where R is strictly given neighborhood with center in (u, v) , N is the number of elements which belongs to the neighborhood R , $I(i, j)$ are pixels from the neighborhood R and $\overline{I(i, j)}$ is mean of pixels from the neighborhood R . Equation (5) can be rewritten as

$$\sigma_R(u, v) = \sqrt{\overline{I(i, j)^2} - (\overline{I(i, j)})^2}, \quad (6)$$

where $\overline{I(i, j)}$ is average of intensities from the strictly given neighborhood R and where $\overline{I(i, j)^2}$ is average of second power of intensities from the strictly given neighborhood R . These averages will be approximately calculated by heat equation, where the width of neighborhood R will be represented by time.

The unknown function $u(x, t)$, where $x \in \Omega$, $t \in [0, T]$ and partial differential equation (PDE) is defined as

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = \Delta u(x, t), \tag{7}$$

with Neumann boundary condition defined on boundary $\partial\Omega$ as

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial \vec{n}} = 0, \tag{8}$$

where \vec{n} is outer unit normal vector to the boundary $\partial\Omega$ and with initial condition

$$u(x, 0) = u^0(x), \tag{9}$$

which is given by the initial image data.

The calculation of local threshold is defined on the strictly given neighborhood R with center in (u, v) . Radius of the neighborhood R should be as large as possible to be able to capture the whole image data, but small enough to capture the smallest changes in the background.

One of the problems, which could happen with small values of standard deviation $\sigma_R(u, v)$, where the intensity on pixels is almost constant, threshold will have value close to the local average. It means that Niblack thresholding method is relatively sensitive for the so-called *ghosting*, a low amplitude of noise. This problem can be fixed with simple modification of Equation (4), by adding a constant d , which ensures minimal distance from the average in the following form

$$Q(u, v) = \mu_R(u, v) + \kappa\sigma_R(u, v) + d, \tag{10}$$

where $d \geq 0$.

2.2 The Classical Subjective Surface Method

The subjective surface method (SUBSURF) [2] is a highly efficient segmentation method, which can find missing edges and reduce background image noise. The SUBSURF method is described by

$$u_t = \sqrt{\epsilon^2 + |\nabla u|^2} \nabla \cdot \left(g \frac{\nabla u}{\sqrt{\epsilon^2 + |\nabla u|^2}} \right), \tag{11}$$

where ϵ is small arbitrary constant. The function g represents the edge detector, generally used as

$$g(s) = \frac{1}{1 + ks^2}, k > 0, \tag{12}$$

where $s = |\nabla G_\sigma * I^0|$. Smoothed gradient $\nabla G_\sigma * I^0$, is obtained by applying one step of the heat equation. Modification of the edge detector

$$g(u_o, u_t) = \frac{C_o}{1+k|\nabla u_o|^2} + \frac{C_t}{1+k|\nabla u_t|^2}, \tag{13}$$

where u_o represents original data, u_t are thresholded data, C_o and C_t are coefficients of edge detector.

3. Results

To demonstrate results, five examples from the given dataset of macrophages were chosen. Chosen data vary with their imperfections, some macrophages have complicated shapes, with thin parts or noise behind them. Before final visual results are presented, parameters and input image data for the classical SUBSURF method needs to be defined. The input data were rescaled to the interval $[0,1]$ and for the computation a semi-implicit numerical scheme was used.

For the hybrid Niblack-Bernsen method two different outputs are needed for the classical SUBSURF method, which are depends on the time step size for the heat equation σ and other parameters which are the same in both outputs: $c_{min} = 50/255$, mask $m = 3$ on which local threshold is calculated, $\kappa = 0.18$.

Input parameters used for the computation for the classical SUBSURF method $\tau = 1$, $\sigma = 10^{-3}$, $h = 1$, $\epsilon^2 = 10^{-10}$, $K = 1000$, $C_o = 0.2$, $C_t = 0.8$. In Fig. 1 the first column contains image data from the original image, the second contains output from the Niblack-Bernsen method with time step $\sigma = 5$, which is used as input parameter to calculate edge detector and the third contains output from the Niblack-Bernsen method with time step $\sigma = 10$, which is used as initial condition for the classical SUBSURF method. The SUBSURF method, which takes as input parameters output of the hybrid Niblack-Bernsen method, is later in this paper referred to as NB-SUBSURF. Both Niblack-Bernsen outputs nicely capture the shape of macrophages and do not tear apart on thinner parts.

In Fig. 2 are the results from NB-SUBSURF displayed over the original macrophage image data as red isoline and are compared to the results from semi-automatic Lagrangian approach shown as green isoline. The red isoline was chosen at $z = -0.5$. It can be seen, that the red isoline is more accurate because it captures smaller irregularities on the macrophages.

To quantitatively compare the perimeters and areas of the automatic and semiautomatic approach, the differences between these two characteristics and Hausdorff distance between them were calculated and can be found in Table 1. However, to determine if the results are reasonable, all the macrophages from the time series should have been calculated.

4. Discussion

The visual comparison in Fig. 2 showed by isolines that the results with proposed NB-SUBSURF method better capture the shape of macrophages – more accurate, are less likely to tear apart, if they contain thinner parts, but sometimes segmentation also contains lower intensities, which means, that the Hausdorff distance is a little bigger than proposed in the paper Macrophage Image Segmentation by Thresholding and Subjective Surface Method [1].

Table 1: perimeters and areas for both the automatic NB-SUBSURF and the semi-automatic Lagrangian method, differences between these perimeters and areas and Hausdorff distance.

macrophage	NB-SUBSURF		LAGRANGIAN		Differences of		Hausdorff distance
	area	perimeter	area	perimeter	areas	perimeters	
T7	109.96	93.73	108.73	77.37	1.23	16.40	3.38
T8	90.62	78.42	99.87	57.33	-9.25	21.09	2.18
T35	170.30	130.35	172.81	117.11	-2.51	13.24	2.03
T49	156.50	97.05	188.33	72.01	-31.83	25.04	4.33
T67	224.81	138.89	201.08	124.65	23.73	14.24	2.51

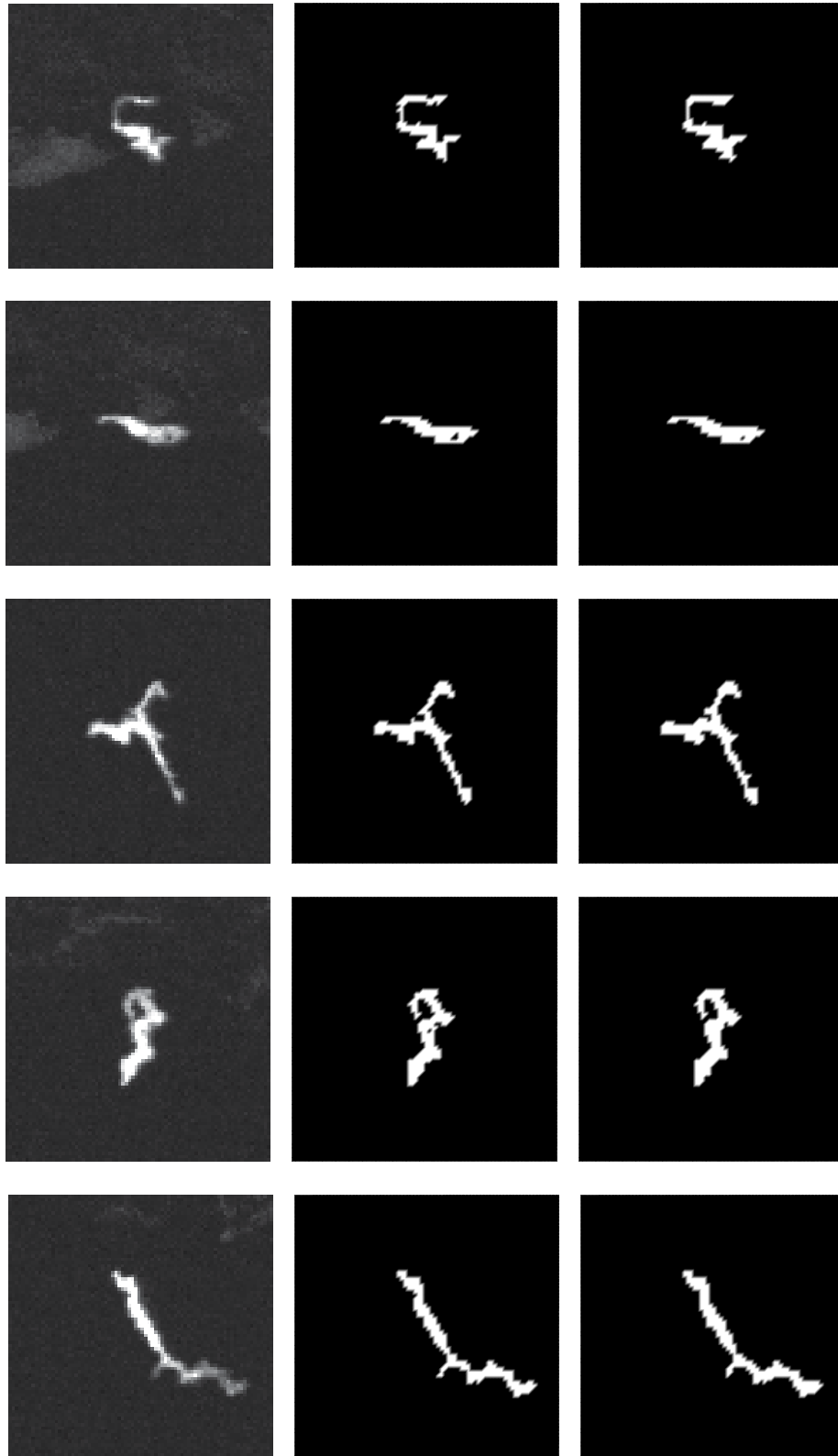


Fig. 1: Five different examples from image series (from up to down - T7, T8, T35, T49, T67). The first column shows the original macrophage images, the second column contains output images from the hybrid Niblack-Bernsen method with time step $\sigma = 5$ and the third column contains output images from the hybrid Niblack-Bernsen method with time step $\sigma = 10$.

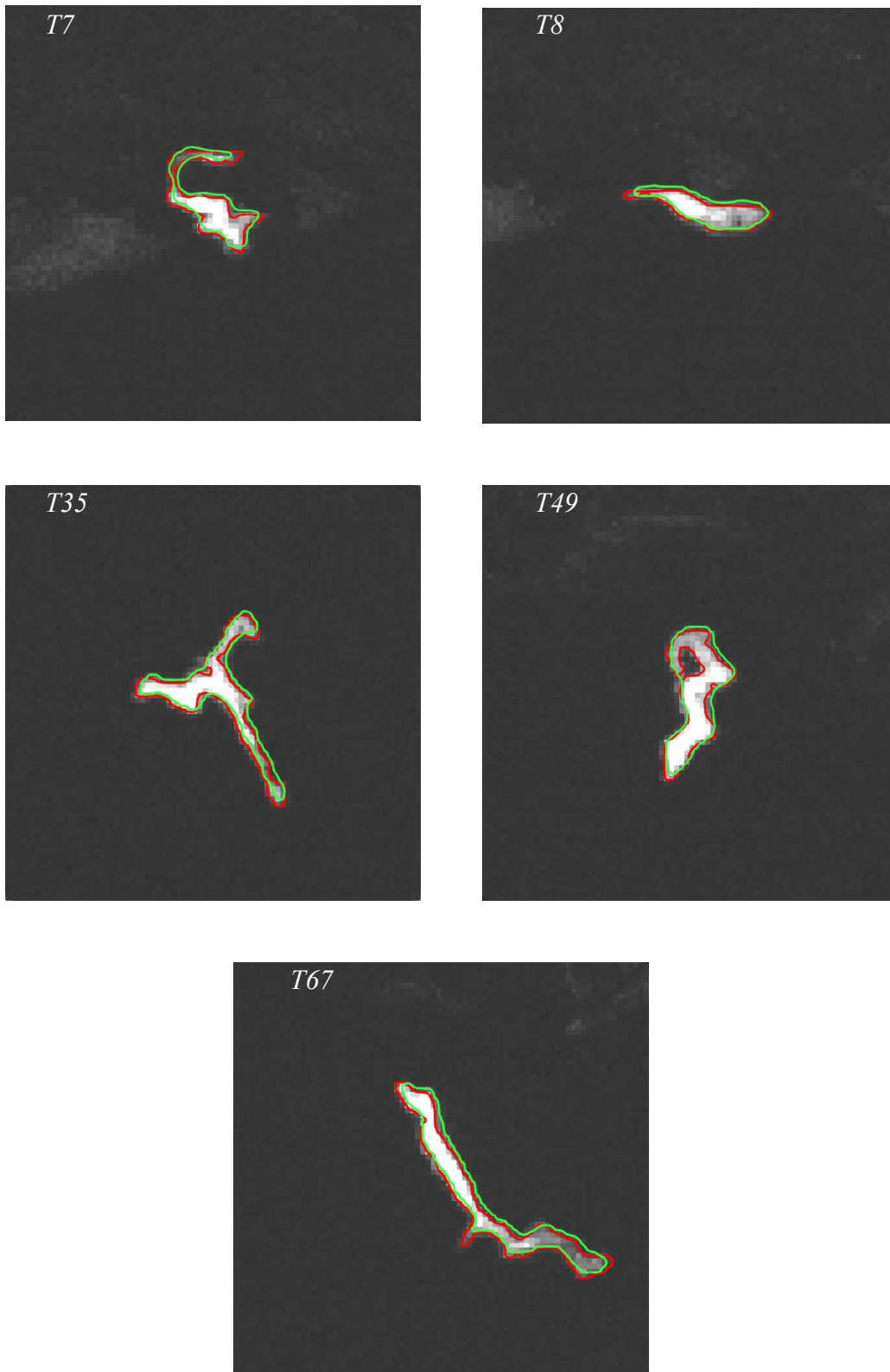


Fig. 2: The background are original data of crop outs of macrophages, green isoline is the result of the semi-automatic Lagrangian method, and isoline is the result of the automatic NB-SUBSURF.

References

- [1] S. A. Park, T. Sipka, Z. Kriva, M. Ambroz, M. Kollar, B. Kosa, M. N.-Chi, G. Lutfalla, K. Mikula, Macrophage image segmentation by Thresholding and subjective surface Method: https://www.researchgate.net/publication/337755994_Macrophage_image_segmentation_by_Thresholding_and_subjective_surface_Method
- [2] Z. Kriva, K. Mikula, O. Stasova, Spracovanie obrazu vybrané kapitoly z prednášok
- [3] W. Burger, Principles of Digital Image Processing: Core Algorithms
- [4] D. P. Huttenlocher, G. A. Klanderman, W. A. Rucklidge, Comparing Images Using the Hausdorff Distance, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 15(9) (1993), 850–863
- [5] K. Mikula, J. Urbán, M. Kollár, M. Ambroz, I. Jarolímek, J. Šibík, M. Šibíková, Semi-automatic segmentation of NATURA 2000 habitats in Sentinel-2 satellite images by evolving open curves, Discrete & Continuous Dynamical Systems - S 14(3):1033-1046 (2021)

Dagmar Žáková¹, Peter Frolkovič²
Študijný program: D-APLMA4, ročník: 2.

THIRD-ORDER ACCURATE COMPACT IMPLICIT NUMERICAL SCHEME FOR LINEAR ADVECTION EQUATION

Abstract

This paper deals with the numerical solution of a conservation law in the form of a linear advection equation in one-dimensional space using a novel implicit time discretization. We present details of the third-order accurate scheme in the case of smooth solutions. The scheme is based on the finite volume method.

Key Words

conservation law; advection equation; compact implicit

1. Conservation law

Considering the linear advection equation in a form

$$\partial_t u(x, t) + \partial_x(v(x)u(x, t)) = 0, \quad (1)$$

with $u = u(x, t)$ being the unknown function for $x \in \Omega$, $\Omega = (x_L, x_R) \subset \mathbb{R}^1$ and $t \in (0, T)$. The velocity is represented by $v = v(x)$. The initial condition $u_0(x)$ and the boundary conditions

$$u(x_L, t) = u_{x_L}(t) \quad \text{if } v(x_L) > 0,$$

$$u(x_R, t) = u_{x_R}(t) \quad \text{if } v(x_R) < 0$$

are given.

The discretization is done in space and time using the following notation. We denote $t^n = n\tau$, $n = 0, 1, \dots, N$ for chosen N and $\tau > 0$ with $t^{n+1/2} = t^n + \tau/2$. Spatial discretization is based on the finite volume method. The interval (x_L, x_R) is divided into finite volumes $I_i = (x_{i-1/2}, x_{i+1/2})$ with a regular grid, where $x_{i-1/2} = x_L + ih - h/2$, $i = 1, 2, \dots, Ip$ for the chosen Ip and $h = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$. The velocity is discretized in the form $v_{i+1/2} = v(x_{i+1/2})$ in each $x_{i+1/2}$ and for simplicity we will consider only $v \geq 0$.

We need to express the numerical approximation of u_i^n and $u_{i+1/2}^{n+1/2}$ using the finite volume method. These approximations are the averaged values over time and a finite volume, as in [2].

$$\begin{aligned} u_i^n &:= \frac{1}{h} \int_{I_i} u(x, t^n) dx \\ u_{i+1/2}^{n+1/2} &:= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau u(x_{i+1/2}, t^n + s) ds \end{aligned} \quad (2)$$

The idea is to integrate the advection equation (1) over a time step and a finite volume

¹ Dagmar Žáková, Ing., Slovak University of Technology in Bratislava, Vazovova 5, 812 43 Bratislava 1, Slovak Republic

² Peter Frolkovič, doc. RNDr., PhD., Slovak University of Technology in Bratislava, Vazovova 5, 812 43 Bratislava 1, Slovak Republic

$$\frac{1}{h\tau} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{I_i} (\partial_t u(x, t) + \partial_x(v(x)u(x, t))) dx dt = 0 \quad (3)$$

and using the relation (2) we obtain

$$u_i^{n+1} - u_i^n + \frac{\tau}{h}(v_{i+1/2}u_{i+1/2}^{n+1/2} - v_{i-1/2}u_{i-1/2}^{n+1/2}) = 0. \quad (4)$$

The scheme (4) is exact and the numerical solution is obtained by approximating the values $u_{i+1/2}^{n+1/2}$, and $u_{i-1/2}^{n+1/2}$ analogously. The approximation in space is performed by polynomial reconstruction as in [3], [4]. For each $x \in I_i$ there exists a reconstruction polynomial $p_k = p_k(x)$ such that $u_{i+1/2}^{n+1} \approx p_k(x_{i+1/2})$ at $t = t^{n+1}$, with k being the degree of polynomial, $k \geq 1$. In general, there are constants c that satisfy $p_k(x_{i+1/2}) = \sum_{j=0}^{k-1} c_{rj} u_{i-r+j}^{n+1}$, where r represents the number of "cells to the left" of the chosen stencil. For the time approximation, we need to express $u(x_{i+1/2}, t^n)$ using the Taylor series

$$u(x_{i+1/2}, t^n + s) = u(x_{i+1/2}, t^{n+1}) - s\partial_t u(x_{i+1/2}, t^{n+1}) + \frac{s^2}{2}\partial_{tt}u(x_{i+1/2}, t^{n+1}) + \mathcal{O}(\tau^3). \quad (5)$$

After the time integration for $s \in (0, \tau)$ and the division by τ we get

$$u_{i+1/2}^{n+1/2} = u_{i+1/2}^{n+1} - \frac{\tau}{2}\partial_t u_{i+1/2}^{n+1} + \frac{\tau^2}{6}\partial_{tt}u_{i+1/2}^{n+1} + \mathcal{O}(\tau^3),$$

where $u_{i+1/2}^{n+1} := u(x_{i+1/2}, t^{n+1})$.

For the first-order accurate fully implicit scheme, one can use a constant function $p_1(x) \equiv u_i^{n+1}$ as the reconstruction polynomial for $x \in I_i$. The first-order accurate time approximation of (6) leads to $u_{i+1/2}^{n+1/2} \approx u_{i+1/2}^{n+1}$ and for $u_{i-1/2}^{n+1/2}$ analogously. Then $u_{i+1/2}^{n+1} \approx p_1(x_{i+1/2})$ and $p_1(x_{i+1/2}) = u_i^{n+1}$ and the scheme looks as

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\tau} + \frac{v_{i+1/2}u_i^{n+1} - v_{i-1/2}u_{i-1}^{n+1}}{h} = 0. \quad (7)$$

2. Compact implicit numerical schemes

2.1 The second-order accurate compact implicit scheme

The second-order time approximation of (6) looks as follows

$$u_{i+1/2}^{n+1/2} \approx u_{i+1/2}^{n+1} - \frac{\tau}{2}\partial_t u_{i+1/2}^{n+1}, \quad (8)$$

where the time derivative can be easily approximated with

$$\partial_t u_{i+1/2}^{n+1} \approx \frac{u_{i+1/2}^{n+1} - u_{i+1/2}^n}{\tau} \quad (9)$$

and the scheme is

$$u_{i+1/2}^{n+1/2} \approx u_{i+1/2}^{n+1} - \frac{\tau}{2} \frac{u_{i+1/2}^{n+1} - u_{i+1/2}^n}{\tau}. \quad (10)$$

Then, using linear and a constant polynomial (respectively) as spatial approximations, we get a scheme

$$u_{i+1/2}^{n+1} \approx p_2(x_{i+1/2}) - \frac{1}{2}(p_1(x_{i+1/2}) - p_1^n(x_{i+1/2})), \quad (11)$$

where p_k^n denotes the polynomial reconstruction of $u_{i+1/2}^n$ and

$$p_2(x) = u_i^{n+1} + (x - x_i)\left(\omega \frac{1}{h}(u_i^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}) + (1 - \omega) \frac{1}{h}(u_{i+1}^{n+1} - u_i^{n+1})\right),$$

for $x \in I_i$. Then the

$$p_2(x_{i+1/2}) = \frac{\omega}{2}(3u_i^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}) + \frac{1 - \omega}{2}(u_i^{n+1} + u_{i+1}^{n+1}) \quad (12)$$

and

$$p_1(x) = \omega u_i^{n+1} + (1 - \omega)u_{i+1}^{n+1} \implies p_1(x_{i+1/2}) = \omega u_i^{n+1} + (1 - \omega)u_{i+1}^{n+1} \quad (13)$$

with ω being a free parameter.

Combining (9), (11), (12), and (13) we get the second-order accurate compact implicit scheme

$$\begin{aligned} & u_i^{n+1} - u_i^n + \\ & \frac{\tau}{h} \left(v_{i+1/2}(u_i^{n+1} - \frac{1}{2}(\omega u_{i-1}^{n+1} + (1 - \omega)u_i^{n+1})) + \frac{1}{2}(\omega u_i^n + (1 - \omega)u_{i+1}^n) \right) - \\ & v_{i-1/2}(u_{i-1}^{n+1} - \frac{1}{2}(\omega u_{i-2}^{n+1} + (1 - \omega)u_{i-1}^{n+1})) + \frac{1}{2}(\omega u_{i-1}^n + (1 - \omega)u_i^n) \Big) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

which can be rewritten as

$$\begin{aligned} & u_i^{n+1} - u_i^n + \\ & \frac{\tau}{h} \left(v_{i+1/2}(u_i^{n+1} - \frac{1}{2}(\omega(u_{i-1}^{n+1} - u_i^n) + (1 - \omega)(u_i^{n+1} - u_{i+1}^n))) - \right. \\ & \left. v_{i-1/2}(u_{i-1}^{n+1} - \frac{1}{2}(\omega(u_{i-2}^{n+1} - u_{i-1}^n) + (1 - \omega)(u_{i-1}^{n+1} - u_i^n))) \right) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Note that the term u_{i+1}^{n+1} from (12) and (13) is canceled in (15).

2.2 The third-order accurate compact implicit scheme

Considering the third-order accurate approximation of (6), we get the following result

$$u_{i+1/2}^{n+1/2} \approx u_{i+1/2}^{n+1} - \frac{\tau}{2} \partial_t u_{i+1/2}^{n+1} + \frac{\tau^2}{6} \partial_{tt} u_{i+1/2}^{n+1}. \quad (16)$$

We can rewrite the Taylor series from (5) in the following form

$$\tau \partial_t u_{i+1/2}^{n+1} \approx (u_{i+1/2}^{n+1} - u_{i+1/2}^n) + \frac{\tau^2}{2} \partial_{tt} u_{i+1/2}^{n+1}. \quad (17)$$

From the Lax-Wendroff procedure, we can express $\partial_{tt} u_{i+1/2}^{n+1}$

$$\begin{aligned} \partial_t u_{i+1/2}^{n+1} &= -\partial_x(v_{i+1/2} u_{i+1/2}^{n+1}) \\ \partial_{tt} u_{i+1/2}^{n+1} &= -\partial_t \partial_x(v_{i+1/2} u_{i+1/2}^{n+1}) = -\partial_x(v_{i+1/2} \partial_t u_{i+1/2}^{n+1}) = -\partial_x v_{i+1/2} \partial_t u_{i+1/2}^{n+1} - v_{i+1/2} \partial_{tx} u_{i+1/2}^{n+1}. \end{aligned} \quad (18)$$

Using the quadratic reconstruction polynomial for $u_{i+1/2}^{n+1}$, the linear polynomial reconstruction in (17) and the Lax-Wendroff procedure from (18) we get

$$u_{i+1/2}^{n+1/2} \approx p_3(x_{i+1/2}) - \frac{1}{2}(p_2(x_{i+1/2}) - p_2^n(x_{i+1/2})) + \frac{\tau^2}{12}(\partial_x v_{i+1/2} \partial_t u_{i+1/2}^{n+1} + v_{i+1/2} \partial_{tx} u_{i+1/2}^{n+1}), \quad (19)$$

with

$$p_2(x_{i+1/2}) = \frac{1}{3}u_{i+1}^{n+1} + \frac{5}{6}u_i^{n+1} - \frac{1}{6}u_{i-1}^{n+1}. \quad (20)$$

To cancel the term u_{i+1}^{n+1} , we must solve the equation

$$\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \omega}{2} \right) = 0, \quad (21)$$

so $\omega = -\frac{1}{3}$.

The time derivative in (19) is approximated as in (9) by applying the constant polynomial reconstruction for $u_{i+1/2}$ at each time step. The mixed derivative is then approximated as

$$\partial_{tx} u_{i+1/2}^{n+1} = \frac{1}{\tau h} (u_i^{n+1} - u_{i-1}^{n+1} - u_i^n + u_{i-1}^n). \quad (22)$$

The final scheme can be expressed as

$$\begin{aligned} & u_i^{n+1} - u_i^n + \\ & \frac{\tau}{h} \left[v_{i+1/2} \left(\frac{1}{6} (2u_{i+1}^{n+1} + 5u_i^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}) - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{1}{2} \left(\frac{1}{6} (4u_{i+1}^{n+1} + u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}) - \frac{1}{6} (4u_{i+1}^n + u_i^n + u_{i-1}^n) \right) \right) + \right. \\ & \left. \frac{\tau}{12} v'_{i+1/2} (u_i^{n+1} - u_i^n) + \frac{\tau}{12h} v_{i+1/2} (u_i^{n+1} - u_{i-1}^{n+1} - u_i^n + u_{i-1}^n) \right) - \\ & v_{i-1/2} \left(\frac{1}{6} (2u_i^{n+1} + 5u_{i-1}^{n+1} - u_{i-2}^{n+1}) - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \left(\frac{1}{6} (4u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1} + u_{i-2}^{n+1}) - \frac{1}{6} (4u_i^n + u_{i-1}^n + u_{i-2}^n) \right) \right) + \\ & \left. \frac{\tau}{12} v'_{i-1/2} (u_{i-1}^{n+1} - u_{i-1}^n) + \frac{\tau}{12h} v_{i-1/2} (u_{i-1}^{n+1} - u_{i-2}^{n+1} - u_{i-1}^n + u_{i-2}^n) \right) \Big] = 0, \end{aligned} \quad (23)$$

with $v'_{i+1/2}$ denoting the spatial derivative of velocity $v(x_{i+1/2})$, and it can be rewritten as

$$\begin{aligned} & u_i^{n+1} - u_i^n + \\ & \frac{\tau}{h} \left[v_{i+1/2} \left(\frac{3}{4} u_i^{n+1} - \frac{1}{4} u_{i-1}^{n+1} + \frac{1}{3} u_{i+1}^n + \frac{1}{12} u_i^n + \frac{1}{12} u_{i-1}^n + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\tau}{12} v'_{i+1/2} (u_i^{n+1} - u_i^n) + \frac{\tau}{12h} v_{i+1/2} (u_i^{n+1} - u_{i-1}^{n+1} - u_i^n + u_{i-1}^n) \right) - \right. \\ & v_{i-1/2} \left(\frac{3}{4} u_{i-1}^{n+1} - \frac{1}{4} u_{i-2}^{n+1} + \frac{1}{3} u_i^n + \frac{1}{12} u_{i-1}^n + \frac{1}{12} u_{i-2}^n + \right. \\ & \left. \left. \frac{\tau}{12} v'_{i-1/2} (u_{i-1}^{n+1} - u_{i-1}^n) + \frac{\tau}{12h} v_{i-1/2} (u_{i-1}^{n+1} - u_{i-2}^{n+1} - u_{i-1}^n + u_{i-2}^n) \right) \right] = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

3. Numerical experiments

We show two results using the third-order accurate scheme. The first is defined with positive velocity. In the second example we use variable velocity that changes the sign. The exact solutions in both cases are known and we compute the discrete L_1 norm (E) and the experimental order of convergence (EOC). In addition, we denote the maximal Courant number in both cases, which is $C_{max} = \frac{\tau}{h} v_{max}$.

The first problem is defined by the initial condition $u_0(x) = \cos(x)$. The velocity is $v(x) = \cos(x) + 2$ and the computational domain is $\Omega = \left(-\frac{1}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi\right)$ with spatial steps $Ip = 80, 160, 320$

and 640. The final time is $T = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}$, where the exact solution and the initial condition are equal. The number of time steps in $N = I/5$ and $C_{max} = 5.77$.

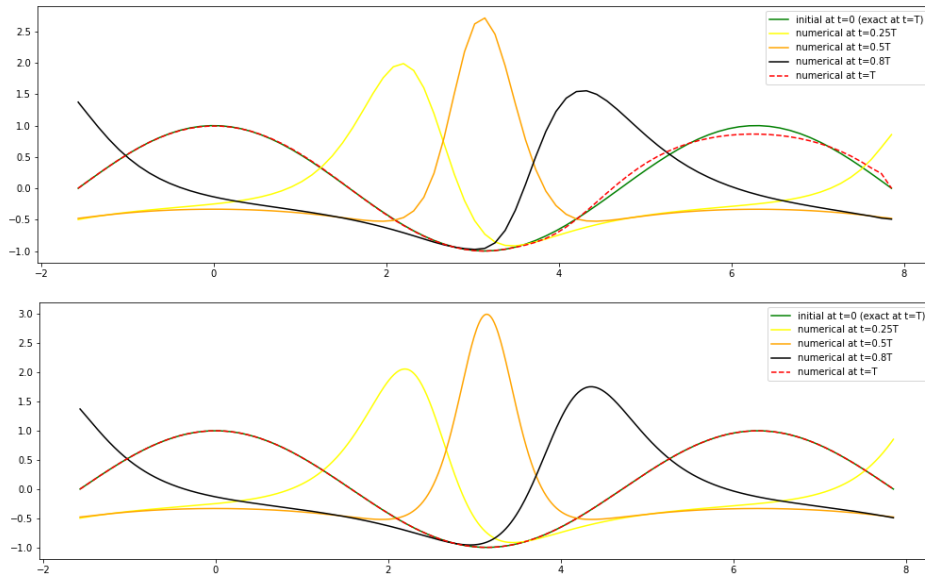


Figure 1: Solutions obtained by the third-order scheme at different time steps compared with the exact solution at $T = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}$, for $I_p = 80$ (upper) and $I_p = 640$ (lower) with a non-negative velocity $v(x) = \cos(x) + 2$

Table 1: Numerical errors in the case of $v(x) = \cos(x) + 2$

I_p	E (2 nd order, $\omega=1/2$)	EOC (2 nd order)	E (3 rd order)	EOC (3 rd order)
80	0.0225329	-	0.033477	-
160	0.0051849	2.1196	0.006226	2.4267
320	0.0011942	2.1182	0.000866	2.8452
640	0.0002905	2.0391	0.000114	2.9147

The second problem differs in the definition of the velocity. In this case $v(x) = \cos(x)$. The derivation of a scheme (15) and (24) are for $v \geq 0$. This time, the scheme must be modified for both cases, when $v \geq 0$ and $v < 0$. The derivation using the fast sweeping method is shown in [1]. We use the final time $T = \frac{\pi}{\sqrt{3}}$ and now the exact solution looks as

$$u(x, t) = \cos^2 \left[2 \tan^{-1} \left(\tanh \left(\frac{1}{2} (t - 2 \tanh^{-1}(\tan \frac{x}{2})) \right) \right) \right].$$

Again, we used the same number of time steps $N = I/5$ and in this case, the maximal Courant number is $C_{max} = 0.96$.

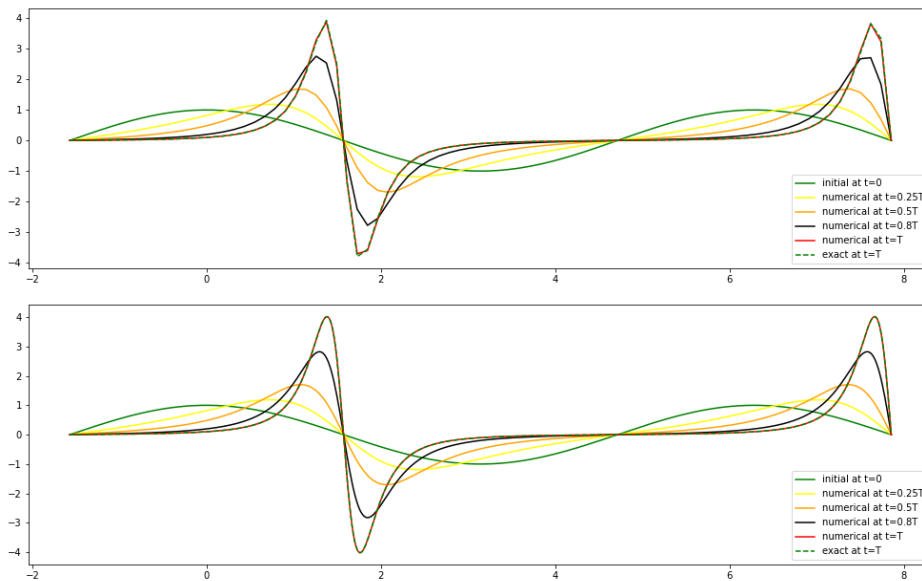


Figure 2: Solutions obtained by the third-order scheme at different time steps compared with the exact solution at $T = \frac{\pi}{\sqrt{3}}$, for $I_p = 80$ (upper) and $I_p = 640$ (lower) with a velocity $v(x) = \cos(x)$

Table 2: Numerical errors in the case of $v(x) = \cos(x)$

I_p	E (2 nd order, $\omega=1/2$)	EOC (2 nd order)	E (3 rd order)	EOC (3 rd order)
80	0.001855	-	0.000867	-
160	0.000537	1.788	0.000125	2.7934
320	0.000143	1.904	$1.66 \cdot 10^{-5}$	2.9089
640	$3.70 \cdot 10^{-5}$	1.954		2.9428

4. Conclusion

In this paper, we derived a novel third-order accurate compact implicit numerical scheme for solving linear advection equation. The scheme is proposed for such a stencil that allows us to solve the problem explicitly. The scheme is based on the finite volume method, using Taylor series and polynomial reconstruction for spatial approximation.

References

- [1] Peter Frolkovič et al. *Semi-implicit methods for advection equations with explicit forms of numerical solution*. In: *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics* (2022).
- [2] Randall J LeVeque. *Finite volume methods for hyperbolic problems*. Cambridge University Press, 2002.
- [3] Janxian Qui and Chi-Wang Shu. *Finite Difference WENO Schemes with Lax-Wendroff-Type Time Discretizations*. In: *Siam Journal on Scientific Computing* (2003).
- [4] Chi-Wang Shu. *Essentially non-oscillatory and weighted essentially non-oscillatory schemes for hyperbolic conservation laws*. In: 1998.

Michal Žeravý¹, Peter Frolkovič²
Study programme: Applied Math, year: 3.

HIGH RESOLUTION COMPACT IMPLICIT METHOD FOR NUMERICAL SOLUTION OF EULER EQUATIONS

Abstract

In fluid dynamics, the Euler equations describe the motion of the fluid. The paper uses a compact implicit numerical scheme to deal with the numerical solution of the Euler equations in the conservative form in one dimensional space. The scheme was derived for the nonlinear scalar equation and the nonlinear system of shallow water equations in [1]. For the system of Euler equations, we follow the approach of the characteristic variables and speeds. The scheme uses the so-called method of fractional steps, where the flux function is split into the positive part, where we consider only the non-negative values of eigenvalues and into the negative part, where we consider only the non-positive values of eigenvalues. As a numerical experiment, we solve the shock tube problem, also known as the Sod's problem.

Key Words

Euler equations; compact implicit method; high resolution method; flux vector splitting

1. Euler equations

In this section, we describe the system of Euler equations in a conservative form. The first equation of the system is the continuity equation

$$\rho_t + (\rho u)_x = 0,$$

where ρ is the density, u is the velocity, and ρu represents a conservative variable, the momentum. The second equation is the momentum equation

$$(\rho u)_t + (\rho u^2 + p)_x = 0,$$

where the pressure p is added to the advective flux ρu^2 to obtain a total momentum flux. The last equation represents the conservation law for the total energy E without external forces

$$E_t + (u(E + p))_x = 0.$$

To obtain a closed system of equations, we need to specify the equation of state relating the total energy to the pressure, density and velocity. For the ideal polytropic gas, it takes the following form [2]

$$E = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho u^2,$$

where the parameter γ represents the ratio of the specific heat at constant pressure and the specific heat at constant volume. In our case, we use the value $\gamma = 1.4$ which corresponds to the ideal gas.

The system of conservation laws can be written in vector form

$$\partial_t \mathbf{q} + \partial_x \mathbf{F}(\mathbf{q}) = 0,$$

where \mathbf{q} is the vector of conservative variables and \mathbf{F} is the flux vector function. Namely, the Euler

¹ Michal, Žeravý, Ing.*

² Peter Frolkovič, doc. RNDr., PhD.*

* Department of Mathematics, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

The work was supported by the grant VEGA 1/0709/19

equations are represented by the following vectors

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ E \end{bmatrix}, \mathbf{F}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ u(E + p) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

For the approach of the characteristic variables, we need to compute the Jacobian matrix of \mathbf{F} from (1) as follows

$$\mathbf{F}'(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{2}(\gamma - 3)u^2 & (3 - \gamma)u & \gamma - 1 \\ \frac{1}{2}(\gamma - 1)u^3 - uH & H - (\gamma - 1)u^2 & \gamma u \end{bmatrix},$$

where H has the following form

$$H = \frac{E + p}{\rho}.$$

Once we define the Jacobian \mathbf{F}' , we can obtain the eigenvalues $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ of the system, which now has the form

$$\lambda_1 = u - c, \quad \lambda_2 = u, \quad \lambda_3 = u + c,$$

where

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}.$$

The corresponding eigenvectors $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3]$ are defined in the form

$$\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ u - c \\ H - uc \end{bmatrix}, \mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ \frac{1}{2}u^2 \end{bmatrix}, \mathbf{r}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ u + c \\ H + uc \end{bmatrix}.$$

In the next section, we briefly describe the numerical scheme used for solving the Euler equations.

2. Compact implicit numerical scheme

For the discretization of the computational domain, we denote $x_i = i\Delta x$, $i = 0, 1, \dots, I$ for a chosen I , where $\Delta x = L/I$ is a spatial step. For the time discretization $t^n = n\Delta t$, $n = 0, 1, \dots, N$ for a chosen N and $\Delta t > 0$ is a time step. The vector of unknowns \mathbf{q} is discretized as $\mathbf{q}(x_i, t^n) = \mathbf{q}_i^n$ and numerical flux function as $\mathbf{F}(\mathbf{q}_i^n) = \mathbf{F}_i^n$.

The high resolution compact implicit numerical scheme derived for the system of equations in [1] uses the fractional step method with the fast sweeping method [3]. Therefore, one needs to split the flux function $\mathbf{F}(\mathbf{q}) = \mathbf{F}^+(\mathbf{q}) + \mathbf{F}^-(\mathbf{q})$. There are several methods for such splitting. In our case, we use the flux vector splitting approach of Steger and Warming [2, 3]. This approach can be used due to the homogeneity property of the system of equations. Using the eigenvalues $\lambda_p^+ = \max(0, \lambda_p)$ and $\lambda_p^- = \min(0, \lambda_p)$ for $p = 1, 2, 3$, we express the corresponding flux vector functions $\mathbf{F}^\pm(\mathbf{q})$ as follows

$$\mathbf{F}^\pm(\mathbf{q}) = \frac{\rho}{2\gamma} \begin{bmatrix} \lambda_1^\pm + 2(\gamma - 1)\lambda_2^\pm + \lambda_3^\pm \\ (u - c)\lambda_1^\pm + 2(\gamma - 1)u\lambda_2^\pm + (u + c)\lambda_3^\pm \\ (H - uc)\lambda_1^\pm + 2(\gamma - 1)\frac{u^2}{2}\lambda_2^\pm + (H + uc)\lambda_3^\pm \end{bmatrix}.$$

Consequently, the upwind direction can be easily determined, and the high resolution scheme can be written using the fractional step method in the conservative form

$$\mathbf{q}_i^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{F}_{i+1/2}^{+,n+1/2} = \mathbf{q}_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{F}_{i-1/2}^{+,n+1/2}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (2)$$

$$\mathbf{q}_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{F}_{i-1/2}^{-,n+1} = \mathbf{q}_i^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{F}_{i+1/2}^{-,n+1}, \quad i = I - 1, \dots, 0, \quad (3)$$

where the numerical fluxes are defined as follows

$$\mathbf{F}_{i+1/2}^{+,n+1} = \mathbf{F}^+(\mathbf{q}_i^{n+1}) - \frac{l_i}{2} \circ ((1 - \omega_i) \circ (\mathbf{F}^+(\mathbf{q}_i^{n+1}) - \mathbf{F}^+(\mathbf{q}_{i+1}^n)) + \omega_i \circ (\mathbf{F}^+(\mathbf{q}_{i-1}^{n+1}) - \mathbf{F}^+(\mathbf{q}_i^n))), \quad (4)$$

and similarly for $\mathbf{F}_{i-1/2}^{+,n+1}$. Analogously, the negative fluxes $\mathbf{F}^-(\mathbf{q})$ are defined as follows

$$\mathbf{F}_{i+1/2}^{-,n+1} = \mathbf{F}^-(\mathbf{q}_{i+1}^{n+1}) - \frac{l_i}{2} \circ ((1 - \omega_i) \circ (\mathbf{F}^-(\mathbf{q}_{i+1}^{n+1}) - \mathbf{F}^-(\mathbf{q}_i^n)) + \omega_i \circ (\mathbf{F}^-(\mathbf{q}_{i+2}^{n+1}) - \mathbf{F}^-(\mathbf{q}_{i+1}^n))), \quad (5)$$

and similarly for $\mathbf{F}_{i-1/2}^{-,n+1}$. Note that \circ is an element-wise product known as the Hadamard product.

The parameters $\boldsymbol{\omega} = (\omega^1, \omega^2, \omega^3)$ and the parameters $\mathbf{l} = (l^1, l^2, l^3)$ will be defined later.

For the Courant number, we use the definition

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \max(|\lambda_1|, |\lambda_2|, |\lambda_3|),$$

where \mathbf{q} is considered for \mathbf{q}_i^n through the whole space and time domain.

We rewrite the numerical flux (4) using the characteristic variables resulting in the following form

$$\mathbf{F}_{i+1/2}^{+,n+1} = \mathbf{F}^+(\mathbf{q}_i^{n+1}) - \frac{1}{2} \sum_p l_i^p ((1 - \omega_i^p) \alpha_i^p + \omega_i^p \beta_i^p) \mathbf{r}_p, \quad (6)$$

where p indicates the component of the system and the parameters $\boldsymbol{\alpha}_i = [\alpha_i^1, \alpha_i^2, \alpha_i^3]$ and $\boldsymbol{\beta}_i = [\beta_i^1, \beta_i^2, \beta_i^3]$ are defined as follows

$$\boldsymbol{\alpha}_i = R^{-1} \cdot (\mathbf{F}_i^{+,n+1} - \mathbf{F}_{i+1}^{+,n}), \quad \boldsymbol{\beta}_i = R^{-1} \cdot (\mathbf{F}_{i-1}^{+,n+1} - \mathbf{F}_i^{+,n}).$$

Rewriting the numerical flux (5) using the characteristic variables, one obtains the following form

$$\mathbf{F}_{i-1/2}^{-,n+1} = \mathbf{F}^-(\mathbf{q}_i^{n+1}) - \frac{1}{2} \sum_p l_i^p ((1 - \omega_i^p) \alpha_i^p + \omega_i^p \beta_i^p) \mathbf{r}_p, \quad (7)$$

where the parameters $\boldsymbol{\alpha}_i$ and $\boldsymbol{\beta}_i$ are described as follows

$$\boldsymbol{\alpha}_i = (R^-)^{-1} \cdot (\mathbf{F}_i^{-,n+1} - \mathbf{F}_{i-1}^{-,n}), \quad \boldsymbol{\beta}_i = (R^-)^{-1} \cdot (\mathbf{F}_{i+1}^{-,n+1} - \mathbf{F}_i^{-,n}).$$

To obtain a numerical solution of (2)-(3) in combination with (6) and (7), we need to solve a system of nonlinear algebraic equations for each index i , with the same number of unknowns as the number of equations in (1). The resulting matrix of the system of nonlinear algebraic equations is always either a lower or upper triangular matrix.

Using this method for the system of equations, we have a forward step (2) described below and an analogous backward step (3).

In the forward step, the first step is to compute the initial guess of the solution \mathbf{q}_i^{n+1} due to dependency on it in $\boldsymbol{\alpha}_i$, $\boldsymbol{\omega}_i$ and \mathbf{l}_i . It is computed by the first order method. Afterwards, $\boldsymbol{\alpha}_i$ and $\boldsymbol{\beta}_i$ are computed.

The next step consists of setting the parameter $\boldsymbol{\omega}_i$ using the ENO method [4]. We compute an auxiliary vector \mathbf{r}_i . Note that all the computations in what follows are realized componentwise. Namely if $|\boldsymbol{\beta}_i| < |\boldsymbol{\alpha}_i|$, set $\boldsymbol{\omega}_i = 1$, otherwise, set $\boldsymbol{\omega}_i = 0$. For stability reasons, if $|\boldsymbol{\beta}_i| < \epsilon$, set $\boldsymbol{\omega}_i = 1$ and $\mathbf{r}_i = 0$, otherwise if $|\boldsymbol{\alpha}_i| < \epsilon$, set $\boldsymbol{\omega}_i = 0$ and $\mathbf{r}_i = 1$, otherwise $\mathbf{r}_i = \frac{\boldsymbol{\beta}_i}{\boldsymbol{\alpha}_i}$.

Next, we set the value of parameter \mathbf{l}_i by computing

$$\boldsymbol{\psi}_i = \frac{1 - \boldsymbol{\omega}_i + \boldsymbol{\omega}_i \mathbf{r}_i}{2},$$

$$\mathbf{M} = \frac{\boldsymbol{\psi}_i}{\lambda^+ \frac{\Delta t}{\Delta x}} + \mathbf{l}_{i-1} \boldsymbol{\psi}_{i-1},$$

and if $|\mathbf{r}_i| > \epsilon$ and $\frac{\boldsymbol{\psi}_i}{\mathbf{r}_i} > \mathbf{M}$, we compute $\mathbf{l}_i = \frac{\mathbf{M} \mathbf{r}_i}{\boldsymbol{\psi}_i}$. Otherwise, we set $\mathbf{l}_i = 1$, see [1] for an explanation.

In the last step, we compute the solution \mathbf{q}_i^{n+1} by the scheme (2) and repeat the previous two steps, then we accept the solution.

For the backward step a similar procedure is used.

3. Sod's shock tube problem

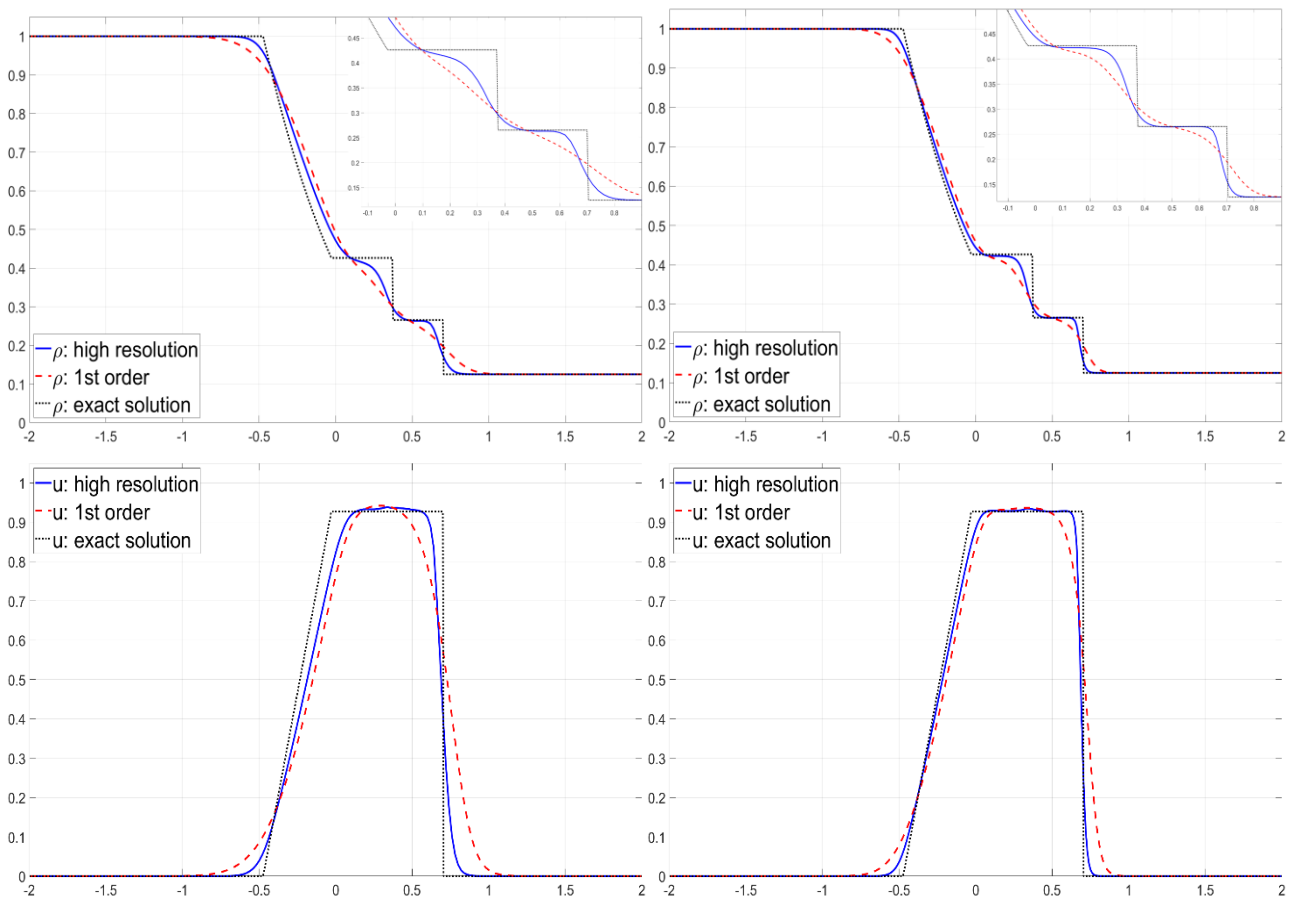
We solve this numerical experiment to test the ability of the scheme to solve the shock wave, rarefaction wave and contact discontinuity. The problem is a special case of the Riemann problem.

The shock tube is filled with the same gas at different pressures and densities separated by a membrane. At the initial time, the membrane is ruptured. The solution consists of the shock wave moving into the part at lower pressure, and the rarefaction wave is moving into the part at higher pressure. The interface between gas states is the contact discontinuity.

The tube length is defined by $L = 4$, and the centre of the tube is situated in $x = 0$, where the membrane is placed. We solved this numerical experiment with two different meshes with $I = 200,400$. The number of time steps is $N = 20,40$, and the final time is $t^N = 0.4$. The maximal Courant number is $C = 2.2$. The initial condition is set as follows

$$(\rho^0, u^0, E^0) = \begin{cases} (1, 0, 2.5) & \text{if } x \leq 0, \\ (0.125, 0, 0.25) & \text{if } x > 0. \end{cases}$$

The solution is compared with the solution obtained by the first order implicit numerical scheme and with the exact solution obtained from [5].



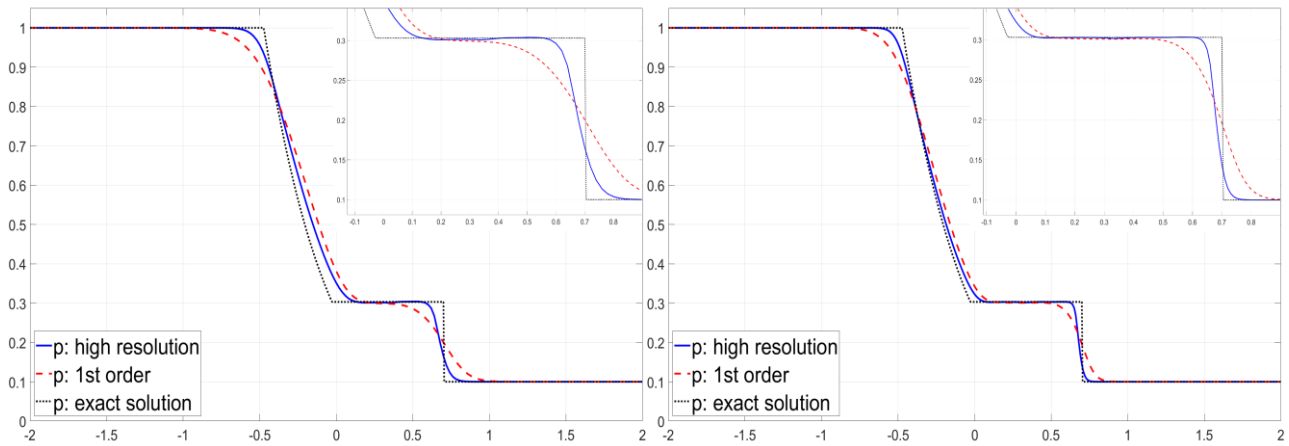


Figure 1: The solution of Sod's shock tube problem obtained by the high resolution scheme and by the first order implicit scheme compared with the exact solution. The left column represents the solution for $I = 200$, and the right column represents the solution for $I = 400$. The first row is for density ρ , the second is for velocity u , and the last is for pressure p .

The figure (1) shows that the high resolution scheme reached better results across all variables. For the density, the challenging part is around $x = 0.5$, where is the contact discontinuity and shock wave. For the coarse grid, the solution obtained by the first order scheme is very smoothed, and the high resolution scheme makes the solution closer to the exact solution. The solution for the velocity consists of the shock wave on the right and the rarefaction wave on the left, and the high resolution scheme nicely catches both waves. The solution for the pressure has a similar profile as for the density but without contact discontinuity. The solution is again closer to the exact solution for the high resolution scheme.

4. Conclusions

In this paper, we solved the Euler equations in 1D by using the high resolution compact implicit numerical scheme. The results for Sod's shock tube problem are compared with the exact solution and the first order method. The compact implicit scheme reached higher accuracy without significant oscillations using the predictor-corrector method. For the final results, we used two corrector steps. The scheme does not have any restrictions for the time step size due to stability, and the resulting system of equations consists of the same number of unknowns as the number of unknowns in the system of partial differential equations.

5. References

- [1] FROLKOVIČ, P., and ŽERAVÝ, M. High resolution compact implicit numerical scheme for conservation laws. *ArXiv:2206.09425 [math, NA]*, Submitted to Elsevier, URL <https://arxiv.org/abs/2206.09425>
- [2] LEVEQUE, R. J. Finite volume methods for hyperbolic problems, Vol. 31, Cambridge university press (2002)
- [3] LOZANO, E., and ASLAM, T. D. Implicit fast sweeping method for hyperbolic systems of conservation laws. *Journal of Computational Physics* 430

(2021), 110039.

[4] SHU, C.-W. Essentially non-oscillatory and weighted essentially non-oscillatory schemes for hyperbolic conservation laws. *In: Advanced Numerical Approximation of Nonlinear Hyperbolic Equations, Lecture Notes in Mathematics, Springer, Berlin, Heidelberg, 1998*, pp. 325–432.

[5] KETCHESON, D. I., LEVEQUE, R. J., and DEL RAZO, M. J. Riemann Problems and Jupyter Solutions. *Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, 2020*, URL <https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9781611976212>.

BUILDING TECHNOLOGY

Mgr. Maryna Babenko, Ph.D.

Študijný program: technológia stavieb / Building Technology, 2

Research supervisor: prof. RNDr. Igor Medved', Ph.D.

ŠTÚDIUM MIKROŠTRUKTÚRY SLAMY A PERSPEKTÍVY JEJ APLIKÁCIE AKO SUBSTRÁTU PRE STAVEBNÉ MATERIÁLY NA BÁZE MYCÉLIA

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF STRAW AND THE PERSPECTIVE OF ITS APPLICATION AS A SUBSTRATE FOR BUILDING MATERIALS BASED ON MYCELIUM

Abstract

The energetic and environmental challenges of the last decades demonstrated the critical need in the development and wide implementation of bio-based life cycle optimized materials. The vegetative growth of fibrous fungi is a revolutionary low-energy biological production and waste recycling method (mycelium). The application mycelium for rational recycling of agriculture plants waste to design the energy-efficient environmentally friendly construction material is considered as the response to the set challenges. In the presented study microstructure of straw is in the focus. Straw is studied in the context of its applicability as the substrate for mycelium composites. Ununified structure particularities and the discovered microstructure character scoped as the foundation for the composition design and the properties of future material projection.

Kľúčové slová / Key Words

Straw; building materials; agriculture waste; microstructure; mycelium; sustainable development

1. Introduction and literature review

1.1 Modern sustainable requirements for construction materials

The building industry has a significant negative influence on the environment since it uses 40% of the natural resources that are exploited in industrialized nations, consumes 70% of the electricity and 12% of the potable water, and produces 45-65% of the garbage that is disposed of in landfills [1]. Additionally, it is expected to expand as a result of the world population rising to nearly 9.0 billion in 2035 [2]. The reduction of buildings' negative environmental effects is a key concern in this situation.

Considerations including resource degradation and landfill overcrowding highlight the construction industry's enormous influence. Additionally, different building waste streams have a harmful impact on the ecosystem. According to [3] it is impossible to categorize the requirements for sustainable building materials and components as either ecological or economically motivated. Based on [4] locally sourced materials must be used in sustainable buildings in order to reduce transportation distances and, consequently, greenhouse gas emissions, as well as to boost the local economy. The use of alternative, recycled, natural, and unconventional construction materials as well as thermal insulation materials will expand, contributing to the sustainability of the built environment [5]. The application of the green building concept relies heavily on the choice of commercially available building materials made during the working plan stage of the design

process, particularly in Europe where micro-scale intervention work is frequently done because of the region's large stock of existing structures [6].

1.2 Agriculture plant waste in buildings

Vegetable-based ecological construction products are becoming more ubiquitous. Because their use enables the revaluation of agricultural wastes, whose disposal is a massive problem, they can play a significant role [7]. Compared to those made from artificial raw materials, construction elements made from natural raw materials use less energy [8].

A lignocellulosic biomass substance known as straw is a by-product of the production of agricultural crops and contains primarily 35–50% cellulose, 15–30% hemicellulose, and 20–30% lignin. The majority of its current farm applications are for animal bedding and feeding. However, a significant portion of the generated straw is left in the field to be distributed or burned, which is not without cause raising environmental worries in many regions [9]. It has been demonstrated that agricultural plant wastes have good thermal and mechanical qualities. Because these materials are inexpensive, using them enhances comfort, which promotes social and economic sustainability [10]. Straw is one of the most frequently applied agricultural products in the world. Since straw is an organic and widely available material, it does not involve complex transportation [11]. Even though agricultural waste only accounts for 1% of all waste produced, it can still be used efficiently and inexpensively because it is so available. Agricultural wastes' thermal conductivity is comparable to that of modern thermal insulation materials including mineral wool, polystyrene, and polyurethane. To attain heat resistance comparable to that of traditional insulation, an increase in thickness might be required [12].

Straw (*T. Aestivum*), jute, hemp, sisal, kenaf, coir, flax, bamboo, pineapple, and banana are examples of plant-based natural fibers [13]. The most spread plant agriculture waste fibers are origin of wheat, hemp, flax cultivation [14].

Wheat straw is a by-product of agriculture made from various components of the wheat plant, including the stem and leaves. The key ingredients are cellulose, hemicellulose, and lignin. Nodes, internodes, and leaves are the three primary elements of wheat straw. According to a chemical examination of wheat straw, it contains significant amounts of proteins, minerals (calcium and phosphorus), silica, fibers from acid detergents, ash, and carbohydrate compounds (cellulose, hemicellulose, and lignin) [15].

Hemp (*Cannabis sativa*) is a niche crop, cultivated on 25,000 ha in the European Union (2015). Because of its unique properties, particularly its environmental benefits and the high yield of natural technical fibres, hemp is a valuable crop for the bio-based economy. The hemp shivs, the woody inner core of the stem, are used for animal bedding and construction [16]. Due to its superior antibacterial resistance, high fiber yield without fertilizer, and consistent growth under a variety of agro-ecological situations, hemp shivs has garnered interest. According to the study [17], the amount of lignin and the mechanical characteristics of the fiber cell wall are significantly influenced by the sex of the plant.

The primary by-product of the flax (*Linum usitatissimum*) scutching business, flax shives make up about 50% of the weight of dry flax stems. Flax shives are an intriguing choice for thermoplastic composite reinforcing since they are a readily available and low-value lignocellulosic resource [18]. After minor adjustments, flax, which is 100% natural and renewable waste from the agricultural sector, can be widely employed as sustainable building insulation [19].

1.3 Mycellium materials engineering

The world's largest living organism on the planet is mycelium, according to research. It develops tangled networks of branching fibers as a result of its symbiotic relationship with the substances

that need it [20]. Mycelium is a natural polymeric composite fiber substance since it mostly consists of natural polymers including chitin, cellulose, proteins, etc. [21]. Mycelia use physical pressure and enzymatic secretion to break down biological polymers into nutrients that can be transported and absorbed easily, such sugars [22]. There are two different ways to grow mycelium-based materials: either by harvesting a liquid culture of mycelium or by taking advantage of the ability of mycelium to interlock other substances within its network to generate a bulk material. A specific strain of fungi is inoculated into an organic substrate to create mycelium-based composites. The vegetative mycelium breaks down and colonizes the organic substrate, extending its hyphae from the tip and branching new hyphae and fusing them together to form a denser network while feeding on the breakdown products [23]. The substrate should supply the needed nutrients for the mycelium to grow, including water, the most important of all, as well as carbon (such as glucose or fructose), nitrogen, minerals, and vitamins. For this reason, the substrate should be prepared by adding the appropriate amount of water. Agricultural waste streams like wheat or rice straw, sawdust from wood, or other fibers like flax and cotton can also be used as substrate-appropriate media. The final product's technical and experiential aspects are greatly influenced by the substrate type selected [24].

In this study the properties and structure of straw as the substrate for mycelium-based composite is in the focus.

2. Results and discussion

The initial study of the basic technical properties of the substrate for the mycelium-based composite has been realized on the base of literature review and laboratory check of the locally available resources. The results are reflected in *Table 1* [25, 26].

Table 1: Characteristics of straw substrates for mycelium-based composite.

Origin of straw	Bulk density, [kg/m ³]	Fraction, [mm]	Coefficient of thermal conductivity, [W/mK]
Wheat	90 - 110	10 - 25	0.045 – 0.05
Hemp	70 – 90	10 - 15	0.048 – 0.06
Flax	65 - 80	5 - 15	0.04 – 0.057

SEM analysis (microscope VEGA 3 SBU, TESCAN) has been done on the exterior and interior surfaces (Figure 1) of the wheat straw particles (as the most spread locally). SEM images show that various straws have openings that are 0.3-2.5 μm wide and have slits that range in length from 3 to 25 μm. The particles of straw appear to have smoother skin. This characteristic has a negative impact on the pull-out resistance of fibers. A higher adherence with the binder matrix (cement, lime, etc.) and, as a result, a better mechanical resistance, are both facilitated by the fiber's roughness. Also detected is the presence of contaminants from the storage environment on the skin of the various straws and inclusion of the remains of pollen are visible on the scanning.

The cross sections of the various straw fibers are shown in Figure 2. These pictures display an intricate structure with a texture that is nearly identical. It consists of sclerenchyma, parenchyma rings, and vascular bundles embedded in the parenchyma from the outside in. The cross sections of the various straw fibers have an external structure that is quite dense and varies in thickness (between 75 and 150 μm), followed by an interior structure that is very porous. Vessels in the porous structure are hexagonal. Near the center of the straw particle, their numbers gradually

decine. These vessels range in diameter from 5 to 25 μm . The vascular bundle's pores were dispersed, and an agglomeration of tiny cells was visible on the outer surface of the microstructure.

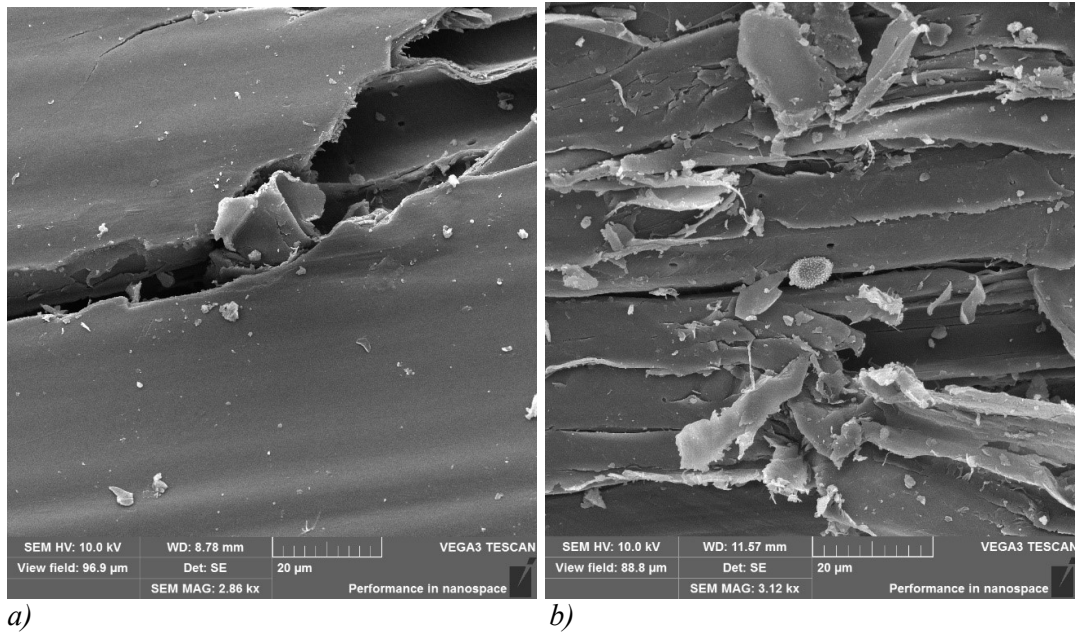


Figure 1: Outside surfaces (a) and inside surfaces (b) of the straw fibers.

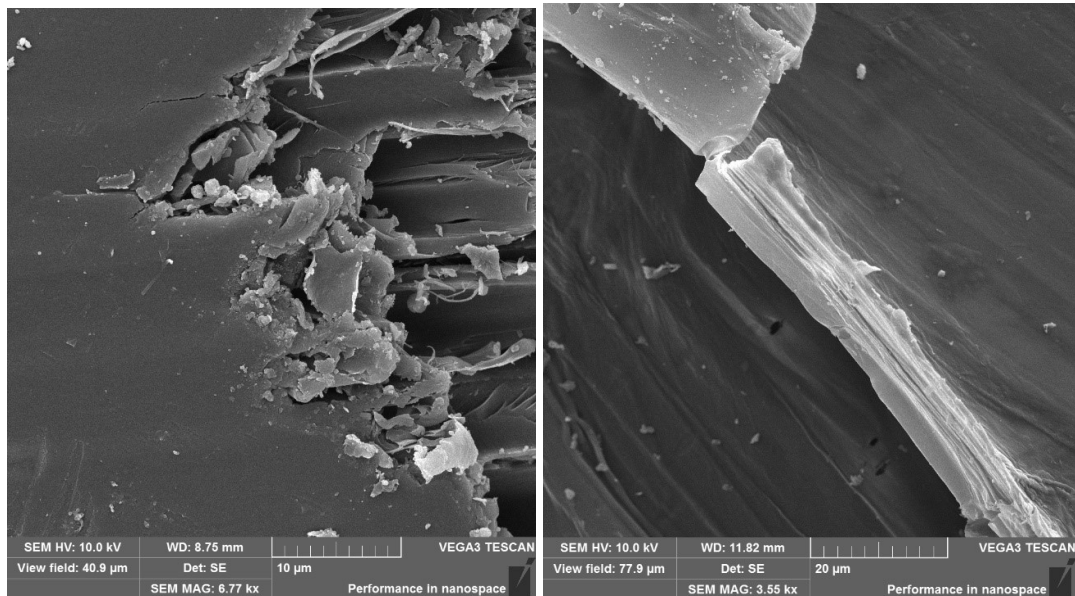


Figure 2: Cross sections of the straw fibers.

Conclusions

The study has shown the necessity of the considering the difference in the outside and inside surfaces of the straw fibre and required additional measures to ensure the needed adherence considering smooth inner side. Additional purifying of the straw before application in the composite will allow to avoid contaminants from the storage environment and the remains of pollen.

Literature

- [1] Castro-Lacouture D, Sefair JA, Florez L, Medaglia AL. Optimization model for the selection of materials using a LEEDbased green building rating system in Colombia. *Build Environ* 2009;44:1162–1170.
- [2] Dixit MK, Fernandez-Solis JL, Lavy S, Culp CH. Identification of parameters for embodied energy measurement: a literature review. *Energ Build* 2010;42:1238–1247.
- [3] <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB14275.pdf>
- [4] Sikora, Karol. (2019). The emerging trends in sustainable construction materials.
- [5] Angeliki Kylili, Paris A. Fokaides, Policy trends for the sustainability assessment of construction materials: A review, *Sustainable Cities and Society*, Volume 35, 2017, pp. 280-288, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.013>
- [6] Elisa Franzoni, Materials Selection for Green Buildings: which Tools for Engineers and Architects?, *Procedia Engineering*, Volume 21, 2011, pp. 883-890, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2090>
- [7] Lorindo Gaspar, Aliaksandr Bakatovich, Nadezhda Davydenko, Arpan Joshi, *Building insulation materials based on agricultural wastes*, Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction, Woodhead Publishing, 2020, pp. 149-170, ISBN 9780128194812, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8>
- [8] EC, COM(2011) 112, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social committee and the committee of the regions of 8 March 2011. "A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050". Brussels, (2008).
- [9] Masłowski, M., Miedzianowska, J. & Strzelec, K. The potential application of cereal straw as a bio-filler for elastomer composites. *Polym. Bull.* 77, 2021–2038 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02848-2>
- [10] Maraveas, C.: Production of sustainable construction materials using agro-wastes. *Materials* 13(2), 262 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13020262>
- [11] Cascone, S., Rapisarda, R., Cascone, D.: Physical properties of straw bales as a construction material: a review. *Sustainability* 11(12), 3388 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11123388>
- [12] Vilaboa Díaz, A., Francisco López, A. & Bello Bugallo, P.M. Analysis of Biowaste-Based Materials in the Construction Sector: Evaluation of Thermal Behaviour and Life Cycle Assessment (LCA). *Waste Biomass Valor* (2022). <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01820-y>
- [13] Sanjay M, Yogesha B (2017) Studies on natural/glass fiber reinforced polymer hybrid composites: an evolution. In: *Materials today: proceedings*, pp 2739–2747
- [14] Balador, Zahra & Gjerde, Morten & Isaacs, Nigel & Imani, Negin. (2018). Thermal and Acoustic Building Insulations from Agricultural Wastes. 10.1007/978-3-319-68255-6_190. \
- [15] Khan, Tehmina & Mubeen, Umarah. (2012). Wheat Straw: A pragmatic overview. *Current Research Journal of Biological Sciences*. 6. 673–675.
- [16] Carus, Michael, and Luis Sarmiento. "The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs, seeds and flowers." *European Industrial Hemp Association* 5 (2016): 1-9.
- [17] Li, Xiaoping & Du, Guanben & Wang, Siqun & Meng, Yujie. (2015). Influence of Gender on the Mechanical and Physical Properties of Hemp Shiv Fiber Cell Wall in Dioecious Hemp Plant. *Bioresources*. 10. 2281-2288. 10.15376/biores.10.2.2281-2288.
- [18] Ucile Nuez, Johnny Beaugrand, Darshil U. Shah, Claire Mayer-Laigle, Alain Bourmaud, Pierre D'Arras, Christophe Baley, The potential of flax shives as reinforcements for injection

- moulded polypropylene composites, *Industrial Crops and Products*, Volume 148, 2020, 112324, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112324>.
- [19] Babenko, Maryna & Estokova, Adriana & Savytskyi, Mykola & Unčík, Stanislav. (2018). Study of Thermal Properties of Lightweight Insulation Made of Flax Straw. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 26. 9-14. 10.2478/sjce-2018-0008.
- [20] Gutmanis, I. Probability of the Nanotechnology Manufacturing Processes in the Industrial Nations in 2015-2025 time period. (Report of Hobe Corporation, 1999).
- [21] Bonfante, P. & Genre, A. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications* 1, doi: 10.1038/ncomms1046 (2010).
- [22] Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C. et al. Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Sci Rep* 7, 41292 (2017). <https://doi.org/10.1038/srep41292>
- [23] Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., HerediaGuerrero, J. A., & Athanassiou, A. (2017). Advanced materials from fungal mycelium: Fabrication and tuning of physical properties. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/srep41292>
- [24] Karana, E., Blauwhoff, D., Hultink, E., & Camere, S. 2018 Aug 30. When the Material Grows: A Case Study on Designing (with) Mycelium-based Materials. *International Journal of Design* [Online] 12:2. Available: <http://ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/2918>
- [25] Babenko, M. V., U. B. Benderskiy, and M. V. Savytskyi. "Органічні заповнювачі з місцевих матеріалів для легких бетонів у екологічному малоповерховому будівництві." *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* 1-2 (2013): 69-71.
- [26] Savytskyi, M., et al. "Integrated use of agricultural waste for the sustainable development of agricultural socio-eco-complexes as closed ecosystem." *Constr Mater Sci Mech Eng* 82 (2015): 179-186.

Terézia Cabanová

Študijný program: Technológia stavieb, 4.ročník

SPEKTRÁLNA ANALÝZA TERMO-OPTICKÝCH PARAMETROV TRANSPARENTNÝCH FASÁDNYCH PRVKOV S APLIKOVANÝM PCM

SPECTRAL ANALYSIS OF THERMO-OPTICAL PARAMETERS OF TRANSPARENT FACADE ELEMENTS WITH APPLIED PCM

Abstract

Research in the field of adaptive technologies using the thermal energy accumulation system in transparent facade systems represents one of the potential but challenging solutions for reducing the energy demand of buildings. An optimally designed system with an applied phase change material (PCM) can be a potential technology for passive solar system applications. The key factor is to find the right combination of thermal and optical properties of PCM material that responds appropriately to changing boundary conditions and solar radiation as an energy source. This contribution focuses on the analysis of the effect of PCM in innovative construction elements of the building envelope and is based on a previous study dealing with the radiation transmission through a glass element with implemented PCM. The goal was to specify changes in PCM transparency, influenced by the phase transformation of the material due to the accumulation of thermal energy received from solar radiation.

Kľúčové slová

Materiály s fázovou zmenou; latentné teplo; viditeľné spektrum svetla; solárny simulátor.

1. Úvod

Vzhľadom na znižovanie zdrojov fosílnych palív v dôsledku zvyšujúcej sa spotreby energie sa v posledných rokoch kladie dôraz úsporu energie a hľadajú sa nové metódy schopné využívať obnoviteľné zdroje energie [1, 2]. V súčasnosti je výrazným architektonickým prvkom transparentná fasáda, kde však vznikajú nedostatky v dôsledku nízkej tepelnej zotrvačnosti, tepelných strát, nadmerného prehrievania a oslnenia vnútorného prostredia [3]. Tie z dlhodobého hľadiska nedosahujú adekvátne dynamické parametre, avšak majú veľký potenciál pri využívaní slnečného žiarenia ako zdroja energie [4]. V dnešnej dobe existuje už množstvo inteligentných fasádnych systémov, ktoré sú schopné adaptovať sa a reagovať na vplyvy vonkajšieho prostredia. Stále je však potrebné hľadať efektívne riešenia pre zlepšenie existujúcich technológií, ktoré by zaistili dynamicky reagujúce systémy na špecifické aspekty okolitého prostredia [5]. Cieľom je teda nájsť nové koncepcie znižujúce energetickú náročnosť budov s vysokou úrovňou využitia obnoviteľných zdrojov energie.

Sklo ako také nemá schopnosť akumulovať tepelnú energiu prijatú zo slnečného žiarenia a veľkú jeho časť prepúšťa do vnútorného prostredia. Dynamické izolačné systémy môžu meniť tepelnú priestupnosť plášťa za pomoci materiálu reagujúceho na obnoviteľné zdroje energie [6]. Transparentné fasádne systémy s integrovaným materiálom s fázovou zmenou (PCM) predstavujú vhodné riešenie, ktoré môže zlepšiť energetickú hospodárnosť budovy vďaka akumulácii a následnému uvoľneniu prijatej energie [8]. Hlavnou charakteristikou týchto materiálov je schopnosť reagovať na energiu vo forme tepla prijatého z vonkajšieho prostredia a v závislosti od toho meniť

svoje fyzikálne vlastnosti. Preto je dôležité zvoliť PCM s vhodnou teplotou topenia/tuhnutia vzhľadom na klimatickú oblasť použitia. Návrh optimálneho dynamického systému si vyžaduje komplexný návrh systému, ktorý zohľadňuje všetky faktory okrajových podmienok a dynamiku technológie využívajúcej PCM [9].

Mnohé doterajšie štúdie sa venovali využitiu PCM v sklenených prvkoch s cieľom dosiahnuť optimálnu konfiguráciu a funkčnosť tohto pasívneho solárneho systému. Aj napriek dlhoročnému skúmaniu existuje stále mnoho aspektov, ktoré vyžadujú ďalšiu analýzu a výskum. Veľká väčšina výsledkov výskumu dokazujúcich účinnosť zasklenia s implementovaným PCM bola objasnená v teplých klimatických podmienkach [10, 11]. Tepelná účinnosť transparentných prvkov s PCM bola obširne skúmaná z hľadiska rôznych termo-fyzikálnych vlastností, hrúbky vrstvy, teploty topenia PCM a optických vlastností [12, 13]. Analýze optických vlastností skleneného systému s PCM sa vo výskume venoval Goia et al., kde sa použila metóda spektrálneho a uhlového správania rôznych vzoriek PCM a hrúbok zasklenia [14]. Vzorky pozostávajúce z dvojitého zasklenia boli vyplnené PCM s rôznymi teplotami topenia na zabezpečenie konštantného stavu, vzhľadom na okolitú teplotu prostredia. Optické charakteristiky parafínových voskov boli teda počas merania stále zachované. Účelom bolo popísať vlastnosti PCM v pevnom stave, v ktorom dominuje predovšetkým difúzne správanie. Z tohto dôvodu bolo meranie spektrofotometrom doplnené o špeciálne optické testovacie lôžko, ktoré obsahovalo veľkú integrujúcu guľu s priemerom 0,75 m. Výsledky ukázali, že štúdium dynamických systémov si vyžaduje použitie nekonvenčných metodík a zložitejších procesov na rôznych úrovniach. Zistilo sa, že proces tuhnutia/tavenia sú ovplyvnené rôznymi faktormi prostredia, ktoré neustále menia svoj charakter. To môže viesť k rôznym výstupom tej istej vzorky s PCM v každom cykle. Preto je dôležité zvoliť vhodnú veľkosť lúča zdroja žiarenia a opakovateľnosť merania s meniacimi sa fázami. Taktiež vo svojom výskume objasnil, že väčšina štúdií týkajúcich sa problému zasklenia s PCM je experimentálna, pretože simulácia takéhoto systému je veľmi zložitá a vyžaduje zber vstupných údajov o systéme. Pre numerické analýzy systému PCM okien je podstatné presne určiť nielen tepelné, ale aj optické vlastnosti v pevnom, kvapalnom a prechodnom stave [14]. Naopak optickým vlastnostiam v kvapalnom stave sa venoval Li a spol. [15], ktorí navrhli novú inverznú metódu pomocou spektrofotometrie. Analyzovalo sa spektrum priepustnosti dvojskla na báze parafínu v tekutom stave, kde sa menila hrúbka PCM vrstvy. Kľúčovým zistením bolo, že priepustnosť klesala so zvyšujúcou sa hrúbkou parafínovej vrstvy. Absorpcia tepelnej energie však bola väčšia s hrubšou vrstvou tekutého parafínu. Heim a kol. [16] skúmali meniace sa účinky priepustnosti komplexného fázového prechodu PCM v priebehu času pri rôznych podmienkach žiarenia. Venovali sa tiež analýze závislosti optických vlastností od umiestnenia PCM vrstvy medzi sklenenými tabuľami vzhľadom na dve dutiny skleneného systému. Pozoroval sa významný rozdiel medzi pevnými a kvapalnými hodnotami. Vysoký difúzny efekt s veľmi nízkou priepustnosťou sa prejavil v pevnom skupenstve, zatiaľ čo v kvapalnom stave predstavoval PCM vysoké hodnoty priepustnosti. Dôležitým zistením bolo, že dynamika topenia PCM závisí od intenzity žiarenia a od umiestnenia PCM v zasklení vzhľadom na polohu svetelného zdroja.

Hlavným cieľom je nájsť vhodnú metódu meraní optických vlastností, ktoré prinesú spoľahlivé výsledky pre efektívne využitie a návrh pasívneho solárneho systému s použitím PCM. Ide o zložitý systém, ktorý dynamicky mení svoje termo-optické vlastnosti v závislosti od okrajových podmienok [17]. Takýto experimentálny prístup si vyžaduje použitie zdroja, ktorý poskytuje ožiarenie približujúce sa prirodzenému slnečnému žiareniu za kontrolovaných a opakovateľných laboratórnych podmienok. Merania teda vyžadujú špecifické parametre použitých meracích aparátov ako je vhodné spektrum vlnových dĺžok zdroja žiarenia, intenzita, stálosť/stabilita, životnosť a podobne [17, 18].

2. Metodika práce

Pri návrhu adaptívneho systému je potrebné brať do úvahy viacero faktorov z hľadiska schopnosti prispôbiť sa premenlivým ovplyvňujúcim okrajovým podmienkam. Súvislosť medzi optickými a

tepelnými vlastnosťami je premenlivá v závislosti od množstva akumulovanej tepelnej energie v určitom časovom rozmedzí a bola podrobne analyzovaná experimentálnymi meraniami. Experimenty boli realizované v laboratóriu s umelým zdrojom svetla a na fasáde reálnej budovy pod vplyvom skutočného slnečného žiarenia. Ako priehľadné prvky boli použité čire sklenené tvárnice plnené vrstvou PCM pozostávajúcou z komerčne dostupného parafínu RT27 Rubitherm GmbH (teplota topenia 25-28 °C a tepelná akumulácia kapacita 179 kJ/kg).

Experimentálna metóda pozostávala z meraní intenzity a priepustnosti viditeľného spektra pomocou spektrometra na vzorkách v rôznom fázovom stave PCM. Princíp merania spektrofotometriou je založený na analýze odrazeného, absorbovaného a prepusteného žiarenia v určitom rozsahu vlnových dĺžok. Skúmali sa termo-optické parametre sklenených vzoriek naplnených parafínovým voskom pomocou spektrometra FLAME-S-VIS-NIR-ES so spektrálnym rozsahom 320 – 1000 nm. Priepustnosť sa analyzovala a vyhodnocovala v rozmedzí 360-880 nm v úrovni viditeľného spektra svetla. Pri meraní bol použitý volfrámový halogénový svetelný zdroj HL-2000-HP-FHSA s komponentmi potrebnými na uskutočnenie experimentu. Táto metóda bola postačujúca len pre úplne priehľadné vzorky, pretože v prípade účinku difúzie pri kryštalizácii materiálu došlo k rozptylu svetelného lúča a nebolo možné zachytiť priepustnosť svetla (Obr.1). Priepustnosť pevného stavu parafínu teda nebolo možné zmerať v dôsledku úzkeho lúča svetelného zdroja. Vzorky pozostávali zo sklenej tvarovky naplnenej parafínom v tekutom stave (ST-PCM) a komparačnými vzorkami, prázdnej tvarovky (ST-A) a tvarovky naplnenej vodou (ST-H₂O). Počas merania sa jednotlivé uložili do stojana napojeného na meraciu zostavu, kde sa následne pomocou spektrometra analyzovala priepustnosť vzoriek.



Obrázok 1: Štruktúra prechodnej fázy kryštalizácie parafínu

Pri efekte difúzie, ako bolo spomenuté, je v experimente potrebné použiť zdroj difúzneho svetla na báze solárneho simulátora alebo prirodzeného slnka. Z toho dôvodu bol vyrobený tmavý box s rozmermi 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m a otvorom na uloženie vzoriek v prednej časti smerujúcej do exteriéru s rozmerom 0,2 m x 0,2 m (Obr.2). V boxe bol nainštalovaný spektrometer, prístroj na meranie optického žiarenia MSC 15 od firmy Gigahertz-Optics GmbH a kosínusové korektorové CC-3-UV-S senzory merajúce optické parametre, tepelné senzory a pyranometer Ahlborn Almemo FLA 623 GS na meranie intenzity prenášaného slnečného žiarenia. Snímač teploty spolu s pyranometrom FLA 623 s rozsahom vlnových dĺžok 400 – 1100 nm boli umiestnené aj na vonkajšiu stranu krytu škatule. Vo fasádnej dutine bol umiestnený tretí pyranometer so spektrálnym rozsahom 320 – 2500 nm, ktorý meral celkové prirodzené slnečné žiarenie.

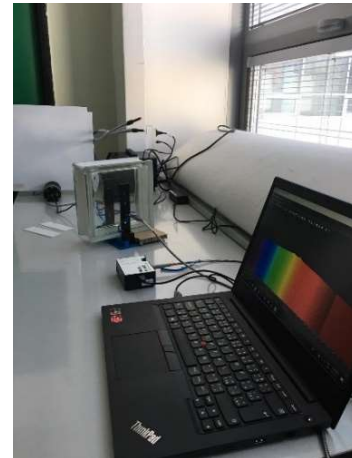
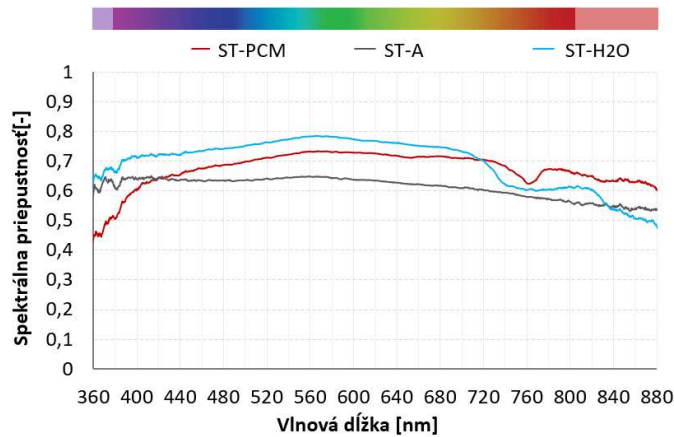


Obrázok 2: Zhotovený tmavý box s umiestnenou vzorkou vystavenou priamemu slnečnému žiareniu

V priebehu meraní bolo prevažne slnečné počasie s vysokými vonkajšími teplotami. Hlavným cieľom bolo sledovať priebeh priepustnosti slnečného žiarenia počas fázovej premeny vrstvy PCM v sklenenom bloku. Po dosiahnutí bodu topenia nastal v časovom horizonte približne 2 – 3 hodiny proces postupnej zmeny z tuhej látky na kvapalnú. So zvyšujúcou sa časťou vrstvy kvapaliny bola pozorovaná zvýšená priepustnosť žiarenia. Počas dňa meranie prebieha od 11:00 do 17:00. Pomocou spektrometra sa údaje merali každých 30 minút v rozsahu.

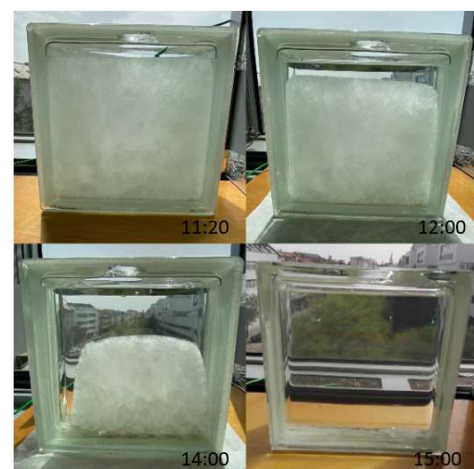
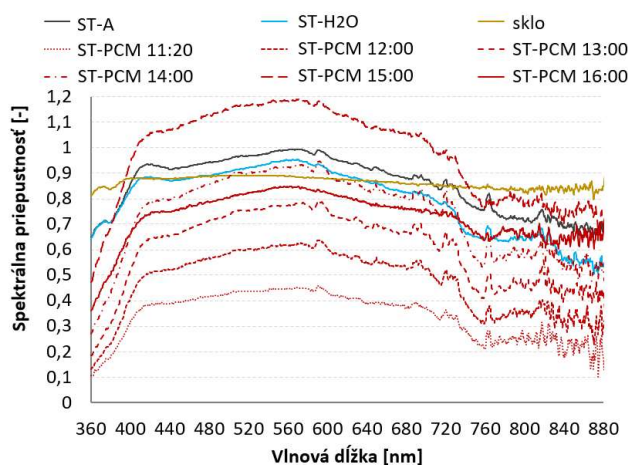
3. Výsledné hodnoty experimentu

V doteraz uskutočnených experimentoch bola použitá metóda založená na meraní intenzity a priepustnosti viditeľného spektra pomocou spektrometra na vzorkách v rôznych fázových stavoch PCM [19]. Vzhľadom na to, že výskum s použitím halogénového zdroja žiarenia neposkytol relevantné výsledky priamej priepustnosti svetla v pevnom a kašovitom stave je potrebné v ďalších meraniach použiť zdroje žiarenia s optimálnymi vlastnosťami. Výsledné hodnoty priepustnosti, ktoré možno brať do úvahy sa ukázali len pri kvapalnom stave parafínovej vrstvy, avšak v prechodovej a pevnej fáze prevládal rozptyl svetla a pomerne rýchly nástup kryštalizácie v parafínovej vrstve generoval minimálne, dokonca až nulové hodnoty priepustnosti, napriek viditeľnej priehľadnosti vrstvy. Výsledky komparačným vzoriek ukázali, že v porovnaní s ST-A mala priepustnosť sklenej tvarovky naplnenej parafínom v kvapalnom stave dokonca vyššiu priepustnosť, čo bolo spôsobené vyšším pomerom odrazu svetla v dutine prázdnej tvarovky a naopak menšieho lomu svetla v naplnenej tvarovke. Je preto potrebné komplexne identifikovať vzájomné odrazy a lom svetla na jednotlivých vrstvách vzorky charakterizovaných rôznymi fyzikálnymi stavmi. Optické parametre ST-H₂O mali dokonca mierne vyšší priebeh priepustnosti ako ST-PCM (Obr.3).



Obrázok 3: Priebeh spektrálnej priepustnosti transparentných vzoriek v rozsahu viditeľného spektra svetla s využitím halogénového zdroja svetla (vľavo), vzorka s PCM pripojená do zostavy spektrometra (vpravo)

Nasledujúce meranie prebiehalo v pod vplyvom priameho slnečného žiarenia, kde hlavným účelom bolo nadviazať na predošlý výskum a doplniť chýbajúce, resp. neadekvátne údaje v pevnej a prechodovej fáze vrstvy parafínu. Výsledky ukázali, že najnižšie hodnoty priepustnosti boli na začiatku merania (11:20), kedy bol PCM v pevnom stave (Obr. 4). Vplyvom zvyšujúcej sa teploty prostredia sa zvýšila teplota parafínu, kedy sa dosiahol bod topenia a nastal proces akumulácie latentnej energie sprevádzaný fázovou premenou pevného skupenstva na kvapalinu. Od toho sa odvíjala aj zmena priepustnosti, ktorá rástla so zvyšujúcou sa vrstvou kvapalnej vrstvy parafínu. Vrchol dosiahla spektrálna priepustnosť počas úplného rozstavenia medzi 15:00 – 15:30, kedy bola úplne priehľadná. Výsledky dokonca ukázali odchýlku v priepustnosti kvapalného parafínu nad 100%, čo je spôsobené optickými javmi, ako je viacnásobný odraz. Počas procesu kryštalizácie začali hodnoty priepustnosti klesať. Analýza bola spracovaná porovnávacou metódou ako v predošlom výskume, kde vzorky naplnené PCM boli porovnané s prázdnu tvarovkou (ST-A) a tiež tvarovkou vyplnenou vodou (ST-H₂O). V tomto prípade hodnoty ST-A vzorky boli vyššie v porovnaní s ST-H₂O, čo mohol spôsobiť iný zdroj žiarenia. Taktiež pre porovnanie s bežne využívaným transparentným prvkom fasády sa použila sklenená tabuľa, ktorej priebeh priepustnosti bol v celom rozsahu vlnovej dĺžky približne rovnaký.



Obrázok 4: Priebeh priepustnosti svetla transparentných vzoriek s využitím slnka ako zdroja svetla (vľavo), priebeh fázovej premeny vzorky naplnenej parafínovým voskom (vpravo)

4. Záver

Tento príspevok je zameraný na analýzu optickej odozvy sklenej tvarovky s integrovaným V prvej fáze experimentálneho výskumu zameranej na priehľadnosť transparentných vzoriek s PCM boli merania uskutočnené v laboratórnom prostredí s použitím umelého zdroja svetla. Vplyvom náhleho poklesu priepustnosti pri postupnej premene kvapalnej fázy na tuhú fázu sa preukázali minimálne až nulové hodnoty napriek viditeľnej priehľadnosti vzorky. Tento jav bol spôsobený úzkym lúčom zdroja svetelného žiarenia, ktorý umožňuje adekvátne merania len pre priehľadné vzorky. Získané výsledky tiež ukázali, že vzorka tekutého parafínu mala mierne vyššie hodnoty priepustnosti (5-10%) ako prázdna vzorka. Tento jav by sa dal vysvetliť tak, že číra sklenená tvárnica mala vyšší pomer svetelnej odrazivosti, kde treba brať do úvahy aj uhol lomu svetla v skle. Druhá fáza experimentu prebiehala v prostredí, ktoré pozostávalo z tmavej krabice s vyhotoveným otvorom na vzorky. Inštalácia bola aplikovaná do okenného otvoru fasády, kde strana s vloženou vzorkou bola v určitom čase vystavená priamemu slnečnému žiareniu. V tomto prípade boli vyhodnotenú adekvátnejšie výsledky doplnené o parametre priepustnosti pevnej a prechodnej fázy PCM. Možno teda zhodnotiť, že merania splnili predpokladané očakávania a budú využité pre ďalší nadväzujúci výskum. Správne navrhnutý transparentný systém s PCM s ohľadom na všetky okrajové podmienky, by mohol v budúcnosti predstavovať riešenie, ktoré zaistí adaptívnu funkciu obalového plášťa budovy a bude schopný eliminovať nadmernú spotrebu energie budov. Za účelom doplnenia doterajších meraní priepustnosti svetla vo viditeľnom spektre svetla sa v ďalšom výskume plánujú použiť spektrometre so širším rozsahom vlnových dĺžok.

PodĎakovanie

Vedecké práce zaoberajúce sa výskumom aplikácie materiálov s fázovou zmenou do transparentných fasádnych prvkov sú realizované aj vďaka podpore projektov VEGA 1/0680/20 a Programu na podporu mladých výskumníkov.

Literatúra

- [1] WANG, T. et al.: Implications and future direction of greenhouse gas emission mitigation policies in the building sector of China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, roč. 31, s. 520-530, ISSN 1364-0321.
- [2] SHAFAGHAT, A. - KEYVANFAR, A.: Dynamic façades design typologies, technologies, measurement techniques, and physical performances across thermal, optical, ventilation, and electricity generation outlooks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, roč. 167, 112647, ISSN 1364-0321.
- [3] CAPPELLETTI, F. et al.: Passive performance of glazed components in heating and cooling of an open-space office under controlled indoor thermal comfort. *Building and Environment*. 2014, roč. 72, s. 131-144, ISSN 0360-1323.
- [4] GOIA, F. - PERINO, M. - SERRA, V.: Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems. *Energy and Buildings*. 2013, roč. 60, s. 442-452, ISSN 0378-7788.
- [5] STEINMAURER, G. - KRUPA, M. - KEFER, P.: Development of Sensors for Measuring the Enthalpy of PCM Storage Systems. *Energy Procedia*. 2014, roč. 48, s. 440-446, ISSN 1876-6102.
- [6] HAWKINS, E. et al.: Estimating Changes in Global Temperature since the Preindustrial Period. *Bulletin of the American Meteorological Society*. *American Meteorological Society*. 2017, roč. 98 (9), s.1841 - 1856. (10.1175/BAMS-D-16-0007.1).
- [7] CUNHA, S. R. L. - AGUIAR, J. L. B.: Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. *Journal of Energy Storage*. 2020, roč. 27, 101083, ISSN

2552-152X.

- [8] FOKAIDES, P.A. - KYLILI, A. - KALOGIROU, S.A.: Phase change materials (PCMs) integrated into transparent building elements: a review. *Mater Renew Sustain Energy*. 2015, roč. 4(6), ISSN : 2194-1467.
- [9] GOIA, F. et al.: Characterization of the optical properties of a PCM glazing system. *Energy Procedia*. 2012, roč. 30, s. 428-437, ISSN 1876-6102.
- [10] GOIA, F. – PERINO M. – SERRA V.: Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. *Solar Energy*. 2014, roč. 100, s. 217-233, ISSN 0038-092X.
- [11] BIANCO, L. et al.: Thermal and optical characterisation of dynamic shading systems with PCMs through laboratory experimental measurements, *Energy and Buildings*, Volume 163, 2018, Pages 92-110, ISSN 0378-7788.
- [12] LI, D. et al.: Thermal performance of a PCM-filled double-glazing unit with different thermophysical parameters of PCM. *Solar Energy*. 2016, roč. 133, s. 207-220, ISSN 0038-092X.
- [13] LIU, CH., et al.: Effect of PCM thickness and melting temperature on thermal performance of double glazing units. *Journal of Building Engineering*. 2017, roč. 11, 2017, s. 87-95, ISSN 2352-7102.
- [14] GOIA, F. et al.: Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit. *Energy and Buildings*. 2015, roč. 87, s. 302-312, ISSN 0378-7788.
- [15] LI, D. et al.: Optical properties of a liquid paraffin-filled double glazing unit. *Energy and Buildings*. 2015, roč. 108, s. 381-386, ISSN 0378-7788.
- [16] HEIM, D. et al.: Dynamics of Melting Process in Phase Change Material Windows Determined Based on Direct Light Transmission. *Energies*. 2021, roč. 14, s. 721.
- [17] CABANOVA, T. – ČURPEK, J. and ČEKON, M. Research challenges and opportunities in transparent PCM-incorporated systems. *AIP Conference Proceedings*. 2020, roč. 2275, č. 1, s. 020004.
- [18] CABANOVA, T. et al.: Thermo-optical challenges of building envelope systems with phase change materials: Pathways to reliable performance characterization. *CEES international conference*. 2021.
- [19] CABANOVA, T. Experimentálna analýza termo-optických charakteristík transparentných fasádnych systémov s integrovaným PCM. In BISTÁK, A. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 63--67. ISBN 978-80-227-5150-6.

Dominika Húdoková¹

Študijný program: Technológia stavieb, 3. ročník

OVERENIE PARAMETRA *STI* V AKUSTICKOM PROGRAME ODEON

THE VERIFICATION OF *STI* PARAMETER IN THE ACOUSTIC SOFTWARE ODEON

Abstract

In this paper, the software Odeon serves as a tool to simulate eighteen variants of three different classroom setups using various values of Transition order. The main aim was to determine the affection of Transition order on speech intelligibility within acoustic simulations. Whether we confirm or deny this statement it will be important information for our further listening tests for the evaluation of speech intelligibility. The results of simulations were observed numerically, graphically, and by auralisations. Concerning numerical investigation of results, there were no differences between using different values of transition order. However, concerning auralisations, we were able to hear a slight difference in the records, as well as when we evaluated the results graphically it was confirmed that there are some differences in speech intelligibility. These findings should be still verified by means of listening tests in the future.

Kľúčové slová / Key Words

zrozumiteľnosť reči, *STI* index, simulácie, transition order

1. Úvod

Verbálna komunikácia, a teda zrozumiteľnosť reči, hrá dôležitú úlohu v každodennom živote každého z nás. Aktuálnym výskumom v rámci zrozumiteľnosti reči sa zaoberajú odvetvia ako logopédia a audiológia [1], zrozumiteľnosť reči je ďalej dôležitým aspektom v rámci vývoja načúvacích prístrojov a kochleárných implantátov [2], rovnako tak aj v oblasti elektroakustiky a ozvučovacích systémov [3]. V neposlednom rade sa zrozumiteľnosťou reči zaoberá aj priestorová akustika [4].

Spoločným znakom všetkých spomenutých vedných odvetví je fenomén zvaný „*speech perception*“. Z pohľadu priestorovej akustiky a audiológie, „*speech perception*“ môžeme zmerať dvomi typmi posluchového testu. Prvý posluchový test je založený na „každodennej reči“ a obsahuje vety s vecným významom. Vety môžu mať rôznu gramatickú štruktúru [5-7]. Druhý posluchový test sa nazýva Matrix test, je charakteristický fixným poradím slov. Tieto vety môžu mať nezmyselný význam [8-10].

Zrozumiteľnosť reči v miestnosti môže byť detegovaná rôznymi metódami. V minulosti najčastejším spôsobom ako zistili kvalitu zrozumiteľnosti reči v priestore bolo vykonanie posluchového testu in situ. V dnešnej dobe už existujú novšie metódy, ktoré sú založené na meraniach a simuláciách integrovanej impulzovej odozvy, z ktorej vieme odvodiť množstvo akustických parametrov, ktoré vyjadrujú kvalitu zrozumiteľnosti reči, ako napríklad: *D*₅₀, *C*₅₀, *STI*, *STIPA*, *RASTI* [11]. V architektonickom kontexte je zrozumiteľnosť reči preverená meraním in situ

¹ Dominika Húdoková, Ing.

KU Leuven, Faculty of Architecture, Brussels and Ghent Campuses, Belgium
STU Bratislava, Faculty of Civil Engineering, Bratislava, Slovakia

alebo simuláciou v 3D virtuálnom priestore. Simulačné algoritmy sú dostupné a využívané v programoch ako napríklad: CATT Acoustics, Odeon, EASE etc. [12-14].

2. Teória

2.1 Index prenosu reči (STI)

Index prenosu reči *STI* (z ang. Speech Transmission Index) bol navrhnutý T. Houtgastom a H. Steenekenom v roku 1971 [15]. *STI* je veličina na určenie zrozumiteľnosti reči v hluku a dozvuku. Využíva priemerné spektrum hlasu ako signál. Keď dôjde ku skresleniu šumom alebo dozvukom, zmení sa signál a v jeho dôsledku budú viditeľné zmeny v spektrálnych rozdieloch medzi fonémami. Reč možno považovať za sekvenciu foném. Fonéma je najmenší fragment reči [11]. Pôvodne bolo meranie *STI* vykonávané in situ, v súčasnosti vieme *STI* určiť z impulzovej odozvy. Hodnoty *STI* sa pohybujú v škále od 0 do 1 resp. od 0 % do 100 %.

2.2 Simulačné princípy v softvéri Odeon

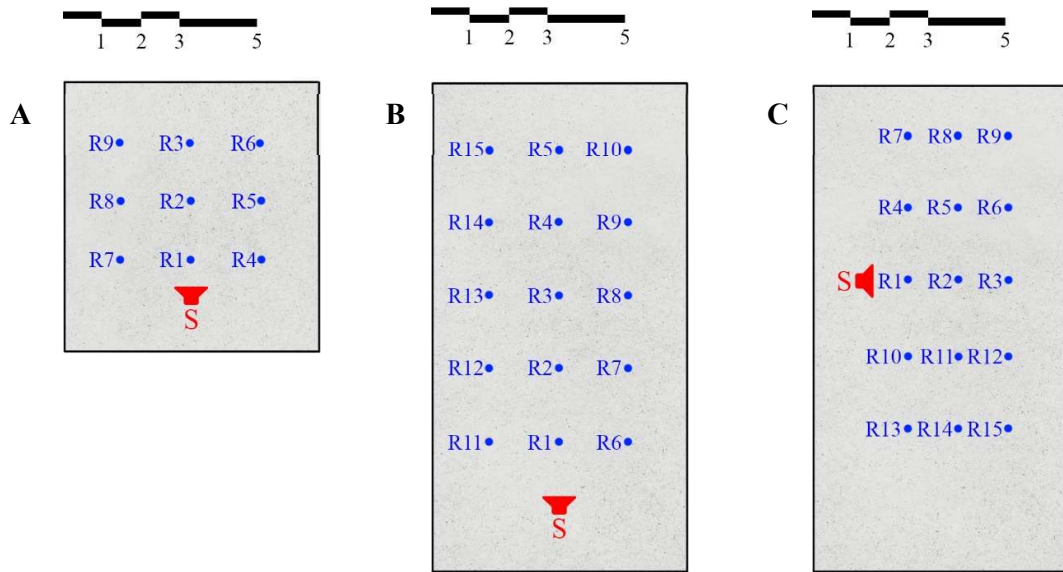
Odeon je založený na lúčovej predikcii, čo znamená že zvuková vlna je prezentovaná ako lúč. Výpočty sú v softvéri Odeon vykonané v energetickej doméne, čo umožňuje dostatočnú a rýchlu predikciu akustiky na architektonické účely. Pre zvýšenie presnosti simulácií môžeme skombinovať rôzne simulačné metódy. Skoré odrazy zvuku sú najčastejšie simulované Metódou zrkadlového zdroja (z ang. Image Source Method - ISM) a tzv. Metódy skorého rozptylu (z ang. Early-Scattering Method - ESM). Na predikciu neskorých odrazov zvuku sa používa Metóda sledovania lúča (z ang. Ray-Tracing Method -RTM) a Radiačná metóda (z ang. Ray-Radiosity Method - RRM). Pre odrazy zvuku v dozvuku (z ang. reverberation tail) sa používajú Receiver-Independent part (Rendering) metóda a Receiver-Dependent part (Gathering) metóda [16].

2.3 „Transition order“

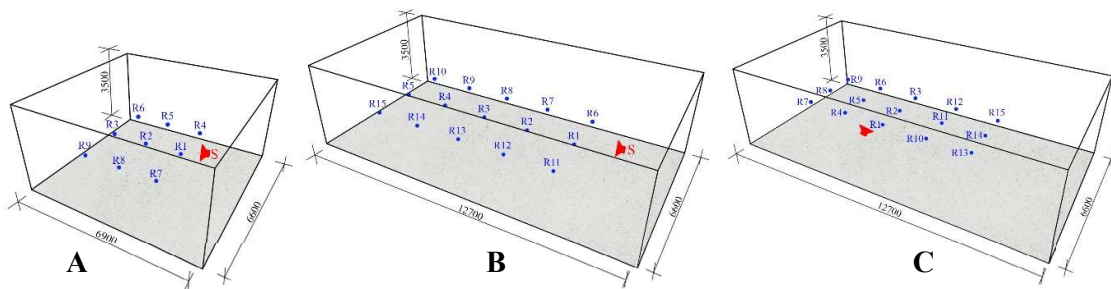
Všetky simulačné metódy sa dokonalo prekrývajú v čase za pomoci nastavenia tzv. „Transition order“ (*TO*). Toto nastavenie spôsobuje dokonalý prechod medzi výpočtovými metódami [17]. Vo všeobecnosti *TO* tvorí pomyselnú hranicu medzi výpočtami skorých a neskorých odrazov zvuku. Hodnotu *TO* meníme vtedy, keď chceme nastaviť kde výpočtové metódy pre skoré odrazy zvuku skončia a kde začnú výpočtové metódy pre neskoré odrazy zvuku. To znamená, že ISM a ESM určujú odrazy od začiatku až po hodnotu *TO*. Práve tieto metódy dosahujú vysokú presnosť v skorých odrazoch zvuku a teda v najdôležitejšej časti celej impulzovej odozvy v ponímaní zrozumiteľnosti reči. Hodnoty *TO* môžeme nastaviť od 0 po hodnotu (počet) zvuk odrážajúcich povrchov. Ak *TO* nastavíme na hodnotu 0, všetky odrazy zvuku sú počítané pomocou RRM.

3. Prípadové štúdie

Zrozumiteľnosť reči bola skúmaná v troch prípadových štúdiách. V (A) malej školskej triede, (B) veľkej, dlhej školskej triede a (C) vo veľkej, širokej školskej triede (Obrázok 1.). Objem *V* malej školskej triedy je 159,4 m³ s rozmermi 6,6 m × 6,9 m × 3,5 m. Obsah a rozmery veľkej, dlhej školskej triedy a veľkej, širokej školskej triedy sú identické, rozdiel je v dispozícií resp. v pozícií prijímača a vysielača zvuku. *V* = 293,4 m³ (6,6 m × 12,7 m × 3,5 m) (Obrázok 2.).



Obrázok 1: Pôdorysy simulovaných prípadových štúdií s vyznačeným zdrojom zvuku „S“ a prijímačov zvuku „R“: (A) malá školská trieda, (B) veľká, dlhá školská trieda, (C) veľká, široká školská trieda.



Obrázok 2: 3D modely simulovaných prípadových štúdií: (A) malá školská trieda, (B) veľká, dlhá školská trieda, (C) veľká, široká školská trieda.

Tieto tri školské triedy boli simulované s dvomi rôznymi hodnotami zvukovej pohltivosti (α), kde $\alpha=0,1$ a $\alpha=0,25$. Každá prípadová štúdia bola simulovaná s nasledovnými nastaveniami TO : $TO=0$; $TO=1$; $TO=2$. V konečnom dôsledku sme spravili osemnásť simulácií (Tabuľka 1).

Table 1: Prehľad simulovaných variantov.

miestnosť	TO=0		TO=1		TO=2	
malá šk. trieda (A)	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$
veľká, dlhá šk. trieda (B)	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$
veľká, široká trieda (C)	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,25$

4. Analýza a výsledky

Výsledky počiatkový čas dozvuku (z ang. Early Decay Time (*EDT*)) a času dozvuku (T_{30}) boli zistené pre všetky simulované varianty. Boli vypočítané ako priemerné hodnoty zo všetkých prijímačov zvuku pre každé frekvenčné pásmo. Tabuľka 2 a Tabuľka 3 ukazujú výsledky *EDT* a T_{30} . Môžeme pozorovať, že sú znateľné len nepatrné rozdiely medzi jednotlivými variantami simulácií resp. medzi nastaveniami *TO* a jeho vplyvu na *EDT* a T_{30} .

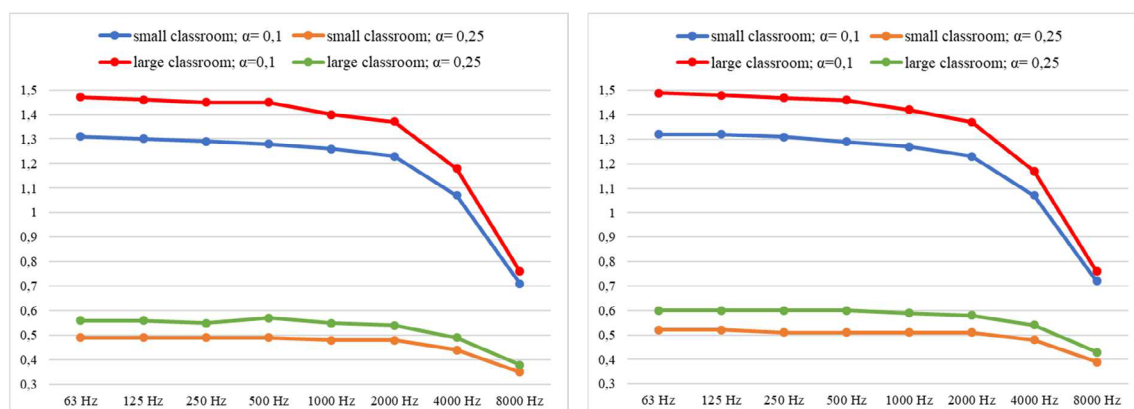
Tabuľka 2: Výsledku *EDT* zo simulácií (sú identické pre všetky varianty *TO*).

miestnosť	α	<i>EDT</i> (s)							
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
A	$\alpha=0,1$	1,31	1,30	1,29	1,28	1,26	1,23	1,07	0,71
A	$\alpha=0,25$	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,44	0,35
B	$\alpha=0,1$	1,46	1,45	1,44	1,44	1,40	1,38	1,18	0,77
B	$\alpha=0,25$	0,55	0,55	0,56	0,55	0,55	0,55	0,50	0,36
C	$\alpha=0,1$	1,47	1,46	1,45	1,45	1,40	1,37	1,18	0,76
C	$\alpha=0,25$	0,56	0,56	0,55	0,57	0,55	0,54	0,49	0,38

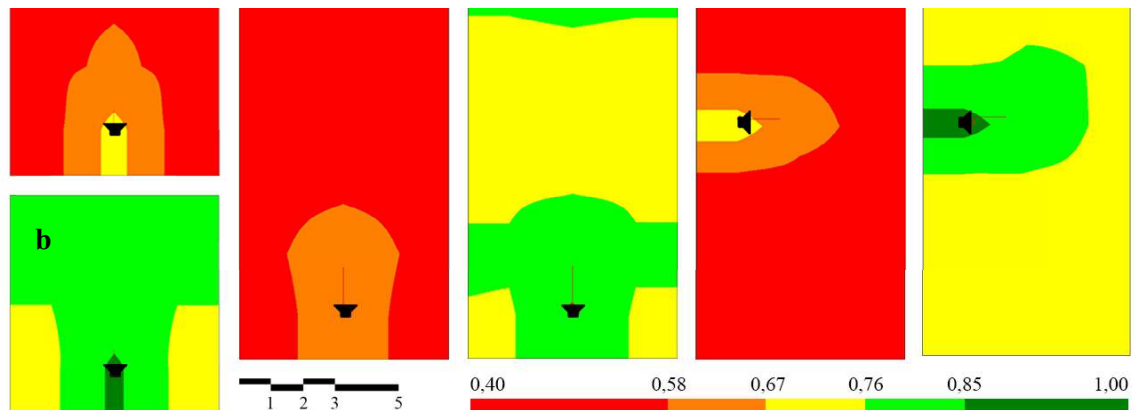
Tabuľka 3: Výsledky T_{30} zo simulácií (sú identické pre všetky varianty *TO*).

miestnosť	α	T_{30} (s)							
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
A	$\alpha=0,1$	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,23	1,07	0,72
A	$\alpha=0,25$	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,48	0,39
B	$\alpha=0,1$	1,49	1,48	1,47	1,46	1,43	1,38	1,17	0,76
B	$\alpha=0,25$	0,61	0,60	0,61	0,60	0,59	0,59	0,55	0,44
C	$\alpha=0,1$	1,49	1,48	1,47	1,46	1,42	1,37	1,17	0,76
C	$\alpha=0,25$	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,54	0,43

Hodnoty *EDT* a T_{30} vo veľkej, dlhej školskej triede a vo veľkej, širokej školskej triede sú si podobné pretože, majú rovnaký objem a povrch. Grafické znázornenie výsledkov *EDT* a T_{30} môžete vidieť na (Obrázok 3.).



Obrázok 3: Graf *EDT* (vľavo), graf T_{30} (vpravo).

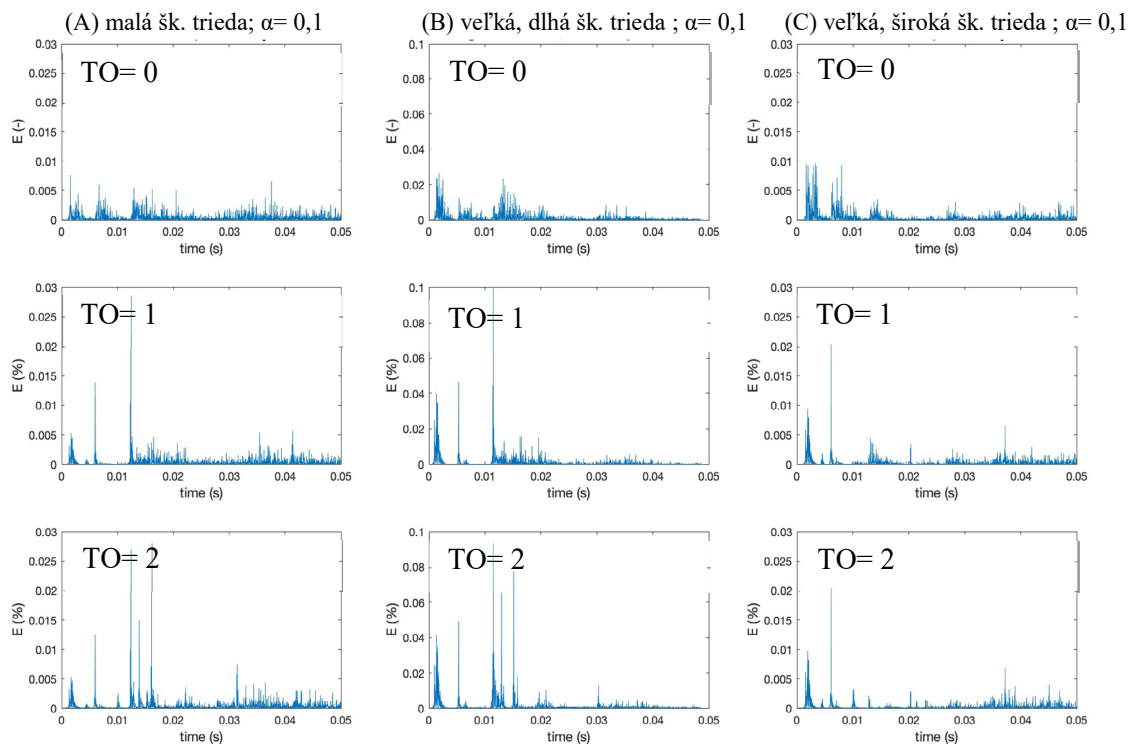


Obrázok 4: STI mapa: a – malá šk. trieda ($\alpha=0,1$); b – malá šk. trieda ($\alpha=0,25$); c – veľká, dlhá šk. trieda ($\alpha=0,1$); d – veľká, dlhá šk. trieda ($\alpha=0,25$); e – veľká, široká šk. trieda ($\alpha=0,1$); f – veľká, široká šk. trieda ($\alpha=0,25$). Každá STI mapa a-f je rovnaká pre TO hodnoty 0; 1; 2.

Pre pozície zdroja zvuku „S“ (pravdepodobná pozícia učiteľa pri vyučovaní) bola spravená detailná numerická analýza parametra STI. V malej školskej triede bolo nasimulovaných deväť a v oboch prípadoch veľkých školských tried pätnásť prijímačov zvuku „R“. Rozmiestnenie prijímačov zvuku a zdroja zvuku môžete vidieť na (Obrázok 1.). Po numerickej analýze parametra STI sme zistili, že nastavenia TO nemajú vplyv na zrozumiteľnosť reči, výsledky si môžete pozrieť v (Tabuľka 4).

Tabuľka 4: Výsledku STI.

malá šk. trieda (A)	STI (TO= 0)	STI (TO= 1)	STI (TO= 2)	d [m]
S – R1 ($\alpha=0,1$)	0,69	0,69	0,69	0,90
S – R3 ($\alpha=0,1$)	0,57	0,58	0,58	3,90
S – R1 ($\alpha=0,25$)	0,87	0,87	0,87	0,90
S – R3 ($\alpha=0,25$)	0,77	0,77	0,77	3,90
veľká, dlhá trieda (B)	STI (TO= 0)	STI (TO= 1)	STI (TO= 2)	d [m]
S – R1 ($\alpha=0,1$)	0,63	0,64	0,64	1,70
S – R8 ($\alpha=0,1$)	0,55	0,55	0,55	3,94
S – R15 ($\alpha=0,1$)	0,57	0,57	0,57	9,47
S – R1 ($\alpha=0,25$)	0,83	0,83	0,83	1,70
S – R8 ($\alpha=0,25$)	0,74	0,74	0,74	3,94
S – R15 ($\alpha=0,25$)	0,76	0,76	0,77	9,47
veľká, široká trieda (C)	STI (TO= 0)	STI (TO= 1)	STI (TO= 2)	d [m]
S – R1 ($\alpha=0,1$)	0,69	0,69	0,69	1,10
S – R9 ($\alpha=0,1$)	0,56	0,56	0,56	5,28
S – R15 ($\alpha=0,1$)	0,54	0,54	0,54	5,28
S – R1 ($\alpha=0,25$)	0,88	0,88	0,87	1,10
S – R9 ($\alpha=0,25$)	0,75	0,74	0,75	5,28
S – R15 ($\alpha=0,25$)	0,73	0,73	0,74	5,28



Obrázok 5: Reflektogramy skorých odrazov zvuku (prvých 50 ms) a TO .

Keď sa pozrieme na reflektogramy zo simulácií (Obrázok 5.), vidíme deväť simulovaných variantov pre $\alpha=0,1$. Reflektogramy sú vytvorené na základe simulovanej impulzovej odozvy. Sú to odrazy zvuku v energetickej doméne. Výsledky sú zobrazené len pre prvých 50 ms, pretože odrazy zvuku, ktoré prichádzajú v tomto časovom intervale sú najdôležitejšie v ponímaní zrozumiteľnosti reči a sú ovplyvnené nastaveniami TO . Neskoré odrazy sú si veľmi podobné v každej prípadovej štúdií, pretože nie sú závislé na nastaveniach TO a sú počítané pomocou RTM. Na základe grafických výsledkov (Obrázok 5.) môžeme konštatovať, že keď $TO=0$, tak sú skoré odrazy zvuku viac rozptýlené a majú menšiu amplitúdu v porovnaní s grafickými výsledkami prípadu kedy $TO=1$ alebo 2.

Toto môže byť zdôvodnené nie len základnými rozdielmi medzi výpočtovými algoritmi (ISM a RTM) ale aj vplyvom rozdielnych algoritmov na výpočet rozptylu zvuku.

5. Záver

Keď $TO=0$, tak výpočty sa dejú v RTM metóde. Odrazy zvuku majú menšiu intenzitu v porovnaní s ISM ale ESM, je to spôsobené neskorými odrazmi zvuku. Čím je hodnota TO väčšia tým je väčší počet odrazov simulovaný. Keď sme skúmali rôzne nastavenia TO , vplyv na STI sme nepostrehli v číselnej analýze ani vo vizuálnej analýze, keď sme výsledky porovnávali v STI mapách (Obrázok 4.). Spravili sme auralizácie reči každého variantu a rozdiely v zrozumiteľnosti reči boli trochu počuteľné. Najväčšie rozdiely sú badateľné v grafickom vyjadrení výsledkov STI (Obrázok 5.) v reflektogramoch. Ďalším krokom v tejto téme bude posluchový test zameraní na TO a jeho vplyv na STI , kde si naše výsledky overíme.

Literatúra

- [1] ZHONG, L., NOUD, B. P., PRUITT, H., MARCRUM, S. C., PICOU, E. M. 2022. Effects of text supplementation on speech intelligibility for listeners with normal and impaired hearing: a systematic review with implications for telecommunication. *International Journal of Audiology*. Volume 61, Issue 1, p. 1-11.
- [2] DEGIRMENCI UZUN, E., BATUK, M. O., D’ALESSANDRO, H. D., SENNAROGLU, G. 2022. Auditory perception in pediatric cochlear implant users with cochlear nerve hypoplasia. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*. Volume 160, Article number 111248.
- [3] HO, CH. Y., LI, P. CH., YOUNG, S. T., LAI, Y. H. 2020. Efficacy of a Smartphone Hearing Aid Simulator. *Journal of Medical and Biological Engineering*. Volume 40, Issue 4, p. 496-504.
- [4] MINELLI, G., PUGLISI, G. E., ASTOLFI, A., HAUTH, C., WARZYBOK, A. 2021. Binaural speech intelligibility in a real elementary classroom. *Journal of Physics: Conference Series*. 8th International Building Physics Conference, IBPC. Volume 2069, Issue 1, Article number 012165.
- [5] PLOMP, R., MIMPEN, A. M. 1979. Improving the reliability of testing the speech reception threshold for sentences, *Audiology*. Volume 18, Issue 1, p. 43-52.
- [6] VAN WIERINGEN, A., WOUTERS, J. 2008. LIST and LINT: Sentences and numbers for quantifying speech understanding in severely impaired listeners for Flanders and the Netherlands. *International Journal of Audiology*. Volume 47, Issue 6, p. 348-355.
- [7] OZIMEK, E., KUTZNER, D., SEK, A., WICHER, A. 2009. Polish sentence tests for measuring the intelligibility of speech in interfering noise, *International Journal of Audiology*, Volume 48, Issue 7, p. 433-443.
- [8] PANOCOVÁ, R., GREGOROVÁ, R. 2019. Designing the Slovak matrix sentence test. *International journal of applied languages and cultural studies*. Volume 2, Issue 2.
- [9] JANSEN, S., LUTS, H., WAGENER, K.C., KOLLMEIER, B., DEL RIO, M. et al. 2012. Comparison of three types of French speech-in-noise tests: A multi-center study. *Int J Audiol*, Volume 51, p. 164–173.
- [10] KOLLMEIER, B., WARZYBOK, A., HOCHMUTH, S., ZOKOLL, M., et al. 2015. The multilingual matrix test: Principles, applications and comparison across languages – a review. *Int J Audiol*, DOI 10.3109/14992027.2015.1020971.
- [11] IEC 60268-16: 2020 Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- [12] CATT acoustic [online] ©2011. Available: <https://www.catt.se/>
- [13] ODEON [online] ©2021. Available: <https://odeon.dk/>
- [14] EASE [online] ©2021. Available: <https://www.afmg.eu/en/ease-enhanced-acoustic-simulator-engineers>
- [15] HOUTGAST, T., STEENEKEN, H. J. M. 1971. Evaluation of speech transmission channels by using artificial signals. *Acta Acustica united with Acustica*. Volume 25, Number 6. p. 355-367.
- [16] RINDEL, J. H. 2000. The use of computer modeling in room acoustics. *Journal of vibroengineering*. International Conference BALTIC-ACOUSTIC. ISSN 1392-8716
- [17] ODEON Room Acoustics Software, User’s Manual, 2021. Version 17. p. 131-140

Muhammad Faisal Junaid¹

Študijný program: Technológia stavieb, 2. ročník

BIOBASED PHASE CHANGE MATERIALS AND APPLICATION IN BUILDING ENERGY SAVING CAMPAIGN

BIO-MATERIÁLY S FÁZOVOU PREMENOU A APLIKÁCIE V BUDOVÁCH PRE ÚSPORU ENERGIE

Abstract:

Biobased phase change materials (bPCMs) offer a wide range of potential applications possibilities in energy conservation and efficient use of energy since they can be utilized for thermal energy storage (TES) and temperature regulation through phase transition. The major characteristics of bPCMs that make them a preferred choice for TES applications include but are not limited to renewability, non-toxicity, minimal supercooling, high latent heat, thermal stability over a wider temperature range, reasonable melting/freezing temperatures, self-nucleating response, and limited flammability. The compatibility of conventional PCMs with building materials is the main challenge for building energy saving. As a result, innovative, sustainable and green PCMs have become a prime focus of research in the area of TES applications in buildings. The study reviews the current developments in bPCMs research as well as the application and optimization of passive building energy-saving techniques.

Kľúčové slová/Key words

Thermal energy storage; Biobased phase change materials; Thermal characteristics; Waste recycling

1. Introduction

Now a days, energy generated from renewable resources cannot adequately meet current global need for energy supply, which strongly motivates researchers to shift to cleaner and safer energy sources such as sustainable energy resources. As a result, phase change energy-based storage technology opens a new avenue for further research into renewable energy resources to meet TES demands [1]. For TES, phase change materials (PCMs) are used for LHS and such PCMs include inorganic, organic, and eutectics [2]. Organic PCMs (oPCMs) such as fatty acids, paraffin waxes, and polyethylene glycol (PEG) are the most frequently used LHS materials. Although PCMs are used for energy conservation, their frequent use disturbs the eco-system, e.g., precious natural materials are consumed as PCMs [3]. Among the oPCMs,

Biobased PCMs (bPCMs) are viewed as the most eco-friendly and low-cost materials because they are originated from environment-friendly and recyclable resources. Moreover, there are several challenges linked with bPCMs that obstruct their frequent applications. Many researchers have conducted studies to identify these challenges i.e., leakage, durability, biodegradation, and demand-supply issues, and proposed different solutions to mitigate them. In addition, an assessment of bPCMs has also been conducted in past studies considering life cycle, cost, and environmental performance. Therefore, the current paper presents current developments in bPCMs research as well as the application and optimization of passive building energy-saving techniques.

2. Characteristics of bPCMs

The urge for eco-friendly organic PCMs is higher than ever which leads to the focus on nonparaffin i.e., biobased PCMs. bPCMs are categorized as organic nonparaffins and are mainly derived from sustainable and eco-friendly bio sources such as palm kernel oil, coconut oil, palm oil, other tropical oils, and animal fat [4–6]. Like paraffins, they exhibit a wide melting temperature range, high latent heat, stable chemical and thermal properties, recyclable nature, self-nucleating response, and abundance which enables them for numerous TES applications [7–9]. bPCMs can be categorized into different types as shown in Figure 1. Alcohols, fatty acids, glycols, and esters are the main types of bPCMs wherein fatty acids are the most preferred choice [10–12]. Fatty acids are mainly the saturated or unsaturated form of carboxylic acids with aliphatic chains.

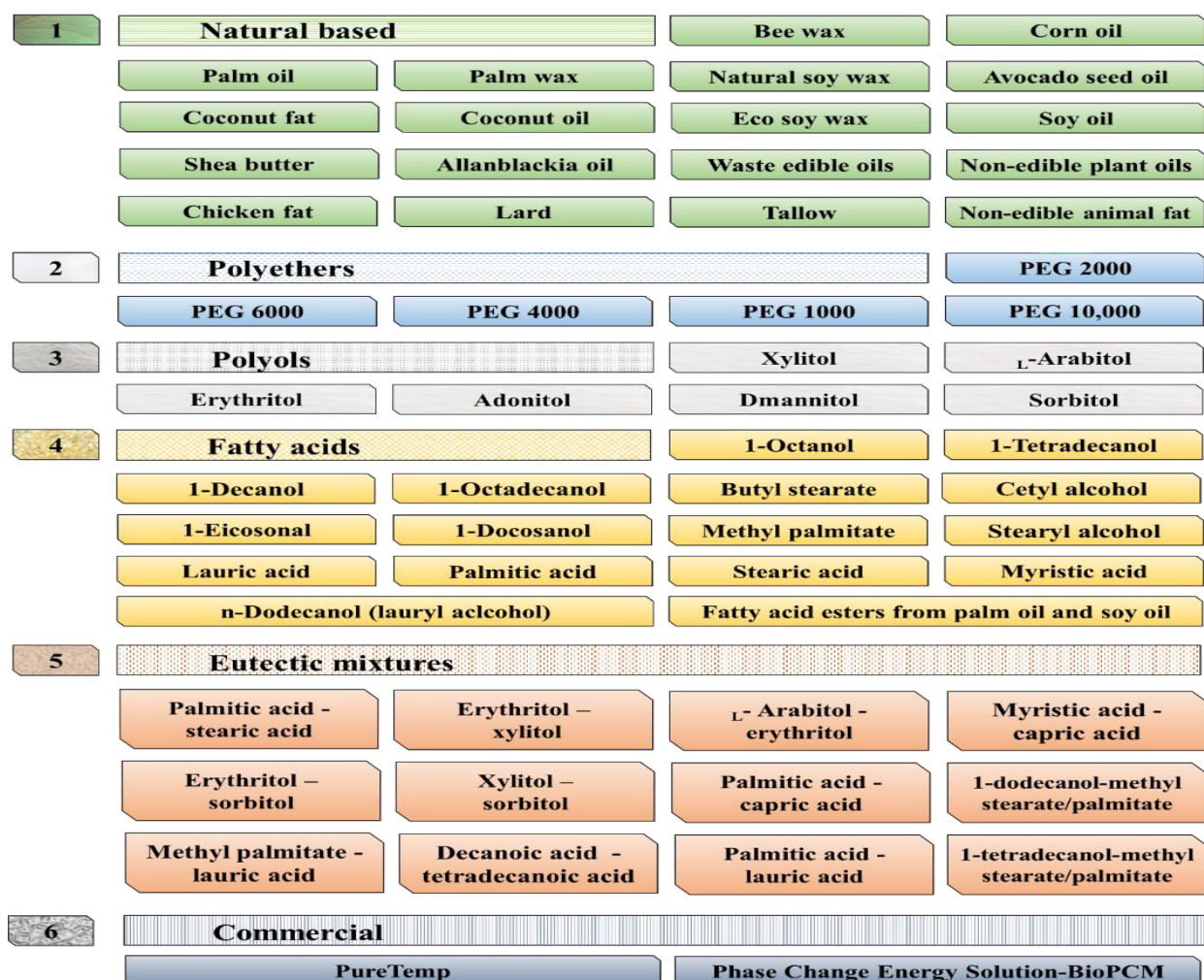


Figure 1: Types of biobased PCMs

Different fatty acids are characterized based on the number of double bonds and the number of carbon atoms in the chain. Fatty acids are mainly composed of hydrocarbons with long chains where instead of $-\text{CH}_3$, the end group is $-\text{COOH}$ and they are epitomized using the molecular formula $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$. Owing to their supportive thermal and thermophysical characteristics analogous to paraffins they could be used as PCMs. Fatty acids that pertain to bPCMs are usually derived from vegetable oils, fat esters, animal fat, etc., thus, their sources are mostly natural or biobased.

Furthermore, the non-toxicity of bPCMs makes them a preferred choice over conventional PCMs, especially for construction. Figure 2 presents desirable characteristics of bPCMs that are needed to be satisfied for their effective application in building envelopes.

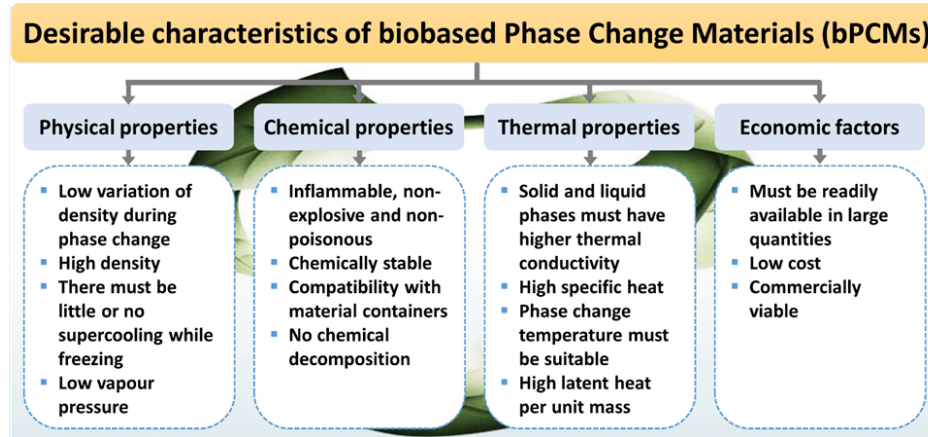


Figure 2: Desirable characteristics of biobased PCMs

3. Passive building applications

PCMs for TES have been employed mainly due to the gradual improvement of standards related to building energy consumption in conjunction with the idea of near-zero energy buildings. A building's capacity to reduce, delay or resist external disturbances i.e., reduction of outdoor and internal heat transfer through envelope structures can be classified as either passive or active energy efficiency techniques. Figure 3 demonstrates the application direction of PCMs in passive and active heating systems [13]. The use of solar energy storage to lower the solar load and stagger solar energy consumption are all examples of passive energy efficiency measures. They also frequently combine solar energy with phase change building materials.

Applying bPCMs to building envelopes can alter a building heat load curve, peak load reduction, and even use the outdoor atmosphere as a source of heating or cooling for the interior, which represents an efficient approach to enhance indoor environment comfort levels and consume less energy. For instance, during the winter, a bPCM-encased structure can fully store heat during the day and release it at night to handle all or a portion of the building heat load [14]. Another approach is to employ bPCMs integrated building envelopes to store cold at night during summer and manage the building cooling demand in the daytime. These PCMs must be adequately integrated with the construction materials. There is currently growing interest in new organic composites to engineer sustainable and green bPCMs. Table 1 and Table 2 lists different bPCMs frequently used in building envelope and thermal properties of various bPCMs before and after thermal cycling, respectively.

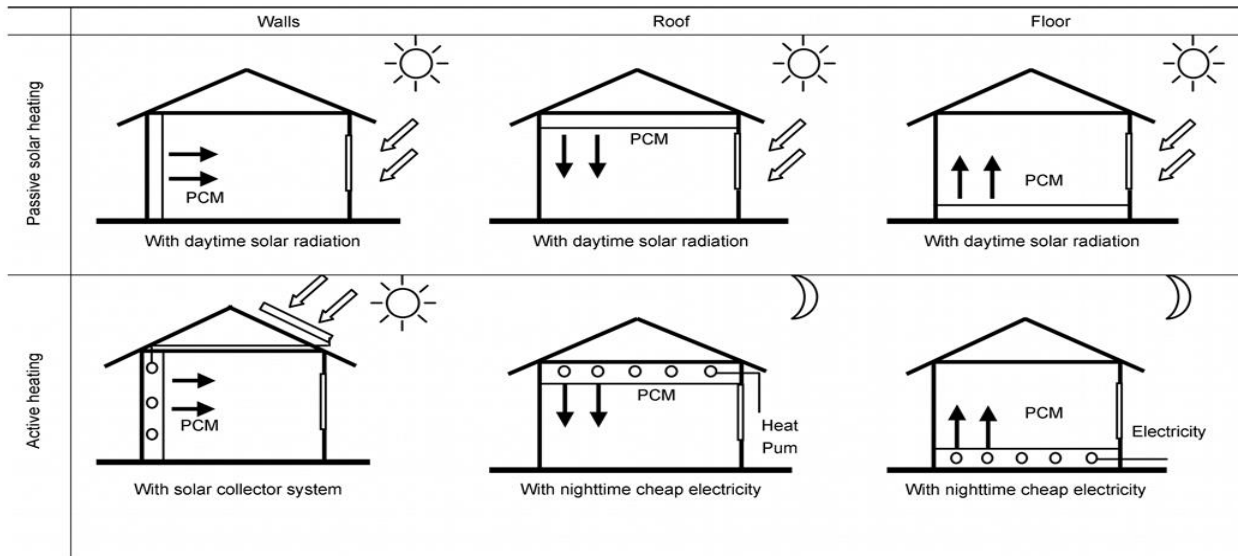


Figure 3: Radiant heating systems using PCMs [13]

Table 1: Thermal properties of various bPCMs before and after thermal cycling [18]

PCMs	Freezing temperature (°C)	Melting temperature (°C)	Freezing latent heat (J·g ⁻¹)	Melting latent heat (J·g ⁻¹)
Myristic acid	51.45	54.37	200.9	197.4
Palmitic acid	58.82	62.74	208	214.4
Stearic acid	68.91	68.86	254.1	252.7
Glycerol trimyristate	31.62	31.96	1448.8	154.3
GTM (after 1000 cycle)	30.91	31.22	153.4	151.8
Glycerol tripalmitate (GTP) [19]	54.83	58.5	182.9	185.9
GTP (after 1000 cycle)	54.46	57.45	177.8	175.8
Glycerol tristearate (GTS)	64.58	63.45	151.7	149.4
GTS (after 1000 cycle)	60.06	62.83	147.5	152.8
Erythritol	36.22	118.4	255.95	379.57
Erythritol tetrapalmitate (ETP)	18.79	21.93	200.75	201.1
ETP (after 1000 cycle)	17.06	20.88	187.71	200.37
Erythritol tetrastearate (ETS)	28.79	30.35	207.16	208.84
ETS (after 1000 cycle)	27.84	33.35	205.16	207.81
Xylitol	-	93.2	-	-
Xylitol pentapalmitate (XPP)	-	18.75	-	170.05
XPP (after 1000 cycle)	-	18.35	-	164.77
Xylitol pentastearate (XPS)	-	32.35	-	205.65
XPS (after 1000 cycle)	-	31.04	-	197.25
Galactitol	115.78	187.41	285.18	401.76
Galactitol hexapalmitate (GHP)	30.02	31.78	197.14	201.66
GHP (after 1000 cycle)	28.69	30.93	196.84	200.7
Galactitol hexastearate (GHS)	45.19	47.79	233.49	251.05
GHS (after 100 cycle)	48.9	49.46	207.55	206.48

Table 2: Typical bPCMs used in building envelopes

Fatty acids	Chemical structure	Melting temperature, T_m (°C)	Enthalpy (J·g ⁻¹)	Ref.
Caprylic acid	CH ₃ (CH ₂) ₆ COOH	16.2	144.1	[15]
Capric acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH	31.5	163	[16]
Lauric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	44.1	183	[16]
Myristic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH	51.4	204	[17]
Palmitic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH	62.8	212	[16]
Stearic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	69.5	222	[16]

4. bPCMs integration technologies at building composites scale

The integration of bPCMs with building materials and composites i.e., cement mortar concrete, wall covering materials plaster, bricks and gypsum mortars for passive TES in buildings has been investigated by various studies. There are generally three methods of integration of bPCMs with cement-based building materials i.e., direct incorporation, micro-encapsulation and shape stabilization. Direct incorporation is reckoned as the cost-effective method; however, it bares serious leakage problems. To reduce the leakage issue, various encapsulation methods have also been used to incorporate bPCMs with building materials [20]; however, these methods are criticized on account of low latent thermal heat storage capacity and high cost. Shape stabilization is the most effective integration technique, in which a shape stable composite bPCM is produced by incorporating bPCM in a porous supporting material and subsequently integrated with building materials and components [19]. This method is viewed as the most effective method by various researchers owing to its simple and cost-effective methodology, leakage control and reasonable latent heat thermal energy storage capacity [21]. Different natural mineral-based materials have been used to prepare porous supporting materials i.e., natural clay, bentonite, montmorillonite, vermiculite, perlite, sepiolite, diatomite, kaolin and their mixtures, which proved to be very effective in terms of bPCM absorption and LHS capacity. However, usage of such materials escalates natural resource consumption and restricts circular economy. To counter it, various waste-based materials have also been used to prepare shape-stabilized composite bPCMs i.e., silica fume, fly ash, bottom ash, biochar and furnace slag. Further, to reduce the leakage problem in this technology, various waste-based fibers have also been utilized in the shape stabilized composite bPCMs e.g., nonwoven textile waste and wool fibers. Thus, shape stabilization technology not only ensures the efficient application of bPCMs with building material and composites but also promotes waste recycling and green building campaign.

5. Conclusion

The escalating demand for energy from the world's growing population has resulted in widespread use (i.e., burning) of fossil fuels triggering pollution and greenhouse gases emissions into the atmosphere, potentially culminating in a fossil fuel scarcity in the coming years. Consequently, TES uses PCMs to fill the gap between energy demand and supply; similarly, the increasing demand for PCMs urges to find renewable, environment-friendly, and sustainable materials. In this regard, bPCMs are considered to hold the promising potential to reduce the environmental burdens and carbon footprint related to the generation of sources of conventional PCMs. Further, applications of bPCMs in building envelopes and other TES systems are gaining popularity over other conventional PCMs, and useful research data is available on it. In addition, technological advancement is also

evident in the incorporation methods of bPCMs in building envelopes which include direct, indirect, microencapsulation, and physical-chemical methods. There is a need for further research on eco-friendly, cost-effective, durable, and renewable support and encapsulation materials for bPCMs. In addition, promotion of the widespread application of bPCMs in the construction sector not only requires more specific research on resolving inherent drawbacks and improving integration technologies with building elements but on economic, demand-supply, comparative and real-scale performance analyses of bPCMs.

Acknowledgement

This research was supported by project VEGA 1/0680/20 supported by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic.

References

- [1] X.Q. Zhai, X.L. Wang, T. Wang, R.Z. Wang, A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 22 (2013) 108–120.
- [2] M.F. Junaid, Z. ur Rehman, M. Čekon, J. Čurpek, R. Farooq, H. Cui, I. Khan, Inorganic phase change materials in thermal energy storage: A review on perspectives and technological advances in building applications, *Energy Build.* 252 (2021) 111443.
- [3] M.M. Umair, Y. Zhang, K. Iqbal, S. Zhang, B. Tang, Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage—A review, *Appl. Energy.* 235 (2019) 846–873.
- [4] S. Kahwaji, M.A. White, Edible Oils as Practical Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, *Appl. Sci.* 2019, Vol. 9, Page 1627. 9 (2019) 1627.
- [5] B. Caballero, L.C. Trugo, P.M. Finglas, *Encyclopedia of food sciences and nutrition*, Academic, 2003.
- [6] J. Yan, D. Hu, Z. Wang, W. Ma, Construction strategies and thermal energy storage applications of shape-stabilized phase change materials, *J. Appl. Polym. Sci.* 139 (2022) 51550.
- [7] C. Fabiani, A.L. Pisello, M. Barbanera, L.F. Cabeza, Palm oil-based bio-PCM for energy efficient building applications: Multipurpose thermal investigation and life cycle assessment, *J. Energy Storage.* 28 (2020) 101129.
- [8] M.M. Kenisarin, Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage. A review, *Sol. Energy.* 107 (2014) 553–575.
- [9] E. Reyes-Cueva, J.F. Nicolalde, J. Martínez-Gómez, Characterization of Unripe and Mature Avocado Seed Oil in Different Proportions as Phase Change Materials and Simulation of Their Cooling Storage, *Molecules.* 26 (2020).
- [10] S.G. Jeong, O. Chung, S. Yu, S. Kim, S. Kim, Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 117 (2013) 87–92.
- [11] M. Duquesne, C. Mailhé, K. Ruiz-Onofre, F. Achchaq, Biosourced organic materials for latent heat storage: An economic and eco-friendly alternative, *Energy.* 188 (2019) 116067.
- [12] V. V. Tyagi, K. Chopra, R.K. Sharma, A.K. Pandey, S.K. Tyagi, M.S. Ahmad, A. Sari, R. Kothari, A comprehensive review on phase change materials for heat storage applications: Development, characterization, thermal and chemical stability, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 234 (2022) 111392.
- [13] X. Wang, Y. Zhang, W. Xiao, R. Zeng, Q. Zhang, H. Di, Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope, *Chinese Sci. Bull.* 54 (2009) 920–928.

- [14] A. Khyad, H. Samrani, M.N. Bargach, R. Tadili, Energy storage with PCMs: Experimental analysis of paraffin's phase change phenomenon & improvement of its properties, *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (2016) 2551–2560.
- [15] T. Inoue, Y. Hisatsugu, M. Suzuki, Z.N. Wang, L.Q. Zheng, Solid-liquid phase behavior of binary fatty acid mixtures 3. Mixtures of oleic acid with capric acid (decanoic acid) and caprylic acid (octanoic acid), *Chem. Phys. Lipids.* 132 (2004) 225–234.
- [16] D. Feldman, M.M. Shapiro, D. Banu, C.J. Fuks, Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage, *Sol. Energy Mater.* 18 (1989) 201–216.
- [17] A. Sari, K. Kaygusuz, Thermal performance of myristic acid as a phase change material for energy storage application, *Renew. Energy.* 24 (2001) 303–317.
- [18] M.F. Junaid, Z. ur Rehman, N. Ijaz, M. Čekon, J. Čurpek, A.B. Elhag, Biobased phase change materials from a perspective of recycling, resources conservation and green buildings, *Energy Build.* (2022) 112280.
- [19] A. Sari, A. Biçer, Thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters/building material composites as novel form-stable PCMs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 101 (2012) 114–122.
- [20] R. Parameshwaran, R. Naresh, V.V. Ram, P. V Srinivas, Microencapsulated bio-based phase change material-micro concrete composite for thermal energy storage, *J. Build. Eng.* 39 (2021) 102247.
- [21] A. Sari, Fabrication and thermal characterization of kaolin-based composite phase change materials for latent heat storage in buildings, *Energy Build.* 96 (2015) 193–200.

Štefan Krištofič¹

Študijný program: Technológia stavieb, 3. ročník

PROPOZÍCIA NABÍJACEJ INFRAŠTRUKTÚRY PRE ELEKTRICKÉ MECHANIZMY Z HĽADISKA PREVÁDZKOVÝCH POTRIEB ZARIADENIA STAVENISKA

PROPOSED CHARGING INFRASTRUCTURE FOR ELECTRICAL MACHINERY IN TERMS OF THE OPERATION NEEDS OF THE SITE EQUIPMENT

Abstract

Development and technology are dramatically changing the automotive sector. In addition to passenger vehicles, drivetrain electrification is a growing trend in the construction equipment sector for a variety of reasons. Electric vehicles promise a number of design advantages, including reduced exhaust and noise emissions and simplified maintenance [1]. In order to reap the benefits of electrified machinery, a battery charging strategy must be developed and incorporated into the operational needs of the site equipment. This paper deals with analysing the impact of charging in the computational design of the construction site electricity supply. Currently, there are no uniform procedures in place for charging infrastructure within a construction site operation.

Kľúčové slová / Key Words

Stavebné mechanizmy; nabíjacia stanica; zariadenie staveniska; elektrická energia na stavenisku

1. Úvod

Súčasný poznatky s využívania stavebných elektrických vozidiel reflektujú viaceré pozitívne dopady, medzi najdôležitejšie patria, že neprodukuje lokálne emisie a majú nižšiu hlučnosť. Výhoda elektrického batériou poháňaného mechanizmu spočíva aj v tom, že má jednoduchší motor. Vozidlo má menej pohyblivých častí a počas prevádzky je tichšie, ľahšie sa riadi aj štartuje. Elektrické stavebné mechanizmy vďaka motoru môžu prinášať nižšie náklady na údržbu.

S nastupujúcou elektrifikáciou sa vozidlá zdokonaľujú aj v iných smeroch, majú viac elektrotechnických prvkov a vybavenia, ktoré zvyšujú bezpečnosť, spoľahlivosť a tak sa postupne dostávajú niektoré činnosti do autonómnych cyklov a vozidlá sú schopné konať prácu bez ľudskej asistencie.

Zavádzaním čistej elektrickej trakcie do vozidiel nadobúda prevodovka tiež iný význam. Trakčný elektromotor môže napríklad produkovať maximálny krútiaci moment skoro od nulových otáčok, umožňuje krátkodobé preťaženie a môže meniť smery otáčania, a preto niektoré úlohy prevodovky môžu byť vynechané. V súčasnosti sa výskum v oblasti elektrickej trakcie snaží o riešenie pohonu všetkých kolies vozidla pomocou trakčných elektromotorov umiestnených v kolesách. Aj táto skutočnosť môže prispieť k úplnej absencii prevodovky. Klasický diferenciál bude nahradený elektronickým diferenciálom [2].

Elektrifikácia stavebných vozidiel je postupne vedená elektrifikáciou malých kompaktných strojov vrátane minirýpadiel, malých kolesových nakladačov a sklápačov, predovšetkým preto, že

¹ Štefan Krištofič, Ing. et Ing. Radlinského 11, STU Bratislava, SvF Katedra technológie stavieb

tieto stroje sú nasadené v mestskom prostredí a mestá čoraz viac hľadajú riešenia na zníženie výfukových emisií a hluku. Ich použitie v menších projektoch znamená, že ich denný pracovný cyklus je ľahší ako u väčších strojov a dopyt po energii možno uspokojiť s praktickou veľkosťou lítium-iónovej batérie a elektromotora [3].

Elektrifikácia strojov nad 20 ton si vyžaduje viac ako 300 kWh kapacitu batérie aby pokryla činnosť stroja počas 8 hodinového pracovného dňa [4]. Do hry o udržateľnosť stavebnej výroby zasiali najmä výrobcovia stavebných zariadení a dodávatelia komponentov, keďže investujú do elektrických stavebných mechanizmov všetkých veľkosti, aby uspokojili rôzne potreby aplikácií.

Aby bolo používanie elektrického mechanizmu čo najpohodlnejšie, je potrebné poznať aký typ nabíjacej infraštruktúry spotrebiteľia uprednostňujú. Z hľadiska preferencií spotrebiteľov by bolo vhodné vedecky skúmať mieru spokojnosti spotrebiteľov s rôznymi typmi nabíjaciech infraštruktúr [5] na stavenisku. Pokiaľ ide o spôsob nabíjania v osobnej doprave, niektorí vedci zistili, že najčastejšie využívané sú práve rýchlonabíjačky [6]. Dá sa predpokladať súhlasný výsledok v rámci stavebných vozidiel využívaných v staveniskovej prevádzke, keďže rýchle nabíjanie výrazne optimalizuje nečinnosť stroja.

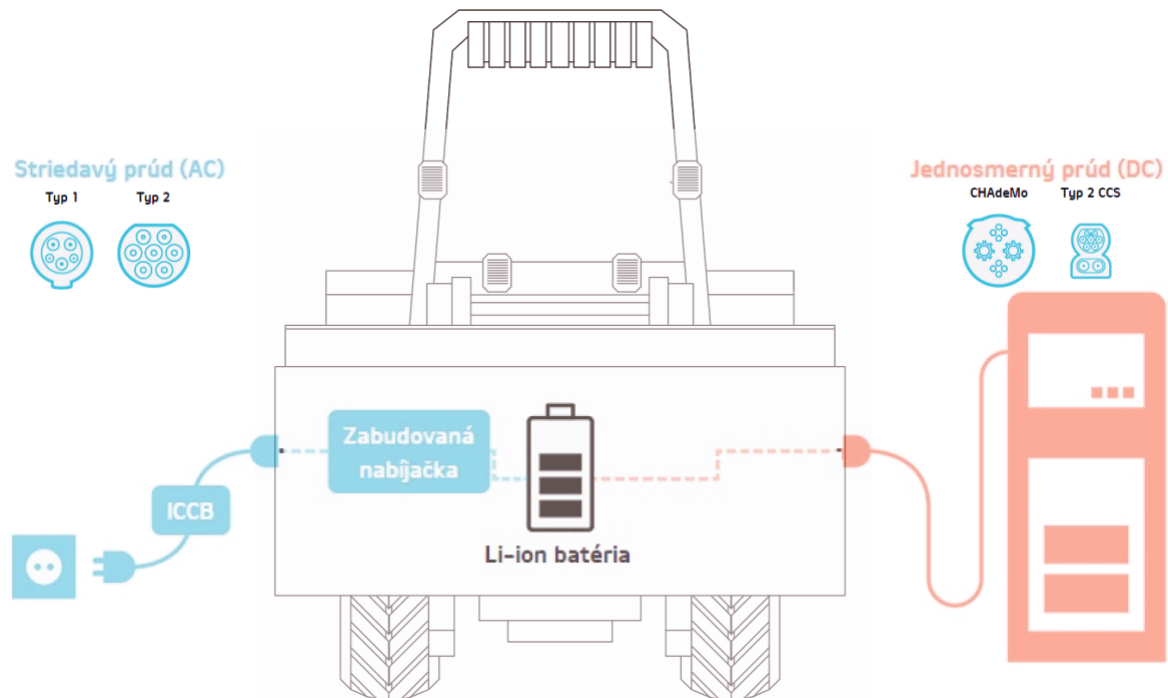
2. Analýza nabíjania elektromobility v staveniskovej prevádzke

Nabíjacia stanica sa musí nachádzať na stavenisku, pretože využívanie verejné stanice nie je vhodné z praktických dôvodu a tiež na základe obmedzenia využívania dopravných ciest stavebnými mechanizmami. Plánovanie a umiestnenie nabíjacej stanice by malo brať do úvahy predovšetkým obmedzenia elektrickej siete v danom prostredí [7].

Faktom je, že počet a nasadenie stavebných vozidiel a mechanizmov je prispôsobené danému stavenisku a tie sú následne využívané s rôznou intenzitou. Preto umiestnenie nabíjacej stanice a počet musí vyhovovať individuálnym podmienkam staveniska. Pre čiastočné uľahčenie výrobcovia inštalujú do stavebných vozidiel palubné nabíjačky, ktoré fungujú na striedavé napätie a môžu sa napájať zo siete na 230V alebo 400V. Striedavé nabíjanie má svoje obmedzenie v odoberanom prúde a nevýhodou sú tiež dlhšie nabíjacie časy v porovnaní s jednosmerným nabíjaním.

Aby sa dnešné elektrické vozidlá výkonovo vyrovnali naftovým, kladú sa väčšie nároky na hustejší obsah uloženej energie v batériách a zároveň je potrebné predĺžiť prevádzkový čas medzi nabíjaním. Proces nabíjania musí byť rýchly a efektívny pre zamedzenie dlhého času nečinnosti vozidla. Predchádzanie neaktívnemu času a preťaženiu je vhodné koordinované nabíjanie elektrických vozidiel, čo zlepšuje celkovú účinnosť elektrickej siete, pretože zabraňuje preťaženiu distribučného systému, zvyšuje kvalitu energie a znižuje kolísanie napätia [7].

Pri širokej vozovej zostave s rôznymi veľkosťami batérie sa stáva rozmanitosť nevýhodou. Zatiaľ čo stroje s naftovým pohonom je možné rýchlo natankovať v priebehu niekoľkých minút a kedykoľvek počas dňa, nabíjanie elektrických strojov trvá určitý čas. Tento čas sa líši v závislosti od typu nabíjacieho zariadenia a dostupného zdroja energie. Za zmienku tiež stojí, že väčšinu strojov nemožno používať počas nabíjania batérie [1].



Obrázok 1: Spôsob nabíjania elektrických vozidiel v Európe [autor]

Elektromobily je možné nabíjať striedavým a jednosmerným prúdom. Rýchlosť nabíjania batérie (definovaná ako množstvo elektrickej energie prenesenej z elektrickej siete do batérie elektromobilu za daný čas) je závislá od výkonu nabíjacej stanice a technických možností elektromobilu. Doba nabitia batérie je ďalej závislá od rýchlosti nabíjania a od kapacity batérie [8].

Spôsoby nabíjania elektrických stavebných vozidiel:

- Typ 1, AC nabíjanie, s výkonom do 11kW, požiadavky na sieť – napätie 230V, prúd do 32A,
- Typ 2 AC nabíjanie, s výkonom do 43kW, požiadavky na sieť – napätie 230V/400V, prúd do 63A,
- Typ 3 DC nabíjanie, s výkonom od 50kW do 100kW, požiadavka na rýchlonabíjajúcu stanicu - napätie 500V, prúd 125A, požiadavky na sieť – permanentné napojenie, napätie 400V, prúd do 32A,
- Typ 4 DC nabíjanie, s výkonom do 170kW, požiadavka na rýchlonabíjajúcu stanicu - napätie 450V, prúd 125A, požiadavky na sieť – permanentné napojenie, napätie 400V, prúd do 32A [9].

3. Súčasný návrh prevádzkových potrieb zariadenia staveniska

Prevádzkové zariadenia staveniska tvoria objekty a zariadenia, ktoré zabezpečujú ochranu práce a bezpečnosť na stavenisku a v jej okolí, komunikácie a zariadenia pre dopravu, objekty pre skladovanie stavebných materiálov a výrobkov pre stavbu, pre administrovanie, údržbárske dielne a objekty pre odber a rozvod elektrickej energie a vody po stavenisku [10]. Riešením staveniskovej prevádzky sa stanoví priestorová, časová a finančná náročnosť. Návrh jednotlivých potrieb je preto kľúčovou úlohou a má zásadný vplyv na plynulosť výstavby.

Elektrická energia vytvára podmienky pre chod stavebných a montážny prác, pretože do procesu výstavby sú zapojené či už priamo alebo nepriamo všetky spotrebiče elektrickej energie

nachádzajúce sa na stavenisku. Elektrina slúži pre pohon stavebných strojov a zariadení, osvetlenie vnútorných a vonkajších priestorov staveniska, napájanie dočasných objektov staveniska, najmä pre potreby osvetlenie, kúrenie a príprava teplej vody. Vo všeobecnosti elektrické spotrebiče na stavenisku môžeme rozdeliť na svetelné, tepelné a rotačné.

Pre distribúciu elektrickej energie na stavenisku je potrebné zabezpečiť vodiče, ktorými sú káble vedené v zemi alebo po povrchu a vo vzduchu. Priestorové umiestnenie vedení musí zohľadňovať organizáciu výstavby a spĺňať bezpečnostné požiadavky. Dôležitými súvisiacimi predpisy, ktoré stanovujú požiadavky na elektrické inštalácie nízkeho napätia na staveniskách, sú:

- STN 33 2000-7-704 (33 2000), ktorou sa opisujú kritéria na tzv. staveniskový rozvádzač, prírodný kábel, staveniskový rozvod, prúdové chrániče atď. Požiadavky v uvedenej norme sa vzťahujú na pevné alebo presúvateľné elektroinštalácie používané v čase vykonávania stavebných prác. Ide napr. o stavebné práce na nových budovách, opravy, úpravy, prístavby alebo ich častí. Požiadavky sa nevzťahujú na priestory stavieb pre zamestnancov, ako napr. kancelárie, šatne, zasadačky, bufety, toalety či ubytovne [11].
- STN EN 61439-4 (35 7107), ktorou sa definujú špecifické požiadavky na rozvádzače, určené na použitie na staveniskách, vo vnútornom aj vonkajšom prostredí, t. j. na dočasných pracoviskách, na ktoré nemá vo všeobecnosti verejnú prístup a na ktorých sa realizuje stavba budov, inštalovanie, opravy, úpravy alebo demolačné práce objektov (budov) alebo všeobecne všetky stavebné práce (verejné práce) alebo kde sa realizujú výkopové práce, prípadne akékoľvek iné podobné činnosti [12].
- STN 33 2000-4-41, predpis pre elektrické inštalácie nízkeho napätia. Časť 4-41: Zaistenie bezpečnosti. Ochrana pred zásahom elektrickým prúdom [13].
- STN 34 1610, ktorou sa stanovujú elektrotechnické predpisy STN. Elektrický silnoprúdový rozvod v priemyselných prevádzkach [14].

Pre bezproblémové napájanie staveniska je potrebné vypočítať maximálny požadovaný príkon elektrických spotrebičov použitých na stavenisku v kW. V závislosti od napät'ovej úrovne je následne dôležité určiť maximálnu rezervovanú kapacitu pre uzavretie zmluvy o združenej dodávke elektriny. Zmluva je uzatvorená medzi dodávateľom elektriny a oprávneným odberateľom, na základe ktorej sa dodávateľ elektriny zaväzuje zabezpečiť distribúciu a dodávku elektriny do odberného miesta oprávneného odberateľa vrátane ostatných regulovaných služieb a prevziať zodpovednosť za odchýlku oprávneného odberateľa. Na napät'ovej úrovni „NN“ – nízke napätie 0,4kV sa hodnota maximálnej rezervovanej kapacity rovná hodnote rezervovanej kapacity určenej menovitou hodnotou hlavného ističa v ampéroch [15]. Maximálna rezervovaná kapacita je maximálna hodnota výkonu, ktorý je technicky možné odoberať z distribučnej sústavy.

Elektroinštalácie na staveniskách sú považované za dočasné a po ukončení prác sa musia vyradiť z prevádzky. Za rozhranie medzi trvalou a dočasnou elektroinštaláciou sa považuje hlavný staveniskový rozvádzač.

3.1 Stanovenie príkonu pre stavenisko

Výpočet celkového elektrického príkonu pre stavenisko, výpočtové zaťaženie, je možné urobiť podľa vzorca STN 34 1090.

$$S_K = 1,1 \sqrt{(\beta_1 * P_1 + \beta_2 * P_2 + \beta_3 * P_3)^2 + (\beta_1 * P_1 * tg\varphi_1 + \beta_2 * P_2 * tg\varphi_2 + \beta_3 * P_3 * tg\varphi_3)^2} \text{ [kVA]} \quad (1)$$

S_K – je zdanlivý príkon (kVA), odpovedajúci maximálnemu odberu za 1 hodinu v dobe najväčšieho odberu

1,1 – koeficient rezervy na nepredvídateľné zvýšenie príkonu

β_1 až β_3 – koeficienty náročnosti podľa STN 34 1610

φ_1 až φ_3 – fázový posun

P_1 – inštalovaný výkon elektromotorov na stavenisku (kW)

P_2 – inštalovaný výkon osvetlenia vnútorných priestorov (kW)

P_3 – inštalovaný výkon vonkajšieho osvetlenia (kW)

Koeficient náročnosti β_1 elektromotorov mechanizačných prostriedkov býva:

→ pri jednom mechanizačnom prostriedku (s jedným motorom – 0,75, s dvoma a viacerými motormi – 0,55),

→ pri väčšom počte mechanizačných prostriedkov (pre stavby murované – 0,25, s oceľovou nosnou konštrukciou – 0,4, zo železobetónových prefabrikátov pri použití ľahkých mechanizačných prostriedkov – 0,45, ťažkých mechanizačných prostriedkov 0,55),

→ pri použití žeriavov podľa ich využitia - 0,25 až 0,30.

- Koeficienty náročnosti β_2 vnútorného osvetlenia býva 0,70 až 0,90.

- Koeficienty náročnosti β_3 vonkajšieho osvetlenia býva 0,90 až 1,00.

- Stredná hodnota fázového posunu $\text{tg}\varphi$ vypočítaná z príslušného účinníka $\cos \varphi$ bez kompenzácie je udaná v STN 34 1610 pre:

→ žeriavy: $\cos \varphi = 0,5$; $\text{tg} \varphi = 1,73$,

→ el. zväracie stroje: $\cos \varphi = 0,6$; $\text{tg} \varphi = 1,32$,

→ čerpadlá, ventilátory, motogenerátory: $\cos \varphi = 0,8$; $\text{tg} \varphi = 0,74$.

Informatívny výpočet

Na informatívny výpočet celkového zdanlivého príkonu potrebného pre stavenisko možno použiť aj zjednodušený vzťah, vychádzajúc z predpokladu:

$$\cos \varphi_1 = 0,6; \text{tg} \varphi_1 = 1,32,$$

$$\cos \varphi_2 = 1,0; \text{tg} \varphi_2 = 0,$$

$$\cos \varphi_3 = 1,0; \text{tg} \varphi_3 = 0.$$

Stredné hodnoty koeficientov $\beta_1=0,5$; $\beta_2=0,8$, $\beta_3=1,0$, po dosadení základného vzorca 1 sa potom dostane zjednodušený vzťah:

$$S_c = 1,1\sqrt{(0,5 * P_1 + 0,8 * P_2 + P_3)^2 + (0,7 * P_1)^2} \text{ [kVA]} \quad (2)$$

S_c – celkový zdanlivý príkon staveniska (kVA)

1,1 – koeficient rezervy na nepredvídateľné zvýšenie príkonu

P_1 – inštalovaný výkon elektromotorov na stavenisku (kW)

P_2 – inštalovaný výkon osvetlenia vnútorných priestorov (kW)

P_3 – inštalovaný výkon vonkajšieho osvetlenia (kW)

0,5; 0,8; 0,7 – koeficienty náročnosti elektro mechanizačných prostriedkov

Takto vypočítaný potrebný príkon predstavuje požiadavku na zdroj elektrickej energie. Na základe vypočítaných hodnôt a zohľadnením napájacieho uzla sa vyhotoví zmluva o dodávke a distribúcii elektrickej energie s dodávateľskou spoločnosťou, ktorá následne vyhotoví prípojné miesto priamo na stavenisku. Toto miesto je staveniskovým zdrojom elektriny pre napájanie chodu výrobného procesu.

4. Metodika návrhu výpočtového príkonu staveniska s nabíjacou stanicou

Súčasnú riešenie výpočtového vzťahu nezohľadňuje prípadné navýšenie spotreby pre nabíjanie elektrických stavebných vozidiel. Táto zložka môže výrazne vplývať na dimenzovanie staveniskovej prípojky. Výkony nabíjačiek na striedavý prúd sú zväčša výkonových radov 3,7kW; 7kW; 11kW, tie sa priamo napájajú zo siete. Rýchlo nabíjačky pre jednosmerné nabíjanie elektrických vozidiel majú permanentné 3-fázové napájanie zo siete a v pohotovostnom režime môžu dosahovať výkon 22kW.

Pri inštalovaní rýchlo nabíjacej stanice s maximálnym výstupným výkonom 150kW pri jednosmernom nabíjaní vozidla sú definované vstupné parametre v pohotovostnom režime. Vstupné parametre ako požiadavky na sieť sú určené výrobcom: permanentné napojenie, napätie 400V, prúd do 32A, výkon $P_4=22kW$, účinník $\cos\phi_4=0,95$, koeficient náročnosti $\beta_4=0,7$.

Po zapracovaní výkonu rýchlo nabíjacej stanice sa získa rozšírený výpočet o hodnotu P_4 .

$$S_{c,RN} = 1,1\sqrt{(0,5 * P_1 + 0,8 * P_2 + P_3 + 0,7 * P_4)^2 + (0,7 * P_1 + 0,3 * P_4)^2} \text{ [kVA]} \quad (3)$$

Nabíjacia stanica s vysokým výkonom môže v závislosti od typu zariadenia staveniska spôsobiť podľa výpočtového vzťahu $S_{c,RN}$ enormné navýšenie požiadavky na zdroj elektrickej energie. Vývoj čiastočné ponúkol riešenie inštaláciou mobilnej kontajnerovej nabíjačky, ktorá sa skladá z obrovskej lítiovej batérie, série invertorov a namontovaných ovládačov. Postupne sa do batérií uskladňuje dostatočne množstvo energie, ktoré sa uvoľní pri nabíjaní. Špičkové zaťaženie nabíjačky smerom k sieti je eliminované sústavou meničov a elektronických zariadení, čo vedie k nižším nákladom na elektrické pripojenie.



Obrázok 2: rýchlonabíjacia kontajnerová stanica [16]

Pre optimalizáciu sú kontajnery v rôznych veľkostiach aby spĺňal nároky na nabíjanie a z praktického hľadiska aby sa jednoducho premiestňovali z jedného staveniska na druhé. Kontajnerové nabíjacie stanice odstraňujú potreby dodatočnej inštalácie. Zapuzdrené elektrokomponenty v štandardizovanom mobilnom kontajneri s viacerými rozhraniami a s výstupmi na DC a AC umožňuje variabilné a rýchle nabíjanie vozidiel [16].

5. Diskusia

Na základe analýzy výpočtového vzťahu stanovenia príkonu pre stavenisko možno konštatovať, že rýchlonabíjacia stanica bude mať zásadný vplyv pri návrhu elektrického zdroja. Požiadavky smerom k verejnej sieti sa zvýšia postupným zavádzaním elektrických stavebných mechanizmov. Zistenia môžu poskytnúť určité referencie pre vývojárov a investičné spoločnosti, ktoré navrhujú elektrické nabíjacie stanice. Čiastočné výsledky sa nachádza v priestorovo štandardizovanom kontajneri, ktorý eliminuje špičkové zaťaženie od DC nabíjania smerom k sieti. Avšak je potrebné

zrealizovať obdobné výskumy, ktoré potvrdia, alebo vyvrátia mieru zvýšenia elektroenergetických nárokov.

Tento článok taktiež môže napomôcť k rozšíreniu poznatkov o výpočtový návrh prevádzkových potrieb zariadenia staveniska s nabíjacou infraštruktúrou pre stavebné mechanizmy.

6. Záver

Elektrifikácia stavebných vozidiel prináša viaceré pozitíva, ale aj prekážky. Súvislosti s nasadením alternatívnych strojov je nutné riešiť nabíjaciu infraštruktúru v prevádzkovom prostredí staveniska. Súčasný návrh potrieb elektrickej energie pre zariadenie staveniska nezohľadňuje potreby nabíjania. Analýza výpočtového vzťahu môže napomôcť k identifikácii návrhu elektrického zdroja a adekvátne reagovať na zvyšujúcu potrebu elektrickej energie.

Plánovanie nasadenia elektrických mechanizmov bez propozície nabíjania vedie k neskorším problémom s dostatočnou vstupnou kapacitou elektrickej siete. Pre užívateľov sa musia stanoviť rozdiely v správe vozového parku a podľa toho sa prispôbiť. Chýbajúca stratégia nabíjacej infraštruktúry spomaľuje prechod na ekologický variant stavebných strojov.

Literatúra

- [1] Curt Bennink, Stratégia nabíjania potrebná pre batéριοvo-elektrické stavebné zariadenia, online na: <https://www.forconstructionpros.com/equipment/earthmoving-compact/article/22093239/charging-strategy-required-for-batteryelectric-construction-equipment>
- [2] Rind, S. J., Ren, Y., Hu, Y., Wang, J., & Jiang, L. (2017). Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review. In Chinese Journal of Electrical Engineering (Vol. 3, Issue 3). <https://doi.org/10.23919/CJEE.2017.8250419>
- [3] Dr. Davida Wyatta, Elektrické vozidlá v stavebníctve 2022-2042, online na: <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-vehicles-in-construction-2022-2042/854>
- [4] Sara Jensen, Vývoj elektrických vozidiel porastie v nasledujúcom desaťročí, online na: <https://www.powermotiontech.com/technologies/article/21236550/electric-vehicle-development-to-grow-over-next-decade>
- [5] Wang, Y. Y., Chi, Y. Y., Xu, J. H., & Li, J. L. (2021). Consumer preferences for electric vehicle charging infrastructure based on the text mining method. *Energies*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/en14154598>
- [6] Morrissey, P., Weldon, P., & O'Mahony, M. (2016). Future standard and fast charging infrastructure planning: An analysis of electric vehicle charging behaviour. *Energy Policy*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.001>
- [7] Zhang, Y., Chen, J., Cai, L., & Pan, J. (2019). Expanding EV charging networks considering transportation pattern and power supply limit. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(6). <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2902370>
- [8] EVESCO, Electric vehicle energy, Dokonalý sprievodca rýchlym nabíjaním jednosmerným prúdom, online na: <https://www.power-sonic.com/blog/the-ultimate-guide-to-dc-fast-charging/>
- [9] DC Fast Charging Explained, Vysvetlenie rýchleho nabíjania jednosmerným prúdom, online na: <https://evsafecharge.com/dc-fast-charging-explained/>
- [10] Technologický projekt. Stavenisková prevádzka a zariadenie staveniska. Bratislava: STU v Bratislave. ISBN 80-227-1847-5 - stavenisková prevádzka
- [11] STN 33 2000-7-704 Elektrické inštalácie nízkeho napätia. Časť 7-704: Požiadavky na osobitné inštalácie alebo priestory. Inštalácie na staveniskách a búraniskách
- [12] STN EN 61439-4 - Nízkonapäťové rozvádzače. Časť 4: Osobitné požiadavky na

- [13] STN 33 2000-4-41, Elektrické inštalácie nízkeho napätia. Časť 4-41: Zaistenie bezpečnosti. Ochrana pred zásahom elektrickým prúdom
- [14] STN 34 1610, Elektrotechnické predpisy STN. Elektrický silnoprúdový rozvod v priemyselných prevádzkach
- [15] Vyhláška č. 24/2013 Z. z. Vyhláška Úradu pre reguláciu sieťových odvetví, ktorou sa ustanovujú pravidlá pre fungovanie vnútorného trhu s elektrinou a pravidlá pre fungovanie vnútorného trhu s plynom.
- [16] Maritim Technology, Netherlands Maritime Technology, Spoločnosť EST-Floattech predstavuje nabíjačku Boost Charger – ideálnu pre EV mobilitu mimo diaľnic, online na: <https://maritimetechnology.nl/en/est-floattech-introduces-boost-charger-perfect-for-off-highway-ev-mobility/>

Michal Kuruc¹

Študijný program: Technológie stavieb, 3. ročník

TESTOVACIA METÓDA NA SVETELNÚ PRIEPUSTNOSŤ SVETLA STAVEBNÝCH MATERIÁLOV A KOMPONENTOV

TEST METHOD FOR LIGHT TRANSMITTANCE OF TRANSPARENT BUILDING COMPONENTS USING VARIOUS RADIATION SOURCES

Abstract

The intention of this study concerns on the investigation of the spectral test method for its potential implementation in analyzing of thermo-optical changes on building components, with the use of solar simulator. This is considered to be the methodology for conducting solar based research under a well-controlled environment. The optical system was designed as a lamp of one unit and a parabolic reflector used to irradiate test samples implemented in a squared box with an optical detector. The experimental setup was equipped by a spectrometer and the validity of transmittance data obtained with a reference building's transparent systems, like a simple glass pane and Plexiglas, was tested by measurements comparison with results obtained. Some of the findings in this article was already published at the conference, and this paper aims to bring this knowledge to the doctoral conference and profesional community in Slovakia.

Kľúčové slová/Key words

optické vlastnosti; priepustnosť svetla; transmitancia,

1. Úvod do problematiky

Optické vlastnosti transparentných a priesvitných materiálov predstavujú jeden z kľúčových parametrov pri vývoji efektívnych stavebných systémov. Medzi také patria napríklad aj rôzne presklené systémy plnené s materiálmi s fázovou zmenou alebo aerogelom. To ovplyvňuje aj priepustnosť svetla do vnútorného prostredia budov [1]. Vo všeobecnosti existujú rôzne spôsoby merania solárnej/svetelnej priepustnosti stavebných komponentov, kde je možné použiť laboratórne [2,3,4,5] aj vonkajšie metódy [6,7,8,9].

Solárne simulátory sú určené na opakované testovanie komponentov v ustálených laboratórnych podmienkach, pričom slnečná priepustnosť transparentných systémov, na ktorú reagujú rôzne časové škály vonkajších podmienok, sa môže výrazne líšiť. Pri implementácii celého systému je potrebné zvážiť spektrum vlnových dĺžok lampy, intenzitu, životnosť, stabilitu, cenu a ďalšie faktory. Metalhalogenidové (MH), volfrámové halogénové (TH) a xenónové (XE) výbojky poskytujú vhodný spektrálny rozsah [10].

V poslednej dobe sa niekoľko výskumných štúdií zaoberalo použitím PCM v sklenených systémoch, kde boli realizované rôzne testovacie metódy. Tieto materiály a systémy sú vysoko špecifické pre spoľahlivú optickú charakterizáciu. Celkovo v literatúre existuje len málo štúdií poskytujúcich merania solárneho simulátora, ktoré sa zvyčajne používajú na meranie priepustnosti svetla.

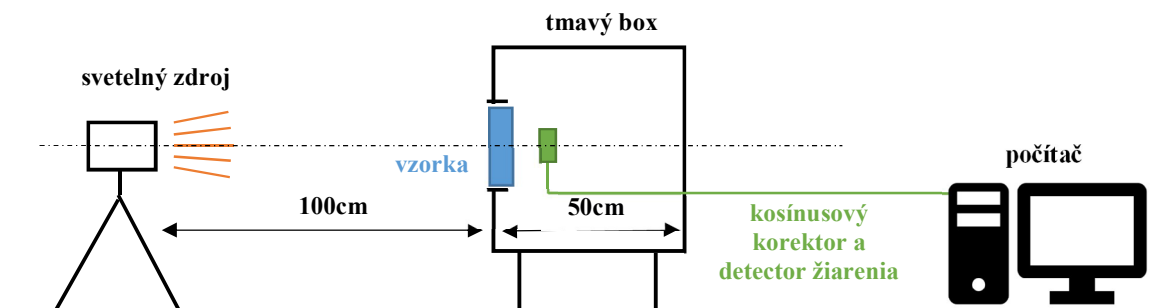
Niektoré štúdie, ako napríklad Manz a kol. [11] skúmali spektrálnu priepustnosť a odrazivosť dvoch vzoriek PCM (s teplotnými úrovňami fázovej zmeny 20 °C a 35 °C) s hrúbkami 10 mm a 20 mm v intervale vlnových dĺžok od 350 do 2500 nm. Vo výsledkoch sa transmitancia znížila vo viditeľnom spektre približne o 0,2, čo závisí od hrúbky použitých materiálov. Berthou a kol. [12]

vytvorili prototyp steny z transparentného materiálu, poly-karbonát a s vrstvou PCM. Skúmaním zistili, že transmitancia je vyššia, keď PCM je v kvapalnom stave. Nižšie hodnoty priepustnosti sa zaznamenali, keď PCM v systéme bolo zatuhnuté. Goia a kol. [13,14] vykonali experimentálne a numerické výskumy, tepelné a optické charakteristiky preskleného systému spolu s PCM. Spektrálne koeficienty ich vzoriek boli merané v rozsahu 400-2000 nm a bolo zistené, že koeficient priepustnosti nie vždy klesá s rastúcou hrúbkou PCM vrstvy.

2. Výskumné otázky a úloha príspevku

Predmetom tohto príspevku je overenie navrhovanej metódy merania spektrálnej priepustnosti svetla transparentných a priesvitných stavebných prvkov, s použitím experimentálnej zostavy. V tomto príspevku sa preto navrhuje využiť umelé zdroje simulujúce žiarenie s cieľom charakterizovať spektrálne vlastnosti meraného transparentného materiálu, alebo systému. Experimentálna zostava bola preto vybavená spektrometrom a merané boli spektrálne svetelné vlastnosti (obrázok č.1). Spektrometer bol použitý ako detektor žiarenia a ako zdroj boli použité rôzne umelé zdroje žiarenia. Počas meraní sa získali údaje s cieľom overiť experimentálne nastavenie v porovnaní s výsledkami laboratórnej spektrometrie. Experimentálna zostava bola navrhnutá v súlade s ASTM E1084-86 (2015) [15], avšak slnko ako skutočný zdroj bol nahradený umelým zdrojom v laboratóriu.

Bol navrhnutý tmavý box s rozmermi 0,5 m × 0,5 m × 0,5 m a otvor s rozmermi 0,2 m × 0,2 m na umiestnenie vzorky, situovaná priamo v prednej časti krytu boxu. Detektor žiarenia bol umiestnený priamo za meranými vzorkami, približne vo vzdialenosti 0,15 m od plochy vzoriek. Svetelný zdroj bol umiestnený vo vzdialenosti 1,0 m priamo pred meracou zostavou. Spektrometer FLAME-S-XR1-ES so spektrálnym rozsahom 200 až 1025 nm ako detektor žiarenia bol použitý a implementovaný v boxe vystavenom laboratórnym podmienkam.



Obrázok 1: Experimentálna zostava

Meranie bolo vykonané pomocou troch rôznych umelých zdrojov žiarenia a výsledky sa porovnali s referenčnými meraniami. Referenčné merania boli získané s laboratórnym spektrometrom Perkin Lambda 1050 UV/VIS/NIR a 150 mm integračnou guľou Spectralon. V jednom z meraní sa charakteristiky optického spektra získali s použitím volfrámového halogénového svetelného zdroja HL-2000-HP s nominálnym výstupným výkonom 20 W (TH20), ktorý vyžaroval sústredený úzky svetelný lúč. Ako druhý zdroj bola použitá metal-halogenidová výbojka (MH250) s výkonom 250 W a ako tretí zdroj volfrámová halogénová žiarovka (TH800) s výkonom 800 W. Podrobnejšia analýza údajov bola vykonaná v rozsahu vlnových dĺžok od 300 nm do 900 nm. Pri postupe sa najprv merané vzorky umiestnili presne oproti zdroju svetla. Cez otvor v boxe prechádzalo svetlo a senzory zachytávali referenčné hodnoty žiarenia. Následne bola testovaná vzorka umiestnená a detektory zaznamenávali preniknutú intenzitu žiarenia.

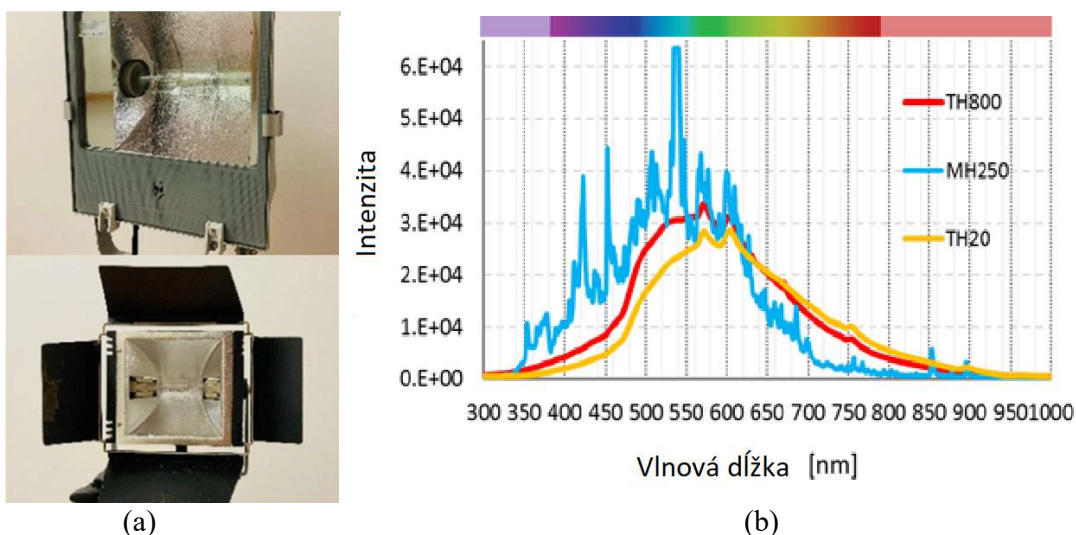
Priepustnosť spektrálnej intenzity bola vypočítaná pomocou nasledujúcej rovnice:

$$\%T_{\lambda} = \frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}} \times 100\% \quad (1)$$

Kde S_{λ} je intenzita vzorky pri vlnovej dĺžke λ , D_{λ} je intenzita pozadia pri vlnovej dĺžke λ a R_{λ} je referenčná intenzita pri vlnovej dĺžke λ .

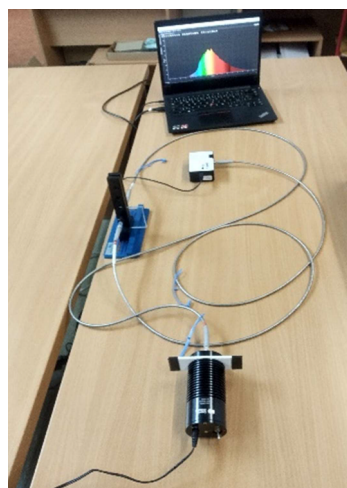
3. Zhrnutie výsledkov

Hodnoty priepustnosti merané na jednoduchej sklenenej tabuli a plexiskla sú znázornené na nasledujúcich obrázkoch. Výsledky získané zo spektrometra FLAME pre všetky tri zdroje sa zhodujú s údajmi získanými zo spektrometra Lambda 1050, najmä v rozsahu viditeľnej časti spektra (obrázky č. 2 až 5). Zatiaľ čo metal-halogenidové výbojky sa väčšinou používajú na simuláciu slnečného žiarenia v rôznych solárnych simulátoroch, v prípade zdroja MH250 existujú veľké oscilácie v rozsahu 700 až 900 nm, čo znamená, že pri použití tohto zdroja nie je možné získať spoľahlivé údaje (obrázok č.5).

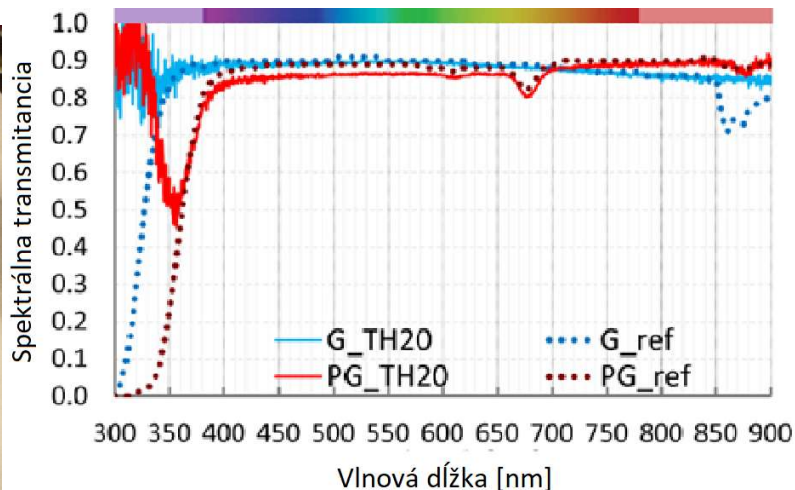


Obrázok 2: (a) svetelné zdroje: (b) vyhodnotené intenzity zdrojov: Halogen tungsten HL-2000-HP s výkonom 20 W (TH20). Halogen wolfrám žiarovka (TH800), a Metal-halide žiarovka (MH250).

Vo všetkých prípadoch testov, výsledky vykazujú, že v rozsahu 400 až 800 nm má priepustnosť hodnoty približne 90 %. Avšak pre plexisklo má spektrálna priepustnosť menšie poklesy, kde pri 670 nm vykazuje hodnoty 80 %. Podobne pre sklo má spektrálna priepustnosť poklesy pri 800 nm až na 70 % v prípade spektrometra Lambda. Pri wolfrám-halogenových zdrojoch (TH20 a TH800) takéto poklesy sa nevykazujú (obrázky č. 3 a 4). Zdroje TH20 a TH800 majú adekvátne parametre, nevykazujú oscilácie a preto boli ďalej použité v meraniach.

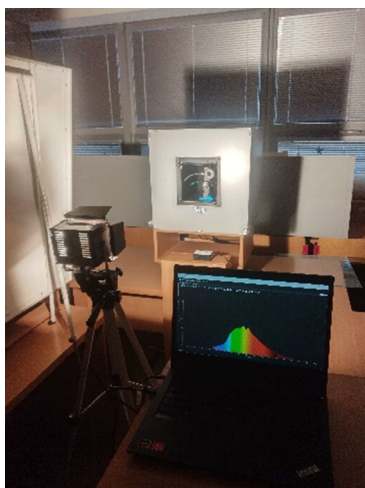


(a)

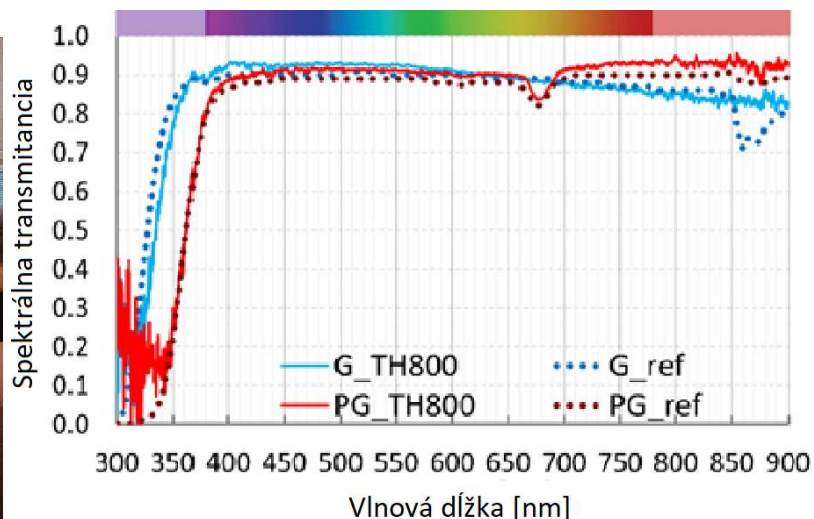


(b)

Obrázok 3: (a) nastavenie s TH20, (b) namerané vzorky (G- jednoduché sklo a PG – plexisklo) a hodnoty ich priepustností, laboratórny svetelný zdroj TH20, v porovnaní s referenčným (ref) spektrofotometrom Lambda 1050



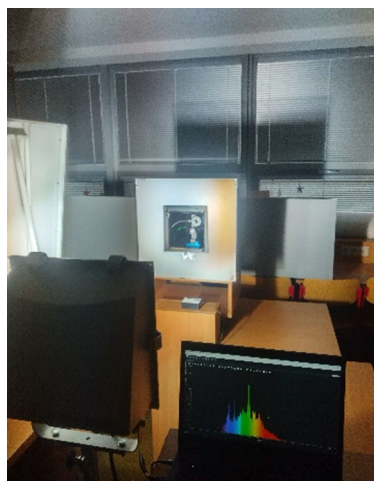
(a)



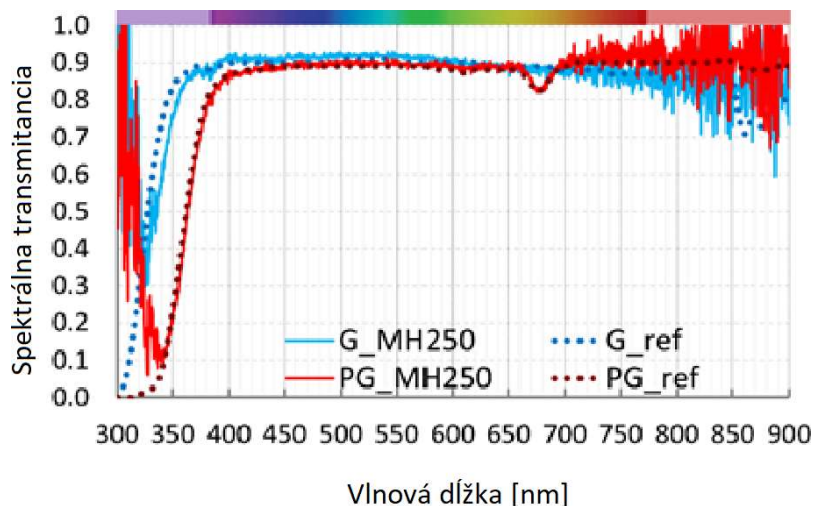
(b)

Obrázok 4: (a) zostava s reflektorom s volfrám halogénovou žiarovkou 800 W (TH800), (b) merané vzorky (G – jednoduchá sklenená tabuľa a PG – plexisklo) a ich hodnotami priepustnosti, zdroj TH800 v porovnaní s referenčnými hodnotami (ref)

Údaje o intenzite svetla a transparentnosti vykazujú, že každý skúmaný transparentný povrch by mal byť bez zakrivení. Vzor materiálov môže viesť k nerovnomernému rozdeľovaniu svetla k senzoru a do miestnosti, a vzniká rozptylový efekt žiarenia. Pri testovaní rôznych iných zložených povrchov, ako napríklad sklenených tvaroviek, je potrebné poznať charakter indexov lomu svetla cez viaceré prostredia.



(a)



(b)

Obrázok 5: (a) zostava s metalhalogenidovou výbojkou 250 W (MH250), (b) Namerané vzorky (G – jednoduché sklo a PG – plexisklo) a ich hodnoty priepustnosti, zdroj MH250 v porovnaní s referenčnými hodnotami (ref) spektrofotometrom Lambda 1050

4. Záver

Príspevok sa zameriava na problematiku optických vlastností preskleného systému, metodiku adekvátneho merania a stanovenia meracej zostavy. Meranie bolo uskutočnené na jednoduchých vzorkách ako sú sklo a plexisklo. Tieto merania boli pre začiatok adekvátne a je možnosť sa ďalej zaoberať problematike pri systémoch, ktoré sú zložené z viacerých materiálov, vrstiev, resp. komponované zo zložitejších tvarov.

Návrh a metodika merania optických vlastností prehľadných stavebných materiálov je nevyhnutná pri vývoji systémov obvodového plášťa budov so zakomponovaním progresívnych materiálov. Pri meraniach boli použité tri zdroje svetelného žiarenia (TH20, TH800 a MH250) a merala sa spektrálna priepustnosť pre plexisklo a sklo pomocou spektrometrov FLAME a Lambda 1050. Získané údaje pre oba spektrometre sú v dobrej zhode vo viditeľnom rozsahu spektra. Výsledky vykazujú, že zdroj MH250 má oscilačné správanie ako v intenzite žiarenia, tak aj v spektrálnej priepustnosti. Zdroje TH20 a TH 800 vykazujú adekvátne parametre a podľa zistení sú vhodnejšie na použitie.

Prezentovaný koncept meraní svetelnej priepustnosti na základe laboratórnych kontrolovateľných podmienok sa plánuje rozsiaholo využiť v oblasti špecifických stavebných aplikácií ako sú komponenty plnené materiálmi s fázovou zmenou, alebo rôzne iné systémy.

Zámerom ďalšej práce je preto detailnejšia analýza optických zmien v systéme sklenených tvárnic. Použitie solárneho simulátora – reflektorov v malom merítku s cieľom určiť spektrálne a dynamické zmeny vnútri skúšaných sklenených tvaroviek – skúmané zmeny v uzavretej kavitě tvarovky – resp. testy s rôznymi výplňami tekutín ako voda či parafín – PCM. S cieľom pochopiť funkčnosť PCM integrovaného do fasádnych systémov, je potrebné sa špecificky zamerať na tepelné aj optické parametre súvisiace s ich dynamickými vlastnosťami.

Tento cieľ je poháňaný súčasnými výzvami výskumu integrácie moderných prvkov do plášťa budovy s cieľom zlepšiť termo-fyzikálne vlastnosti plášťa/fasády budovy a regulovať vnútornú teplotu budovy na vhodné, adekvátne hodnoty v určitých fázach denného cyklu, v špecifických geografických a klimatických podmienkach.

Pod'akovanie/Acknowledgement

Tento výskum bol podporený projektom VEGA 1/0680/20 podporený Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR.

Príspevok obsahuje údaje, informácie a rozbor problematiky už z publikovaných príspevkov z konferencii a má za cieľ priniesť tieto poznatky aj pre doktorandskú konferenciu a odbornú komunitu na Slovensku.

Literatúra

- [1] WEI, L. et al.: Progress materials for energy, storage and conversion. *Energy Storage*. 2022, vol. 49, pp. 104–183.
- [2] MACCARI, A. et al.: An apparatus for the optical characterization of advanced transparent materials. *Appl. Opt.* 1998, vol. 37, pp. 5156–5161.
- [3] GOIA, F. et al.: Characterization of the optical properties of a PCM glazing system. *Energy Procedia*. 2012, vol. 30, pp. 428–437.
- [4] GOWREESUNKER, B. L. et al.: Experimental and numerical investigations of the optical and thermal aspects of a PCM-glazed unit. *Energy Build.* 2013, vol. 61, pp. 239–249.
- [5] HEIM, D. et al.: Dynamics of melting process in phase change material windows determined based on direct light transmission. *Energies*. 2021, vol. 14, pp. 721.
- [6] ZAPALOWICZ, Z. et al.: Estimation of total solar transmittance for Twin-Wall polycarbonate sheet with rectangular structure on the basis of experimental research. *Energies*. 2022, vol. 15, pp. 1360.
- [7] ČEKON, M. et al.: A non-ventilated solar façade concept based on selective and transparent insulation material integration: An experimental study. *Energies*. 2017, vol. 10, pp. 815.
- [8] ČEKON, M. et al.: Total solar transmittance quantifying of transparent insulation building materials based on real climate outdoor measurements. *Energy Procedia*. 2017, vol. 132, pp. 243–248.
- [9] ČEKON, M. et al.: Polycarbonate multi-wall panels integrated in multi-layer solar façade concepts. IOP Conf. Ser.: *Mater. Sci. Eng.* 2018, vol. 415, pp. 012-019,
- [10] TAWFIK, M. et al.: Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2018, vol. 90, pp.802–813.
- [11] MANZ, H. et al.: TIM–PCM external wall system for solar space heating and daylighting. *Solar Energy*, 1997, vol. 61, no. 6, pp. 369–379.
- [12] BERTHOU, Y. et al.: Full scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials. *Solar Energy*, 2015, vol. 115, pp. 733–742.
- [13] GOIA, F. et al.: Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems. *Energy and Buildings*, 2013, vol. 60, pp. 442–452.
- [14] GOIA, F. et al.: Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. *Solar Energy*, 2014, vol. 100, pp. 217–233.
- [15] ASTM, ASTM E1084-86 - Standard Test Method for Solar Transmittance (Terrestrial) of Sheet Materials Using Sunlight. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials American (ASTM), 2015.

Lukáš Lederer

Študijný program: D-TS4 technológia stavieb, 2. ročník

PROGNÓZOVANIE VÝVOJA CIEN STAVEBNÝCH MATERIÁLOV A PRÁC

Forecasting the development of the prices of building materials and works

Abstract

Due to the development of the prices of construction works and materials at the moment, it is almost impossible for contractors to comply with concluded contracts. For this reason, there was a request from the contractors to adjust the contract price after signing the contract for the work or in the process of realisation. Within this issue, forecasting the prices of construction materials and works could solve the problem of adjusting the contract price. The development forecast could be anchored in the contract conditions and at the start of construction, an optimal reserve would be established, which would eliminate the risk of the investor changing the agreed contract price and also the possible occurrence more work.

Kľúčové slová

Prognózovanie cien stavebných materiálov a prác; štatistický index; investor; úprava zmluvnej ceny

1. Úvod

Rozhodujúcim nástrojom riadenia celej výstavby a východiskovým podkladom pre vykonávanie prác je zmluva o dielo, ktorá výraznou mierou ovplyvňuje úspešnosť realizovaného diela. Zmluva o dielo býva často, najmä v súkromnom sektore, uzatváraná pod tlakom investora. Obecne platí, že podmienky zmluvy, vrátane všeobecných zmluvných a obchodných podmienok v rozsahu predložených investorom, dodávateľ prakticky nemôže meniť.

Pri stavebných zákazkách na Slovensku a v zahraničí sú najčastejšie používané dva typy zmluvných cien.

Zmluvou na základe jednotkových cien sa zhotoviteľ zaväzuje, že všetky podmienky splní za predpokladu úhrady skutočne vynaložených vlastných nákladov a primeraného zisku. Tento typ zmluvy sa obvykle používa, keď nie je presne známy rozsah prác, alebo sa v priebehu výstavby očakáva množstvo zmien rozsahu skutočne vykonávaných prác.

Zmluva s pevne stanovenou cenou (paušálna cena) zaväzuje dodávateľa k vykonaniu prác a dodávok, bez ohľadu na jeho vlastné náklady vynaložené v súvislosti s dodávkou, špecifikovanou v zmluve.

Vzhľadom na vývoj cien stavebných prác a materiálov v súčasnosti je takmer nemožné zo strany zhotoviteľov dodržiavať uzatvorené zmluvy, či už vo verejnom alebo súkromnom sektore. Z tohto dôvodu vznikla požiadavka zhotoviteľov na úpravu zmluvnej ceny po podpísaní zmluvy o dielo resp. v procese realizácie. Vývoj cien stavebných materiálov od roku 2021, ktorý bol len ťažko predvídateľný, zapríčinil takmer nulovú ziskovosť dodávateľov pri stavebných zákazkách vo fáze realizácie. Tento fakt viedol k sporu medzi zhotoviteľmi a investormi, nakoľko vo veľa prípadoch zhotoviteľia neboli ochotní pokračovať v prácach za vopred stanovených zmluvných podmienok. [1]

Na základe údajov štatistických úradov, ktoré tvoria indexy stavebných prác, materiálov a výrobkov spotrebovaných v stavebníctve, je možné konštatovať celkový nárast cien v sledovanom období od roku 2015 až po súčasnosť. Slovenský štatistický úrad zisťuje ceny vybraných reprezentantov vrátane všetkého materiálu, kompletných nákladov na realizáciu stavby (objektu) a zisku. Slovenský štatistický úrad publikuje ceny materiálov a prác zvlášť. Zahraničné štatistické úrady vydávajú jeden index, ktorý v sebe zahŕňa cenu stavebných prác aj cenu stavebných materiálov.

Rok	Kvartál	Stavebné práce v SR	Stavebné materiály v SR	Rakúsko	Nemecko	ČR
2016	Q1	100,8	98,4	98,2	101,2	100,8
	Q2	101,6	99,4	102,8	101,9	101,1
	Q3	101,2	99,7	102,0	102,4	101,4
	Q4	101,6	99,6	103,4	102,7	101,8
2017	Q1	103,4	102,4	104,7	104,0	102,2
	Q2	104,5	102,6	105,0	104,9	102,7
	Q3	105,0	102,8	107,6	105,7	103,2
	Q4	105,3	104,4	108,7	106,4	103,9
2018	Q1	107,5	108,3	110,4	108,2	104,7
	Q2	107,1	109,0	112,0	109,2	105,9
	Q3	108,7	109,5	112,5	110,6	107,2
	Q4	109,2	109,6	111,7	111,5	108,1
2019	Q1	111,3	110,6	112,1	113,4	110,0
	Q2	111,7	110,4	112,6	114,3	110,4
	Q3	112,5	111,2	111,6	115,1	112,4
	Q4	113,3	111,1	110,6	115,7	112,8
2020	Q1	114,7	110,3	111,1	117,2	114,6
	Q2	115,1	109,6	110,8	117,7	114,9
	Q3	115,4	109,9	110,8	118,1	115,8
	Q4	116,4	109,9	112,4	118,6	115,9
2021	Q1	111,7	113,6	115,9	120,8	117,4
	Q2	119,2	119,6	124,0	125,2	120,5
	Q3	124,6	129,9	126,0	129,6	123,5
	Q4	124,3	134,9	125,3	132,3	125,4
2022	Q1	135,9	145,1	133,6	138,1	133,2

Tabuľka 1 Porovnanie vývoja indexu cien u nás a v zahraničí [6,7,8,9,10]

Pri porovnaní vývoja indexu cien stavebných materiálov a prác možno konštatovať veľmi podobný priebeh. Štatistické úrady u nás a v zahraničí zaznamenali najväčší nárast v prvom polroku 2021 a začiatkom roka 2022. V tomto období stúpol index v rozmedzí od 15,8-31,5 percentuálneho bodu. V predchádzajúcom období od roku 2016 po rok 2020 sa jednalo o pozvoľný rast indexov v rozmedzí 2 až 5 percentuálnych bodov ročne.

2. Prognózovanie vývoja cien stavebných materiálov a prác

Pre prognózovanie časových radov vývoja cien stavebných materiálov a prác sú ako zdrojové dáta použité údaje zo Štatistického úradu SR. Jednotlivé dáta sú zastúpené bodovými hodnotami, ktoré sú vyjadrené v percentuálnych bodoch, kde ako základ vystupuje priemer 2015=100. Na základe údajov Štatistického úradu Slovenskej republiky, ktorý tvorí indexy stavebných prác, materiálov a výrobkov spotrebovaných v stavebníctve, je možné konštatovať celkový nárast cien. Sledované obdobie začína prvým kvartálom 2015 a končí štvrtým kvartálom 2021, nakoľko v čase vytvárania tejto prognózy ešte novšie dáta neboli dostupné.

2.1 Dekompozícia regresnou analýzou

Ako prvá predpovedná metóda časových radov bola použitá regresná analýza, pri ktorej boli preskúmané a charakterizované vzťahy medzi jednotlivými premennými – hodnotami indexu cien stavebných materiálov resp. indexu cien stavebných prác.

Hlavným cieľom regresnej analýzy je preskúmať a charakterizovať vzájomné vzťahy medzi premennými. Jej úlohou je nájsť matematickú funkciu nazývanú regresná funkcia, resp. regresný model, ktorá má najlepšie opisovať priebeh závislosti medzi premennými veličinami. V rámci porovnávaných metód je pre multikriteriálny výber použitá jednoduchá regresná analýza. Jednoduchá analýza je taká, pri ktorej sa zaoberáme jednou nezávislou premennou, závislá premenná YY , bude závisieť od nezávislej premennej XX . Užitočnou pomôckou pri vyšetrení závislosti je grafická metóda využitím bodového grafu tvoreného bodmi $[x_i, y_i]$, pre $i=1, \dots, n$ v rovine, kde x_i a y_i sú hodnoty skúmaných premenných XX a YY . Na základe priebehu bodového grafu sa rozhodujeme, o aký typ závislosti sa jedná: lineárny, kvadratický, hyperbolický, exponenciálny atď. [2]

2.2 Exponenciálne vyhladzovanie

Exponenciálne vyhladzovanie je metóda, ktorá má samoopravný mechanizmus. Tento mechanizmus je schopný prispôbiť prognózy spôsobom, ktorý je v rozpore s minulými chybami. Jedná sa o vážené kľzavé priemery súčasných a minulých hodnôt, kde sa váhy znižujú exponenciálne a preto ho možno použiť na vyhladzovanie a súčasne na vykonávanie rôznych predpovedí. [3]

Týmto spôsobom môže tento model dosiahnuť presnejšie predpovedné údaje a dopyt za posledné obdobie, okrem koeficientu vyhladenia. Metóda exponenciálneho vyhladzovania hľadá spôsob, ako eliminovať rôzne historické nepravidelné prvky v období súčasného dopytu a dosiahnuť optimálne prognostické výsledky.

Táto metóda sa považuje za vývoj metódy váženého kľzavého priemeru, pri ktorej sa počíta časový priemer, ktorý má samokorekčný mechanizmus. Metóda váženého exponenciálneho priemeru sa zameriava na úpravu prognóz spôsobom, ktorý je v rozpore s predchádzajúcimi odchýlkami, a to prostredníctvom korekcií, ktoré môžu mať vplyv na koeficient vyhladenia. [3]

2.3 ARIMA model

ARIMA (autoregressive integrated moving average) je model autoregresného integrovaného kľzavého priemeru, ktorý slúži najmä na lepšie pochopenie a predpovedanie jednotlivých bodov v budúcnosti. Modely ARIMA sa aplikujú v prípadoch, keď dáta vykazujú dôkaz nestacionárnosti v zmysle priemeru, nie však rozptylu, kde je možné použiť počiatkový diferenciálny krok jeden alebo viackrát, aby sa eliminovala nestacionárnosť strednej funkcie, trendu. Keď sa sezónnosť prejaví v časovom rade, sezónna diferenciácia by sa mohla použiť na odstránenie sezónnej zložky. [4]

2.4 Naivná metóda

V prípade naivných predpovedí jednoducho nastavíme všetky predpovede na hodnotu posledného pozorovania. Teda

$$\hat{R}_{T+|h|T} = R_T$$

Vzorec 1 Naivná metóda [5]

kde:

- R_t – sledovaná hodnota časového radu
- $|h|T$ – absolútna hodnota rozdielu posledného pozorovania

Naivné predpovede vychádzajú z modelu náhodnej prechádzky sa rovnajú poslednému pozorovaniu, pretože budúce pohyby sú nepredvídateľné a je rovnako pravdepodobné, že budú stúpať alebo klesať.

3. Multikriteriálny výber

Multikriteriálny výber tvorený pre časový rad stavebných materiálov a časový rad stavených prác. Pre multikriteriálne rozhodovanie sa pri všetkých vyššie spomínaných predpovedných metódach a chybách jedná o minimalizačné kritérium.

- dekompozícia regresnou analýzou – reg
- ARIMA model – arima
- exponenciálne vyhladzovanie – ets
- naivná metóda – naive

Predpovedné chyby

- Sigma - smerodajná odchýlka
- MSE – mean squared error - priemerný štvorcový rozdiel
- MAE – mean absolute error – stredná absolútna chyba
- RMSE – root mean squared error - odmocnina so štvorcovou chybou
- MAPE – mean absolute percentage error - stredná percentuálna chyba
- MASE - mean scaled error – stredná škálovaná chyba

Časový rad	Model	Sigma	MAE	RMSE	MAPE	MASE	MSE	Spolu	Poradie
Materiál	reg	0,430	1,000	1,000	1,000	1,000	0,204	4,634	4
Materiál	ARIMA	1,000	0,949	0,930	0,954	0,949	3,518	8,300	3
Materiál	ets	0,813	1,00	1,000	1,000	1,000	5,000	9,813	1
Materiál	naive	1,000	0,947	0,944	0,949	0,949	3,518	8,307	2
	Váha	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,500		

Tabuľka 1 Multikriteriálne vyhodnotenie predpovedí časových radov stavebných materiálov

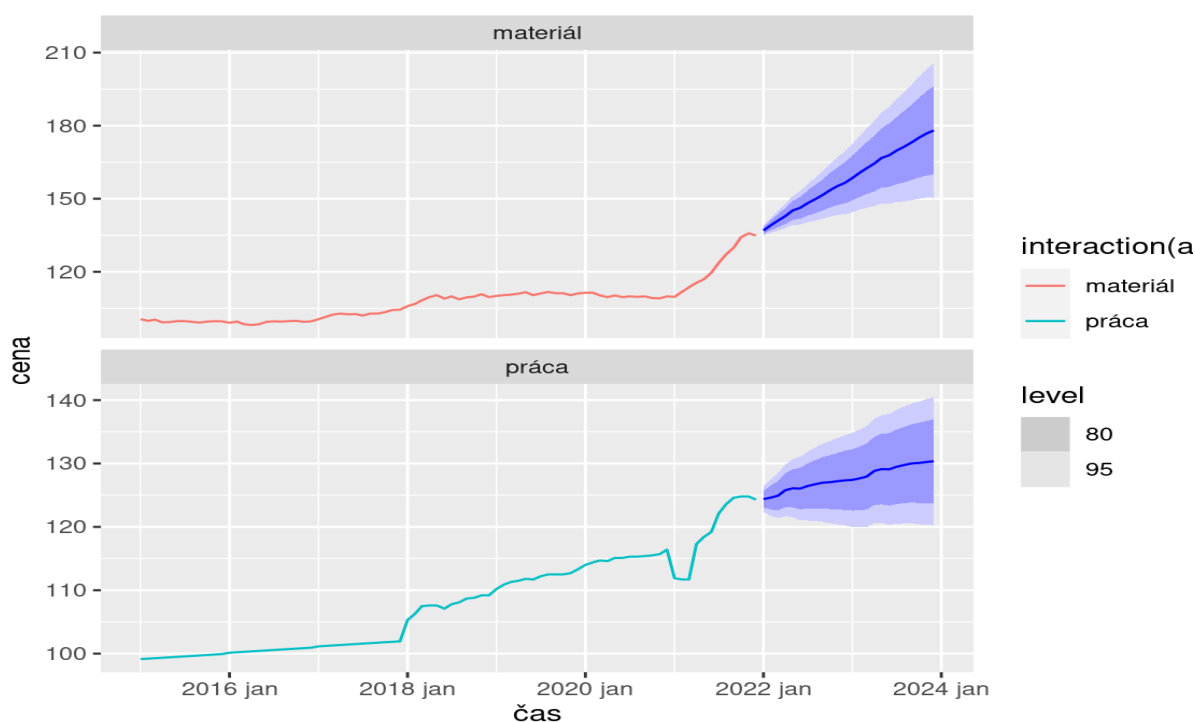
Časový rad	Model	Sigma	MAE	RMSE	MAPE	MASE	MSE	Spolu	Poradie
Práca	reg	1,000	0,981	0,957	0,994	0,986	1,576	6,494	4

Práca	ARIMA	0,429	0,841	0,925	0,829	0,842	4,567	8,433	3
Práca	ets	0,447	0,926	0,925	0,938	0,927	5,000	9,162	1
Práca	naive	0,395	1,000	1,000	1,000	1,000	4,444	8,839	2
	Váha	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,500		

Tabuľka 3 Multikriteriálne vyhodnotenie predpovedí časových radov stavebných prác

4. Predpoveď na základe multikriteriálneho výberu

Na základe multikriteriálneho výberu a pováh časových radov bolo zistené, že najlepšie je možné prognózovať časové rady stavebných prác a materiálov pomocou exponenciálneho vyhladzovania - ets modelu. Na vyobrazených grafoch sú použité dva predpovedné intervaly; tmavomodrá časť zobrazuje predpovedný interval 80%, ktoré sú predpovedané s pravdepodobnosťou 80%. Svetlomodrá časť predstavuje predpovedný interval 95%, ktorý zobrazuje predpovedanú hodnotu s pravdepodobnosťou 95%. Tmavomodrá čiara zobrazuje priemer predpovedaných hodnôt.



Graf 1 Prognóza vývoja cien stavebných materiálov a prác

ČAS	Predpoveď	Dolná hranica D80%	Horná hranica H80%	Dolná hranica D95%	Horná hranica H95%
03/2022	140,97	138,31	143,64	136,90	145,05
06/2022	146,28	141,79	150,76	139,41	153,14
09/2022	151,55	145,15	157,96	141,76	161,35
12/2022	156,50	148,04	164,96	143,56	169,44
03/2023	162,54	151,87	173,20	146,22	178,85
06/2023	167,84	154,83	180,85	147,94	187,74
09/2023	173,11	157,62	188,60	149,42	196,81
12/2023	178,06	159,95	196,17	150,37	205,75

Tabuľka 4 Prognóza časového radu cien stavebných materiálov pomocou ETS modelu

Na základe vykonanej predpovede vývoja cien je možné konštatovať, že index cien stavebných materiálov a výrobkov spotrebovaných v stavebníctve s 95 % pravdepodobnosťou medziročne stúpne o 8 až 35 % a s 80% percentnou pravdepodobnosťou stúpne o 13 až 30%. Koncoročná hodnota indexu 12/2021 bola 134,9 percentuálneho bodu. Na základe vykonanej predpovede bude mať index stavebných materiálov na konci roku 2022 hodnotu 156,5. Prognóza na koniec roku 2023 je predpokladaný nárast indexu cien stavebných materiálov v rozsahu 15-70% s pravdepodobnosťou 95%.

ČAS	Predpoveď	Dolná hranica D80%	Horná hranica H80%	Dolná hranica D95%	Horná hranica H95%
03/2022	124,91	122,59	127,23	121,36	128,46
06/2022	126,04	122,76	129,33	121,02	131,07
09/2022	126,97	122,95	131,00	120,81	133,13
12/2022	127,34	122,67	131,99	120,21	134,46
03/2023	127,94	122,73	133,16	119,97	135,91
06/2023	129,08	123,36	134,79	120,34	137,82
09/2023	130,01	123,83	136,19	120,56	139,46
12/2023	130,37	123,76	136,98	120,26	140,48

Tabuľka 5 Prognóza časového radu cien stavebných prác pomocou ETS modelu

Počiatočná hodnota indexu cien stavebných prác ku koncu roku 2021 bola 124,3 percentuálneho bodu. Medziročne na základe zvolenej predpovednej metódy predikujeme nárast o približne 3 percentuálne body a za dva roky očakávame, že hodnota indexu stavebných prác v rozmedzí od 120,26 – 140,48 s 95 % pravdepodobnosťou. S pravdepodobnosťou 80 % je možné konštatovať, že hodnota indexu stavebných prác bude v rozpätí 123,76 až 136,98 percentuálneho bodu.

ČAS	Stavebné materiály		Stavebné práce	
	Predpovedaná hodnota	Hodnota indexu	Predpovedaná hodnota	Hodnota indexu
Q1/2022	140,97	145,1	124,91	135,9
Q2/2022	146,28	152,8	126,04	138,8

Tabuľka 6 Porovnanie prognózy z aktuálnymi dátami

V súhrnnej tabuľke 6 je možné vidieť aktuálne vyhodnotenie prognózy vývoja cien stavebných materiálov a prác na Slovensku. Prognóza vývoja cien stavebných materiálov a výrobkov spotrebovaných v stavebníctve v SR sa líši od reálnej hodnoty publikovanej Štatistickým úradom SR o 4,1 percentuálneho bodu v Q1/2022 resp. o 6,5 percentuálneho bodu v Q2/2022. Prognóza vývoja cien stavebných prác je v Q1/2022 o 11,0 percentuálneho bodu resp. o 12,8 v Q2/2022 menšia ako reálna hodnota indexu cien stavebných materiálov publikovaná Štatistickým úradom SR.

Záver

Z vykonanej analýzy vývoja indexov cien stavebných prác a materiálov je možné konštatovať, že úprava zmluvnej ceny v realizačnej fáze je nutnosťou nielen na Slovensku, ale i v zahraničí. V rámci tejto problematiky by prognózovanie cien stavebných materiálov a prác mohlo vyriešiť problém úpravy zmluvnej ceny. V prípade, že by prognóza bola dostatočne presná, dala by sa zakotviť do zmluvných podmienok a pri začiatku výstavby by sa stanovil optimálna rezerva, ktorou

by investor eliminoval riziko zmeny dohodnutej zmluvnej ceny a taktiež prípadnému vzniku navyiac prác.

Použitá literatúra

- [1] OLERÍNY, M.: *Řízení stavebních projektu. Ceny a smlouvy v zahraničí praxi. I. vydání* C.H. Beck, Praha, 2002. ISBN 80–7179–665–4
- [2] CLEVELAND, R. B., CLEVELAND, W. S., MCRAE, J. E., & TERPENNING, I. J. (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1), 3–33. <http://bit.ly/stl1990>
- [3] GARDNER, ES (1985). Exponenciálne vyhladzovanie: Stav techniky. *Journal of Forecasting*, 4 (1), 1–28. [DOI]Theodosiou, M. (2011).
- [4] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. [Amazon]
- [5] HYNDMAN, R.J., & ATHANASOPOULOS, G. (2018) *Forecasting: principles and practice*, 2nd edition, OTexts: Melbourne, Australia
- [6] Index cien stavebných prác a materiálov (2015=100) – štvrťročne [sp2063qs] dostupné : http://datacube.statistics.sk/#!/view/sk/VBD_SLOVSTAT/sp2063qs/v_sp2063qs_0_00_00_sk
- [7] Indexy stavebných cien v Nemecku dostupné : <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Baupreise-Immobilienpreisindex/Publikationen/bauwirtschaft-preise-artikel.html>
- [8] Vývoj indexov stavebných cien v Nemecku dostupné : <https://bki.de/baupreisindex.html>
- [9] Index cien stavebných nákladov v rakúsku dostupné na: <https://www.statistik.at/statistiken/industrie-bau-handel-und-dienstleistungen/konjunktur/baukostenindex>
- [10] Index cien stavebných prác v Českej republike dostupné na: <https://www.czso.cz/csu/czso/ci/stavebnictvi-duben-2022>

Milan Švolík

Študijný program: Technológie stavieb (3.stupeň), ročník: 2

ANALÝZA ČIASŤOČNÉHO ODDEBNENOVANIA STROPNÝCH KONŠTRUKCIÍ A STATICKÝCH PODPIER Z POHĽADU OPTIMALIZÁCIE VYUŽITIA

ANALYSIS OF PARTIAL REMOVING OF CEILING STRUCTURES AND STATIC SUPPORTS FROM THE POINT OF VIEW OPTIMIZATION OF USE

Abstract

This article serves to find out the current state in the construction industry when using formwork for ceiling structures on real buildings. I also focused the analysis on the optimal bracing of the lower floors, due to the load transfer from the implemented ceiling structure to the lower floors. Improper use of these supports, or their absence, can cause destructive damage to the ceiling structure. It is therefore necessary to define according to what these supports are placed on construction sites and whether these procedures are correct.

Kľúčové slová

Debnenie, debnenie stropu, analýza, statické podpery, betonáž, stropná konštrukcia

1. Úvod

Výstavba budov technológiou monolitického železobetónu sa stáva stále viac a viac zaužívanou v praxi [1]. Vďaka technickému pokroku, využívania náročnejších architektonických detailov i využívania nových stavebných technológií a materiálov je potrebné prispôbiť aj debniace prvky. Je to nutnosť aj kvôli optimalizácii výrobných nákladov, dodacích lehôt a ďalších ekonomických a technických ukazovateľov [2].

Debnenie je celosvetovo využívaná stavebná podporná konštrukcia. Debnenie vieme vo všeobecnosti rozdeliť na vertikálne a horizontálne. Stropná doska je zaraďovaná ako horizontálny prvok v ktorom zaťaženie pôsobí na ich strednicovú rovinu [3]. V rámci tohto príspevku sa zameriavam na analýzu celosvetového záujmu vedeckej komunity o túto časť v obore stavebníctvo ale aj priamu analýzu momentálneho stavu na Slovenských a zahraničných stavbách.

2. Debnenie stropných konštrukcií

Debnenie je dočasná podpora výstavby betónovej konštrukcie, ktorá sa používa najmä na tvarovanie a udržiavanie čerstvého betónu, kým nedosiahne primeranú pevnosť. Debnenie tvorí forma a jej oporný systém. Forma je časť debnenia, ktorá vytvára vyžadovaný tvar betónovej konštrukcie. Skladá sa z odebnovacej plochy a zo stuženia [4]. Po betóne a armovacích prvkoch je najvýznamnejšou cenovou položkou v rozpočte realizácií objektu [5]. Konečná geometria a kvalita povrchu dokončenej betónovej konštrukcie vo veľkej miere závisia od systému debnenia použitého pri konštrukcii [6]. Preto je potrebné pred začatím výstavby dôkladne zvážiť výberové kritériá a základné požiadavky na debniaci systém [7, 8]. V prvom rade by mal mať debniaci systém dobrú

kvalitu z hľadiska pevnosti, životnosti a tuhosti a mala by byť zaručená bezpečnosť procesu výstavby [9, 10]. To si vyžaduje starostlivú analýzu možných zaťažení, ktoré by pôsobili na debnenie. Potom sa vyberie vhodný debniaci materiál a systém lešenia, ktorý má primeranú pevnosť, aby uniesol zaťaženie. Debnenia rozčleňujeme na dva druhy a to debnenia na jednorazové použitie a debnenia na viacnásobné použitie [11, 12].

2.1. Konvenčné debnenia stropu

Pre tradičné tesárske debnenie sa používa rezivo z mäkkého stavebného dreva. Na plášť sa používajú nehobl'ované aj hobl'ované dosky II. a III. kvalitatívnej triedy. V rámci Slovenska sa najčastejšie používa smrekové drevo [13]. V rámci celosvetového merítka sa dá povedať, že sa mení typ používaného materiálu debnenia od polohy krajiny, podnebia, kultúry. V ázijských krajinách, kde je veľká dostupnosť bambusu, poprípade v krajinách tretieho sveta ako je Etiópia, kvôli nedostatku finančných zdrojov využívajú debnenia z bambusu [14].

2.2. Systémové debnenia

Systémové debnenie je kompletný, priemyselne vyrábaný súbor prvkov a dielcov formy, zahŕňajúci aj oporný a podperný systém a ochranné lešenie. Systém je navrhnutý tak, aby boli jeho prvky kompatibilné. Systémové debnenia väčšinou zabezpečujú kvalitný povrch betónovej konštrukcie. Pri použití systémových debnení sa dosahuje nízka stavenisková prácnosť (0,2 až 0,65 Nh/m²) a vysoká obratovosť jednotlivých prvkov debnenia (200 až 400 obrátov) počas ich životnosti [15].

- Tieto debniace systémy sú väčšinou modulárne, ktoré sú určené na rýchlosť a efektívnosť.
- Sú navrhnuté tak, aby poskytovali zvýšenú presnosť a minimalizovali odpad pri výstavbe a väčšina z nich má zabudované vylepšené funkcie ochrany zdravia a bezpečnosti.
- Systémové debnenia sú navrhované tak, aby boli čo najviac ekologické a šetrné voči prírode.

3. Metodika

Metodika analýzy spočíva v zozbieraní dát celosvetových publikácií na danú tému. V rámci tohto zberu je nutné zdefinovať, koľko z celkových publikácií o debnení sa zameriava priamo na debnenie stropu. Po zedefinovaní vieme zistiť, v akom pomere sa vedecká komunita zaujíma o debnenie stropných konštrukcií, v pomere s debnením ako takým. Dôležitou súčasťou je aj zistiť väzby na publikácie, ktoré sa touto témou zaoberajú. Ďalším krokom je analyzovať súčasný stav na slovenských stavbách. Túto analýzu budem robiť formou Google formuláru, v ktorom sú zedefinované jasné otázky. Tento formulár som zaslal na stavby v rámci Slovenska a blízkeho zahraničia.

4. Prehľad svetových publikácií

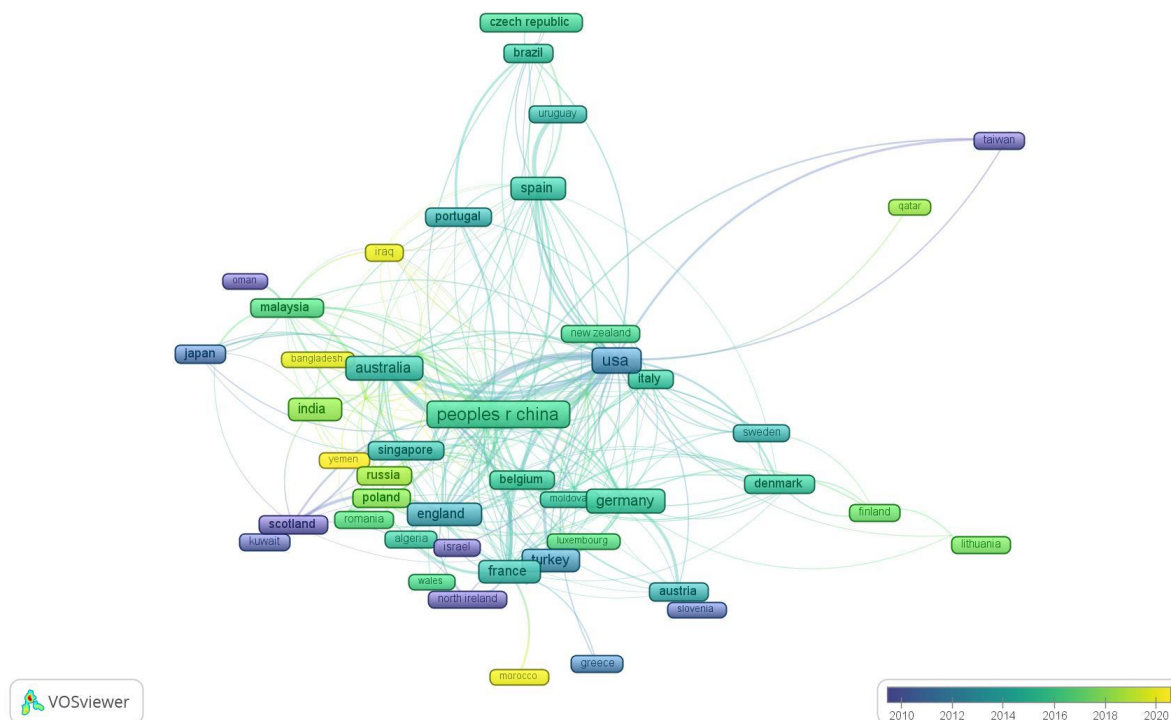
V rámci mapovania publikačných aktivít v zahraničí som využil voľne dostupný softvér VOSviewer, ktorý sa používa na bibliografické mapovanie s grafickým znázornením

bibliografických máp [16]. VOSviewer používa súbor dát z Web of science, ktoré pozostávajú z publikácií, citácií a spolucitácií autorov [17]. V rámci výberu publikácií som si zvolil viacero kľúčových slov. Ako prvý krok som zvolil pre porovnanie kľúčové slovo: debnenie „formwork“. Pri použití tohto kľúčového slova mi databáza Web of science sprístupnila 2528 výsledkov. Keďže téma debnenie je veľmi obsiahla, v druhom kroku som zadefinoval kľúčové slová: Debnenie stropnej dosky „Ceiling formwork“, „Slab formwork“ a zaťaženie debnenia stropnej dosky „Weight of the slab formwork“. Celkový počet výsledkov v druhom kroku bolo 362. Následne som z týchto výsledkov spravil bibliografické mapy na základe krajiny publikácie.

4.1. Bibliografická mapa

Prvý krok

V prvom kroku, kedy som analyzoval slovo debnenie „formwork“ môžeme vidieť, že ide o vysoký počet publikácií v rámci celého sveta. Publikácie majú medzi sebou prepojenie a využívajú sa informácie a dáta z rôznych iných publikácií. Zaujímavým trendom je, že krajiny z blízkeho východu, ako Maroko, Jemen, Irak sa dostávajú do popredia v publikáciách od roku 2020. Môže to mať aj za následok zvyšujúca sa životná úroveň, čím úzko súvisí aj kladenie dôrazu na kvalitnejšie a bezpečnejšie realizovanie stavieb. V rámci analýzy bolo zahrnutých 96 krajín z ktorých boli publikácie na túto tému.



Obr. 1 Medzinárodné prepojenie publikácií na tému debnenie

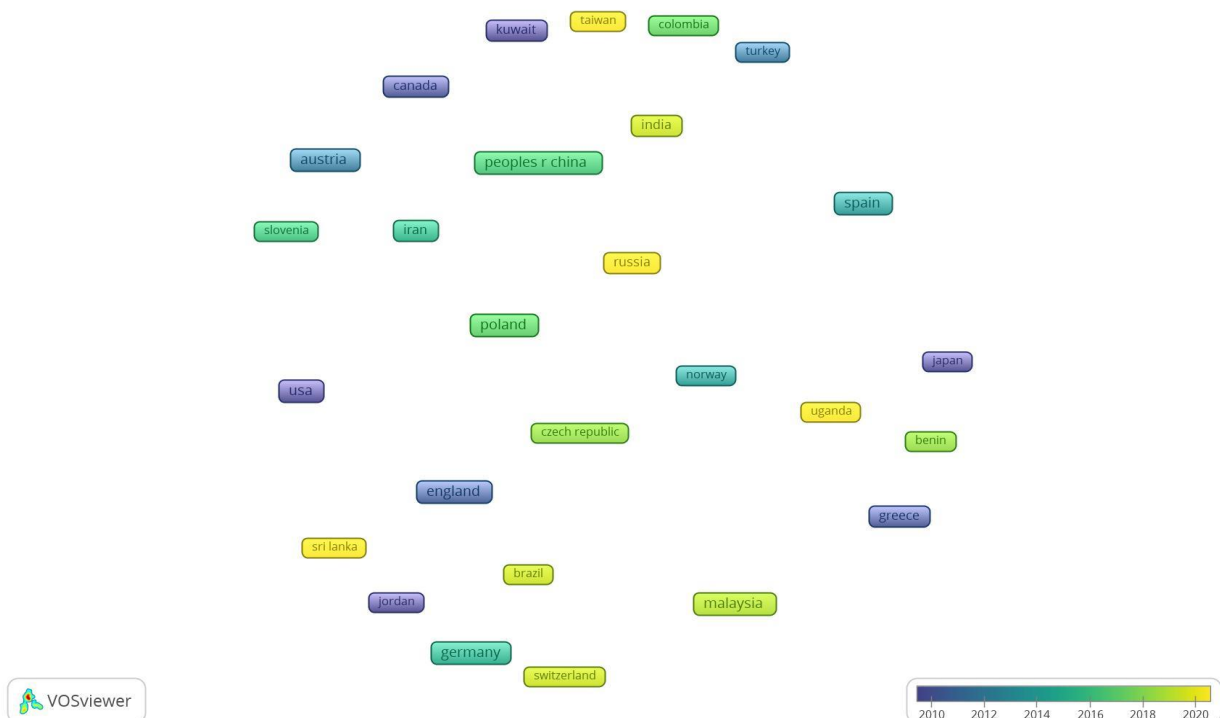
Z dát z Web of science vychádza, že najviac publikácií na tému debnenie bolo zaznamenaných v rozmedzí rokov 2010 až 2022. Dá sa povedať, že vedecká komunita sa tejto téme začala venovať len v posledných rokoch. Prvá zaznamenaná publikácia bola z roku 1964 [18]. Najviac publikácií bolo vydaných v roku 2020.



Graf 1 Počty publikácií v rozmedzí rokov 2010-2022

Druhý krok

V tomto kroku som sa zamerlal na špecifikáciu problému a to na debnenie stropných konštrukcií. Z už získaných dát vieme povedať, že v rámci témy debnenie sa len malá časť autorov zaoberá práve publikáciami v oblasti debnenia stropov. Na obrázku č.2 môžeme vidieť, že publikácie sa medzi sebou necitujú a tým sa ani nerozvíja medzinárodná spolupráca v tejto téme. Táto analýza nám ukázala, že v jednotlivých krajinách sa pravdepodobne venujú špecifickým oblastiam v debnení stropných konštrukcií, ktoré nenachádzajú využitie inde vo svete.



Obr. 2 Prepojenie celosvetových publikácií na tému debnenie stropných konštrukcií

V rámci hustoty publikácií vieme na prvotné priečky dať krajiny ako Španielsko, USA a Malaysia.

5. Prehľad využívania debnenia cez aktívny formulár

Ako súčasť analýzy som využil formulár na zistenie využívania debnenia stropných konštrukcií na stavbách. V rámci analýzy som požiadal pracovníkov rôznych stavieb na Slovensku, aby mi tento formulár vyplnili. Vo formulári som definoval základne otázky a to otázky o údajoch stavby, druhoch a typoch debnenia stropu, ktoré používajú, otázky o spôsobe určenia umiestnenia podpier na nižších podlažiach, počte podlaží ktoré sú podstojkované a spôsobe využitia priestorov. V rámci výstavby sa stretávame s rôznymi spôsobmi realizácie debnenia stropov. Niektoré sú efektívne, niektoré sú menej efektívne. V rámci analýzy som chcel určiť kde a prečo to efektívne nie je a v rámci týchto dát navrhnúť optimalizáciu celého procesu. Spustenie formuláru bolo dňa 01.10.2022. a formulár bude zbierať dáta až do 01.03.2023.

5.1. Respondenti

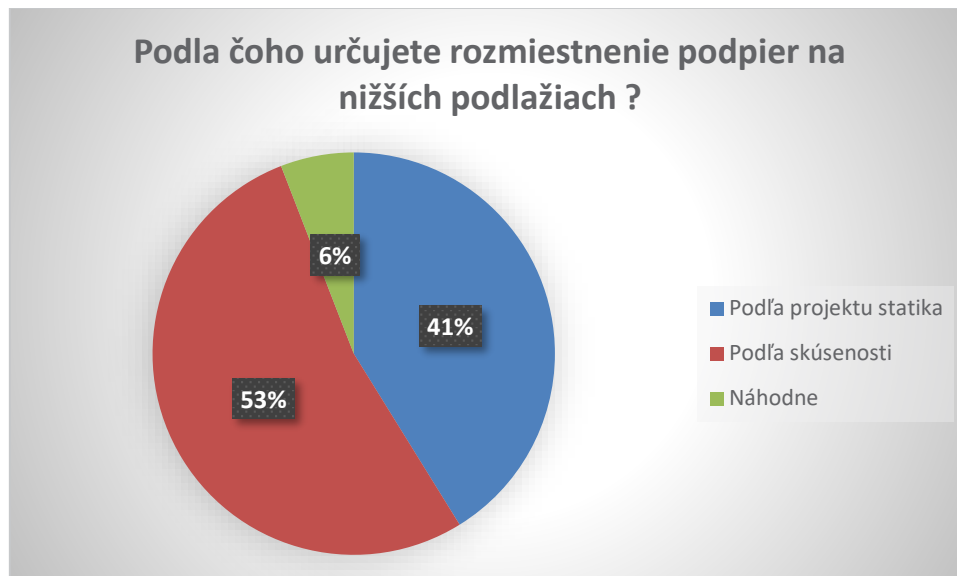
V rámci analýzy som obdržal 17. odpovedí z rôznych stavieb. Medzi respondentami sa nachádzali pracovníci na postoch Stavbyvedúci, Asistent stavbyvedúceho, Asistent projektového manažera a pracovníci na pozícií majster. Respondenti boli oslovení so žiadosťou o vyplnenie údajov potrebných pre tento výskum, žiaľ vo veľkej miere množstvo pracovníkov, tieto údaje odmietla udávať. Avšak v rámci analýzy sa podarilo zozbierať údaje zo stavieb v rámci Bratislavského, Nitrianskeho, Trnavského, Košického kraja a stavieb z Belgicka. Vzhľadom na špecifickú vzorku vo formulári je tento počet odpovedí dostačujúci k analýze. Všetky odpovede sa týkajú len bytových domov, alebo polyfunkčných komplexov.

5.2. Využívaný typ debnenia

Z prieskumu vzišlo, že najviac používané debnenia na stavbe sú Doka a Peri. Najčastejšie používané debnenia bolo Dokaflex od spoločnosti Doka v celkovom počte 14. Od spoločnosti Peri bolo využívané debnenie na 3 stavbách a bolo to konkrétne systémové debnenie Multiflex. Na dvoch stavbách používali ako doplnkové debnenia stropov Ringet od AS TRADING.

5.3. Podstojkovanie nižších podlaží

Dotazník sa zaoberal aj podstojkovaním nižších podlaží, kvôli prenosu zaťaženia z realizovanej stropnej konštrukcie do nižších podlaží. V rámci odpovedí som zistil, že všetky stavby dbajú na optimálne podstojkovanie nižších podlaží, až na jednu. Rozdiel sa líšil najmä spôsobom podstojkovania. Zatiaľ, čo len v siedmich prípadoch sa na stavbe riadili projektom od statika. V deviatich prípadoch to bolo podľa skúseností stavbyvedúceho, alebo majstra. V jednom z prípadov sa podstojkovanie neriešilo vôbec. Podpery pracovníci rozmiestňovali náhodne.



Graf 2. Určovanie rozmiestnenia podpier v nižších podlažiach

5.4. Využívanie priestorov v nižších podlažiach

V dotazníku vyšlo, že v 76% prípadoch sa využívajú priestory pod realizovanou stropnou konštrukciou. Využívanie sa týka výlučne skladovania stavebného materiálu, prípravou, alebo realizáciou ďalších stavebných prác. Len v troch prípadoch tieto priestory využívali na ďalší stavebný postup. V deviatich prípadoch sa tieto priestory využívajú len ako skladovacie priestory.



Graf 3. Využitie nižších podstojkovaných priestorov

5.5. Získané dáta

Dáta boli získané zo stavieb: Eurovea, Zvirn1, Rendez, Polyfunkčný dom Vodotika, Slnčnice, Kopčianka, Klingerka, Ovocné sady, Bytový dom Kozárovce, Bytový dom Tlmače, Autobusová stanica Mlynské Nivy, Aarschot de luxe Torres- Belgicko, De Torens- Belgicko, QRF Leuven- Belgicko, Cukrovar obytná zóna, Bytový komplex Popradská.

6. Výsledky analýzy

Z odpovedí vieme povedať, že na stavbách sa používajú najznámejšie značky systémových debnení. S konvenčným debnením sme sa v žiadnej z odpovedí nestretli, čiže sa dá uvažovať, že tieto debnenia v rámci väčších stavieb sa už nepoužívajú. Z výsledkov analýzy môžem konštatovať, že na 59% stavieb vo formulári sa nedbá na dôsledné podstojkovanie nižších podlaží podľa projektu statika. Na stavbách sa necháva táto dôležitá úloha na realizátorov, poprípade stavbyvedúcich, aby rozhodli v akej miere bude toto podstojkovanie. Čo je paradox, analýzy výsledky ukazujú, že na všetkých stavbách sa dbá na optimálne podstojkovanie, kde v prípadoch okrem stavieb, ktoré majú vypracované projekty podstojkovania od statikov, berú subjektívne rozhodnutie stavbyvedúceho ako optimálne.

7. Záver

Zo všetkých vyhľadávaní publikácií na tému debnenie na Web of Science len 14,3% sa zaoberá aspoň okrajovo témou debnenia stropných konštrukcií. Z prehľadu z VOSviewer vidíme, že krajiny sa zaoberajú v rámci vedy debnením stropných konštrukcií len vo svojom štáte. Necitujú a nepreberajú skúmané informácie z iných krajín, čo sa nedá porovnať so všeobecnou témou „debnenie“. Keď som sa bližšie pozrel na využívanie debnení stropu na stavbách, v mnohých som našiel konsenzus. V rámci využívania typu debnenia vieme povedať, že na všetkých stavbách sa využíva systémové debnenie od spoločností Doka a Peri, avšak rozdiely začínajú pri nižších podlažiach. Graf 2. nám ukazuje rozdiely pri rozmiestnení podpier nižších stropných konštrukcií. Až 59% stavieb rieši rozmiestnenie podpier len podľa skúseností, poprípade nerieši vôbec. Toto môže mať za následok buď zbytočné prestojkovanie podlažia, alebo deficit v podstojkovaní. Obidva varianty majú negatívne následky. V prípade prestojkovania podlažia sa zbytočne zaberá priestor, ktorý môže byť využitý. Rovnako zbytočne sa zaberajú podpory, ktoré môžu byť použité na iných miestach, poprípade nemuseli byť vôbec zapožičané. V prípade nedostatočného podstojkovania môže hroziť deformácia dosky od zaťaženia z realizovanej stropnej dosky, čo môže mať za následok finančne náročné sanovanie konštrukcie, v horších prípadoch deformáciu alebo deštrukciu konštrukcie. Graf 3. nám ukazuje využitie priestorov v podstojkovaných častiach, kde vo viac ako polovici prípadov sa tieto priestory využívajú ako slady materiálu. Len pri 18% sa tieto priestory využívajú na ďalšie práce a je to presne v tých prípadoch kde používajú projekt podstojkovania od statika, čož poukazuje na to, že tento projekt zefektívňuje výstavbu. Táto štúdia poukazuje na to, že keby sa v rámci stavby viac optimalizovalo podstojkovanie nižších podlaží v statických bodoch, mohli by sme eliminovať zbytočné prestojkovanie. Pri otvorení priestoru by bolo možné vykonávať dodatkové práce na danom podlaží, čo by urýchlilo istú časť dokončovacích prác, bez rizika možných defektov na stropnej konštrukcií.

Literatúra

- [1] Z. Orłowski, "Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego", PWN, 2009
- [2] K.Loganathan, K.E.Viswanathan " A STUDY REPORT ON COST, DURATION AND QUALITY ANALYSIS OF DIFFERENT FORMWORKS IN HIGH-RISE BUILDING"
- [3] Bajtoš, J.: Betónové konštrukcie 1, pp. 17, Kontakt plus 2002, ISBN 80-88855-42-X

- [4] Juriček, I.: Technológia pozemných stavieb – Hrubá stavba, Bratislava: JAGA GROUP, 2001. pp. 70-79
- [5] Baxi, C. K., 2011. Formwork – A Concrete Quality Tool. S.I., 36th conference on our world in concrete & structures, August 14-16. Singapore
- [6] H. Schipper, “Double-curved precast concrete elements: Research into technical viability of the flexible mould method,” 2015.
- [7] L. R. Peurifoy, and D. G. Oberlender, "Formwork for Concrete Structures 4th edition," The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [8] C.-H. Ko, and J.-D. Kuo, “Making formwork design lean,” *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, vol. 9, no. 1, pp. 29-47, 2019
- [9] K. Brózda, and J. Selejdak, “Safety of Formworks in the Engineering and General Construction Sector,” *System Safety: Human-Technical Facility-Environment*, vol. 1, no. 1, pp. 284-290, 2019.
- [10] V. Rajeshkumar, S. Anandaraj, V. Kavinkumar *et al.*, “Analysis of factors influencing formwork material selection in construction buildings,” *Materials Today: Proceedings*, 2020/07/28/, 2020.
- [11] Juriček, I a kol. Konštrukcie budov z monolitického betónu, Bratislava, Eurostav 2005
- [12] Ladra J, a kol. Technológie stavieb 11. Realizace železobetónové monolitické konštrukcie budov. Praha: ČVUT 2002.
- [13] Bašková, R.: Realizácia betónových konštrukcií, Košice: Stavebný trh, 2008 , pp.38
- [14] Ermias A. Amede, Ezra K. Hailemariam, Leule M. Hailemariam & Denamo A. Nuramo | (2022) Identification of factors on the possibility of bamboo as a scaffolding and a formwork material in Ethiopia, Cogent Engineering
- [15] Bašková, R.: Realizácia betónových konštrukcií, Košice: Stavebný trh, 2008 , pp.41
- [16] Van Eck, N.J., Waltman, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* **84**, 523–538 (2010).
- [17] www.vosviewer.com
- [18] <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:A19648824B00020>

Adam Uhlík¹

Student program: Construction Technology, 4th. Year

POROVNANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ CEMENTOVÝCH ZMESÍ PRE 3D TLAČ V STAVEBNÍCTVE

COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT MIXTURES FOR 3D PRINTING IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Abstract

The article is devoted to the mechanical properties of cement mixtures used for 3D printing of houses. Specifically, properties such as tensile strength and bending strength and, last but not least, the density of the material were measured using test methods. Measurements and comparisons were made on three different cement composite mixes that are optimized for such 3D technology. The goal was to compare the properties of a commercially available mixture and two mixtures designed by us. Appropriate setting of the material composition depending on the strength characteristics and finding the ideal ratio between the rheology of the fresh mixture and the mechanical properties of the hardened structure.

Klíčové slová

3D tlač; mechanické vlastnosti, pevnosť v tlaku; pevnosť v ťahu; cementový kompozit; materiál;

1. Úvod

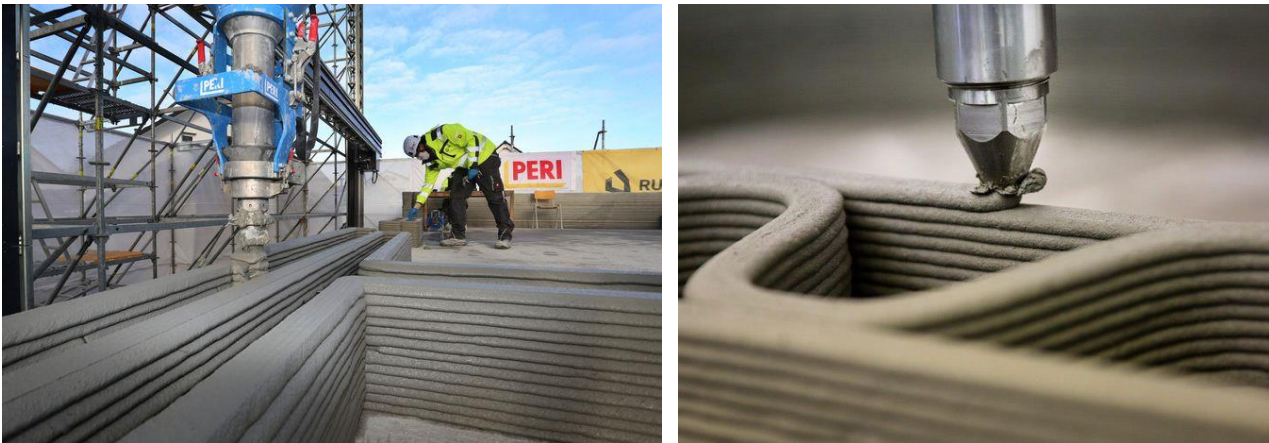
Aditívna výroba, známa tiež ako 3D tlač si nachádza svoje uplatnenie aj v stavebníctve. Je to počítačom riadené postupné vrstvenie materiálov na vytvorenie trojrozmerných tvarov. 3D tlač v stavebníctve má výhody plnej automatizácie procesu, rýchlejšieho času výstavby, nízkych nákladov na pracovnú silu a menšieho stavebného odpadu v porovnaní s tradičnou technológiou výstavby [1]. V súčasnosti bolo pomocou technológie 3D tlače úspešne vytlačených pomerne veľké množstvo stavebných konštrukcií a preto 3D tlačený betónový kompozit má veľký potenciál v praktických aplikáciách aj pre budúce použitie v stavebníctve, ako napr. cenovo dostupná výstavba v rozvojových krajinách alebo v našich zemepisných šírkach ako technológia pre rýchlu a dôstojnú radovú zástavbu pre sociálne znevýhodnené skupiny.

Materiál používaný pre takúto technológiu je 3D tlačený betónový kompozit, je špeciálny typ betónu, ktorý je možné nanášať prostredníctvom 3D tlačiarne vrstvu po vrstve bez akejkoľvek podpory debnenia. Jeho dôležité technické vlastnosti a technologické parametre vrátane spracovateľnosti, času tuhnutia a mechanických vlastností, je možné optimalizovať pomocou vhodného výberu zloženia materiálov a nastavenia parametrov tlače.

¹ Adam Uhlík, Ing., Department of Material Engineering, SvF STU, Radlinskeho 11, 81005 Bratislava

2. Vlastnosti a zloženie cementového materiálu pre 3D tlač

Takýto materiál musí byť samozrejme kompatibilný s 3D tlačiarňou a s príslušnou tryskov, ktorou sa bude materiál vytlačať. Vzhľadom k tomu, že proces tlače vyžaduje kontinuálny, vysoký stupeň kontroly materiálu počas tlače, sa musí tomu prispôbiť aj jeho materiálové zloženie a potrebné vlastnosti a preto sa uprednostňujú vysoko výkonné stavebné materiály. Keďže sa pre 3D betónovú tlač nepoužíva žiadne nosné debnenie, tradičný betón sa nedá priamo použiť. Pre zaistenie malej alebo žiadnej deformácie vo vrstvách sa vyžaduje buď nízko až nulový roztekajúci sa betón. Tlač takéhoto kompozitu vyžaduje špeciálnu starostlivosť o granulometrické vlastnosti jemných častíc. V tomto ohľade má tvar a veľkosť častíc plniva veľký vplyv na správanie pri zhutňovaní, ako aj na pevnosť materiálu. Preto sa vo väčšine cementových kompozitov pre 3D tlač používajú jemné častice agregátov ako je piesok. V zložení takéhoto špeciálneho kompozitu pre 3D technológiu hrajú dôležitú úlohu aj prísady a prísady, tie sú prítomné v materiály spolu s kamenivom, cementom a vodou, a pridávajú sa na zlepšenie vybraných vlastností materiálov. [2].



Obrázok 1: Príklad procesu 3D tlače domov a detail vytlačeného cementového kompozitu [3], [4]

Mechanické vlastnosti ako dobrá pevnosť konštrukcie je základná požiadavka pri každej stavbe, pri takejto technológii sú dobré pevnosti taktiež veľmi dôležité je dôležitá taktiež pevnosť medzi vrstvami. V 3D betónovej tlači, po vytlačení vrstvy, musí materiál dosiahnuť dostatočnú pevnosť, aby niesol zaťaženie nasledujúcich vrstiev. Preto sú pevnostné charakteristiky takýchto materiálov jedny z najdôležitejších. [5]

3. Experimentálna časť

V tejto časti sme sa preto pozreli na porovnanie 3 zmesi materiálu a vyhodnocovali pomocou experimentálnych testov ich pevnostné charakteristiky.

3.1 Použité materiály a stavebné metódy

V rámci experimentálnej časti sme preskúmali 3 rôzne cementové zmesi v rámci. Zmesi sa delia podľa čísel 1, 2 a 3. Prvá zmes označená číslom 1 je suchá zmes skladovaná vo vreciach, ktorá je určená na 3D tlač a bude sa označovať ako referenčná zmes. Je to komerčne dostupná zmes MasterFlow 3D 100 od spoločnosti BASF, ktorá je založená na hlavnej zložke - portlandskom cemente a po zamiešaní s vodou je zmes pripravená k použitiu. Výrobca ju nazýva špeciálnou nezmršťovacou zmesou, ktorá má veľkosť zrna do 0,5 mm. Výrobca tiež uvádza, že zmes má hlavnú vlastnosť a tou je dobrá spracovateľnosť, a to je 1 h / + 20° C pri 0,165 l / kg vody, čo znamená vysokú pevnosť, nulovú segregáciu a tiež rýchle stvrdnutie [6]. Čísla 2 a 3 označujú ďalšie zmesi, ktoré sú výsledkom dobrej a vhodnej kombinácie cementu a komerčne dostupných prísad. Takéto zmesi v správnom pomere spravidla vedú k požadovanému účinku pre takúto technológiu. Vďaka riadenému a nepretržitému procesu hydratácie si takéto zmesi zachovávajú dostatočný čas spracovateľnosti a majú tiež rýchly nárast počiatkových, najmä mechanických vlastností a následne sú schopné dosiahnuť spoľahlivú stabilitu po vytvrdnutí. V našich zmesiach 2 a 3 sme použili cement CEM I 42,5 R. Ide o portlandský cement s rýchlym nárastom pevností a vyznačuje sa výbornou kompatibilitou s použitými plastifikačnými prísadami, nízkymi objemovými zmenami, vysokým vývinom hydratačného tepla a vysokými konečnými pevnosťami v tlaku [7]. Ďalej bol použitý pri zmesi 2 piesok s veľkosťou zrna do 0,1-0,6 mm a pri zmesi 3 piesok o veľkosti zrna 0,3-0,8mm. Piesok s cementom boli v pomere 1:1. Z prímiesy boli použité mikrosilika, ktorá je prevažne tvorená z SiO₂ a prísadu tvoril superplastifikátor Carboxyl ether vo forme prášku na báze polykarboxylátu, ktorý výrazne predlžuje čas spracovateľnosti (60 – 90 minút) bez zásadného vplyvu na priebeh tuhnutia a tvrdnutia[8]. Používa sa na výrobu bežných transportbetónov, ľahkozhutiteľných, vodotesných a pohľadových betónov. S jeho pridaním sa dosahuje vysoká tekutosť a pohyblivosť zmesi bez jej segregácie. Pomery prísad boli na jeden diel cementu 0,2 diely mikrosilikátu a cca 0,004 dielu superplastifikátora pri zmesi 2 a pri zmesi 3 cca 0,007 dielu superplastifikátora.



a)



b)



c)

Obrázok 2: a) komerčne dostupná zmes MasterFlow 3D 100 od spoločnosti BASF, b) použité prísady a prímiesy, c) Normová miešačka na zmiešanie zmesi

Prvá zmes číslo 1, ktorú sme označili ako referenčnú, bola vyrobená podľa postupu výrobcu. Koeficient vody pre túto referenčnú zmes je uvedený ako 0,156l/kg. Obsah vody v tejto hodnote je vo všeobecnosti pomerne nízky a možno predpokladať, že zmes bude obsahovať aj prísady alebo prísady, ktoré ovplyvnia spracovateľnosť čerstvej zmesi. Koeficient vody ostatných zmesí 2 a 3 nebol vopred známy, takže sa odvážil s trochou vody - suchá zmes sa najskôr zmiešala a následne sa zvyšná voda pridávala, až kým sa nedosiahla požadovaná konzistencia zmesi. Pre zmesi 2 a 3 bol koeficient vody približne rovnaký ako pre referenčnú zmes 1. Koeficient vody pre zmes 2 bol 0,181l/kg a pre zmes 3 sa sme považovali za ideálny koeficient 0,166. Tieto zmesi vykazovali optimálnu konzistenciu pri odlievaní zmesí do foriem.

3.2 Mechanické vlastnosti a ich testovanie

Na tieto testy sa použili skúšobné vzorky na analýzu vo forme trámecov s rozmermi 160 x 40 x 40 mm. Vzorky boli uložené v prostredí so zvýšenou vlhkosťou. Mechanické vlastnosti vzoriek boli štandardne testované po 7, 14 a 28 dňoch. Toto meranie, ktoré sa uskutočnilo v rôznych fázach vytvrdzovania betónu, nám zlepšilo prehľad o skúmaných cementových kompozitoch a ich vývoji pevnostných charakteristík.

Testovanie mechanických vlastností ako sú pevnosť v tlaku a pevnosť v ťahu prebiehalo na vzorkách každej zmesi. Pevnosť v ťahu v ohybe sa vykonala na vzorkách v tvare trámca s nosnou vzdialenosťou 100 mm medzi podperami. Následne po ukončení skúšky pevnosti v ťahu bola na oboch častiach trámca vykonaná tlaková skúška podľa normy STN EN 206-1, kde kontaktná plocha bola 40 × 40 mm. Obrázok 3 znázorňuje skúšku pevnosti v tlaku v skúšobnom lise, pri ktorej je možné pozorovať rozdiel v poruche na vzorke zmesi 1. Tento indikátor nám naznačil, že zmes od výrobcu BAHM obsahuje aj prímes špecifického typu mikrovlákná, ktoré tu pôsobia ako rozptýlená výstuž a čiastočne bráni porušeniu materiálu.



a)



b)



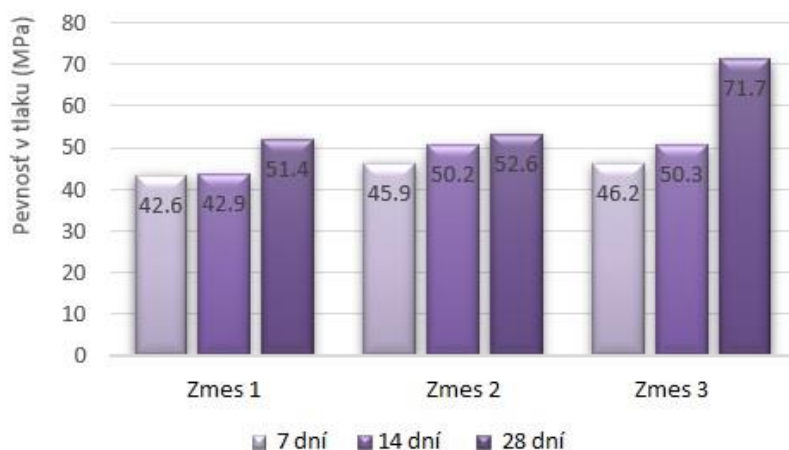
c)

Obrázok 3: a) Odliate trámce vzoriek b) trámce po skúške pevnosti v ťahu c) Zobrazuje porušenie vzorky zmesi 1 pri skúške pevnosti v tlaku

3.3 Zhodnotenie nameraných výsledkov

V tejto kapitole si popíšeme rôzne namerané mechanické vlastnosti takýchto materiálov, na obrázku 4 sú znázornené pevnosti v tlaku v rôznych časových intervaloch. Následne na obrázku 5 je znázornený vývoj pevností v ťahu v ohybe. S takmer identickými hodnotami po 7 a 14 dňoch pre zmesi 2 a 3 vyzerá vývoj pevnosti v tlaku v priebehu času v normálnych hodnotách. Po 28 dňoch však môžeme vidieť významný rozdiel medzi zmesami a to najmä pri zmesi 3, kde vidíme rýchly nárast pevnosti v tlaku až o viac ako 20 MPa až na 71,7 MPa. Pri oboch nových zmesiach 2 a 3 sme zaznamenali rýchlejší nárast sily ako pri referenčnej zmesi 1. V porovnaní s komerčne dostupnými betónmi však naša referenčná zmes 1 stále dosahovala relatívne dobré pevnostné charakteristiky.

Pri pevnosti v ťahu je vidieť, že zmesi 1 a 2 vykazovali rýchly nárast v porovnaní so zmesou 3, kde sa pevnosť stále zvyšovala. Prítomnosť vlákien v zmesi 1 bola viditeľná v teste pevnosti v ťahu v ohybe. Takéto vlákna sa aktivujú počas vývoja zaťaženia a zvyšujú pevnosť v ťahu v ohybe aj v prípade miernych zlomenín a prasklín[9]. Hodnoty zmesi 1 a 3 boli porovnateľné pre 28-dňové pevnosti v ťahu. Preto môžeme konštatovať, že podľa výsledkov získaných zo skúšok pevnosti v tlaku a ťahu je možné poznamenať, že testované zmesi 1 a 3 sa približujú hodnotám vysokopevnostného betónu (60 MPa v tlaku) [10].



Obrázok 4: V grafe sú znázornené pevnosti v tlaku po 7, 14 a 28 dňoch



Obrázok 5: V grafe sú znázornené pevnosti v ťahu po 7, 14 a 28 dňoch

V tabuľke 1 môžeme vidieť vzorky 1,2 a 3 a ich hustoty a namerané mechanické vlastnosti ako je pevnosť v tlaku a pevnosť v ťahu pri ohybe.

Tabuľka 1: Znázornené mechanické vlastnosti zmesí 1,2 a 3. [7].

Zmes	Hustota	Pevnosť v tlaku	Pevnosť v ťahu
	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]
Číslo 1	2000	51.4	13.1
Číslo 2	2041	52.6	10.8
Číslo 3	2112	71.7	13.5

Ako je možné vidieť podľa vypočítaných hodnôt objemovej hmotnosti možno tento materiál zaradiť podľa klasifikácie do kategórie ľahký betón LC (800 - 2000 kg/m³) až po bežný betón C (2000 - 2600 kg/m³) [11]. Pokiaľ ide o objemovú hmotnosť, najnižšiu objemovú hmotnosť mala referenčná zmes 1, zatiaľ čo zmes 3 mala najvyššie hodnoty zo všetkých troch zmesí, pozri tab. 1. Tieto objemové hmotnosti zodpovedajú aj nameraným pevnostiam v tlaku. Z hľadiska objemovej hmotnosti je zmes 1 vhodnejšia pre 3D tlačené štruktúry. Zmesi 2 a 3 majú vyššiu objemovú hmotnosť, a preto sa môžu považovať za menej vhodné pre konštrukcie. Prínosom je síce vyššia pevnosť v tlaku, no zároveň s vyššou objemovou hmotnosťou sa zvyšuje aj vlastné zaťaženie konštrukcie. Takéto vyššie zaťaženie môže prípadne negatívne ovplyvniť stavitel'nosť konštrukciu vrstvu po vrstve pretože spodné vrstvy ešte poriadne nevytuhnuté môžu mať problém udržať vrchné čerstvé vrstvy 3D tlačeného materiálu [12].

4. Záver

Z meraní a vyhodnotení pevnostných parametrov môžeme poznamenať, že referenčná zmes 1 ale aj zmesi 2 a 3 sú vhodné na 3D tlač. Presnejšie povedané, zmes 1 je vhodnejšia pre technológiu 3D tlače. Zmesi 2 a 3, majú dobrú reológiu materiálu ale vyššiu objemovú hmotnosť a sú tak z tohto hľadiska menej vhodné pre použitie. Pokiaľ nie je nutné použiť vysokopevnostný kompozit, tieto zmesi spôsobujú zbytočné preťažovanie konštrukcie svojou vlastnou hmotnosťou. Hodnoty experimentálne skúmaných pevností sú blízke vysokopevnostnému betónu. Pri navrhovaní nosných konštrukcií sú pevnosti materiálu dôležitým vstupom pre posúdenie odolnosti konštrukcie voči zaťaženiu, ale statický výkon budov s 3D tlačením sa môže líšiť od budov s identickou geometriou postavených pomocou konvenčného procesu liateho betónu. Z výsledku je teda zrejmé, že pre vytvorenie najvhodnejšieho materiálu pre 3D tlač je dôležitá celá škála vyhovujúcich vlastností a nie iba dobré pevnostné charakteristiky. To si vyžaduje znalosť mechanických ale aj fyzikálnych vlastností zmesi. Získané poznatky a namerané hodnoty použijeme v budúcnosti pri ďalších meraniach a výskume.

Literatúra

- [1] I. Hager, A. Golonka, R. Putanowicz,: *3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?*, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- [2] J. Hainesa,: *3D Printed House Material: What Are They Made of in 2022?*, 2022. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printing-in-construction-what-are-3d-printed-houses-made-of/>
- [3] A. Walker,: *No we Shouldnt 3-D Print the Suburbs*, 2021. URL: <https://www.curbed.com/2021/04/3d-printed-house-california-suburbs.html>
- [4] Article: *The foundation of 3D printing in construction has been laid.*: 2021. URL: <https://gosmartbricks.com/3d-printing-in-construction/>
- [5] M. Meurer, M. Classen: *Mechanical Properties of Hardened 3D Printed Concretes and Mortars- Development of a Consistent Experimental Characterization Strategy*, 2021. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7914988/>
- [6] Article: *MasterFlow 3D 100 – špeciálna prefabrikovaná zmes pre 3D tlač*, 2022. URL: <https://www.master-builders-solutions.com/sk-sk/products/masterflow/masterflow-3d-100>
- [7] Article: *CEM I 42,5 R*, 2022. URL: <http://www.cemmac.sk/dev/language/sk/cement-cem-i-425r/>
- [8] P. C. Aitcin: *Vysokohodnotný betón*, Praha : Informační centrum ČKAIT, ISBN 978-80-86769-39-4.
- [9] M. Hambach, D. Volkmer,: *Properties of 3D- printed fiber-reinforced Portland cement paste*, 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516301093>
- [10] Article: *Druhy betónu*, 2022. URL: <https://www.zapa.sk/sk/druhy-betonu>
- [11] Article: *Triedy betónu-druhy, značenie, vlastnosti, aplikácia, typy*, 2022. URL: <https://sk.thebest-home.com/14268004-concrete-classes-types-markings-properties-application-tips>
- [12] T. Quang Bui,: *Buildability and Mechanical Properties of 3D printed Concrete*, 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/345213674_Buildability_and_Mechanical_Properties_of_3D_Printed_Concrete

Ivan Vavřík¹

Študijný program: Technológia stavieb (3. stupeň), ročník: 4.

PÔSOBENIE DEBNENIA NA VZHĽAD BETÓNU

EFFECT OF FORMWORK ON THE CONCRETE APPEARANCE

Abstract

Formwork and forms have a decisive influence on the final appearance of the concrete. From the analysis of the effect of the formwork on the surface of the concrete, it follows that the most important properties include the absorbency of the form. It has a fundamental influence on the colour and porosity of the concrete, which are also basic parameters for the assessment of fair-faced concrete. The aesthetic effect of the concrete is also influenced by the drawing of the mould impression, the grid of the formwork panels and the course of the joints resulting from their arrangement and the placement of the anchor rods in case of double-sided formwork. This article is therefore devoted to the analysis of the effect of formwork on the surface of the concrete structure, especially its porosity, colour, and structure.

Kľúčové slová / Key Words

pohľadový betón; debnenie; pórovitosť; farebnosť povrchu

1. Úvod

Pri realizácii pohľadového betónu pôsobí na kvalitu finálneho produktu množstvo činiteľov. Z pohľadu zhotoviteľa konštrukcie má najväčší význam debnenie – materiál, z ktorého je vyrobené, jeho geometria, kvalita vyhotovenia. Tento článok je preto venovaný analýze vplyvu debnenia na povrch betónovej konštrukcie, najmä jej pórovitosť, farebnosť a štruktúru.

Počiatočným predpokladom na bezproblémové zhotovenia konštrukcie z pohľadového betónu je výber správneho debniaceho systému. Závisí od celkového tvaru navrhovanej betónovej konštrukcie, zadefinovaných vlastností povrchu betónu a podmienok na stavbe. [1] Podľa Helu [2] má výber debniaceho systému veľký vplyv na cenu diela a technológiu vyhotovenia konštrukcie. Preto je vo fáze projektovania potrebné posúdiť, či možno použiť systémové debnenie (rámové a nosníkové), alebo či je nutné individuálne riešenie. Debnenie a formy majú rozhodujúci vplyv na finálny vzhľad betónu, a to predovšetkým povrchovými vlastnosťami, tesnosťou, tuhosťou a čistotou.

2. Druhy debniacich systémov

Z pohľadu konštrukcie debnenia sa tieto delia na rámové a nosníkové. Rámové debnenie tvorí debniaci plášť (forma) pripevnený na rám. Má štandardizované rozmery a používa sa primárne na vertikálne konštrukcie. Panely sa navzájom spájajú pomocou spájacích prvkov a spínacích tiahel. Tie zabezpečujú tesné spojenie panelov a konštantnú vzdialenosť medzi odebnovacími plochami. [18] Obrys panelu a spínacie tiahla sa prekreslia aj na povrch betónu.

¹ Ivan Vavřík, Ing., Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

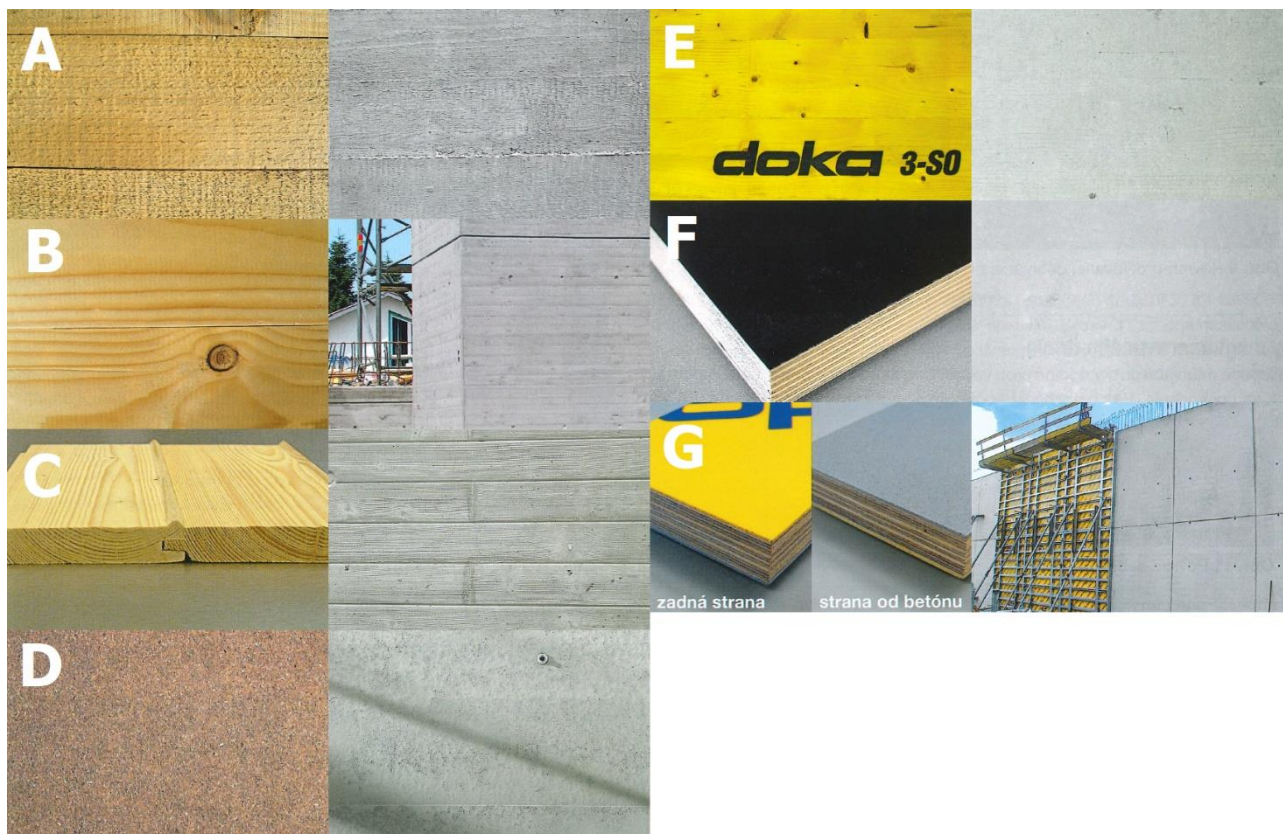
Nosníkové debnenie pozostáva z typizovaných nosníkov, na ktoré sa pripevňuje plášť debnenia. [18] Používajú sa prevažne na horizontálne konštrukcie, prípadne pre konštrukcie nepravidelného tvaru. Výhodou takéhoto debnenia je voliteľná debniaca doska, rozmiestnenie kotevných otvorov a vzhľad škár podľa individuálnych potrieb a skutočnosť, že otláčok rámu nie je viditeľný. [1]

3. Typy foriem a ich vplyv na povrch betónu

Podľa národných smerníc zaoberajúcich sa pohľadovými betónmi [1, 3, 4, 5] a príručiek od výrobcov debnenia PERI a DOKA [6, 7] môžu byť materiály kontaktných plôch debnenia a ich vplyv na pohľadový betón nasledovné:

- a) **Pílené dosky** – pri použití tohto typu debniacich dosiek je výsledkom odtlačok s drsnou doskovou štruktúrou a tmavšou farbou betónu, s takmer žiadnymi pórmí, po viacerých použitíach je odtlačok svetlejší, dosky sú značne nasiakavé, môže vzniknúť odpieskovanie povrchu. Vlákna dreva zostávajú v betóne. Drewný cukor čiastočne zabraňuje tvrdnutiu betónu.
- b) **Hobl'ované dosky** – vytvárajú hladký povrch betónu tmavej farby (svetlejšia ako pri pílených doskách), so zreteľnou štruktúrou dreva a nízkou tvorbou pórov, po viacerých použitíach je odtlačok svetlejší, môže vzniknúť odpieskovanie povrchu. Drewný cukor čiastočne zabraňuje tvrdnutiu betónu.
- c) **Profilované dosky** – ich použitím vzniká značne štruktúrovaný povrch s prehĺbeniami v betóne, odtlačok má zreteľnú štruktúru použitých dosiek s tmavou farbou betónu a nízkou tvorbou pórov, po viacerých použitíach je odtlačok svetlejší, môže vzniknúť odpieskovanie povrchu. Drewný cukor čiastočne zabraňuje tvrdnutie betónu.
- d) **Dosky z aglomerovaného dreva** – ide o lepené debniacie dosky odolné proti vode s viacvrstvovou konštrukciou, mierne drsným povrchom a hranami citlivými na poškodenie. Bez povrchovej úpravy sú silne nasiakavé. Majú sklon k vytváraniu škvŕn. Sú vhodné na menší počet nasadení a vytvárajú odtlačky s takmer žiadnymi pórmí.
- e) **Trojvrstvé dosky z ihličnatého dreva, brúsené, so zošľachteným povrchom** – ide o dosky lepené krížom s povlakom zo syntetickej melamínovej živice s nízkym sklonom k tvorbe trhlín. Majú mierne nasiakavý povrch, čím sa v malej miere vytvárajú póry. Vzniká hladký a rovnomerný odtlačok s ľahkou doskovou štruktúrou. Použiteľné sú v stropnom aj stenovom debnení. Dosiahne sa nimi vyšší počet nasadení. Farba betónu je spočiatku tmavá, po viacnásobnom použití svetlejšia.
- f) **Trojvrstvé dosky z ihličnatého dreva, kefované alebo opieskované, s uzavretým povrchom** – majú podobné vlastnosti a vplyv ako predchádzajúce trojvrstvé dosky, majú však veľmi nízkú nasiakavosť. Výsledkom sú matnejšie odtlačky so svetlou farbou a normálnou tvorbou pórov. Dosky s kefovaným povrchom vytvárajú zreteľný doskový charakter odtlačku.
- g) **Preglejky** – sú dosky lepené krížom s povlakom z fenolovej živice (príp. s plastovým povlakom), s mierne nasiakavým až nenasiakavým povrchom na vytvorenie hladkého svetlého odtlačku betónu bez štruktúry a s normálnou tvorbou pórov. Použiteľné sú v stropnom aj stenovom debnení. Dosiahne sa nimi vysoký počet nasadení. Pri použití preglejok môže vzhľadom na rozdielnu vlhkosť dreva jednotlivých vrstiev vznikáť mierne vlnenie krycej vrstvy. Táto skutočnosť sa môže prejaviť aj pri poškodeniach povlaku, preto sa treba vyvarovať úderom kladivom, škrabancom a je potrebné používať vibrátor s gumovým krytom.
- h) **Celoplastové dosky, plastovo-kompozitné konštrukcie** – vytvárajú hladké svetlé betónové povrchy s normálnou tvorbou pórov.

- i) **Papierové debnenia** – zväčša ide o kartón s vnútornou plochou ošetrovanou plastovým povlakom na zvýšenie hladkosti povrchu a odolnosti proti vode. Oddebnenie prebieha pomocou trhacieho lanka alebo rozrezaním nožom. Jedná sa o jednorazové debnenie, ktorým sa zhotoví svetlý hladký povrch betónu s normálnou tvorbou pórov. Nie je potrebný separačný prostriedok. Vnutie kartónu sa ľahko odtláča na betóne
- j) **Oceľový a hliníkový plech** – svojím nenasiakavým povrchom poskytuje svetlé odtlačky s normálnou tvorbou pórov. Dosahuje sa nimi vysoký počet nasadení. Pri neošetrených oceľových debniacich plochách vzniká nebezpečenstvo hrdzavých škvŕn. Treba počítať so zvýšenými nákladmi na prichytenie vložiek, líšt a pod.



Obrázok 1: Povrch formy a jej odtlačok na povrchu betónovej konštrukcie (A – pílená doska, B – hobľovaná doska, C – profilovaná doska, D – doska z aglomerovaného dreva, E – trojvrstvá doska, F – preglejka, G – celoplastová doska) [1].

4. Nasiakavosť formy debnenia

Vplyvu nasiakavosti debnenia na povrch betónu sa vo svojej publikácii venuje Marko. [8] Podľa neho sú absorpčné debnenia svojou nasiakavosťou schopné po uložení a spracovaní betónovej zmesi odobrať časť zámesovej vody a vzduchových bublín z povrchu betónu, tým znižujú vodný súčiniteľ, skvalitňujú hutnejšie štruktúry a obyčajne dávajú matné, tmavšie plochy. Oproti tomu neabsorpčné debnenia sú rozdielne najmä tým, že pri rovnakých podmienkach skladby betónovej zmesi a jej spracovania neodsávajú zámesovú vodu, a tým dávajú svetlejšie povrchy betónu. Povrch je pórovitejší, so zvýšeným výskytom vzduchových bublín rôznej veľkosti (od zlomkov milimetra až po niekoľko milimetrov). Zvýšenú pórovitosť spôsobuje vyššie prevodnenie povrchových vrstiev betónu. Oproti nasiakavému debneniu sú betónové plochy jednotne sfarbené, sú lesklé, ale postupne vplyvom ovzdušia zmatnejú.

Aj iní autori tvrdia [9, 10, 11, 12], že nasiakavosť debnenia je zásadný faktor. Pri nasiakavých debneniach môže klesnúť veľkosť jednotlivých pórov o 50%, celková pórovitosť o 45% a pevnosť povrchovej vrstvy môže narásť o 70%.

Na Slovensku sa vplyvu materiálu debnenia na pórovitosť venovali Kamas a Bisták. [13] Pri skúškach použili päť druhov debniacich dosiek – trojvrstvová doska z masívneho dreva s močovino-melamínovým živičným povlakom, preglejka z brezového dreva vystužená sklenným vláknom s polypropylénovým povlakom, preglejka z topolového dreva s náterom z fenolovej živice 120 g.m⁻², preglejka z brezového dreva s náterom z fenolovej živice 220 g.m⁻² a preglejka z brezového dreva s povlakom zo syntetickej živice vystuženej vláknami. Pri všetkých vzorkách bol použitý rovnaký betón (troskoportlandský zmesový cement CEM II/A-S 42,5 N a plastifikačná prísada na báze polykarboxylátu) a rovnaký spôsob ukladania a zhutňovania (dvakrát 30 sekúnd). Najlepšie výsledky dosiahol debnenie s veľmi tvrdým povrchom zo syntetickej živice, ktoré výrobca odporúčal pre pohľadové betóny. Veľmi dobré výsledky zaznamenali aj debnenia s povrchom z fenolovej živice. Mierne nasiakavé debnenie z masívneho dreva s močovino-melamínovým živičným povlakom vytváralo povrch s výraznou textúrou a s malým množstvom pórov. Segregácia a mramorovanie boli taktiež menej alebo nie viditeľné. Najmenej vhodným sa ukázalo debnenie s polypropylénovým povrchom, ktoré si pre vyššiu kvalitu betónu vyžaduje vhodnú kombináciu receptúry a separačného prostriedku.

Klovas et al. z Litvy vo svojich výskumoch [12, 14] porovnával päť druhov povrchu debnenia na pórovitosť betónu. Skúmanými materiálmi bolo drevo impregnované polymérovým olejom, drevo pokryté gumou, pílené drevo, kov a plast. Sledovanými vlastnosťami boli stredná hodnota, rozptyl, štandardná odchýlka a variačný koeficient pórovitosti. Výsledkom bolo, že najviac pórovitý povrch betónu bol pri použití dreva pokrytého gumou, na povrchu debnenia zostalo veľké množstvo separačného prostriedku, pretože ho guma neabsorbovala. Najmenej pórovitý povrch bol pri pílenom dreve, ktoré absorbovalo aj výrazné množstvo separačného prostriedku. Najmenšia veľkosť pórov bola pri betóne v plastovom debnení a najväčšia v drevenom debnení pokrytom gumou.

K podobných konštatovaniam dospeli aj Megid z Kanady a Khayat zo Spojených štátov amerických. [15] Tvrdia, že nasiakavé debnenie zlepšuje kvalitu povrchu a s debnením z PVC a ocele (nenasiakavé) sa dá dosiahnuť stredná kvalita povrchu.

Vplyv nasiakavosti debnenia na vodný súčiniteľ povrchovej vrstvy betónu potvrdzuje aj výskum z Indie. [16]

5. Nové a opakovane použité debnenie

Podľa Marka [8] niektoré druhy absorpčných debnení po viacnásobnom použití môžu meniť svoje vlastnosti, a tým vplývať na farebný odtieň betónovej plochy. Znamená to, že medzi absorpčným a neabsorpčným stavom debnenia sa v určitých štádiách vytvára medzistupeň. Pri výbere materiálov na debnenie treba túto vlastnosť zohľadniť, aby sa predišlo rôznemu nežiadúcemu farebnému tónovaniu betónových plôch.

Spoločnosť DOKA [7] tvrdí, že lepšie výsledky sú po jednom až dvoch použitíach nového debnenia. Ustálenie povrchu debnenia sa dá zabezpečiť aj natretím debnenia cementovým mliekom a jeho následným odstránením.

Podľa smernice Slovenskej asociácie výrobcov transportbetónu [1] je pri opakovanom použití debnenia potrebné chrániť ho pred poveternosťou (slnečné žiarenie, dážď, sneh) a znečistením počas prevádzky na stavbe. Treba dbať na to, aby sa zabezpečilo vetranie debnenia obzvlášť pri dlhšom skladovaní. Pri nedostatočnom vetraní môžu vzniknúť plesne pôsobením skondenзованej vody alebo už existujúcej vlhkosti. Debniaca doska vrchného panela pri nezakrytom debnení je vystavená slnečnému žiareniu, vysúša sa silnejšie ako dosky spodných panelov, a tak je podstatne nasiakavejšia. Výsledkom pri použití takejto dosky je tmavší povrch betónu a celá plocha vykazuje farebné rozdiely.

6. Tesnosť spojov debnenia

Tesnosť debnenia je jedným zo základov vytvorenia kvalitných betónových plôch. Ak sa netesnosťou debnenia vyskytne lokálne odňatie časti zámesovej vody a jemných zložiek betónu, vznikajú poruchy betónových plôch. Môžu dosiahnuť rôznu stupeň:

- a) Vytečenie časti zámesovej vody znižuje vodný súčiniteľ, a tým sa stmavuje povrch. Môže sa vyskytnúť nielen v miestach stykov debniacich dosák, preglejkových platní alebo celých debniacich dielcov. Takéto miestne netesnosti sa môžu vyskytnúť najmä v kútoch, rohoch a v miestach prestupov rozperných a stužujúcich elementov.
- b) Vytečenie časti cementového tmelu, ktorý potom chýba na vytvorenie cementopieskovej škrupinky, spôsobuje, že k viditeľnému povrchu sa dostáva piesková frakcia a drobnejšie zrná kameniva.
- c) Hrubé netesnosti spôsobujú nadmernú stratu maltovej zložky, čiže cementovej kaše spolu s drobnými frakciami kameniva. Výsledkom sú zhluky hrubých frakcií kamenných zŕn na betónovej ploche. [8]

Z vyššie uvedených dôvodov viacerí autori [1, 2, 8, 17] odporúčajú utesnenie stykov debnenia tesniacimi šnúrami, tesniacimi pásmi, lepiacou páskou alebo silikónom.

7. Záver

Z analýzy pôsobenia debnenia na povrch betónu vyplýva, že medzi najdôležitejšie vlastnosti patrí nasiakavosť formy. Tá má zásadný vplyv na farebnosť a pórovitosť betónu, čo sú zároveň základné parametre hodnotenia pohľadového betónu. Pre málo pórovité povrchy s rovnomernou farebnosťou je vhodné použiť nasiakavú debniacu dosku. Tá zníži vodný súčiniteľ čerstvého betónu a pritiahne jemné čiastočky cementu. Estetický efekt betónu ovplyvňuje aj kresba otláčku formy, raster debniacich panelov a priebeh škár vyplývajúci z ich usporiadania a rozmiestenie kotevných tyčí pri obojstranných debneniach.

V ďalšom výskume sa plánujem zaoberať výberom vhodného debnenia pre pohľadový betón. Pre získanie informácií o vplyve rôznych materiálov a zadefinovanie technológie bude potrebné vyhotoviť viaceré vzorky v laboratóriu a následne na nich sledovať stanovené parametre. Získané výsledky by sa mohli použiť pre spracovanie návodov pre zhotoviteľov s určením konkrétnej technológie pre realizáciu požadovanej triedy pohľadového betónu.

Literatúra

[1] HELA, R. – NOVOSAD, P. – BALÁŽOVÁ, D.: *Pohľadový betón*. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o., 2015. 92 s. ISBN 978-80-8076-119-6.

- [2] HELA, R.: *Výroba pohľadového betónu*. Dostupné na internete: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/zaklady-a-hruba-stavba/cement-beton/vyroba-pohladoveho-betonu>. [cit. 2020-10-11].
- [3] HELA, R. – ŠRŮMA, V. et al: *Technická pravidla ČBS 03 Pohľadový beton*. Praha: ČBS Servis, s. r. o., 2009. 60 s.
- [4] HUBER, H. et al: *Richtlinie Sichtbeton – Geschalte Betonflächen*. Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2009. 73 s.
- [5] *Sichtbeton. Merkblatt, Deutscher Beton- and Bautechnik - Verein*. Berlin: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, 2004.
- [6] *Reference Booklet: Fair-face concrete*. Weißenhorn: PERI GmbH, 2003. 88 p.
- [7] *Understanding the concreting results. Experience the fascination*. Amstetten: Doka GmbH, 2019. 34 p.
- [8] MARKO, L.: *Architektonický betón*. Bratislava: Alfa, 1989. 312 s. ISBN 80-05-00137-1.
- [9] COUTINHO, J. S.: The Effect of Controlled Permeability Formwork (CPF) on white concrete. *ACI Materials Journal*, 2001. Vol. 98. No. 2. p. 148-171.
- [10] PRICE, W. F.: Controlled Permeability Formwork. *CIRIA Report C511*, 2000. p. 102.
- [11] DUGGAN, T.: Enhancing Concrete Durability Using Controlled Permeability Formworks. *17th Conference on Our World in Concrete and Structures*, 1992. p. 57-62.
- [12] KLOVAS, A. et al.: The Distribution Analysis of Concrete Horizontal Surface Air Pores. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2013. No. 2 (3). p. 40-45. ISSN 2029-9990. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.sace.2.3.2789>.
- [13] KAMAS, T. – BISTÁK, A.: Pohľadové betóny: Závislosť skladby betónu a typu debnenia – Experimentálne skúšky v laboratóriu. *Betón 2017 – zborník príspevkov z celoštátnej konferencie s medzinárodnou účasťou, Štrbské pleso*. Bratislava: Slovenská asociácia výrobcov transportbetónu, 2017. s. 134-138. ISBN 978-80-89682-13-3.
- [14] KLOVAS, A. – DAUKŠYS, M.: The Evaluation Methods of Decorative Concrete Horizontal Surfaces Quality. *Materials Science*, 2013. Vol. 19. No. 3. p. 343-348. ISSN 1392-1320. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ms.19.3.2006>.
- [15] MEGID, W. A. – KHAYAT, K. H.: Variations in surface quality of self-consolidation and highly workable concretes with formwork materials. *Construction and Building Materials*, 2020. Volume 238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117638>.
- [16] GARG, S. et al.: Enhancement in the quality of near surface concrete using some formwork liners. *Construction and Building Materials*, 2019. Volume 207. p. 722-733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.124>.

[17] KOCH, I.: *Pohľadové betóny – Technologické predpisy*. Bratislava: Alfa, 1975. 56 s.

[18] JURÍČEK, I.: *TECHNOLÓGIA STAVIEB Hrubá stavba*. Bratislava: VYDAVATEĽSTVO EUROSTAV, spol. s r.o., 2018. 311 s. ISBN 978-80-89228-58-4.

GEODESY AND CARTOGRAPHY

Ján Brindza¹

Študijný program: Geodézia a kartografia, 1. ročník

VÝVOJ NÍZKO-NÁKLADOVÉHO MERACIEHO SYSTÉMU A JEHO TESTOVANIE

DEVELOPMENT OF A LOW-COST MEASUREMENT SYSTEM AND IT'S TESTING

Abstract

The contribution is dedicated to the creation of a low-cost measurement system and its testing for the purpose of simultaneous localization and mapping SLAM. Using a measurement system consisting of three 2D lidars, a speed sensor and an inertial measurement unit IMU, we are able to calculate the trajectory of the measurement system and at the same time create a floor plan of the indoor environment. The transformation of two consecutive scenes created by the measurement system is used to create the resulting model. The main error source is the imperfect transformation of two scans to each other. The elimination of the accumulation of errors is carried out using different approaches of data processing. The measuring system was tested in the premises of the Faculty of Civil Engineering of the STU, where difficult conditions were simulated, i.e., long straight sections and obstacle areas. Proposed approaches for eliminating the accumulation of errors were applied to the measured data and subsequently analyzed.

Kľúčové slová / Key Words

Lidar; IMU; snímač otáčok; SLAM; uzatváranie slučky; pôdorys

1. Úvod

Počas zhotovenia stavieb je vždy potrebné kontrolovať postup a správnosť realizácie stavebných prác budov. Aktuálne sú na túto kontrolu využívané univerzálne meracie stanice alebo terestrické laserové skenery. Meranie je často zdĺhavé s množstvom stanovísk a v rámci spracovania je potrebné skombinovať všetky merania vykonané na jednotlivých stanoviskách do jedného výsledného celku. Meranie však môže byť zefektívnené pomocou simultánneho určenia polohy a mapovania (SLAM) za pomoci automatizovaného meracieho systému. Meracie systémy využívajúce SLAM môžu byť rozdelené na základe použitých snímačov na systémy využívajúce kamery [1, 2, 3, 4, 5], kombináciu viacerých snímačov [4] a na systémy využívajúce lidar [1, 4, 6]. V súčasnosti cena komerčných automatizovaných meracích systémov dosahuje rádovo niekoľko 10 000 €. Väčšia cenová dostupnosť automatizovaných meracích systémov v komerčnom sektore môže mať za následok ich rýchlejšiu aplikáciu (využitie v praxi), ako aj vývoj a optimalizáciu. Článok sa venuje vývoju nízko-nákladového meracieho systému a návrhu algoritmu na spracovanie meraných dát. Článok obsahuje popis meracieho systému, následne návrh experimentálneho merania, pomocou ktorého bol vyvíjaný algoritmus na spracovanie meraných dát testovaný. Na záver je vykonaná analýza dosiahnutých výsledkov spracovania.

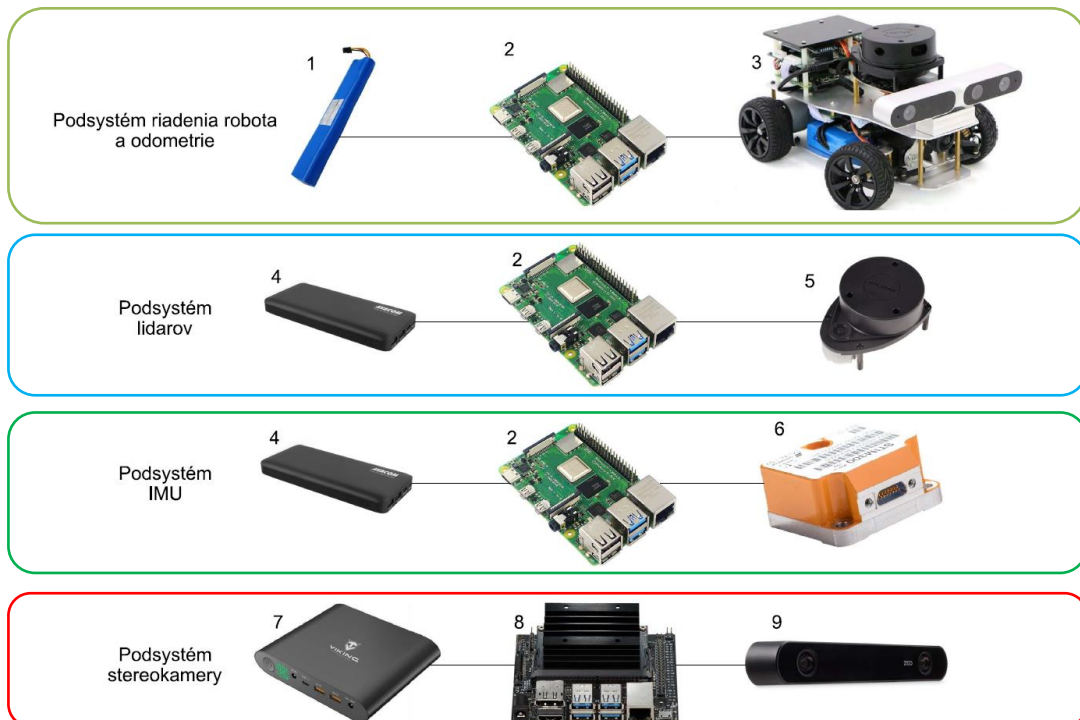
¹ Ján, Brindza, Ing., Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Popis meracieho systému

Vytvorený nízko-nákladový merací systém (Obr. 1) využíval merané údaje z lidarov, inerciálnej meracej jednotky IMU, snímača otáčok a stereokamery. Všetky snímače sú navzájom prepojené pomocou operačného systému ROS.



Obr. 1: Merací systém (foto autor)



Obr. 2: Schéma zapojenia podsystemov

Nízko-nákladový merací systém pozostáva zo štyroch podsystémov (Obr. 2), ktoré sú spoločne uložené na pohybujúcom sa nosiči (3):

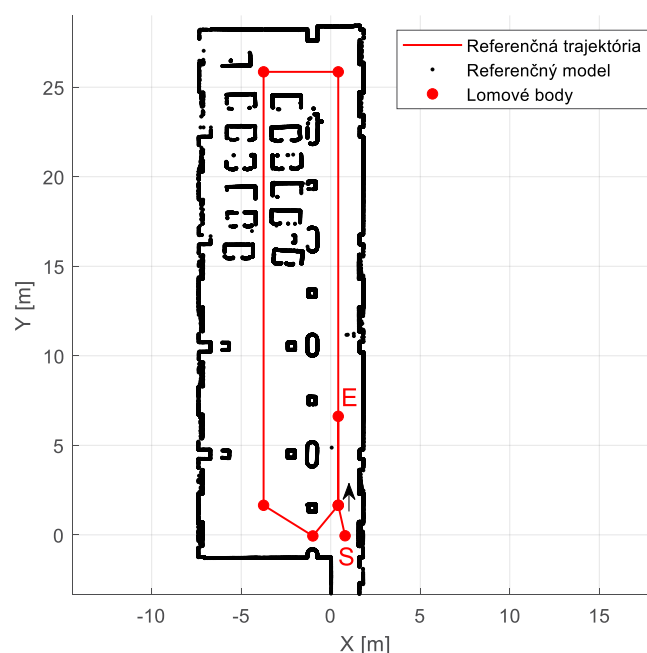
1. podsystém riadenia robota a odometrie,
2. podsystém lidarov,
3. podsystém IMU,
4. podsystém stereokamery.

Celý nízko-nákladový merací systém bol riadený použitím ROSu (verzia Melodic), pričom podsystémy tvorili uzly. Hlavný mikrokontrolér (master), ktorý spúšťal ROS je NVIDIA Jetson Nano 4 GB (8). Zvyšné mikrokontroléry Raspberry PI 4 8 GB (2) boli pripájané do ROSu ako uzly na základe svojej IP adresy. Ďalej mal každý podsystém svoje vlastné napájanie a zariadenie, ktoré generuje merané dáta. Podsystém riadenia robota a odometrie bol napájaný 12V lítium-polymérovou batériou (1) a dáta boli získavané z dvoch snímačov otáčok umiestnených na zadnej náprave platformy (3). Podsystém lidarov bol napájaný 5 V batériou (4) a dáta boli získavané z trojice 2D lidarov RPLIDAR A1 (5) firmy Slamtec [7], ktoré boli umiestnené v troch navzájom kolmých rovinách na spoločnom podstavci. Podsystém IMU bol napájaný 5 V batériou (4) a dáta boli získavané z IMU Sensoror STIM 300 (6) [8]. Podsystém stereokamery bol napájaný 12 V batériou (7) a dáta boli získavané zo stereokamery ZED 2 (9) umiestnenej približne 0,6 m nad platformou (Obr. 1).

3. Experimentálne meranie

Cieľom experimentálneho merania bolo testovanie navrhnutého nízko-nákladového meracieho systému a posúdenie použitých krokov v spracovaní. Z meraných údajov bola počítaná trajektória pohybu meracieho systému a súčasne bol vytváraný model pôdorysu. Jednotlivé trajektórie boli navzájom porovnané s referenčnou trajektóriou, ktorej lomové body boli označené značkami na podlahe (Obr. 3).

Meranie bolo vykonané v interiéri budovy, pričom trajektória meracieho systému bola navrhnutá v tvare uzavretého polygónu tak, aby prechádzala členitým prostredím, ktoré predstavujú stoly a stoličky. Výpočet transformácie aktuálneho skenu na predchádzajúci sken je v členitom prostredí výrazne náročnejší a dá sa očakávať, že otestuje správanie sa systému intenzívnejšie.



Obr. 3: Schéma priebehu trajektórie

Pred samotným meraním boli všetky podsystémy pripojené do ROSu, ktorým bolo meranie spustené. Meranie začalo zo začiatočného bodu S , následne merací systém prešiel jedenkrát miestnosť tak, aby v spracovaní bolo možné použiť uzatváranie slučky (Loop Closure). Pomocou uzatvárania slučky [1, 2, 9] sme dokázali potlačiť hromadenie chýb vo výslednom modeli pôdorysu. Meranie bolo ukončené na koncovom bode E , ktorý bol umiestnený takmer v tretine miestnosti, aby bolo možné vyhodnotiť uzatváranie slučky. Uzavretie slučky je vyhodnotenie opakovaným prejdutím prostredím, vďaka čomu sú trajektória a model upravené. Meranie trvalo 4 minúty.

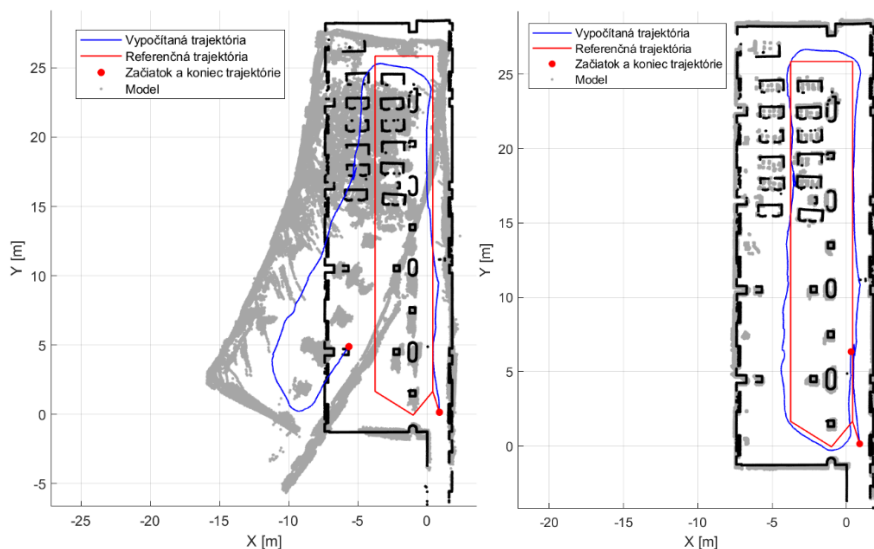
V rámci spracovania sme použili niekoľko krokov, ktoré odzrkadľujú vývoj algoritmu na spracovanie. Na výpočet trajektórie a pôdorysu sme využili scan matching, ktorý pomocou normálnej distribučnej transformácie [10] vypočíta parametre transformácie aktuálneho skenu na predchádzajúci sken. V rámci prvého kroku spracovania vstupovali do scan matchingu neupravené skeny, ktoré neboli vodorovné t.j. obsahovali sklony. Keďže trojica lidarov bola umiestnená na spoločnej platforme, ktorá bola na pohybujúcom sa nosiči vo všeobecnej polohe a počas merania sa jej sklon menil, je potrebné aby boli eliminované sklony lidarov umiestnených na platforme. Sklony boli vypočítané pomocou lidarov skenujúcich vertikálne (Obr. 1), pričom ich výpočet bol vykonaný za predpokladu, že stropy sú vodorovné. Pomocou vypočítaných sklonov boli eliminované sklony skenov lidarov umiestneného vodorovne. V ďalšom kroku bolo eliminované hromadenie chýb pomocou uzatvárania slučky [1, 2, 9]. Uzavretím slučky sa vyhodnotilo opakovaným prejdutím prostredie, čím sme dokázali vypočítať odchýlku v polohe skenu a tým upraviť trajektóriu a vytváraný model pôdorysu. Spracovanie bolo vykonané v troch krokoch:

1. scan matching pred elimináciou sklonov,
2. scan matching po eliminácii sklonov,
3. scan matching s uzatváraním slučky.

3.1 Výsledky spracovania meraných údajov

V scan matchingu pred elimináciou sklonov boli používané merané údaje, z ktorých nebol eliminovaný sklon vďaka čomu sme mohli očakávať, že výsledný model bude zašumený a nekonzistentný (Obr. 4 - vľavo).

Pri scan matchingu po eliminácii sklonov boli použité merané údaje, z ktorých bol eliminovaný sklon, vďaka čomu sme očakávali menej zašumený model ako pred elimináciou sklonov.



Obr. 4: Výsledný model pôdorysu scan matchingu pred elimináciou sklonov (vľavo) a scan matchingu s uzatváraním slučky (vpravo)

Pri scan matchingu s uzatváraním slučky (Obr. 4 - vpravo) bolo počas celého spracovania trajektórie vyhľadávané opakované prejdenie trajektórie, ako aj blízky prechod už prejdeným prostredím. Na základe identifikácie takýchto miest bola výsledná trajektória upravená, vďaka čomu bol upravený aj výsledný model (Obr. 4 - vpravo).

Postupným vývojom algoritmu na spracovanie dát sme sa dostali ku scan matchingu s uzatváraním slučky, ktorý generuje model, z ktorého 86 % bodov má polohovú odchýlku od referenčného modelu menšiu ako 0,100 m. Presnosť jednotlivých krokov v riešení a ich prínos sme si overili analýzou experimentálneho merania.

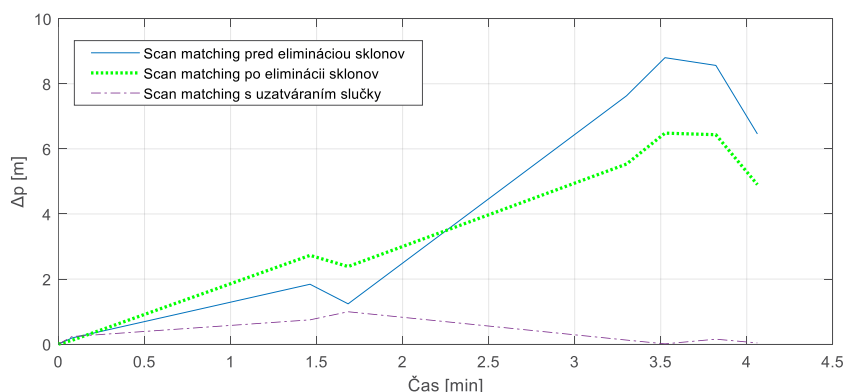
4. Analýza výsledkov

V rámci analýzy výsledkov experimentálneho merania sa vyhodnotila presnosť trajektórie na lomových bodoch referenčnej trajektórie (Obr. 3) určených v jednotlivých krokoch. Presnosť určenia trajektórie bola vyjadrená na základe odchýlok v polohe lomového bodu, v dĺžke spojnic medzi lomovými bodmi a v orientácii spojnic medzi lomovými bodmi, ktoré sme získali ako rozdiel referenčných a vypočítaných hodnôt.

V prvom kroku boli vypočítané polohové odchýlky na lomových bodoch trajektórie. Polohové odchýlky Δp (1) boli určené pomocou referenčnej polohy lomových bodov X_{ref} , Y_{ref} a polohy meracieho systému X_{mer} , Y_{mer} vypočítanej v jednotlivých krokoch spracovania.

$$\Delta p = \sqrt{(X_{ref} - X_{mer})^2 + (Y_{ref} - Y_{mer})^2} \quad (1)$$

Z porovnania jednotlivých krokov riešenia (Obr. 5, Tab. 1) môžeme vidieť, že najhoršie je poloha určená zo scan matchingu pred elimináciou sklonov s priemernou polohovou odchýlkou 4,3 m. Elimináciou sklonov sme dokázali znížiť priemernú polohovú odchýlku na 3,5 m. Pomocou uzatvárania slučiek sme výrazne znížili polohovú odchýlku a to na hodnotu 0,2 m. V rámci prvých dvoch krokov riešenia narástla polohová odchýlka najmä na dlhých priamych úsekoch trajektórie, kde algoritmus zle vyhodnotil transformácie medzi dvojicou skenov, resp. má problémy s dlhými priamymi úsekmi.



Obr. 5: Porovnanie variantov výpočtu na základe polohových odchýlok

Tab. 1 Porovnanie variantov výpočtu na základe polohovej odchýlky

Variant	Priemerná polohová odchýlka [m]	Maximálna polohová odchýlka [m]
Scan matching pred elimináciou sklonov	4,3	8,7
Scan matching po eliminácii sklonov	3,5	6,4
Scan matching s uzatváraním slučky	0,2	0,4

Následne bola analyzovaná presnosť určenia dĺžky pomocou odchýlok v dĺžke Δd (2) na priamych úsekoch medzi lomovými bodmi. Referenčná dĺžka d_{ref} medzi dvojicou lomových bodov bola vypočítaná z referenčných súradníc lomových bodov a meraná dĺžka d_{mer} bola vypočítaná zo súradníc lomových bodov z jednotlivých krokov výpočtu.

$$\Delta d = d_{ref} - d_{mer} \quad (2)$$

Z porovnania odchýlok v dĺžke Δd (Tab. 2) v rámci jednotlivých krokov spracovania vyplýva, že prvé dva varianty scan matchingu (pred a po eliminácii sklonov) dosahovali rovnaké priemerné odchýlky v dĺžke s hodnotou 0,6 m. Najväčšie odchýlky v dĺžke dosahovali riešenia na dlhých priamych úsekoch, ktoré boli pre scan matching problematické. Pomocou uzatvárania slučky sme odchýlku v dĺžke výrazne znížili a to na hodnotu 0,1 m.

Tab. 2 Porovnanie variantov výpočtu na základe odchýlok v dĺžke

Variant	Priemerná odchýlka v dĺžke [m]	Maximálna odchýlka v dĺžke [m]
Scan matching pred elimináciou sklonov	0,6	1,7
Scan matching po eliminácii sklonov	0,6	1,8
Scan matching s uzatváraním slučky	0,1	-0,3

V rámci analýzy presnosti určenia orientácie boli vypočítané odchýlky v orientácii $\Delta\alpha$ na priamych úsekoch medzi lomovými bodmi. Odchýlky v orientácii $\Delta\alpha$ (3) boli vypočítané ako rozdiel medzi referenčným smerníkom α_{ref} a meraným smerníkom α_{mer} . Referenčný smerník α_{ref} bol vypočítaný z referenčných súradníc lomových bodov a meraný smerník α_{mer} bol vypočítaný zo súradníc lomových bodov z jednotlivých krokov spracovania.

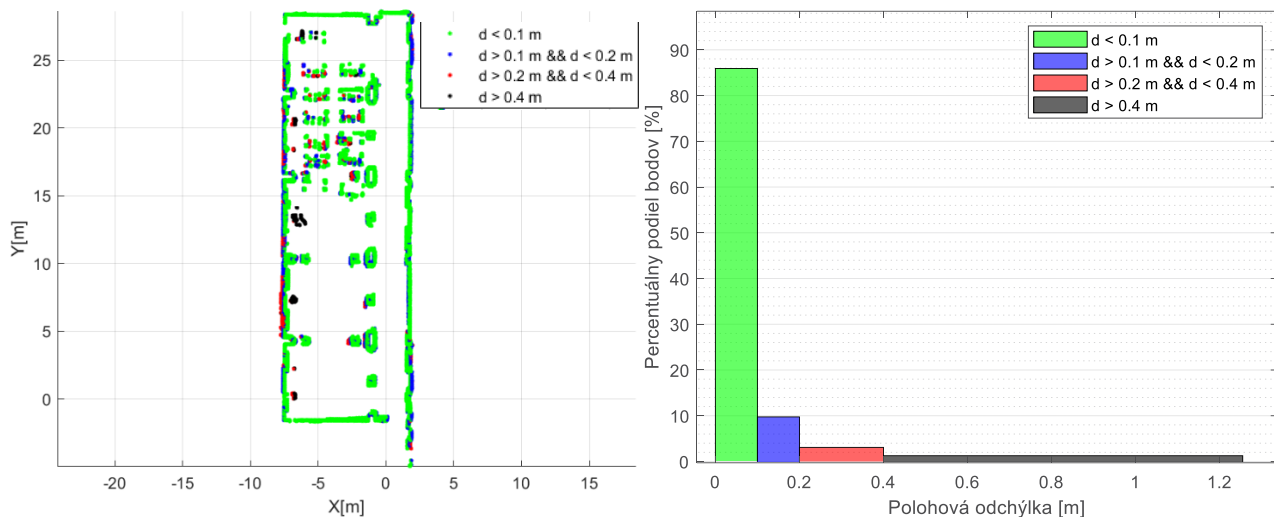
$$\Delta\alpha = \alpha_{ref} - \alpha_{mer} \quad (3)$$

Z porovnania jednotlivých krokov spracovania v rámci odchýlok v orientácii $\Delta\alpha$ (Tab. 3) boli prvé dva kroky takmer identické. Avšak, eliminácia sklonov zvýšila presnosť v orientácii z priemernej odchýlky v orientácii 17,6° na 13,3°. Výrazné zvýšenie presnosti v orientácii sme však dosiahli použitím uzatvárania slučky s priemernou odchýlkou v orientácii 2,0°.

Tab. 3 Porovnanie variantov výpočtu na základe odchýlok v orientácii

Variant	Priemerná odchýlka v orientácii [°]	Maximálna odchýlka v orientácii [°]
Scan matching pred elimináciou sklonov	17,6	32,2
Scan matching po eliminácii sklonov	13,3	26,9
Scan matching s uzatváraním slučky	2,0	8,2

Z analýzy experimentálneho merania vyplýva, že najlepším variantom je scan matching s uzatváraním slučky, ktorý dosiahol najlepšie výsledky z odchýlok v polohe, v dĺžke a v orientácii. Preto bol pre krok spracovania scan matchingu s uzatváraním slučky vypočítaný rozdielový model kde bol porovnaný vypočítaný model okolitého prostredia s referenčným modelom (Obr. 6 - vľavo). Referenčný model bol získaný pomocou terestrického laserového skenovania. Pre každý bod z vypočítaného modelu prostredia bol nájdený najbližší bod z referenčného modelu a následne sa vypočítala polohová odchýlka. Na základe histogramu (Obr. 6 - vpravo) z rozdielového modelu vyplýva, že 86 % bodov má polohovú odchýlku nižšiu ako 0,1 m, 10 % bodov má polohovú odchýlku v rozmedzí 0,1 m do 0,2 m, 3 % bodov má polohovú odchýlku v rozmedzí 0,2 m do 0,4 m a 1 % bodov má polohovú odchýlku väčšiu ako 0,4 m.



Obr. 6: Rozdielový model pôdorysu miestnosti B321 (vľavo) a histogram odchýlok rozdielového modelu (vpravo)

5. Záver

V príspevku sme sa zaoberali vývojom nízko-nákladového meracieho systému z dôvodu vysokých obstarávacích nákladov existujúcich meracích systémov. Navrhnutý nízko-nákladový merací systém sa skladá z kombinácie viacerých snímačov, aby sa navzájom odstránili ich nedostatky a bez väčšiny snímačov by systém nebol funkčný. Pomocou použitých snímačov, trojice 2D lidarov, IMU, snímačov otáčok a stereokamery, bola vypočítaná trajektória pohybu meracieho systému a súčasne bol vytváraný aj model okolitého prostredia (pôdorys). Spracovanie dát sa vykonávalo tromi krokmi scan matchingu, ktoré odzrkadľovali vývoj algoritmu. Prvým krokom bol scan matching bez eliminácie sklonov, kde z meraných dát neboli eliminované sklony. Sklony vznikli z umiestnenia lidarov vo všeobecnej polohe na pohybujúcom sa nosiči a vplyvom pohybu meracieho systému. V ďalšom kroku spracovania, scan matchingu s elimináciou sklonov, už boli z meraných dát odstránené sklony vďaka dvom zvislým lidarom a predpokladu, že strop je vodorovný. Tretím krokom bol scan matching s uzatváraním slučky, kde sme pomocou uzatvárania slučky identifikovali opakovane prejdene prostredie a vďaka tomu sme dokázali upraviť vypočítanú trajektóriu a model pôdorysu.

Vytvorený algoritmus bol testovaný na dátach, ktoré sa získali z experimentálneho merania. Experimentálne meranie bolo vykonané v interiéri budovy so zariadením, ktoré vytváralo členité prostredie. Pri analýze jednotlivých krokov spracovania sme porovnali vytvorený model pred a po eliminácii sklonov lidarových skenov z horizontálnej roviny a potvrdilo sa, že odstránenie sklonov zvyšuje presnosť výsledného modelu pôdorysu o 19 %. Výsledný model založený na uzatváraní slučky dosiahol najlepšiu presnosť v rámci presnosti v polohe lomového bodu, v dĺžke spojnic medzi lomovými bodmi a v orientácii spojnic medzi lomovými bodmi. Presnosť v polohe vyjadrená priemernou polohovou odchýlkou na lomových bodoch trajektórie dosiahla hodnotu 0,2 m. Vyjadrili sme aj odchýlku pôdorysu od referenčného modelu rozdielovým modelom, z ktorého vyplýva, že 86 % bodov malo polohovú odchýlku menšiu ako 0,100 m.

V rámci ďalšieho vývoja algoritmu bude potrebné sa zamerať na optimalizáciu algoritmu pre dlhé rovné chodby, s ktorými má scan matching problém. Cieľom bude aj tvorba 3D modelu prostredia využitím dát generovaných tromi 2D lidarmi.

Pod'akovanie

„Tento článok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied pre projekt VEGA-1/0272/22“.

Literatúra

- [1] CHEN, S. a kol.: A LiDAR/Visual SLAM Backend with Loop Closure Detection and Graph Optimization. *Remote Sensing*. 2021, roč. 13, č. 14, s. 2720.
- [2] CUMMINS, M. - NEWMAN, P.: Probabilistic appearance based navigation and loop closing. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2007, s. 2042-2048. ISSN 1050-4729.
- [3] VALENCIA, R. - ANDRADE-CETTO, J.: *Mapping, planning and exploration with Pose SLAM*. Berlín, Springer 2018, ISBN 978-3-319-60602-6.
- [4] KUDRIASHOV, A. a kol.: *SLAM Techniques Application for Mobile Robot in Rough Terrain*. Springer International Publishing 2020, ISBN 978-3-030-48980-9.
- [5] FERNANDO, M. a kol.: Two different tools for three-dimensional mapping: DE-based scan matching and feature-based loop detection. *Robotica*. 2014, roč. 32, č.1, s. 19-41.
- [6] BISTRÖM, B.: Comparative analysis of properties of LiDAR-based point clouds versus camera-based point clouds for 3D reconstruction using SLAM algorithms: Master's thesis. Turku: Åbo Akademi University, 2019. 101 s.
- [7] Vlastnosti lidarů Slamtec RPLIDAR A1, dostupné na: https://bucket-download.slamtec.com/d1e428e7efbdc65a8ea111061794fb8d4ccd3a0/LD108_SLAMTEC_rp_lidar_datasheet_A1M8_v3.0_en.pdf. [prístupné dňa 9.10.2022].
- [8] Vlastnosti IMU Sensor STIM300, dostupné na: <https://www.sensor.com/media/1132/ts1524r9-datasheet-stim300.pdf>. [prístupné dňa 9.10.2022].
- [9] STACHNISS, C.: *Robotic mapping and exploration*. Springer 2009, ISBN 978-3-642-01096-5.
- [10] BIBER, P. - STRABER, W.: The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching. In: *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*. IEEE 2003, s. 2743-2748. ISBN 0-7803-7860-1.

*Andrej Hideghéty*¹

Study programme: D-GAK4, year: 4

VERIFICATION OF CAMERA STABILITY FOR TIME-BASE PHOTOGRAMMETRY

Overenie stability kamery na účely časovej základnice

Abstract

In this paper two main issues were tested that have a significant impact on accuracy when measuring deformations using time-base photogrammetry. The first is the influence of target diameter on the accuracy of the target measuring edge ellipse operator, which was developed by the author in MATLAB. The second is the self-heating problem of camera sensors, which causes an expansion in the image, therefore the measured coordinates will differ from their real value, thus the measured image coordinates won't be sufficiently accurate for high-precision deformation measurements if they are not dealt with. In this regard several laboratory tests were carried out and the knowledge gained was utilized in two outdoor experiments.

Key Words

Photogrammetry, deformations, self-heating, sensor, MATLAB

1. Introduction

Time-base photogrammetry represents the comparison of results of single image photogrammetric measurements of a given object in different points in time. Single image photogrammetry can be used for several different applications; however, this article will mainly focus on deformation measurements. Time base photogrammetry in this context can only detect deformations parallel to the image plane. It is crucial to ensure that the camera is stable, therefore the interior and exterior orientation parameters (IOP and EOP) remain constant. This implies that, that for achieving high accuracy measurements the camera shouldn't be tempered with and under no circumstances should be moved from its place. To measure deformations using time-base photogrammetry effectively and accurately, it is crucial to adhere to the following theoretical assumptions [1]:

1. Constant IOP and EOP.
2. The sensor must be parallel to the plane of the deformations.
3. Accurate measurement of targets.
4. True image scale.
5. High resolution.
6. Elimination of lens distortion (not necessary in all cases).

This method was applied by a multitude of different authors, most notably Lee and Shinozuka [2], Yoneyama and Ueada [3], Jiang and Jauregui [4], Avşar et al [5] and others [6, 7, 8, 9].

The aim of this paper is to carry out a range of experiments where both the camera and the target are bound and not tempered with, in both a controlled and outdoor environment. In such configuration the change in the targets coordinates should be nil, however even in a controlled setting the empirical results might differ. According to Luhmann et al [10] of the most common target measurement

¹ Andrej, Hideghéty, Ing. Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

operators the ellipse measurement based on edge detection has the most potential, therefore all measurements were performed by one developed by the author. The two main reasons that can potentially decrease the accuracy are the following: the accuracy of the operator, based on the size of the target and distortions induced by self-heating of cameras.

According to Luhmann et al the optimal target size ranges between 5 and 15 pixels in diameter [10]. Smaller points do not provide enough object information, which limits the localisation accuracy of edge-oriented operators. Larger point diameters result in larger numbers of observations, but the number of significant edge points increases only linearly whilst the number of pixels in the window increases quadratically. The empirical relation between target size and achievable point accuracy, together with typical application areas for different operators is shown in figure 1 [10].

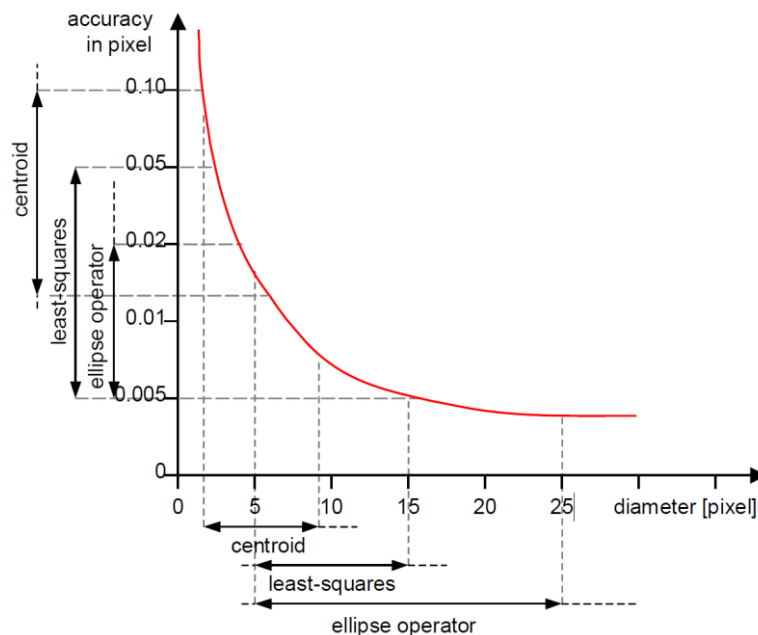


Figure 1: Practical use and accuracy potential of different point measurement operators as a function of target diameter [10].

The temperature increases of CMOS- or CCD- sensors during image capture over a long period of time could induce a slight translation and/or expansion of the image and cause a systematic error and thus for some high-precision measurements cooled cameras are used [11]. The change in image geometry is relatively small, however, as the pixels on these sensors are also very small, a few micrometres, the impact is significant. These errors have been extensively studied by several authors, like Wong et al [12], Beyer [13], Handel [14], Yu [15] and Ma et al [11]. Ma et al [11, 16] suggested to solve this by calibrating the image expansion rate of the imaging system before the experiment and then recording the temperature variation during experiment. However, in their experiment the temperature of the camera body was measured using an infrared camera, not the sensor itself. In fact, measuring the temperature of the sensor directly is impossible, as it is encased in the cameras body.

The aim of this paper is to analyse the impact of target size on the accuracy of the authors algorithm, and the stability of four different cameras in context of their correlation to sensor temperature changes.

2. Methods and materials

Three main experiments were carried out:

1. Testing the effect of target size on the accuracy of image operators.

2. Testing the stability of four cameras.
3. Verifying the impact of the self-heating phenomenon of sensors on the image coordinates.
4. Terrain tests.

The algorithm used for the measurement of image coordinates of the targets was an in-house algorithm developed by the author. It consists of a loop, that sequentially reads each image then performs the detection of edges with sub-pixel accuracy using the detector developed by Agustin Trujillo-Pino [17] and fits an ellipse on the edges using a least squares ellipse fitting function by Richard Brown [18]. These steps are shown in figure 2. In the next step each new image coordinate of the target marker is compared with the coordinates measured in the first epoch, thus deformations parallel to the image plane are calculated.

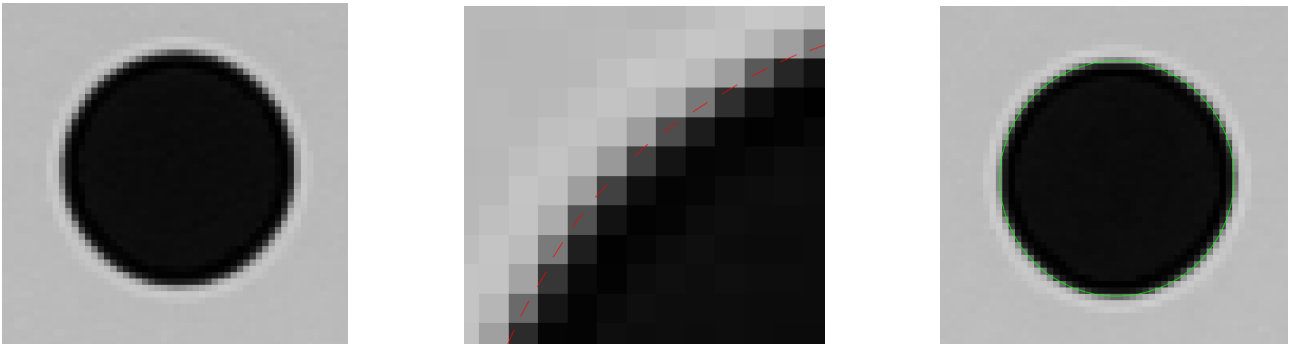


Figure 1: Target marker (left) detected edges (centre) and ellipse fitted onto edge data (right).

2.1 Effect of target size

The hypotheses regarding the target size were tested in a laboratory setting by capturing a series of images of a board attached to the same panel as the camera. The board contained several RAD targets with diameters of 50-, 25-, 10-, and 5 pixels as shown in figure 2. RAD targets were used, so the accuracy of the edge ellipse algorithm could be compared to commercial software, e.g., Photomodeler [19] in future experiments.



Figure 2: RAD target markers with a 50-, 25-, 10-, and 5 pixels inner disk diameter attached to a board fixed on the same panel as the camera (left-entire scene, right-closeup).

These hypotheses were tested in a laboratory setting by capturing a series of images of board attached to the same panel as the camera (figure 2). The board contained several targets of four different sizes. The images were captured using a Nikon D850 camera with a 35 mm lens from 1.7 metres, which represented a GSD of 0.2 mm. 240 images were taken with a 1 minute interval between each shot. The image coordinates were measured using the edge ellipse operator. The results of measured image coordinates X and Y are shown in figures 3 and 4 respectively.

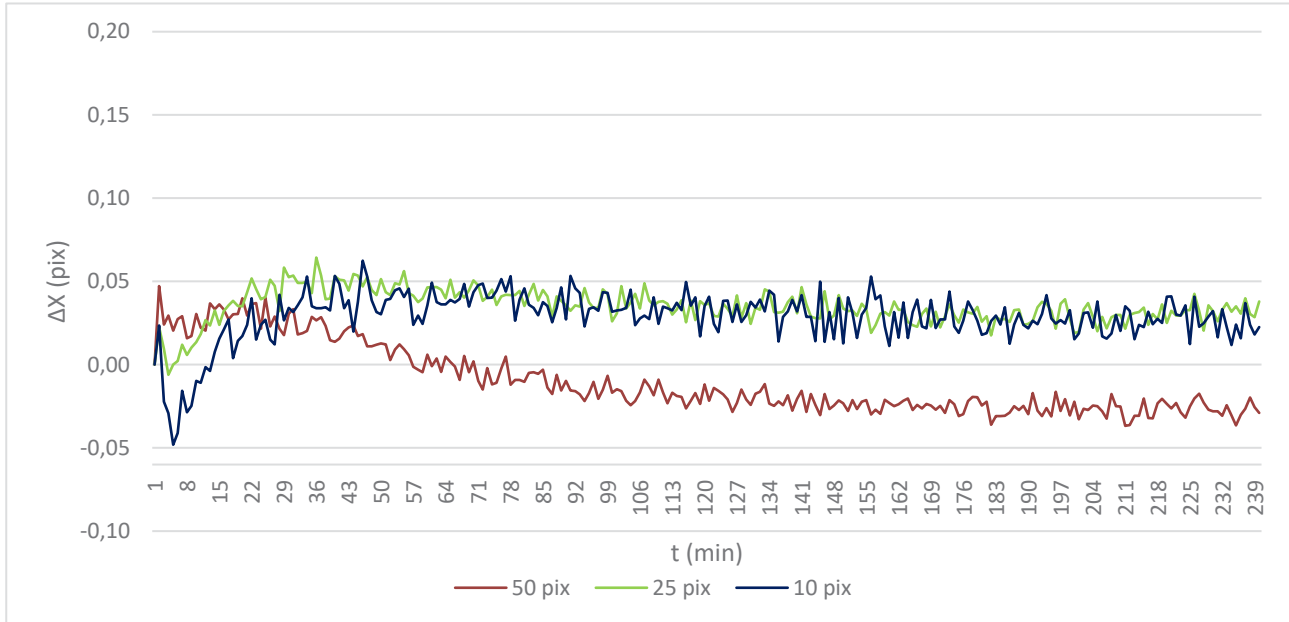


Figure 3: Changes in X image coordinates for different marker sizes.

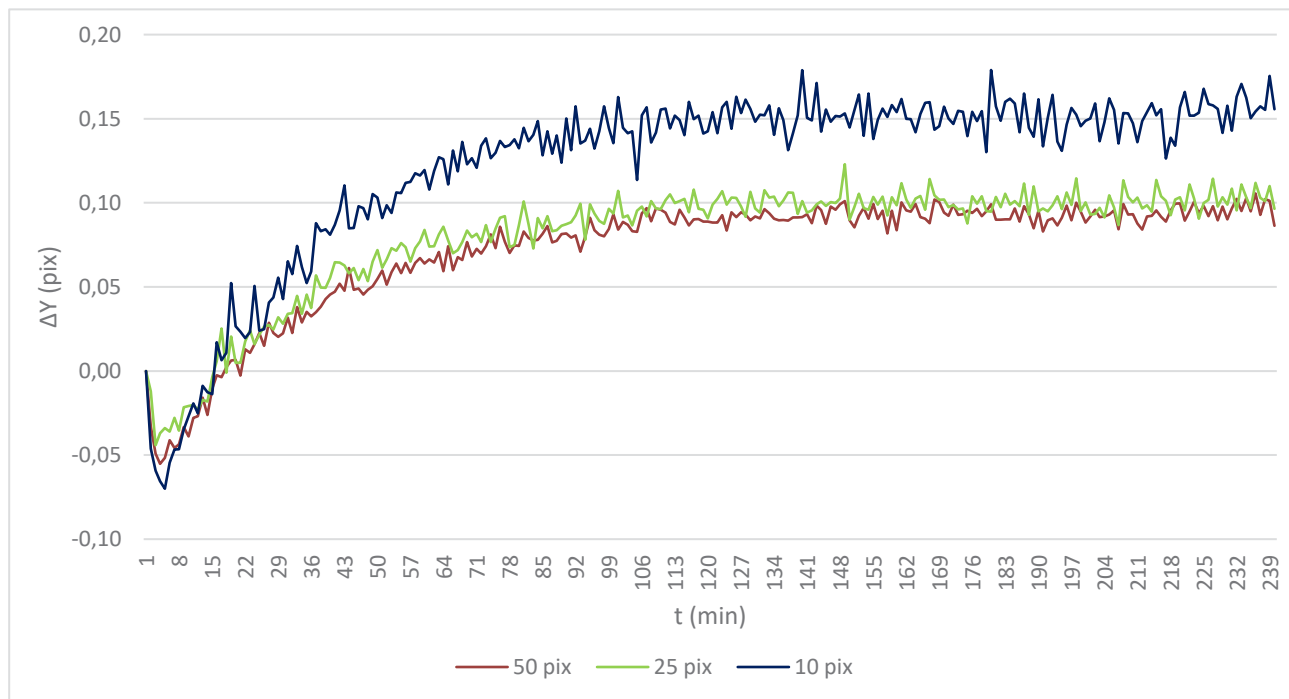


Figure 4: Changes in Y image coordinates for different marker sizes.

The changes in coordinates in the first two hours of the experiment, i.e., the first 120 images were primarily the result of the self-heating phenomenon of the sensor, which will by more closely

inspected in the next chapter. The first 120 measurements for this case were cut and the rest was summarized in table 1.

Table 1: Changes in image coordinates for different marker sizes.

Statistics for t=120 min until t=240 min (pix)										
Size	Mean value		Standard deviation		Root mean Square		Min		Max	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
50	-0.013	0.004	0.005	0.005	0.014	0.006	-0.025	-0.007	0.000	0.017
25	-0.005	0.010	0.006	0.006	0.007	0.012	-0.018	-0.004	0.011	0.032
10	-0.007	0.009	0.009	0.010	0.011	0.014	-0.024	-0.016	0.018	0.036

The standard deviation is progressively getting worse with the decrease of target diameter, however the difference between 50-, 25- and 10 pixel targets is statistically insignificant. The edge ellipse operator couldn't measure the 5 pixel targets in most cases, as they represented a target with a diameter slightly less than 5 pixels, which is in line with Luhmann's research. Luhmann et al states that the optimum target diameter should be no less than 5 pixels [10]. In conclusion, the hypotheses presented by Luhmann et al were verified. The highest accuracy of 0.005 pixels was achieved with the 50 pixel target, which is also in line with Luhmann research, stating that as target size increases the function converges to an accuracy of about 0.005 pixel [10].

2.2 Testing the stability of four cameras

The stability of four cameras was tested using a similar configuration as in the last chapter. Stability in this case represents constant EOP and IOP, since if these parameters remain constant, the accuracy of measured image coordinates should correspond to 0.005 pixel acquired in the previous experiment. The cameras were the following: Nikon D7500, Nikon D850, Sony Alpha 7R III and a Leaf Aptus-II 12. The Sony is a mirrorless camera, and the D850 had the silent shooting mode, where the mirror is locked up, and only the shutter is moving. This could eliminate potential changes in image coordinates caused by the clapping of the mirror. All cameras had a comparable GSD (pixel size after projecting onto a surface). The technical specification of these cameras is shown in table 2. This time only the 10 mm target was measured in MATLAB, using the edge ellipse operator. The results are displayed in figures 5 and 6.

Table 2: Technical specifications of the cameras used for this experiment.

	Nikon D850	Nikon D7500	Sony Alpha A7R III	Leaf Aptus-II 12
Type	DSLR	DSLR	Mirrorless	Medium format camera
Sensor	full-frame CMOS	FX	full-frame CMOS	full-frame CCD
Resolution	45.7 Mpix	20.9 Mpix	42.4 Mpix	80.0 Mpix
Pixel size	4.3 μm	4.2 μm	4.5 μm	5.2 μm
Sensor size	35.9 x 23.9 mm	23.5 x 15.6 mm	35,6 x 23,8 mm	53.7 x 40.3 mm
Lens	35 mm	35 mm	35 mm	45 mm
Format	TIFF	JPG	Raw to TIFF	Raw to TIFF
GSD	0.21 mm	0.20 mm	0.22 mm	0.20 mm

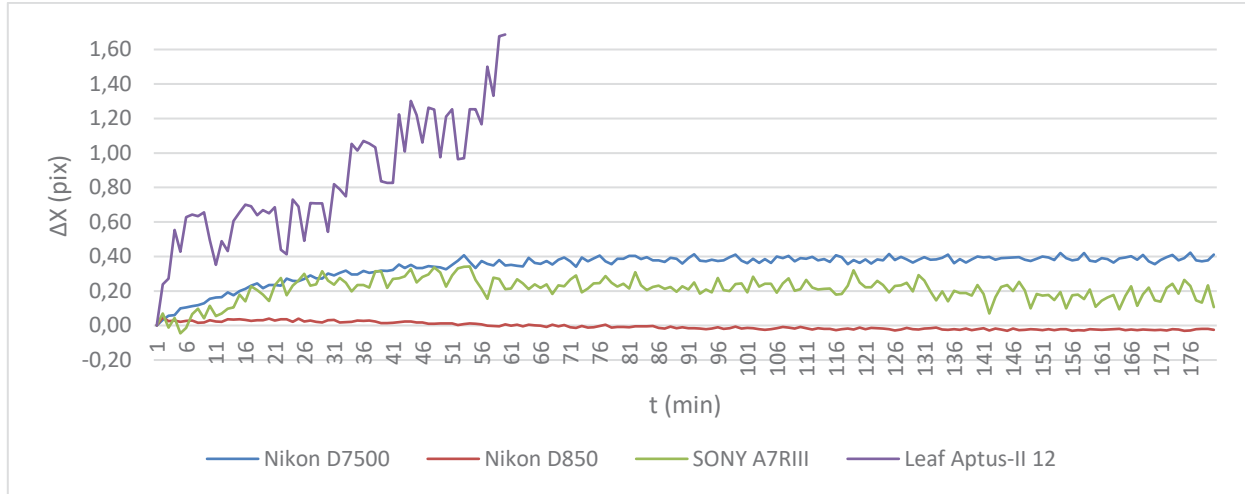


Figure 5: Changes in X image coordinates for different cameras.

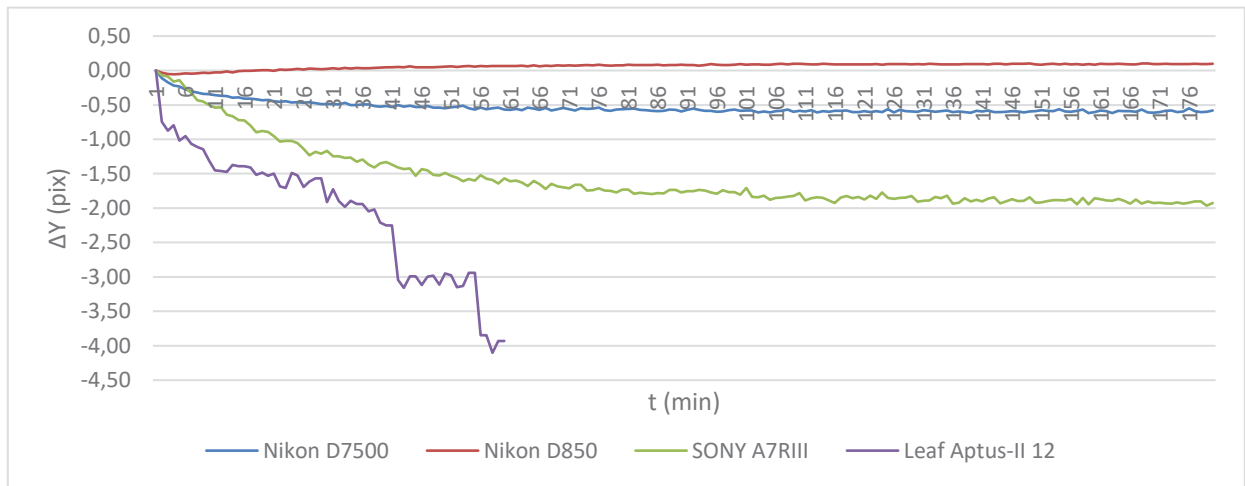


Figure 6: Changes in Y image coordinates for different cameras.

The battery in the Leaf Aptus-II 12 had to be changed every 40 minutes, and this caused a slight shift in camera position, therefore the results had to be corrected. The digital back of the camera was also equipped with a small fan, which cooled the sensor, however this cooling effect seemed inconsistent. The deviations from zero are high compared to the other camera models, and the variations in image coordinates far exceed the required accuracy of 0.1 pixels, therefore the Leaf Aptus-II 12 isn't suitable for deformation measurements where high accuracy is required.

It is also notable that among the three other cameras, the deviations induced by the self-heating effect are the highest in the Sony A7RIII, however it seems like it levels out at the two-hour mark. In this regard, just as in the previous chapter, the measurements from the first two hours were cut and the rest was presented in figure 7 and 8 and table 3, ordered from best to worst.

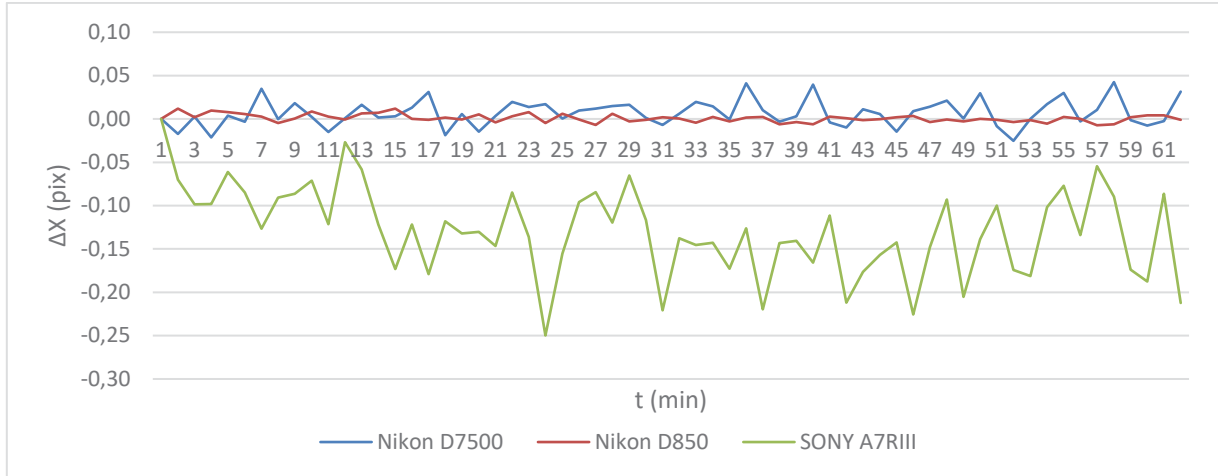


Figure 7: Changes in X image coordinates for different marker sizes.

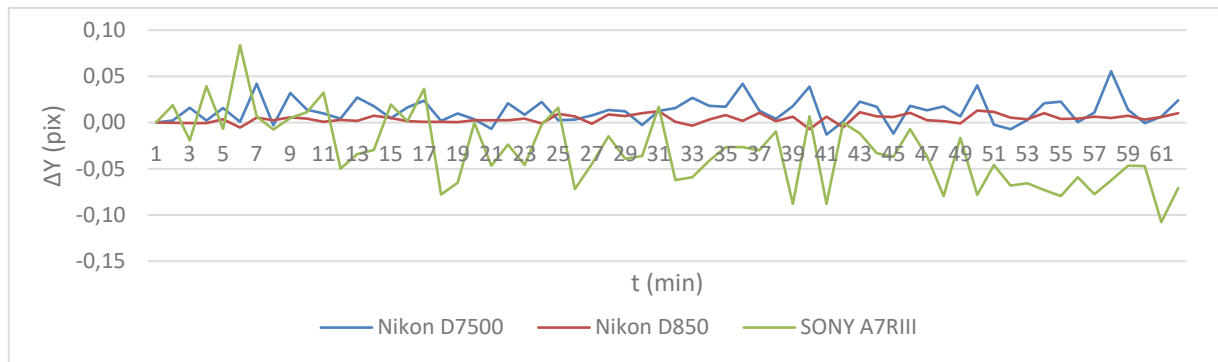


Figure 8: Changes in Y image coordinates for different marker sizes.

Table 3: Changes in image coordinates for different cameras.

Statistics for t=120 min until t=180 min (pix)										
Camera	Mean value		Standard deviation		Root mean Square		Min		Max	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
D850	0.001	0.004	0.005	0.004	0.005	0.006	-0.007	-0.007	0.012	0.013
D7500	0.007	0.013	0.015	0.013	0.017	0.019	-0.025	-0.013	0.042	0.056
A7RIII	-0.129	-0.030	0.051	0.038	0.139	0.048	-0.250	-0.108	0.000	0.084

According to both the graphs in figure 7 and 8 and the standard deviation, and maximum/minimum values in table 2, the Sony A7RIII camera isn't suitable for high-accuracy deformation measurements. This camera is equipped 5-axis optical in-body image stabilisation which compensates for vertical/horizontal shift and yaw/pitch/roll [20]. Even though this feature was disabled during the experiment, it might have been partly responsible for the significant changes in measured image coordinates, however this statement requires further testing.

The Nikon D7500 camera produced promising results, however it lacks the "silent shooting" function, which might have caused the more pronounced variations in image coordinates. Overall, this camera could be used as a cheaper substitute for the D850 when measuring deformations. The results from only the D850 camera are shown in figure 9.

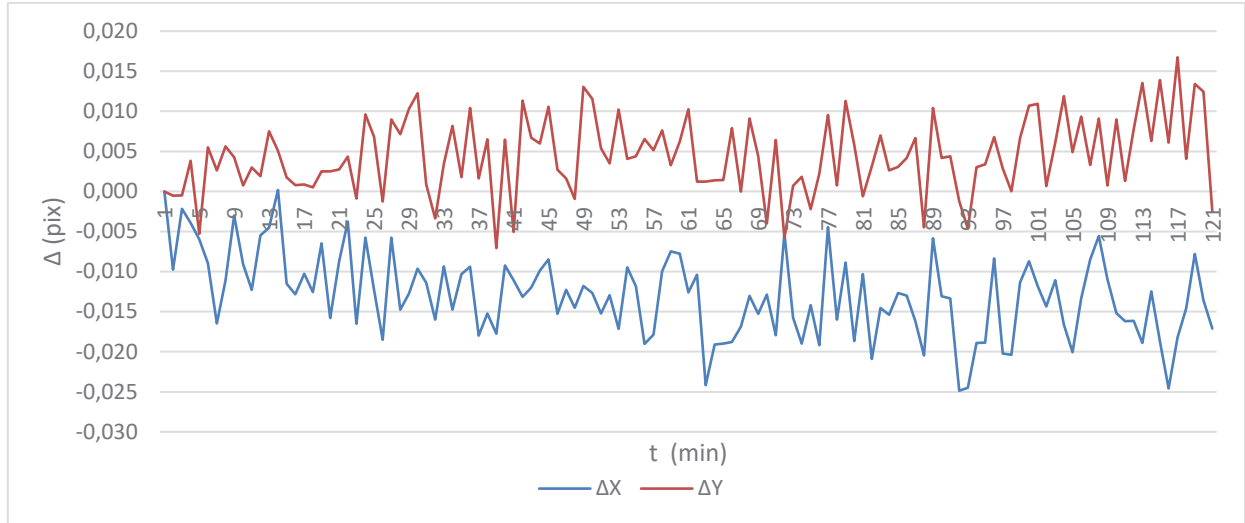


Figure 9: Changes in image coordinates for the Nikon D850 camera.

As shown in the graph above, the variations are extremely small, under 0.03 pixel. As a conclusion for this chapter, the Nikon D850 camera is more than suitable for deformation measurement with high accuracy in a laboratory setting. The 0.005-pixel standard deviation is in line with Luhmann’s research. Even if a maximum and minimum changes are considered, it is safe to say that the real measured changes will not exceed 0.03 pixels, which equals to 6 μm at a distance of 1.7 m.

2.3 Effect of sensor self-heating

In the next experiment the cameras’ self-heating effect was tested. In a laboratory the cameras lens was unmounted, and the capturing mode was set to interval timer shooting, with a one-minute interval, just as in the previous experiments. An image of the camera’s sensor was then captured every minute with the FLIR T620 thermal camera [21], and the changes in temperature were then correlated with the changes in image coordinates from the previous experiment and are shown in figure 10.

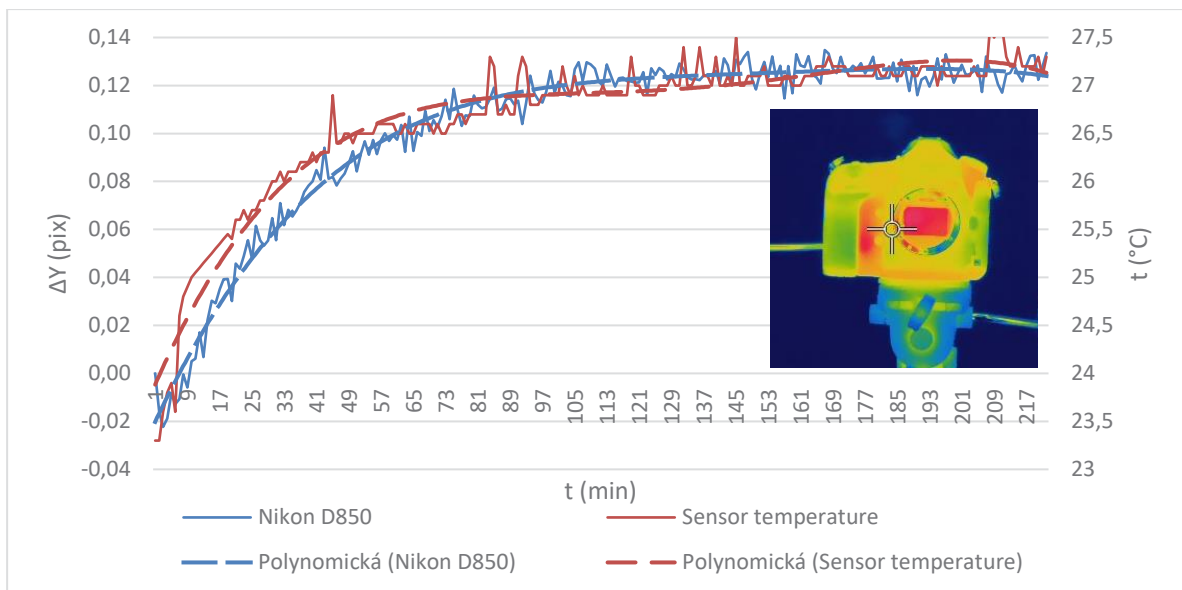


Figure 10: Thermal image of the Nikon D850 cameras sensor and changes in temperature correlated with changes in Y image coordinates, and their trendlines.

We focused on the changes in Y coordinates because the main goal of these measurements is to determine vertical deformations. In the graph above the trendlines of both datasets seem to correlate, and the correlation coefficient between the two datasets, the temperature and the changes in coordinate Y was 0.95. The changes in coordinates seem to copy the temperature changes with a slight delay. This could be the result of the time delay between the sensor heating up and the actual thermal expansion of the mechanical components within the camera. Also, when measuring with a FLIR camera, it is crucial to set the reflectivity correctly, as FLIR camera temperature measurements are highly influenced by the reflectivity at the top surface of the object [22]. Since the reflectivity constant of the CMOS sensor wasn't verified, the results could slightly differ from a measurement where the reflectivity is set correctly.

2.4 Terrain test with the Nikon D850 camera

Utilizing previous information, we carried out a test outdoors. The camera with the best results, the Nikon D850 was used, and the temperature of the air was measured using a Comet sensor [23]. Since we couldn't measure the temperature of the sensor directly, we tried to find a certain correlation with the outdoor temperature. Both the targets and the camera were stabilized on a heavy tripod, set 21 metres from each other (figure 11). For the D850 this represented a GSD of 2.61 mm. This experiment was carried out twice, on two different days. The results are shown in figure 12 and 13.



Figure 11: camera and target configuration.

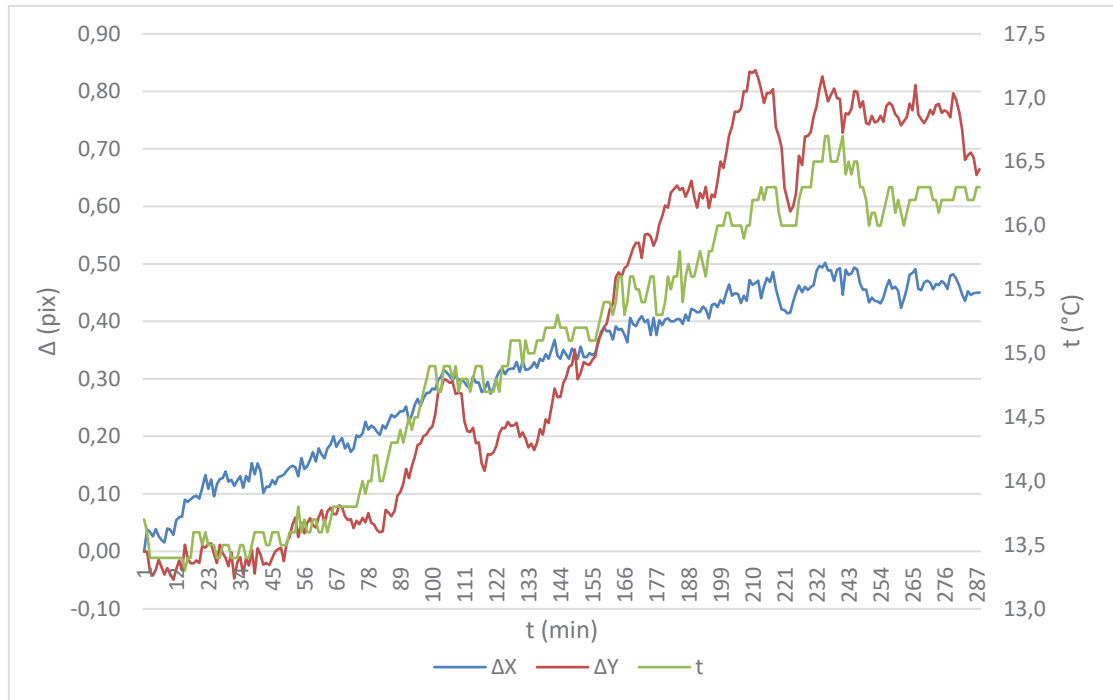


Figure 12: Changes in image coordinates and temperature-first experiment.

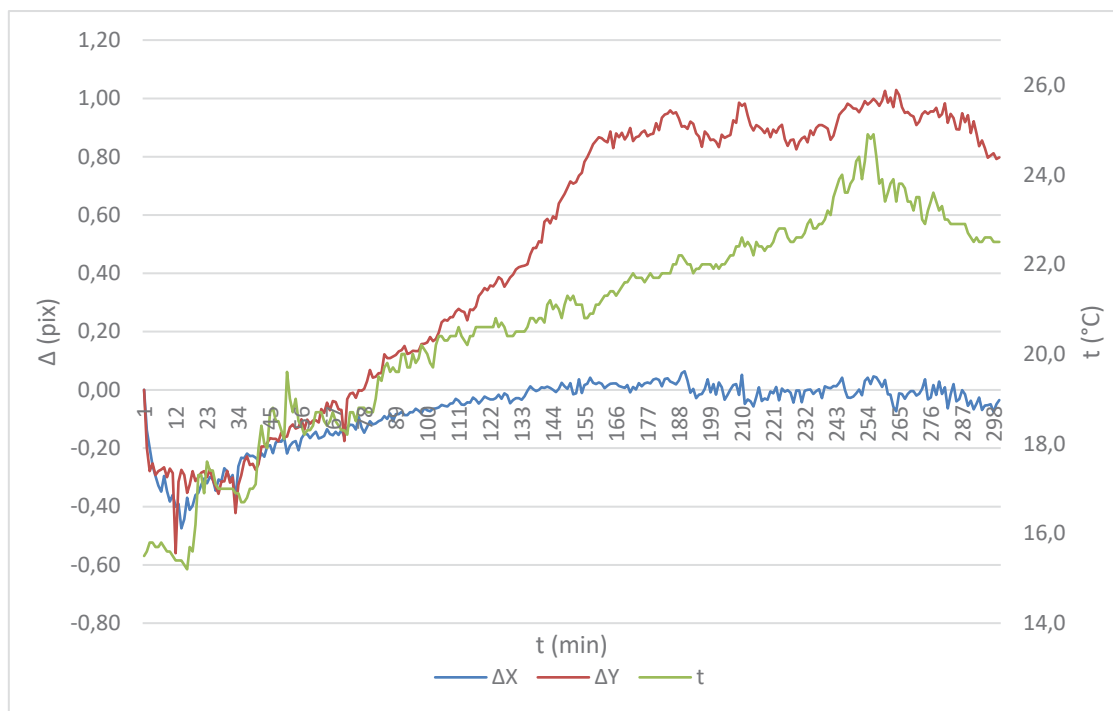


Figure 13: Changes in image coordinates and temperature-second experiment.

As seen in the graphs above there is no strong correlation between neither of the axes and the temperature, besides some similar peaks and dips in the first outdoor experiment between $t=190$ min and $t=280$ min, however, this didn't happen in the second outdoor experiment. The dip in the beginning of the second experiment might have been caused by the heat differences, as the camera was in an office with a temperature at $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, then taken outdoors. The changes in image coordinates might have been the result of several different influences, such as torsion of both tripods, and the material expansion of the target markers.

3. Conclusion

In conclusion the authors' algorithm based on the ellipse fitting on the detected edges achieved high accuracy when the target markers were sufficiently large. Four cameras were tested and the Nikon D850 camera was sufficiently accurate to perform measurements with up to a 0.03 accuracy in laboratory settings. In contrast with other authors proposal, like pre-heating a camera, just eliminating the measurements before heat-balance with the environment is achieved seems to be more effective. It should be also tested how cameras heat up when using an interval different than 1 minute.

As for the outdoor experiments, some other factors must be considered to achieve an accuracy as high as in the laboratory tests. Some of the planned experiments are the following: comparing the edge ellipse operator to the Least-Square Matching and the Digital Image Correlation algorithms; Testing the edge ellipse operator when measuring simulated deformations with deformations measured using precise levelling; and placing a compensation specimen as proposed by Ma [11], such as a levelling rod in the image plane and using it for corrections.

Acknowledgement

This article was created with the support of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic within the Slovak Research and Development Agency, project no. APVV-18-0472.

Literature

- [1] FRAŠTIA, M. Vybrané aplikácie fotogrametrie v oblasti merania posunov. Habilitačná práca. 2017.
- [2] LEE, Jong Jae; SHINOZUKA, Masanobu. A vision-based system for remote sensing of bridge displacement. *Ndt & E International*, 2006, 39.5: 425-431.
- [3] YONEYAMA, Satoru; UEDA, Hiroki. Bridge deflection measurement using digital image correlation with camera movement correction. *Materials transactions*, 2012, 53.2: 285-290.
- [4] JIANG, Ruinian; JAUREGUI, David V. Development of a digital close-range photogrammetric bridge deflection measurement system. *Measurement*, 2010, 43.10: 1431-1438.
- [5] RIBEIRO, D., et al. Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system. *Engineering Structures*, 2014, 75: 164-180.
- [6] WAGNER, Andreas, et al. Bridge monitoring by means of video-tacheometer—a case study. *avn-Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 2013, 120.8-9: 283-292.
- [7] WAGNER¹, Andreas, et al. *Monitoring Concepts Using Image Assisted Total Stations*. 2016.
- [8] ABOLHASANNEJAD, Vahid; HUANG, Xiaoming; NAMAZI, Nader. Developing an optical image-based method for bridge deformation measurement considering camera motion. *Sensors*, 2018, 18.9: 2754.

- [9] AVŞAR, Özgür; AKÇA, Mehmet Devrim; ALTAN, Orhan. Photogrammetric deformation monitoring of the second Bosphorus Bridge in Istanbul.
- [10] LUHMANN, Thomas, et al. Close-range photogrammetry and 3D imaging. In: Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. de Gruyter, 2019.
- [11] MA, Shaopeng; PANG, Jiazhi; MA, Qinwei. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera. Measurement Science and Technology, 2012, 23.2: 025403.
- [12] WONG, Kam W. Experience with two vision systems. In: Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision. SPIE, 1990. p. 2-6.
- [13] BEYER, H. A. Analysis of a CCD-camera based Photogrammetric Close-range System. 1992. PhD Thesis.
- [14] HANDEL, Holger. Analyzing the influences of camera warm-up effects on image acquisition. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2009, 1: 12-20.
- [15] YU, Liping; LUBINEAU, Gilles. Modeling of systematic errors in stereo-digital image correlation due to camera self-heating. Scientific reports, 2019, 9.1: 1-15.
- [16] MA, Shaopeng; ZHOU, Shichao; MA, Qinwei. Image distortion of working digital camera induced by environmental temperature and camera self-heating. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 115: 67-73.
- [17] Agustin Trujillo-Pino (2022). Accurate subpixel edge location (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48908-accurate-subpixel-edge-location>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved October 10, 2022.
- [18] Richard Brown (2022). fitellipse.m (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15125-fitellipse-m>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved October 10, 2022.
- [19] <https://www.photomodeler.com/>
- [20] <https://www.Sony.co.uk/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-7rm3>
- [21] <https://www.flir.eu/support/products/t620/#Overview>
- [22] HOSSEINI, SayedMohammad; TAN, Yongwen; AHMADIAN, Mehdi. Forward-Looking Infrared Radiometry (FLIR) Application for Detecting Ballast Fouling. In: ASME/IEEE Joint Rail Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2020. p. V001T03A003.
- [23] <https://www.cometsystem.com/products/sensors>

Lukáš Kubica¹

Študijný program: geodézia a kartografia, 2. ročník

POROVNANIE L_1 A L_2 REGRESIE PRI MODELOVANÍ InSAR ČASOVÝCH RADOV

COMPARISON OF L_1 AND L_2 REGRESSION IN InSAR TIME SERIES MODELLING

Abstract

One of the many methods to identify outliers in the InSAR time series is its modeling with statistical criteria defining confident interval. Time series modeling, based on the Ordinary least squares (OLS) method, exploits the L_2 norm as a function to minimize. Therefore, it is sensitive to the presence of outliers. One solution to make the estimation more robust is to implement the L_1 norm. This work compares both L_2 and L_1 norms in the process of modeling the InSAR time series. The main objective is to investigate whether the L_1 norm implementation can increase the success rate of the outlier detection algorithm.

Klíčové slová

InSAR; odľahlé merania; lineárna regresia; L_1 norma, L_2 norma

1. Úvod

Družicová radarová interferometria je v poslednom období veľmi populárna a rozšírená metóda používaná na sledovanie pretvorenia zemského povrchu a objektov umiestnených na ňom. Vhodným spracovaním družicových meraní je možné z radarových snímok získať informácie o pohybe veľkého množstva prirodzených trvalých odrážačov s milimetrovou presnosťou v podobe časových radov pohybu bodov.

Z použitej metódy spracovania, nedokonalosti algoritmov rozbalenia meranej fázy ako aj nedokonalosti modelovania systematických vplyvov napr. atmosféry sú vo výsledných časových radov často prítomné systematické chyby v podobe odľahlých meraní a fázových skokov.

Jedným zo spôsobom akým identifikovať vybočujúce merania je aplikácia štatistického prístupu definície intervalu spoľahlivosti okolo vhodne zvoleného modelu aproximujúceho pohyb bodu. Merania, ktoré nie sú súčasťou intervalu spoľahlivosti môžeme považovať za vybočujúce. Úspešnosť uvedenej metódy priamo ovplyvňuje spôsob, akým sa určí model časového radu.

Cieľom predkladanej práce je porovnať 2 prístupy modelovania časových radov. Uvedené metódy sa odlišujú vo funkcii, ktorú pri riešení minimalizujú. Prvý prístup spočíva v klasickej metóde najmenších štvorcov (MNS), ktorej optimalizačná funkcia je L_2 norma. Druhý prístup je štatistický robustnejší a pri riešení minimalizuje L_1 normu. Odhad pomocou tohto prístupu by mal byť rezistentnejší na prítomnosť odľahlých meraní [1].

V rámci práce oba prístupy otestujeme na vzorke pozostávajúcej z 1000 InSAR časových radov za účelom porovnať úspešnosť jednotlivých metód, posúdiť ich výhody, resp. nevýhody a analyzovať, či má zmysel používať L_1 normu pri modelovaní InSAR časových radov za účelom identifikácie odľahlých meraní.

¹ Ing. Lukáš Kubica, STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra globálnej geodézie a geoinformatiky, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

2. Normy v lineárnej algebre

V lineárnej algebre sa normy využívajú na určovanie veľkosti tenzorov [2]. Keďže tenzory vyšších radov pozostávajú z viacerých hodnôt nie je úplne jednoduché si predstaviť ich veľkosť. Normy teda môžeme chápať aj ako funkcie, ktorých účelom je mapovať tenzory do skalárnych hodnôt zodpovedajúcich ich veľkosti. Okrem určovania veľkosti tenzorov môžeme normy využiť napr. aj pri určovaní vzájomnej vzdialenosti dvoch tenzorov. Z matematického hľadiska by normy ako funkcie f mali spĺňať 3 základné vlastnosti.

Prvá vlastnosť noriem hovorí o tom, že normy by nemali byť záporné. Norma vektora, ktorého prvky sú nulové (leží v počiatku súradnicovej sústavy), je tiež nulová:

$$f(\vec{x}) \geq 0 \quad (1)$$

Druhá vlastnosť noriem je ekvivalentom trojuholníkovej nerovnosti, kde súčet dvoch strán trojuholníka musí byť väčší ako tretia strana. Toto pravidlo analogicky platí ja pre normy dvoch vektorov:

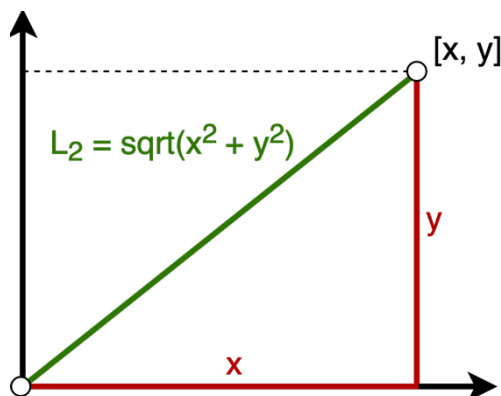
$$f(\vec{x} + \vec{y}) \leq f(\vec{x}) + f(\vec{y}) \quad (2)$$

Tretou vlastnosťou je linearita. Ak sú prvky vektora škálované konštantou α , potom norma škálovaného vektora je zväčšené o absolútnu hodnotu konštanty α :

$$f(\alpha\vec{x}) = |\alpha|f(\vec{x}) \quad (3)$$

L2 norma označovaná tiež ako Euklidovská norma zodpovedá najkratšej vzdialenosti medzi dvojicou bodov (Obr. 1). Matematický zápis normy (4) vyjadruje druhú odmocninu zo sumy štvorcov jednotlivých elementov vektora:

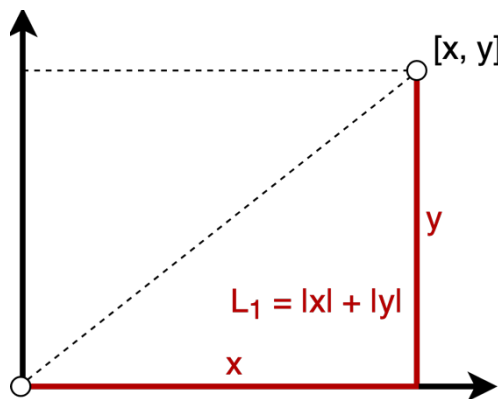
$$\|\vec{x}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (4)$$



Obr. 1: Grafická interpretácia L2 normy v 2D

L1 norma zodpovedá súčtu absolútnych hodnôt prvkov vektora (5). Norma sa často označuje aj ako „*Manhattan Distance*“ pre jej grafickú interpretáciu (Obr. 2).

$$\|\vec{x}\|_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|} \quad (5)$$



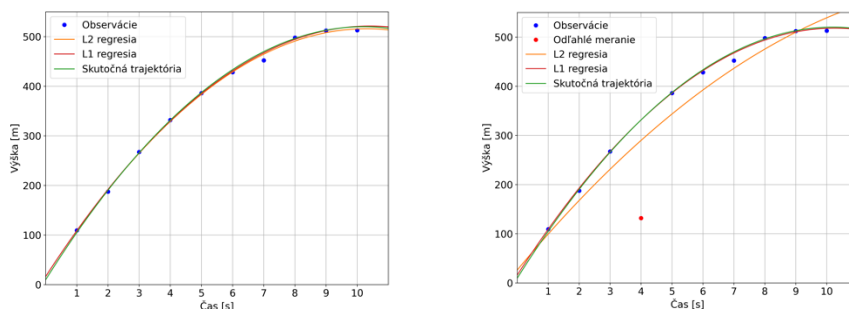
Obr. 2: Grafická interpretácia L1 normy v 2D

2.1 Využitie noriem pri modelovaní InSAR časových radov

V prírodných vedách ako aj v technických disciplínach sa často vyskytujú javy, ktoré možno opísať funkciou jednej, príp. aj viacerých premenných. Rovnako to je aj v prípade InSAR časových radov, kde pohyb prirodzených trvalých odražačov je možné aproximovať funkciou. Vo všeobecnosti sa problém určenia parametrov funkčných závislostí na základe meraní nazýva regresná analýza. V geodézii sa pri jej riešení najčastejšie využíva metóda najmenších štvorcov (MNS). Princíp MNS je založený na minimalizácii súčtu štvorcov odchýlok medzi meraniami a ich aproximáciou. Inými slovami môžeme povedať, že v rámci riešenia MNS sa minimalizuje L2 norma [3].

Z matematického zápisu L₂ normy (4) vyplýva, že čím je väčšia odchýlka medzi meraniami a ich aproximáciou, tým viac je hodnota normy a teda aj aproximačná funkcia negatívne ovplyvnená. Ak teda aplikujeme MNS na súbor meraní, obsahujúci odľahlé hodnoty, tak získaný odhad môže byť skreslený. Jedným z riešení je aplikácia robustnejších metód, ktoré nie sú ovplyvnené vybočujúcimi meraniami v takej miere ako v prípade MNS.

Z definície L₁ normy (5) vyplýva, že odľahlé merania sa v odhade prejavujú v omnoho menšej miere ako v prípade L₂ normy (viď. Obr. 3). Keďže predmetom minimalizácie je suma absolútnych odchýlok medzi meraniami a ich aproximačnou funkciou a nie súčet ich druhých mocnín. Z uvedeného vyplýva, že L₁ norma je pri svojom odhade robustnejšia a mali by sme pomocou nej dostať aproximáciu, ktorá nie je ovplyvnená odľahlými meraniami (Obr. 3).



Obr. 3: Ukážka vplyvu odľahlých meraní na odhad pomocou L_2 a L_1 normy (modelový príklad)

3. Praktický experiment

V rámci praktického experimentu sme na vzorke 1000 InSAR časových radov realizovali oba uvedené prístupy modelovania časových radov. Parametre dátového súboru, ktorý bol pri experimente použitý sú uvedené v tabuľke č. 1.

Tab. 1: Charakteristika dátového súboru

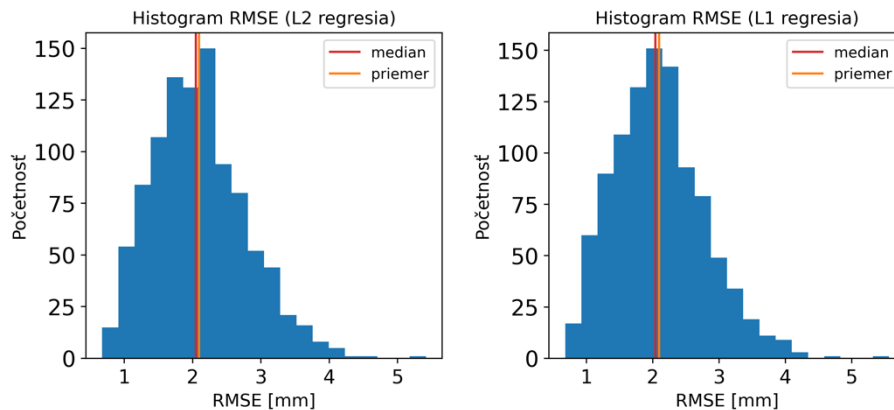
Družicová misia:	Sentinel-1
Dráha:	DSC124
Obdobie:	9.1.2019 – 18.12.2021
Počet bodov:	1000
Počet epoch:	163
Celkový počet meraní:	163 000

Na vybranej množine časových radov sme aplikovali algoritmus detekcie odľahlých meraní na základe štatistického prístupu stanovenia intervalu spoľahlivosti o hodnote ± 3 -krát medián absolútnej odchýlky (MAD) okolo modelu [4]. V prvom kroku sme proces modelovania časových radov nechali v pôvodnom stave, teda minimalizačnú funkciu reprezentovala L_2 norma. V druhom kroku sme zmenili minimalizačnú funkciu na L_1 normu. Pri výpočte sme sa zamerali na 3 základné ukazovatele, na základe ktorých sme metódy porovnávali. Prvým ukazovateľom boli rezíduá, teda rozdiely medzi meraniami a ich aproximáciou získanou oboma metódami a z nich odvodená štandardná odchýlka. Druhým ukazovateľom bol počet identifikovaných odľahlých meraní, na základe ktorého budeme vedieť stanoviť, či implementácia L_1 normy vedie k zvýšeniu úspešnosti identifikácie odľahlých meraní v InSAR časových radov pomocou štatistického prístupu. Tretím ukazovateľom bola časová náročnosť výpočtu jednotlivých metód.

Z rezíduí sme pre obe metódy vypočítali štandardnú odchýlku, ktorej štatistické vyhodnotenie je uvedené v tabuľke č. 2. Z výsledkov môžeme konštatovať, že štandardné odchýlky vypočítané na základe rezíduí získaných z oboch metód sú takmer identické. Grafické znázornenie početnosti štandardnej odchýlky nám taktiež hovorí o veľmi podobných výsledkov pre obe použité metódy modelovania InSAR časových radov.

Tab. 2: Štatistické vyhodnotenie štandardnej odchýlky [mm] pre obe metódy

Ukazovateľ	L ₂ norma	L ₁ norma
Priemerná hodnota:	2,1	2,1
Medián:	2,1	2,0
Modus:	2,3	2,0

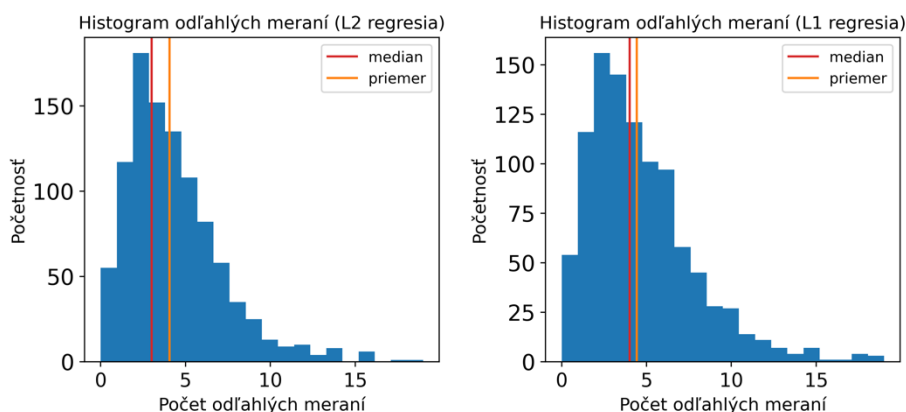


Obr. 3: Početnosť štandardnej odchýlky pre jednotlivé metódy

Ukazovateľ počtu identifikovaných odľahlých meraní je štatisticky vyhodnotený v tabuľke č. 3. Z výsledkov je vidieť, že použitie robustnejšej metódy v podobe L₁ normy výrazne neprispelo k úspešnosti algoritmu na identifikáciu odľahlých meraní v InSAR časových radov. Grafické znázornenie početnosti (Obr. 4), podobne ako v prípade prvého ukazovateľa, je takmer identické pre obe metódy.

Tab. 3: Štatistické vyhodnotenie počtu odľahlých meraní pre obe metódy

Ukazovateľ	L ₂ norma	L ₁ norma
Priemerná hodnota:	4,1	4,4
Medián:	3	4
Modus:	2	2



Obr. 4: Početnosť počtu identifikovaných odľahlých meraní pre jednotlivé metódy

Keďže implementácia L₁ normy rieši optimalizačný problém v podobe minimalizácie funkcie (L₁ normy) jej časová náročnosť sa výrazne odlišuje od implementácie štandardnej MNS. V tabuľke č. 4 sú uvedené časy potrebné na určenie modelu jedného časového radu ako aj celej

množiny. Implementácia oboch metód je realizovaná v programovacom jazyku Python3 (verzia 3.8.13). Výpočet bol spustený pod operačným systémom macOS Bug Sur (verzia 11.6), ktorý disponuje 16 GB operačnou pamäťou a 2,4 GHz procesorom (Quad-Core Intel Core i5).

Tab. 4: Časová náročnosť jednotlivých metód

	L ₂ norma	L ₁ norma
1 časový rad	23,6 ms ± 150 μs	260 ms ± 5,6 ms
Množina	28,28 s	456,08 s (~ 7,6 m)

Z tabuľky č. 4 je vidieť markantný rozdiel v časovej náročnosti jednotlivých metód. Spôsobené to je najmä spôsobom, akým sa hľadá minimum funkcie pri L₁ norme. V našom prípade bol použitý optimalizačný algoritmus *Constrained optimization by linear approximation (COBYLA)* [5]. V rámci praktického experimentu bolo testovaných viacero možných optimalizačných algoritmov, ktoré viedli k takmer rovnakému výsledku avšak odlišovali s v časovej náročnosti výpočtu.

4. Záver

V rámci predkladanej práce sme modifikovali existujúci algoritmus detekcie odľahlých meraní v InSAR časových radov za účelom zvýšenia úspešnosti detekcie. Pôvodné modelovanie časových radov pomocou MNS, ktorá v rámci riešenia minimalizuje L₂ normu, sme nahradili L₁ normou, ktorá je robustnejšia na prítomnosť odľahlých hodnôt v súbore meraní. Obe metódy sme aplikovali na rovnakú vzorku dát a porovnávali sme ich odlišnosti na základe štandardnej odchýlky modelov, počtu identifikovaných odľahlých meraní a časovej náročnosti metód.

Na základe numerických výsledkov uvedených v tabuľke č. 2, 3 ako aj z grafických ukážok histogramov (Obr. 3 a 4) môžeme tvrdiť, že použitie normy L₁ v procese modelovania InSAR časových radov neprispelo zásadným spôsobom k zvýšeniu úspešnosti detekčného algoritmu. Navyše, časová náročnosť modelovania časových radov pomocou L₁ normy je výrazne vyššia ako v prípade pôvodného riešenia v podobe L₂ normy (viď. tab. č. 4). Z uvedených dôvodov môžeme konštatovať, že implementácia L₁ normy v prípade štatistického algoritmu detekcie odľahlých meraní v InSAR časových radov neprispieva k zvýšeniu úspešnosti algoritmu a jej implementácia nemá výrazne opodstatnenie.

Literatúra

[1]

Brandt S.; Data Analysis - Statistical and Computational Methods for Scientists and Engineers Third Edition. Springer; New York; 1999; ISBN 0-387-98498-4.

[2]

Teunissen P. J. G.; Adjustment Theory: An Introduction; Delft University Press, 2000; ISBN 90-407-1974-8

[3]

Kubáčková Ľ.; Metódy spracovania experimentálnych údajov; VEDA vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied; Bratislava; 1990; ISBN 80-224-0104-8.

[4]

Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P. & Licata, L. (2013); Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median; *Journal of Experimental Social Psychology* pp. 764–766; URL: <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013>

[5]

M. J. D. Powell (2007); A view of algorithms for optimization without derivatives; *Cambridge University Technical Report DAMTP 2007*.

Peter Kysel¹

Študijný program: geodézia a kartografia, 4. ročník

KOMPLEXNÁ OBNOVA VKMČ S LOKÁLNymi POSUNMI V KATASTRÁLNOM ÚZEMÍ GALOVANY

COMPLEX RENEWAL OF VECTOR CADASTRAL MAP NUMERICAL WITH LOCAL SHIFTS IN THE CADASTRAL UNIT OF GALOVANY

Abstract

The cadastral map collection in Slovakia includes maps with various origin and quality. Its complex homogenization is needed. However, the only suitable method, which is now used, is a completely new mapping. This is a complex process, which is very expensive and time consuming. In the map collection, there are numerical maps, which include local shifts. These maps also need renewal, but the new mapping would be ineffective, because the relative quality of these maps is still sufficient. A new method for their renewal was developed, using a transformation of the map. This method is tested for a renewal of the vector cadastral map in the chosen cadastral unit as a whole. If the method proved sufficient, it could bring vast savings of time and money for the renewal of the numerical cadastral maps with local shifts.

Kľúčové slová

vektorová katastrálna mapa; transformácia; obnova.

1. Úvod

Kataster nehnuteľností v Slovenskej republike obsahuje množstvo údajov s rôznou kvalitou. Rozdiely v kvalite údajov sú spôsobené najmä ich pôvodom. Mapový fond katastra nehnuteľností je v súčasnosti v zlom stave, pretože obsahuje množstvo historických máp z obdobia pred prvou svetovou vojnou, ktoré však po viacerých úpravách a digitalizácii dodnes slúžia ako platné katastrálne mapy. Kvalita týchto máp je prakticky neznáma. Časť mapového fondu katastra tvoria novšie číselné katastrálne mapy, ktoré boli vytvorené pomocou novších číselných metód merania. Číselné katastrálne mapy by teda zákonite mali byť tou kvalitnejšou časťou mapového fondu katastra nehnuteľností.

Použité metódy a postupy pri starších číselných meraniach však mali svoje obmedzenia, preto aj niektoré číselné mapy nie sú také kvalitné, ako deklarujú predpisy. Niektoré časti máp, prípadne aj celé mapy v rámci katastrálneho územia, sú oproti stavu v teréne posunuté. Dnes sa tento posun prejaví tak, že po novom zameraní pôvodných bodov s využitím technológie GNSS sa novozameraná poloha bodu líši od polohy bodu v mape o rozdiel, ktorý je väčší ako dovolená odchýlka podľa súčasných predpisov. Odchýlky medzi novým meraním a pôvodnou mapou sú väčšinou v rozsahu niekoľkých desiatok centimetrov, ale vo výnimočných prípadoch môže posun dosahovať aj veľkosť niekoľkých metrov. Bez ohľadu na veľkosť posunu však tieto mapy nespĺňajú dnešné požiadavky na presnosť a je nutná ich obnova. Dnes je však možné obnoviť katastrálnu mapu iba pomocou obnovy katastrálneho operátu novým mapovaním. Tento postup predpokladá kompletne nové mapovanie

¹ Ing. Peter Kysel, STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra geodézie, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

v celom katastrálnom území. Lokálne posuny v číselných katastrálnych mapách však majú väčšinou systematický charakter, čo znamená, že ich veľkosť aj smer sú približne rovnaké na všetkých bodoch v určitej ohraničenej lokalite. Relatívna kvalita mapy je teda aj napriek posunu vysoká a nové mapovanie by bolo neefektívne, keďže systematický posun je možné opraviť jednoduchým spôsobom. Preto bol navrhnutý špeciálny postup na obnovu číselných katastrálnych máp s lokálnymi posunmi, tzv. obnova katastrálneho operátu korekciou (OKO K). Tento postup predpokladá obnovu katastrálnej mapy iba v ohraničených častiach katastrálneho územia, v ktorých bol novým meraním dokázaný lokálny posun. Obvod obnovy by bol určený flexibilne podľa veľkosti a rozsahu chýb v katastrálnej mape. Technická časť procesu bola viackrát úspešne testovaná, avšak iba v rozsahu malej ohraničenej časti katastrálneho územia [1], [2].

Príspevok je pokračovaním tohto testovania, avšak s tým rozdielom, že tu bude testovaná obnova číselnej katastrálnej mapy s lokálnym posunom komplexne v celom katastrálnom území. Výsledkom tejto obnovy bude obnovená katastrálna mapa, ktorá bude plne spôsobilá na ďalšie používanie v praxi a bude spĺňať všetky požiadavky na presnosť a kvalitu podľa súčasných predpisov.

2. Súčasný stav problematiky

Mapové dielo katastra nehnuteľností tvorí heterogénna množina máp. Tieto mapy charakterizuje najmä doba ich vzniku a s ňou súvisiace parametre, ako napríklad použitý súradnicový systém, kartografické zobrazenie a spôsob zobrazenia a aktualizácie máp, ktorej súčasťou mohlo byť viacnásobné prekresľovanie, zosúvisľovanie, prípadne transformácia [3]. Je teda nutná homogenizácia tohto mapového diela.

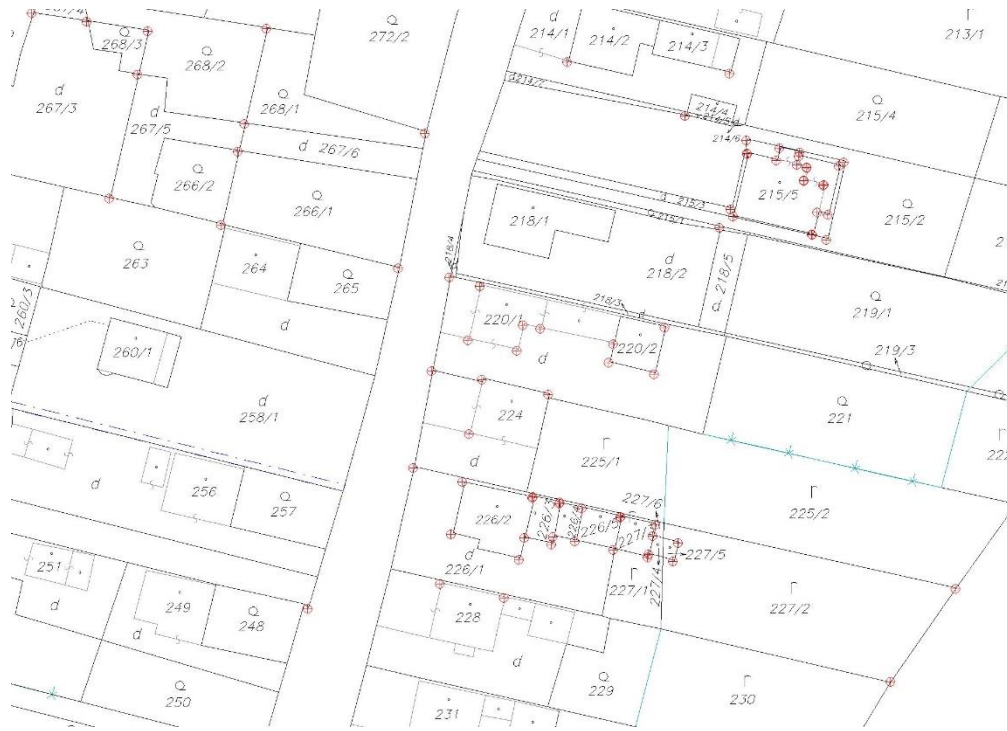
Mapové dielo sa vo všeobecnosti delí na katastrálne mapy a mapy určeného operátu. Príspevok sa bude ďalej zaoberať katastrálnymi mapami, ktoré zobrazujú nehnuteľnosti zapísané v registri C. V súčasnej dobe sú už všetky katastrálne mapy spravované v digitálnej vektorovej forme s presnou štruktúrou, preto môžeme hovoriť o vektorových katastrálnych mapách (VKM).

Vektorové katastrálne mapy sa ďalej rozdeľujú na dve hlavné skupiny – číselné a nečíselné. Prvou skupinou sú nečíselné vektorové katastrálne mapy. Tieto vznikli na podklade nečíselného merania, ktoré bolo vykonané zväčša metódou meračského stola. Body v týchto mapách nemajú určené presné súradnice a výsledkom merania bola iba grafická podoba mapy. Pôvodné analógové mapy boli neskôr naskenované a prepracované do digitálnej vektorovej formy [4].

Príspevok sa bude zaoberať vektorovými katastrálnymi mapami číselnými (VKMč). Tieto mapy boli vytvorené na podklade číselného merania geodetickými, prípadne fotogrametrickými metódami, pričom každý podrobný bod má určené presné súradnice v záväznom súradnicovom systéme S-JTSK [4]. VKMč obsahujú body s kódom kvality $T = 1$ až $T = 4$.

Ak bol bod určený presnými geodetickými metódami, znamená to, že by mal spĺňať určité kritériá presnosti dané Vyhláškou ÚGKK SR č. 461/2009 a ďalšími predpismi. Ak je teda dnes znovu zameraný bod v číselnej katastrálnej mape, polohová odchýlka medzi novým meraním a polohou bodu v mape by nemala prekračovať odchýlku danú predpismi. Kritériá sú bližšie popísané napr. v Usmernení ÚGKK SR č. 1/2022, pričom nadväzujú na kvalitu bodu danú jeho kódom kvality [2], [5].

Po zavedení technológie GNSS do bežnej geodetickej praxe však došlo k zisteniu, že niektoré mapy nespĺňajú vyššie uvedené kritériá. V niektorých mapách sa totiž nachádzajú oblasti, kde po novom zameraní podrobných bodov polohová odchýlka prekračuje dovolenú odchýlku, teda mapa je posunutá. Tento lokálny posun je však väčšinou v rámci určitej ohraničenej lokality systematický, teda jeho veľkosť aj smer sú približne rovnaké na všetkých bodoch v lokalite. Dnes sú tieto mapy aktualizované špeciálnym spôsobom podľa Vyhlášky ÚGKK SR č. 461/2009 [2], [4]. Aktualizácia je vykonaná pomocou lokálnej transformácie merania do posunutej mapy. Pôvodné meranie sa však nezahodí, ale ukladá sa v špeciálnom objekte vo vrstve BODY. VKMč s vrstvou BODY je znázornená na Obr. 1.



Obr. 1: Vektorová katastrálna mapa číselná s vrstvou BODY

Dnes je už ťažké povedať, čo bolo príčinou vzniku týchto lokálnych posunov, ale s najväčšou pravdepodobnosťou vznikli pri budovaní meračskej siete pre katastrálne mapovanie [6]. Je však nutná obnova týchto máp, pretože súčasný stav umožňuje iba ukladanie nových meraní do vrstvy BODY. Tieto merania sú iba zakonzervované a neexistuje žiadna oficiálna koncepcia na ich využitie a obnovu mapy.

V rámci výskumu autora bol navrhnutý nový spôsob obnovy týchto máp s lokálnym posunom, tzv. obnova katastrálneho operátu korekciou (OKO K). Tento postup bol už viackrát testovaný s úspešným výsledkom [1], [2]. Taktiež bola testovaná aj automatizácia procesu pomocou aplikácie VÚGK SR s názvom Spresnenie VKMt a špeciálnej aplikácie s názvom Korekcia, vyvinutej pre OKO K v jazyku R [7], [8]. Tento postup je navrhnutý na mieru pre VKMč s lokálnymi posunmi a v praxi by sa mohol osvedčiť ako veľmi efektívny a nenákladný.

3. Metodika

Cieľom príspevku je testovanie technickej časti procesu OKO K. Na rozdiel od predchádzajúcich experimentoch bude testovanie prebiehať v celom katastrálnom území. Na testovanie bolo vybrané katastrálne územie Galovany, ktoré sa nachádza v okrese Liptovský Mikuláš. V tomto katastrálnom území prebehlo nové mapovanie v rámci mapovej kampane Technicko-hospodárskeho mapovania, pričom toto mapovanie bolo ukončené v roku 1984. Podľa informácií, ktoré boli poskytnuté z ÚGKK SR, sa v tomto katastrálnom území nachádza 22 objektov vo vrstve BODY, ktoré obsahujú dokopy takmer 200 bodov. Objekty sú rozložené rovnomerne po celom katastrálnom území, čo znamená, že v celom katastrálnom území sa nachádza lokálny posun.

Technická časť procesu OKO K má 3 základné časti – analýzu homogenity, transformáciu mapy a záverečnú kontrolu. Prvou časťou je analýza homogenity, ktorej súčasťou je určenie definitívneho obvodu obnovy v rámci OKO K. Analýza homogenity pozostáva z identifikácie lokalít s lokálnym posunom, analýze smeru a veľkosti posunov v týchto lokalitách a porovnaní týchto lokalít navzájom. Následne je na základe tejto analýzy určený definitívny obvod obnovy. Tento je určený tak, že chybové lokality sa najprv rozdelia na čo najmenšie časti ohraničené parcelami vo verejnom vlastníctve (ulice, vodné toky,...), následne sa vykoná analýza homogenity a bloky s podobnými vlastnosťami lokálneho posunu sú následne spojené do väčších celkov. Definitívny obvod obnovy sa

určuje tam, kde sú v teréne označené hranice parciel, teda zväčša v zastavanom území obce. Ak hranice nie sú označené v teréne, dnes už nevieme posúdiť veľkosť lokálneho posunu a OKO K tu nemôže byť vykonaná. V týchto častiach však lokálny posun nie je veľkou prekážkou na používanie mapy a pri vytyčovaní hraníc môžu byť akceptované výsledky z pôvodného mapovania, aj keď tieto výsledky môžu obsahovať lokálny posun.

Druhou časťou technického procesu OKO K je transformácia mapy. Využíva sa tu zhodnostná transformácia jednotlivých blokov s lokálnym posunom. Tento typ transformácie zachováva tvar, a tým aj výmery parciel vo vnútri bloku. Toto je veľkou výhodou OKO K, pretože výmery väčšiny parciel v obvode obnovy sa nebudú meniť. Výmery sa môžu zmeniť iba v prípade malého počtu parciel, cez ktoré prebiehajú hranice transformovaných blokov. Ani to však nemusí byť pravidlom. Na výpočet transformačných parametrov sa využijú identické body určené pomocou technológie GNSS, teda body vo vrstve BODY, prípadne body z doplnujúceho merania, ak je pokrytie vrstvou BODY nepostačujúce pre OKO K.

Poslednou časťou je záverečná kontrola. V rámci tejto kontroly sú opäť vypočítané smer a veľkosť lokálnych posunov na množine kontrolných bodov, ktoré boli predtým využité aj na analýzu homogenity. Týmto krokom sa zisťuje, či bola obnova mapy úspešná a či mapa vyhovuje všetkým požiadavkám. V rámci tohto kroku sa analyzujú aj výmery hraničných parciel. Ich výmera je porovnaná s výmerou na liste vlastníctva a na základe hodnoty dovolenej odchýlky sa rozhodne, či je potrebné výmeru opraviť. Výsledkom týchto krokov je obnovená VKMč bez lokálneho posunu.

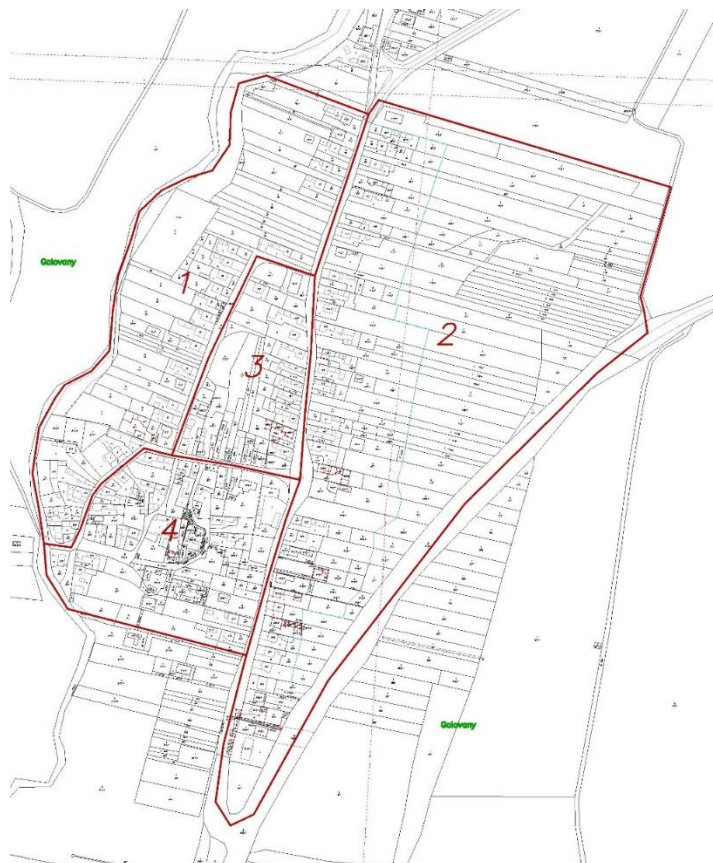
4. Výsledky a diskusia

Komplexná obnova vektorovej katastrálnej mapy číselnej v rozsahu celého katastrálneho územia bola testovaná v katastrálnom území Galovany. Keďže pokrytie katastrálneho územia vrstvou BODY nebolo dostatočné, bolo dňa 18. 6. 2022 vykonané doplnujúce meranie metódou GNSS-RTK s pripojením na sieť SKPOS. V rámci tohto merania bolo určených 200 bodov, ktoré sa nachádzali primárne na oploteniach, ktoré boli dostupné z verejných priestranstiev.

Ako prvá bola vykonaná analýza homogenity a určenie obvodu obnovy. Obvod bol určovaný podľa toho, kde boli hranice parciel označené v teréne a bolo ich možné zamerať. Do obvodu nebolo zahrnutých niekoľko novostavieb domov s ich príslušnými pozemkami, ktoré sa nachádzajú na okraji zastavaného územia obce. Pri zápise týchto stavieb bol totiž ignorovaný lokálny posun a ich poloha vo VKM je v rámci dovolenej odchýlky. Preto nemôžu byť tieto stavby zahrnuté do obvodu OKO K, v ktorom sa bude vykonávať transformácia. Obvod bol v prvom kroku rozdelený na najmenšie možné bloky oddelené cestami, vodnými tokmi, prípadne inými parcelami nevyžívanými na výstavbu. Počet týchto blokov bol 4 (Obr. 2). V týchto blokoch bola vykonaná analýza homogenity, ktorej výsledky sa nachádzajú v Tab. 1. Veľkosť a smer lokálneho posunu v jednotlivých blokoch je vyjadrená priemernou polohovou odchýlkou Δ_{PR} a priemerným smerníkom v systéme S-JTSK α_{PR} . Taktiež boli vyjadrené aj RMSE týchto hodnôt $RMSE_{\Delta p}$ a $RMSE_{\alpha}$, ktoré hovoria o rozptyle jednotlivých meraných hodnôt okolo ich priemeru. Analýza homogenity bola vykonaná automatizovane pomocou vlastnej aplikácie v jazyku R s názvom „Korekcia“.

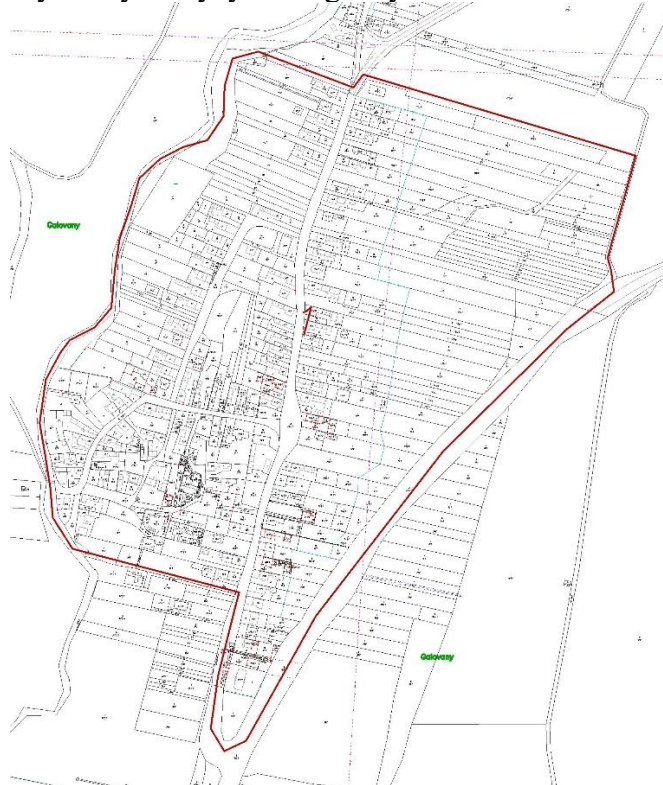
Tab. 1: Výsledky analýzy homogenity v k.ú. Galovany – malé bloky

blok	Δ_{PR} [m]	$RMSE_{\Delta p}$ [m]	α_{PR} [g]	$RMSE_{\alpha}$ [g]
1	0,31	0,048	252,4489	9,0502
2	0,33	0,079	263,4419	13,9289
3	0,30	0,070	254,6042	16,9221
4	0,32	0,058	258,9296	20,3351



Obr. 2: Rozdelenie k.ú. Galovany na najmenšie možné bloky

Z výsledkov analýzy homogenity v jednotlivých menších blokoch je možné vidieť, že priemerné hodnoty polohových odchýlok aj smerníkov sú pri porovnaní jednotlivých blokov podobné. Preto je možné pristúpiť k spojeniu všetkých menších blokov do jedného veľkého, ktorý bude pokrývať celý obvod OKO K (Obr. 3). Výsledky analýzy homogenity v tomto bloku sú v Tab. 2.



Obr. 3: Finálny obvod obnovy v k.ú. Galovany

Tab. 2: Výsledky analýzy homogenity v k.ú. Galovany – finálny obvod obnovy

blok	Δ_{PR} [m]	$RMSE_{\Delta p}$ [m]	α_{PR} [g]	$RMSE_{\alpha}$ [g]
1	0,32	0,066	257,6660	16,2054

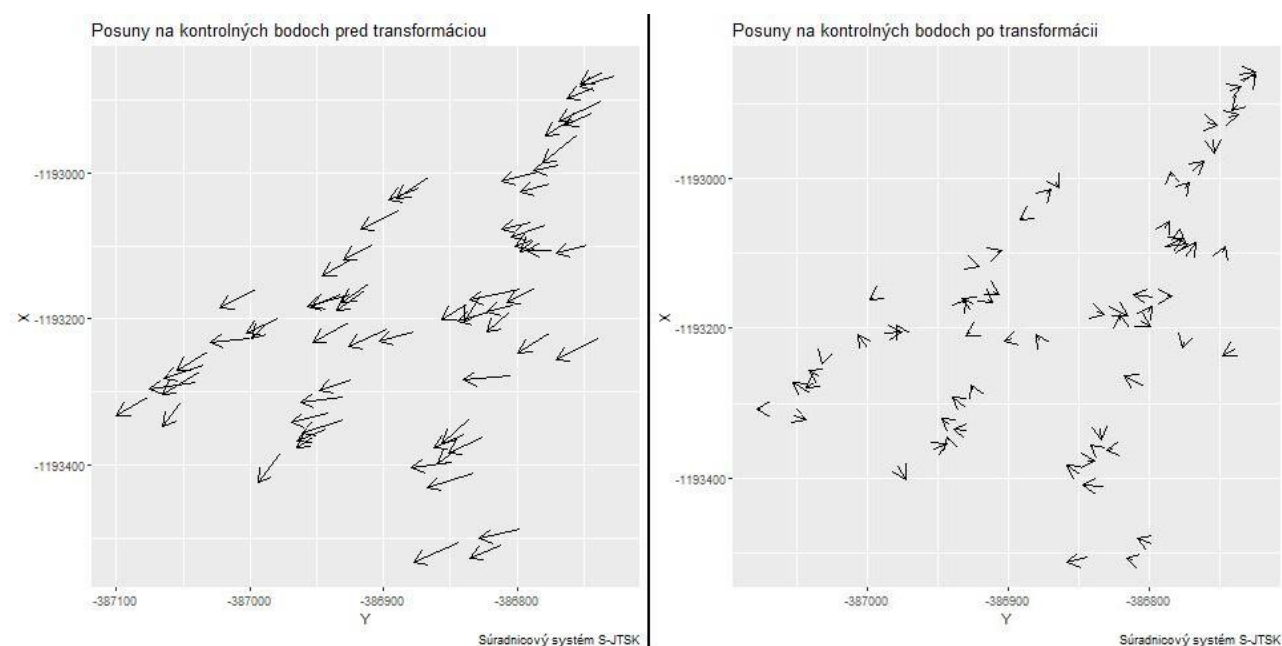
Z Tab. 2 je možné vidieť, že aj v prípade spojenia všetkých menších blokov do jedného väčšieho sú stále nízke hodnoty RMSE v prípade oboch parametrov, preto môžeme považovať celý blok za homogénny. Z tohto dôvodu sa pristúpilo k obnove mapy iba v jednom spojenom bloku.

Ďalším krokom bola samotná obnova VKMč pomocou zhodnostnej transformácie mapy v obvode obnovy. Transformácia bola vykonaná automatizovaným spôsobom pomocou aplikácie „Spresenie VKMč“. Na výpočet transformačných parametrov bolo využitých 19 identických bodov, ktoré boli rovnomerne rozložené po celom obvode OKO K. Niektoré z identických bodov sa nachádzali vo vrstve BODY, ale väčšina z nich bola určená v rámci nového doplňujúceho merania. Pre všetky identické body však platí, že ich „správna“ poloha bez lokálneho posunu bola určená s využitím technológie GNSS. Priemerná hodnota rezíduí na identických bodoch po transformácii bola 10 cm, pričom ich maximálna hodnota sa pohybovala na úrovni 17 cm. Väčšina hodnôt rezíduí na identických bodoch sa pohybovala v intervale 2 až 10 cm.

Posledným krokom bola záverečná kontrola. V rámci tohto kroku bolo vykonané nezávislé overenie transformácie mapy pomocou množiny kontrolných bodov, ktoré boli podobne ako identické body zamerané pomocou technológie GNSS, ale ich súradnice neboli využité na výpočet parametrov transformácie. V rámci záverečnej kontroly bolo využitých 65 kontrolných bodov rovnomerne rozložených po celom obvode OKO K. Rovnaké body boli využité aj pri prvotnej analýze homogenity VKM, čo umožňuje porovnanie parametrov mapy pred a po transformácii. Na kontrolných bodoch boli opäť vypočítané polohové odchýlky a ich smerníky po transformácii. Výsledok záverečnej kontroly sa nachádza v Tab. 3. Grafické porovnanie posunov na množine kontrolných bodov pred a po transformácii pomocou šípkového grafu sa nachádza na Obr. 4. Celá záverečná kontrola vrátane vytvorenia šípkových grafov bola opäť vykonaná vo vlastnej aplikácii s názvom „Korekcia“.

Tab. 3: Výsledky záverečnej kontroly v k.ú. Galovany – finálny obvod obnovy

blok	Δ_{PR} [m]	Δ_{MAX} [m]	$RMSE_{\Delta p}$ [m]	α_{PR} [g]	$RMSE_{\alpha}$ [g]
1	0,10	0,20	0,050	203,9349	128,0412



Obr. 4: Porovnanie posunov na kontrolných bodoch pred a po transformácii

Poslednou časťou záverečnej kontroly je analýza výmer hraničných parciel, cez ktoré prechádza hranica obvodu obnovy, prípadne hranice menších blokov vo vnútri obvodu obnovy. Výmery týchto parciel po transformácii boli porovnané s ich hodnotami, ktoré sú zapísané na liste vlastníctva. Rozdiely dP medzi týmito výmerami boli konfrontované s krajnými dovolenými odchýlkami U_P , ktoré boli vypočítané v súlade s Vyhláškou ÚGKK SR č. 461/2009 [4]. Výsledky analýzy výmer hraničných parciel sú uvedené v Tab. 4.

Tab. 4: Analýza výmer hraničných parciel

Celkový počet hraničných parciel	19
Počet hraničných parciel kde $dP \leq U_P$	13
Počet hraničných parciel kde $dP > U_P$	6
- z toho počet parciel s vlastníckymi právami na LV	3
- z toho počet parciel s vlastníckymi právami na LV v súkromnom vlastníctve	3
- z toho počet parciel bez vlastníckych práv na LV	3

Pri porovnaní Tab. 2 a Tab. 3 je možné vidieť, že priemerná hodnota polohovej odchýlky v obvode obnovy klesla z 0,32 m až na hodnotu 0,10 m. RMSE polohovej odchýlky po transformácii sa pohybuje na úrovni 0,05 m. Maximálna hodnota polohovej odchýlky Δp_{MAX} medzi meraním a transformovanou mapou sa síce pohybuje až na úrovni 0,20 m, avšak všetky kontrolné body mali v pôvodnej VKMč kód kvality $T = 3$, čo znamená, že dovolená odchýlka na týchto bodoch je 0,24 m. Po transformácii teda boli splnené podmienky presnosti podľa predpisov na všetkých kontrolných bodoch. Z hodnoty RMSE smerníkov, a taktiež aj zo šípkového grafu (Obr. 4) je možné vidieť, že smerníky po transformácii dosahujú rôzne hodnoty na jednotlivých bodoch. To znamená, že rozdiely medzi VKM a meranými bodmi po transformácii majú už iba náhodný charakter a odzrkadľujú náhodné chyby merania.

Na základe dosiahnutých výsledkov je možné konštatovať, že veľkosť polohových odchýlok na identických aj kontrolných bodoch po transformácii je pod hranicou dovolenej odchýlky podľa predpisov. Z rozdielov medzi meraním a mapou boli odstránené systematické chyby a ich charakter odzrkadľuje už iba náhodné chyby merania. Preto je možné z technického hľadiska hodnotiť OKO K v katastrálnom území Galovany za úspešnú. Proces bol v tomto prípade veľmi jednoduchý aj preto, že mapa bola v celom obvode obnovy homogénna a obvod nemusel byť rozdelený na ďalšie menšie bloky. Preto ani transformácia celého obvodu obnovy naraz neznamenala zhoršenie výsledkov.

Obrovskou výhodou procesu je, že je využitá zhodnostná transformácia, čo znamená, že tvar ani výmery parciel vo vnútri obvodu obnovy sa nemenia. Vlastníci parciel vo vnútri obvodu obnovy teda nie sú žiadnym spôsobom dotknutí. Jediní vlastníci, ktorí môžu byť obnovou dotknutí, sú vlastníci parciel na hranici obvodu obnovy, do ktorých je zahrnutý lokálny posun. Vhodným výberom hranice obvodu obnovy je však možné minimalizovať vplyv na výmery parciel. V tomto konkrétnom prípade (Tab. 4) je nutné opraviť výmeru iba na 3 parcelách registra C so založeným listom vlastníctva, ktoré sú v súkromnom vlastníctve. Tento vplyv na výmery parciel je však pri rozsahu obnovy zanedbateľný. Toto testovanie ukázalo, že proces OKO K môže byť rýchlou a nenákladnou alternatívou k procesu nového mapovania. Práce v teréne v tomto prípade trvali iba približne 2 hodiny a práce v kancelárii taktiež zabrali približne 2 hodiny. Celý proces by samozrejme obsahoval mnoho ďalších formálnych krokov, avšak úspora času aj financií oproti novému mapovaniu by mohla byť v prípade VKMč s lokálnym posunom obrovská.

5. Záver

Príspevok sa venuje obnove vektorovej katastrálnej mapy číselnej s lokálnym posunom. Na tento účel bol využitý nový spôsob obnovy – tzv. obnova katastrálneho operátu korekciou (OKO K). Tento spôsob spočíva v transformácii časti VKMč s lokálnym posunom, pričom transformačné parametre sú určené na základe nového presnejšieho merania. Tento príspevok sa zaoberá komplexnou obnovou

VKMč v katastrálnom území Galovany. Keďže pokrytie tohto katastrálneho územia existujúcimi objektami vo vrstve BODY nebolo dostatočné, bolo tu vykonané nové doplnujúce meranie pomocou metódy GNSS-RTK, ktorého predmetom boli najmä verejne prístupné oplotenia. Na základe meraných údajov bol najprv určený predbežný obvod obnovy a bola vykonaná analýza homogenity. Jej výsledkom bolo, že mapa je homogénna v rámci celého obvodu obnovy, preto je možné obnovu vykonať naraz. Transformačné parametre zhodnostnej transformácie boli určené na základe 19 identických bodov. Po transformácii mapy bola vykonaná záverečná kontrola na 65 kontrolných bodoch, ktoré boli rovnomerne rozložené po celom obvode obnovy. V rámci záverečnej kontroly bola vykonaná aj analýza výmer parciel, cez ktoré prebieha hranica obvodu obnovy. Na základe dosiahnutých výsledkov je možné konštatovať, že obnova VKMč korekciou v katastrálnom území Galovany bola úspešná. Výsledkom je teda vektorová katastrálna mapa číselná, ktorej parametre vyhovujú presnosti v celom katastrálnom území.

Výhodou tejto metódy obnovy je, že nijakým spôsobom nie sú dotknutí vlastníci parciel vo vnútri obvodu obnovy. Dotknutí môžu byť iba vlastníci na hranici obvodu. Tá je však určovaná tak, že vo veľkej časti prechádza cez parcely vo verejnom vlastníctve, prípadne cez parcely bez listu vlastníctva v registri C. Môže sa však stať, že obnovou budú dotknutí aj súkromní vlastníci, ako tomu bolo aj v tomto prípade, kedy je nutné opraviť výmery 3 parciel registra C v súkromnom vlastníctve. Vzhľadom na rozsah obnovy však ide o zanedbateľný problém. Najväčšou výhodou OKO K je bezpochyby jej časová a finančná nenáročnosť. Pri využití vo viacerých katastrálnych územiach s podobným problémom by teda mohli byť ušetrené nemalé prostriedky.

Literatúra

- [1] KYSEĽ, P.: Homogenizácia vektorovej katastrálnej mapy číselnej. In: *JUNIORSTAV 2020: 22. odborná konferencia doktorského studia s mezinárodnou účasťou. Sborník príspevků*. Brno: VUT v Brně, 2020. s. 790-795. ISBN 978-80-86433-73-8
- [2] KYSEĽ, P. Obnova vektorovej katastrálnej mapy číselnej s lokálnymi posunmi s využitím meraní metódou GNSS. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Zborník príspevkov*. Bratislava: STU v Bratislave, 2020. s. 195-203. ISBN 978-80-227-5052-3.
- [3] HORŇANSKÝ, I, LEITMAN, M. ONDREJIČKA, E.: Na ceste k homogenizácii katastrálneho mapového diela. *Geodetický a kartografický obzor 60/102*, 2014, s. 229-240. ISSN 1805-7446.
- [4] Vyhláška ÚGKK SR č. 461/2009 Z. z., ktorou sa vykonáva zákon č. 162/1995 Z. z. o katastri nehnuteľností a o zápise vlastníckych a iných práv k nehnuteľnostiam (katastrálny zákon) v znení neskorších predpisov, 2009
- [5] Usmernenie ÚGKK SR č. 1/2022 na opravu podrobných bodov a výmer parciel registra „C“ a parciel registra „E“, 2014
- [6] HUDECOVÁ, E., KYSEĽ, P.: Vector cadastral maps numerical homogeneity analysis. *Geodetski list*, 74. s. 41-56. ISSN 1849-0611
- [7] KYSEĽ, P.: Aplikácia na obnovu katastrálneho operátu korekciou. In: *JUNIORSTAV 2021: 23. odborná konferencia doktorského studia s mezinárodnou účasťou. Sborník príspevků*. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2021. s. 683-688. ISBN 978-80-86433-75-2.
- [8] KYSEĽ, P. Využitie aplikácie "Spresnenie VKMt" pri obnove korekciou. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Zborník príspevkov*. Bratislava: STU v Bratislave, 2021. s. 183-192. ISBN 978-80-227-5150-6.

Laura Pénzešová¹

Študijný program: Geodézia a kartografia, 2. ročník

POHĽAD NA ZAČIATKY PANDÉMIE COVID-19 POMOCOU KONTINUÁLNYCH GRAVIMETRICKÝCH MERANÍ

A LOOK BACK INTO BEGINNING OF COVID-19 PANDEMIC TROUGH SUPERCONDUCTING GRAVITY MEASUREMENTS

Abstract

Superconducting gravity measurements are able, due to their high accuracy and continuity, to capture temporal changes of various global phenomena but also some local phenomena around the gravimeter. In addition to geodynamic and meteorological phenomena, human influence can also be observed in such measurements by increasing the environmental noise. This work is focused on the analysis of the impact of the Covid-19 pandemic on environmental noise in superconducting gravity measurements at Trappes station of the IGETS (International Geodynamic and Earth Tide Service).

Kľúčové slová / Key Words

Supravodivý gravimeter, pandémia, IGETS, environmentálny šum

1. Úvod

Prepuknutie pandémie Covid-19 začiatkom roka 2020 ovplyvnilo každodenný život takmer vo všetkých oblastiach. Keď na začiatku pandémie jednotlivé krajiny postupne uvádzali nové protipandemické opatrenia a pravidlá obmedzujúce voľný pohyb ľudí, mohli sme pozorovať pokles v znečistení ovzdušia [1], ktorý súvisí s elimináciou leteckej, autobusovej a vlakovej dopravy na minimum [2] a celkový pokles environmentálneho šumu. Environmentálny šum je zapríčinený napríklad dopravou, priemyselnými alebo rekreačnými aktivitami a vyskytuje sa pri všetkých ľudských, zvieracích alebo environmentálnych aktivitách. Presnosť merania tiažového zrýchlenia supravodivým gravimetrom je okrem iného limitovaná práve environmentálnym šumom. Vzhľadom na vysokú citlivosť a presnosť supravodivých gravimetrov máme možnosť pozrieť sa na začiatky a vývoj tejto pandémie aj prostredníctvom kontinuálnych meraní tiažového zrýchlenia.

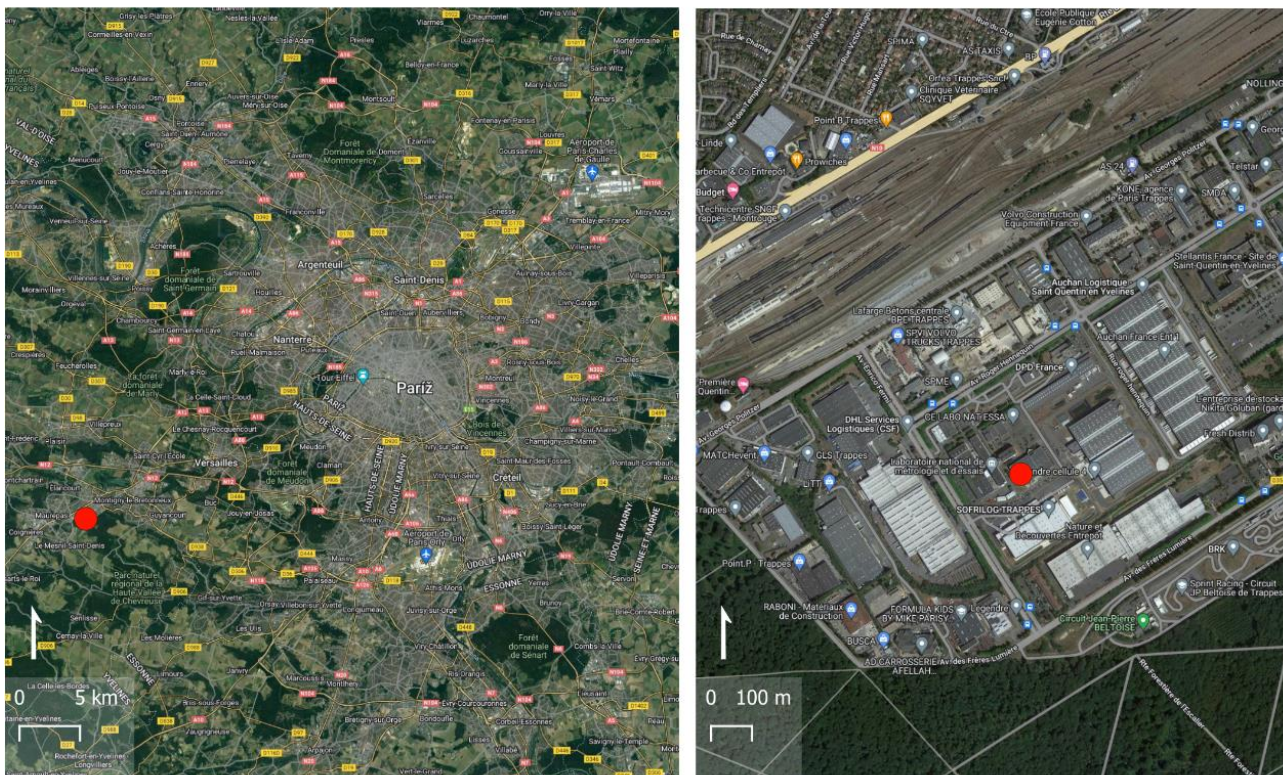
2. Použité dáta

International Geodynamics and Earth Tide Service (IGETS) je medzinárodná služba, ktorá vznikla z dôvodu monitorovania časových variácií tiažového poľa Zeme pomocou kontinuálnych meraní tiažového zrýchlenia relatívnymi gravimetrami, náklonomermi a ďalšími geodynamickými senzormi. Funguje od roku 2015 ako pokračovanie dovtedajších aktivít s názvom Global Geodynamics Project (GGP) [3]. V súčasnosti poskytuje služba IGETS dáta s meraným tiažovým zrýchlením supravodivým gravimetrom na viac ako 40 stanicích po celej Zemi. Služba IGETS poskytuje kontinuálne merania tiažového zrýchlenia v troch úrovniach [3]:

¹ Pénzešová Laura, Ing. Radlinského 2766/11 810 05 Bratislava

- surové dáta z merania tiažového zrýchlenia a atmosférického tlaku s krokom 1 alebo 2 s a tie isté dáta s krokom 1 minúta, pričom tieto dáta poskytujú jednotliví operátori staníc IGETS – dáta Level 1,
- údaje o atmosférickom tlaku a tiažové merania opravené o poruchy prístroja pripravené na slapovú analýzu – tieto dáta sú vypočítané zo surových dát vo viacerých analytických centrách – dáta Level 2,
- tiažové zrýchlenia po uvážení dohodnutých korekcií (zahrňujúce slapové a atmosférické efekty, pohyb pólu a zmena dĺžky dňa a inštrumentálny chod) , ktoré v súčasnosti vieme s dostatočnou presnosťou modelovať – dáta Level 3.

Súčasťou služby IGETS je aj stanica Trappes, nachádzajúca sa v gravimetrickom laboratóriu 30 km západne od Paríža, vo Francúzskom národnom metrologickom ústave (LNE-Trappes). Práve z hľadiska prejavu poklesu environmentálneho šumu po prepuknutí pandémie je táto lokalita v tesnej blízkosti železničnej trate a viacerých logistických centier veľmi zaujímavá. Poloha geodynamickej stanice Trappes je znázornená na podklade satelitnej snímky na obrázku č. 1. Na obrázku si môžeme všimnúť viacprúdovú železničnú trať vzdialenú približne 600 m od samotnej stanice a taktiež niekoľko logistických centier v bezprostrednej blízkosti stanice. Supravodivý gravimeter je umiestnený na pilieri spolu s niekoľkými absolútnymi gravimetrami. Na elimináciu gravitačného efektu spôsobeného pohybom operátorov v okolí gravimetra je prístroj umiestnený na skalnom podstavci vo výške približne 1 m [4].

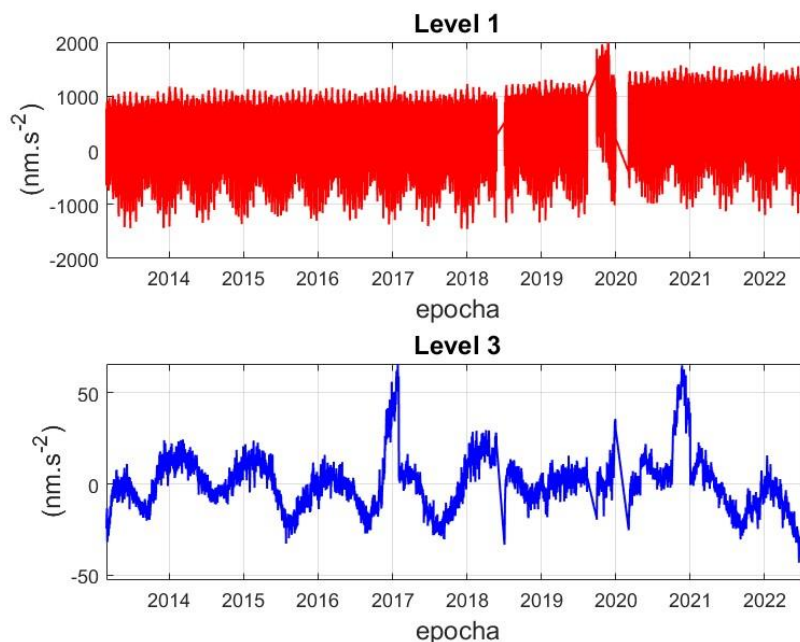


Obr. 1: Lokalizácia stanice Trappes na podklade satelitnej snímky (Zdroj: Google Maps)

Kontinuálne meranie tiažového zrýchlenia na stanici Trappes supravodivým gravimetrom iGrav#005 sa vykonáva od februára 2013 až po súčasnosť. Meranie bolo za celé obdobie prerušené v troch prípadoch, konkrétne od 25.5.2018 do 4.6.2018, od 14.8.2019 do 1.10.2019 a od 1.1.2020 do 4.3.2020 [5].

V analýze boli použité dáta z najvyššej úrovne - level 3 s časovým krokom 1 minúta, ktoré sú opravené o poruchy prístroja a taktiež o slapy pevnej zeme a oceánske zaťaženie, vplyv zmien

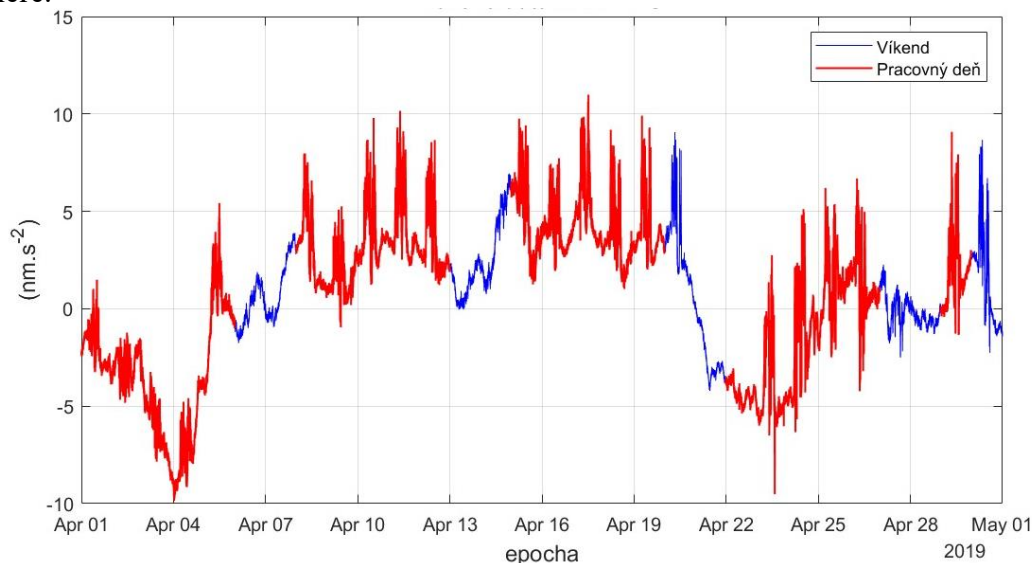
atmosférického tlaku, pohyb pólu, zmenu dĺžky dňa a inštrumentálny chod. Časový rad pre dáta zo základnej úrovne 1, predstavujúce surové hodnoty tiažového zrýchlenia spolu s opravenými hodnotami z úrovne 3 z gravimetrickej stanice Trappes sa nachádzajú na obrázku č. 2.



Obr. 2: Časový rad meraného tiažového zrýchlenia s časovým krokom 1 minúta na gravimetrickej základnici Trappes v základnej úrovni (Level 1 - hore) a opravené merania (Level 3 - dole) [5]

3. Analýza tiažového zrýchlenia pred a počas pandémie Covid-19

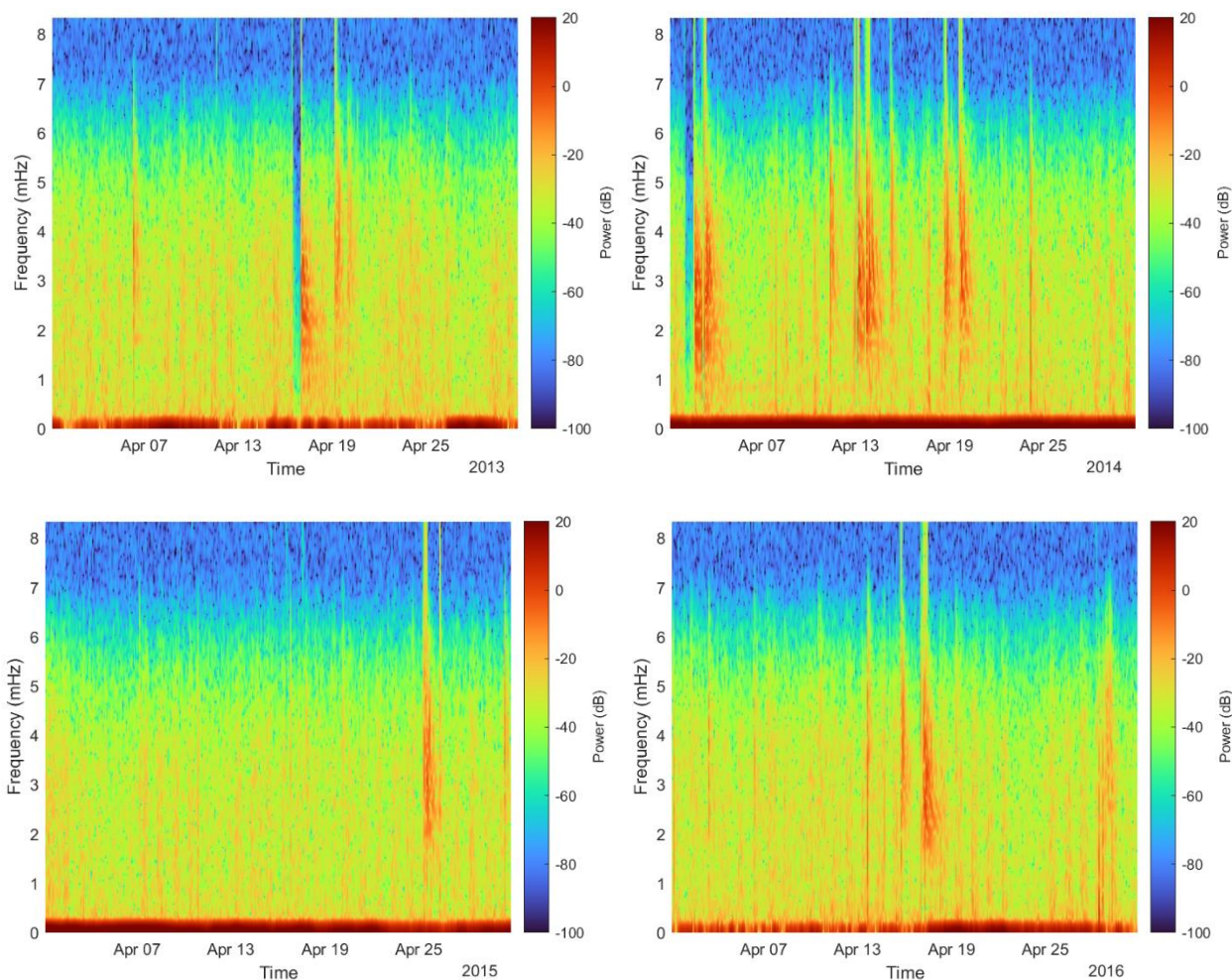
Podrobnejší pohľad na merané tiažové zrýchlenie v jednotlivých mesiacoch na stanici Trappes odhaľuje výraznejšie variácie tiažového zrýchlenia v pracovných dňoch, ako cez víkendy a v noci, čo svedčí o tom, že táto stanica je ovplyvnená ľudskou pracovnou činnosťou. V detailnom pohľade na tiažové zrýchlenie v apríli 2019 (Obr. 3) je možné voľným okom pozorovať výrazné zmeny tiažového zrýchlenia práve v pracovných časoch približne od 5:00 do 13:00. Naopak víkendy a voľné dni varujú podstatne menej. Podobný jav môžeme pozorovať aj v iných mesiacoch, hoci nie v takej veľkej miere.



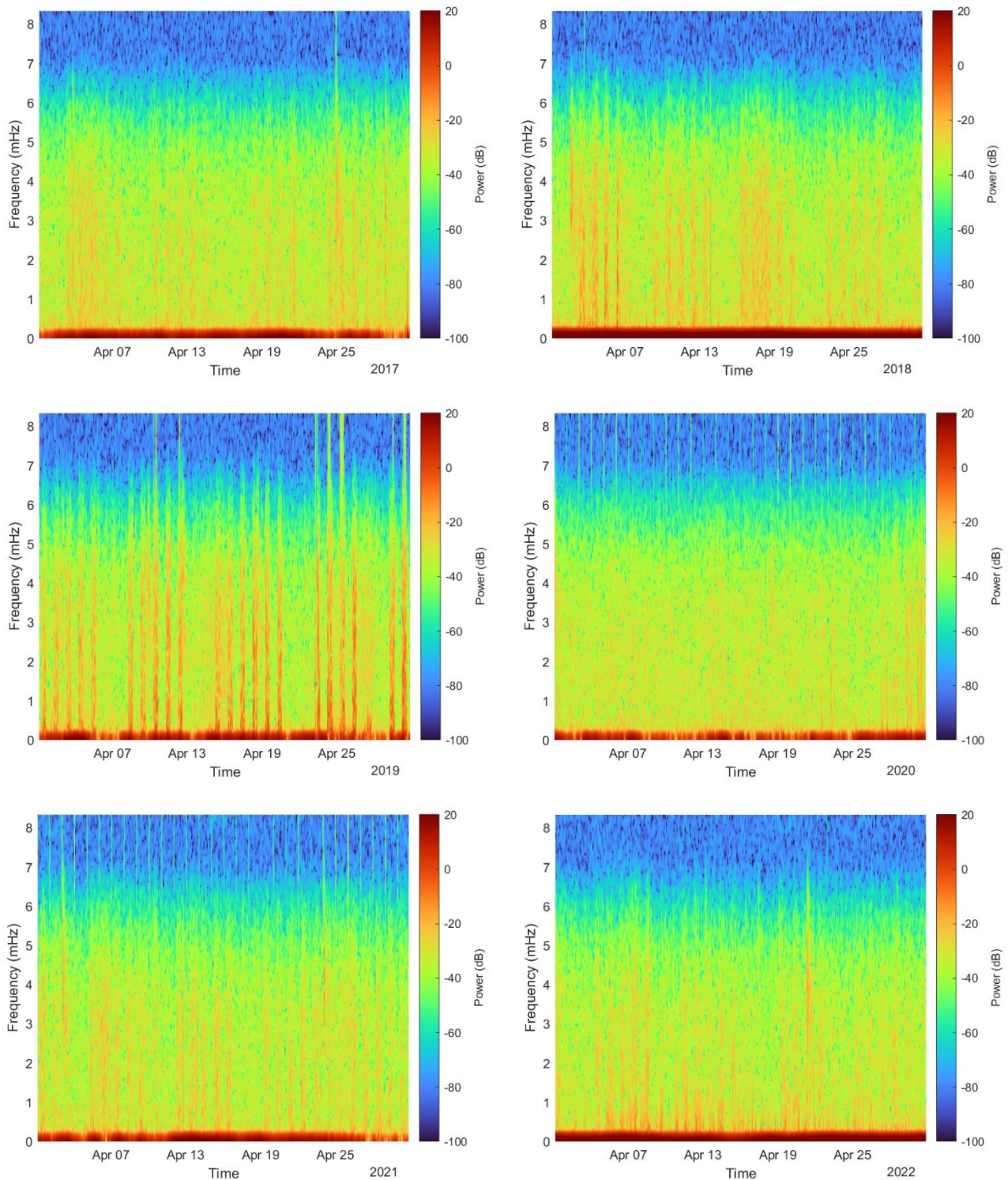
Obr. 3: Detailný pohľad na merané tiažové zrýchlenie na stanici Trappes v apríli 2019

Striktný lockdown vo Francúzsku trval od 16.3.2020 do 11.5.2020 [6]. Vzhľadom k tomuto faktu a taktiež z dôvodu chýbajúcich meraní na začiatku marca 2019 budú ďalej porovnávané dáta merané v mesiaci apríl od roku 2013 po rok 2022.

Na ľahšiu interpretáciu časových variácií boli pre tieto dáta vykreslené spektrogramy s využitím rýchlej Fourierovej transformácie s dĺžkou okna 4 hodiny a 50% prekrytom. Spektrogramy sú znázornené na obrázku 4 a 5. Spektrálna hustota je vyjadrená v decibeloch a frekvencie v mHz, pričom frekvencie sú zobrazené po hodnotu 8 mHz, čo zodpovedá časovej perióde 2 minúty. V grafoch si opäť môžeme všimnúť oranžové vertikálne pružky zodpovedajúce pracovným dňom v rámci týždňa a zároveň nižší šum počas víkendov. Vertikálne pružky naznačujú vyššiu intenzitu šumu v pracovných dňoch pre takmer všetky frekvencie v rokoch 2013 až 2019 a v rokoch 2021 a 2022. Naopak v mesiaci apríl 2020 po začiatku pandémie pozorujeme podstatne nižší šum ako v ostatných rokoch.

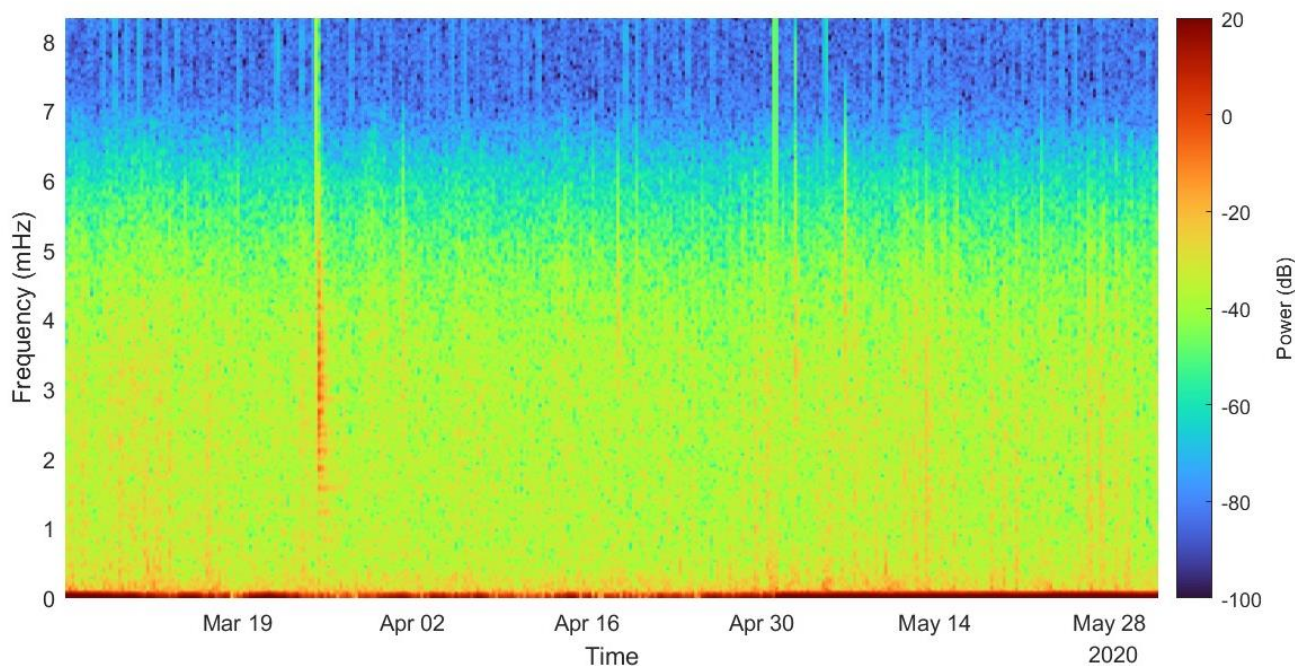


Obr. 4: Spektrogram minutových dát opraveného tiažového zrýchlenia na stanici Trappes v apríli 2013 až 2016



Obr. 5: Spektrogram minutových dát opraveného tiažového zrýchlenia na stanici Trappes v apríli 2017 až 2022

Nasledujúci graf (Obr. 6) znázorňuje spektrogram pre tiažové zrýchlenie od 1. marca 2020 do konca mája 2020 s dĺžkou okna 12 hodín a 50% prekrytom, čo zachytáva celé obdobie striktného lockdownu (od 16.3.2020 do 11.5.2020). V spektrograme si môžeme všimnúť, že najpokojnejšie obdobie v okolí gravimetra bolo práve od začiatku platnosti protipandemických opatrení až po koniec apríla, kedy sa opäť začal prejavovať zvýšený šum v pracovných dňoch, hoci striktný lockdown trval až do 11. mája, kedy sa protipandemické opatrenia začali postupne uvoľňovať. Tento jav môže byť spôsobený postupným návratom k bežným činnostiam najmä v priemysle a zásobovaní, nakoľko gravimeter obklopujú práve logistické centrá.



Obr. 6: Spektrogram minútových dát opraveného tiažového zrýchlenia na stanici Trappes v marci až máji 2020

Keďže predchádzajúce spektrogramy naznačujú, že v rámci pracovných dní je environmentálny šum na podstatne vyššej úrovni ako vo voľných dňoch a v noci, v ďalšej analýze boli brané do úvahy iba pracovné dni v rámci týždňa (víkendy boli vynechané), pre ktoré bol počítaný rozptyl hodnôt tiažového zrýchlenia z minútových dát úrovne 3. Rozptyl hodnôt tiažového zrýchlenia opraveného o modelovateľné časové variácie nám poskytuje približný obraz o úrovni environmentálneho šumu na danej stanici. Aby bolo možné vykonať následné porovnanie medzi rušnejšími a menej rušnými časťami dňa, rozptyl bol počítaný v rámci každého dňa zvlášť v troch intervaloch a následne bol pre každý mesiac priemerovaný. Obrázok č. 7 znázorňuje rozptyl počítaný v troch rôznych časových intervaloch v rámci pracovného dňa, a to od 5:00 do 13:00, od 13:00 do 21:00 a od 21:00 do 5:00 podľa vzťahu:

$$\text{var}(g) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |g_i - g_{avg}|^2}, \quad (1)$$

kde:

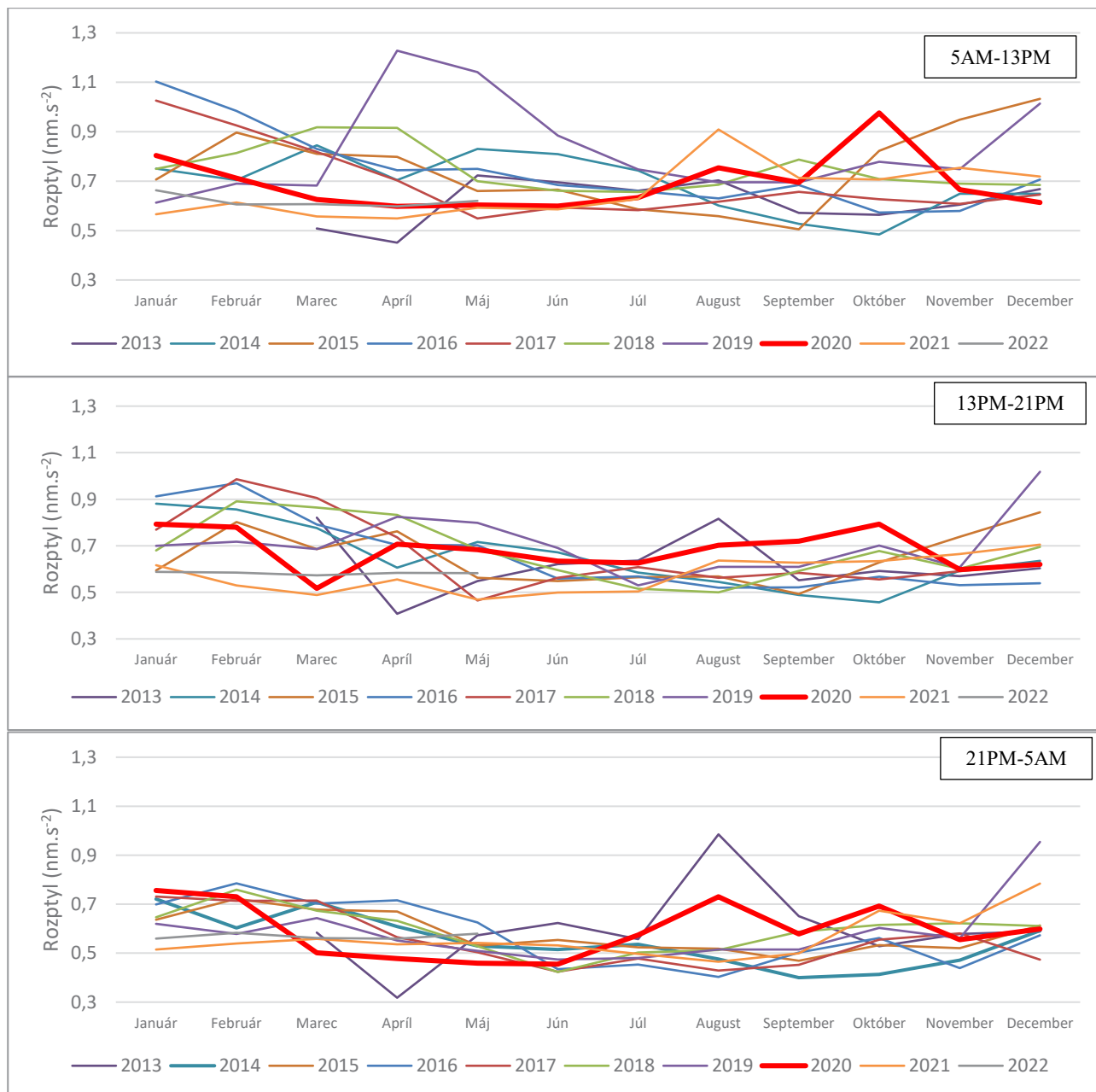
n – počet hodnôt tiažového zrýchlenia v rámci časového intervalu,

g_i – i -ta hodnota tiažového zrýchlenia v rámci časového intervalu,

g_{avg} – stredná hodnota tiažového zrýchlenia v rámci časového intervalu.

Ako si môžeme všimnúť, najvyšší rozptyl má tiažové zrýchlenie v čase o 5:00 do 13:00, následne v poobedňajších hodinách a najnižší je v nočných hodinách. Rok 2020 sa v týchto grafoch

prejavuje vo všetkých časoch veľmi podobne, najväčší rozptyl je koncom tohto roka v októbri, naopak najmenší v mesiacoch od apríla do júna. V porovnaní s rozptylom v iných rokoch môžeme taktiež pozorovať nižšie hodnoty v týchto mesiacoch, čo znamená, že variácia tiažového zrýchlenia v pracovných dňoch bola v mesiacoch marec a apríl nižšia v roku 2020 ako v iných rokoch.



Obr. 7: Znáznornenie rozptylu tiažového zrýchlenia v pracovných dňoch v časoch 5:00 - 13:00 (hore), 13:00 – 21:00 (v strede), 21:00-5:00 (dole) priemerované pre jednotlivé mesiace v každom roku

Tabuľka č.1 obsahuje vyčíslenie týchto rozptylov pre mesiac apríl v jednotlivých časových intervaloch pre roky 2017-2022. V roku 2019 bol rozptyl podstatne vyšší v ranných hodinách ako v iných rokoch. Naopak v roku 2020 si môžeme všimnúť pokles v ranných aj nočných hodinách oproti predchádzajúcim rokom. V roku 2021 a 2022 vidíme aj v grafe (Obr. 7) a taktiež v tabuľke stabilnejší priebeh rozptylu a hodnoty sa veľmi nelíšia v denných a nočných hodinách.

Tabuľka. 1: Porovnanie rozptylu tiažového zrýchlenia minútových dát úrovne 3 vo vybraných časoch v apríli v rokoch 2017-2022 v $\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}$

Rok \ Časový interval	5AM-13PM	13PM-21PM	21PM-5AM
2017	0.703	0.736	0.565
2018	0.916	0.833	0.632
2019	1.228	0.825	0.552
2020	0.598	0.707	0.478
2021	0.549	0.555	0.536
2022	0.598	0.584	0.559

Porovnanie rozptylu tiažového zrýchlenia cez víkend a počas pracovných dní (Tabuľka 2) dokazuje, že počas pandémie bol taktiež podstatne menší rozdiel v šume počas pracovných dní, ako počas víkendov. Naopak v roku 2019 bol tento rozdiel podstatne výraznejší, z dôvodu frekventovanejšej dopravy v okolí stanoviska. V roku 2020 bol rozptyl týchto hodnôt počas víkendu a v rovnakých časoch počas pracovného týždňa podstatne menší.

Tabuľka. 2: Porovnanie rozptylu tiažového zrýchlenia minútových dát úrovne 3 vo vybraných časoch v apríli v rokoch 2019 a 2020 cez víkend a počas pracovných dní v $\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}$

Rok \ Časový interval	5AM-13PM	
	Pracovný týždeň	Víkend
2019	1.228	0.487
2020	0.598	0.500

4. Diskusia a záver

Merania tiažového zrýchlenia supravodivým gravimetrom sú do istej miery limitované okolitými ruchmi, ako aj prístrojovými procesmi. Na to, aby sme mohli pozorovať vplyv environmentálneho šumu na tieto merania je pandémia a s ňou súvisiace protipandemické opatrenia vynikajúcou príležitosťou.

Na základe vykonaných analýz môžeme zhodnotiť, že v pracovných dňoch po prepuknutí pandémie výrazne klesol environmentálny šum na gravimetrickej stanici Trappes vo Francúzsku. V apríli roku 2020 pozorujeme zásadne nižšiu intenzitu šumu v pracovných dňoch oproti iným rokom. Pokles šumu taktiež súhlasí s dátumom začiatku striktného lockdownu, ktorý bol vyhlásený od 16. marca 2020. Šum sa začal postupne zvyšovať koncom apríla tohto roku, keď sa protipandemické opatrenia začali postupne uvoľňovať. Rozptyl hodnôt tiažového zrýchlenia na jar v roku 2020 počas pracovných dní taktiež klesol oproti predchádzajúcim rokom najmä v ranných a nočných hodinách.

V práci je porovnávaný pokles celkového šumu v okolí gravimetra Trappes, ktorý zahŕňa okrem environmentálneho šumu taktiež šum inštrumentálny, spôsobený samotným prístrojom. Na oddelenie environmentálneho šumu od inštrumentálneho šumu, by bolo vhodné použiť súbežné merania na viacerých supravodivých gravimetroch, či iných staničných gravimetroch a senzoch

podobným spôsobom, akým bola odhadovaná hladina environmentálneho šumu v gravimetrickom observatóriu v Štrasburgu. [7]. Pri analýze sme predpokladali, že inštrumentálny šum nebol ovplyvnený pandémiou COVID 19 a preto zmena celkového šumu bola pripísaná zmene environmentálneho šumu.

Literatúra

- [1] VENTER, Z. S., AUNAN, K., CHOWDHURY, S., & LELIEVELD, J. (n.d.). COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006853117/-DCSupplemental>
- [2] BROOMANDI, P., TLEUKEN, A., ZHAXYLYKOV, S., NIKFAL, A., KIM, J. R., & KARACA, F. (n.d.). Assessment of potential benefits of traffic and urban mobility reductions during COVID-19 lockdowns: dose-response calculations for material corrosions on built cultural heritage. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16078-5/Published>
- [3] VOIGT, C., FÖRSTE, C., WZIONTEK, H., CROSSLEY, D., MEURERS, B., PÁLINKÁŠ, V., HINDERER, J., BOY, J.-P., BARRIOT, J.-P., & SUN, H. (n.d.). Report on the Data Base of the International Geodynamics and Earth Tide Service (IGETS) www.gfz-potsdam.de. <https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-16087>
- [4] MERLET, S., GILLOT, P., CHENG, B., KARCHER, R., IMANALIEV, A., TIMMEN, L., PEREIRA, F., & SANTOS, D. (2021). Calibration of a superconducting gravimeter with an absolute atom gravimeter. *Journal of Geodesy*, 95, 62. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01516-6>
- [5] MERLET, S., & PEREIRA DOS SANTOS, F. (2020). Superconducting Gravimeter Data from LNE-SYRTE Trappes - Level 1. GFZ Data Services.
- [6] ADÉLAÏDE, L., MEDINA, S., WAGNER, V., DE CROUY-CHANEL, P., REAL, E., COLETTE, A., COUVIDAT, F., BESSAGNET, B., ALTER, M., DUROU, A., HOST, S., HULIN, M., CORSO, M., & PASCAL, M. (2021). Covid-19 Lockdown in Spring 2020 in France Provided Unexpected Opportunity to Assess Health Impacts of Falls in Air Pollution. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.643821>
- [7] ROSAT, S., & HINDERER, J. (2018). *Limits of Detection of Gravimetric Signals on Earth*. 8, 15324. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33717-z>

LANDSCAPING

Viktória Gáspár

Študijný program: Krajinárstvo, 4. ročník

VPLYV KLIMATICKÝCH ZMIEN NA PREMENLIVOSŤ ETÁŽÍ LESNÝCH SPOLOČENSTIEV

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES ON THE VARIABILITY OF FLOORS IN FOREST COMMUNITIES

Abstract

Forest vegetation is one of the main elements of the landscape image. These fragments form a landscape and have irreplaceable microclimatic and ecological functions in the landscape. Modifications in climate and the atmosphere disrupt the balance of the interrelationships of individual components and the existence of direct and feedback links in forest ecosystems. Changes in bioclimatic conditions caused the rebirth of forest communities along the Danube River as we have known them until now. Due to the urbanization of Petržalka, the forest habitats of floodplain forests have been divided into smaller areas. This phenomenon conditioned the change of light and thermal conditions in floodplain communities. The regulation of natural conditions changed the optimal tolerance limits of species, which reduced the intensity of vital activity of species typical of floodplain forests.

Kľúčové slová

typológia lesa; lužný les; morfológia lesa

1. Úvod

Na každodennej báze sa stretávame s pojmami ako klimatická zmena, kríza, globálne otepľovanie či skleníkový efekt. Tieto javy sú spôsobené antropogénnymi ale aj prirodzenými faktormi, ktoré podmieňujú zosilňovanie týchto úkazov v atmosfére. Tieto globálne zmeny majú dosah aj na lesné spoločenstvá či už na ich štrukturálne zloženie alebo na premenlivosť druhov v biocenóze. Vysokú koncentráciu skleníkových plynov v atmosfére (CO₂, CH₄, N₂O, freóny) môžeme pripísať ľudskej činnosti konkrétne spaľovaniu fosílnych palív [1].

Podľa scenárov klimatických zmien najviac zastihnuté budú biocenózy, ktoré sú situované v nížinných a horských oblastiach [2]. Exaktne sa nedá kvalifikovať reakcia lesných biocenóz na vyššie uvedené klimatické faktory. Zmena klímy a chémie atmosféry narúša rovnováhu vzájomných vzťahov jednotlivých zložiek a existenciu priamych a spätných väzieb v lesných ekosystémoch. Subjekty ako zvyšovanie koncentrácie CO₂, zvyšovanie priemernej teploty, zmeny v množstve a distribúcii zrážok a nasledujúce zmeny vodnej bilancie, zvyšovanie UV-B žiarenia a zmeny frekvencie a intenzity extrémnych klimatických javov priamo ale aj nepriamo ovplyvňujú zloženie lesných ekosystémov [2].

Zmeny v bioklimatických podmienkach podmienili prerod lesných spoločenstiev po pri rieke Dunaj ako sme ich poznali doteraz. Lužné lesy prešli rôznymi zmenami počas ich vývoja. Tieto procesy zapríčinili vo väčšej miere narušenie degradáciu lužných porastov avšak fragmenty týchto biotopov sa čiastočne zachovali v ich autochtónnom prostredí. Tieto rastlinné spoločenstvá

stabilizujú brehy riek, vytvárajú optimálne predpoklady pre. Historické pramene svedčia o úbytku a čiastočnej degradácii týchto biotopov.

Príčinou úbytku lesnej drevinovej vegetácie lužných lesov a poklesu autochtónnych druhov v ich zložení sú antropogénne zásahy, nenáležitý manažment týchto areálov a neprimerané úpravy vodných tokov, ktoré negatívne vplývajú na vodný režim, záplavový režim v nivách riek a tým pádom aj na režim podzemných vôd. Výstavbou komunikácií a urbanizáciou územia Petržalky došlo k fragmentácii lesných biotopov. Tento jav podmienil zmenu svetelných a tepelných podmienok v lužných spoločenstvách.

Lužné spoločenstvá môžeme považovať za takzvané ekotypy čiže ich optimálne a tolerančné limity zodpovedajú miestnym podmienkam. Výstavbou vodného diela Gabčíkovo došlo k narušeniu vodného režimu lesov. Reguláciou prírodných podmienok sa zmenili optimálne tolerančné limity druhov, ktoré znížili intenzitu vitálnej činnosti druhov typických pre lužné lesy. Pôdy lužných lesov boli charakteristické nedostatkom produkcie a akumulácie humusu pretože bol narušený záplavami a aluviálnou akumuláciou. Tieto pôdne druhy sa vyznačujú rôznou textúrou a pestrým minerálnym zložením. Narušením záplavového režimu došlo k zvýšeniu tvorby humusu v pôdnej zložke čím boli narušené hraničné hodnoty, v ktorých tieto biotopy dokážu existovať.

1.1 Prispôbenie organizmov prostrediu

Rastlinné spoločenstvá reagujú na vplyv vonkajších faktorov, respektíve na zmeny v prostredí s cieľom prežiť a žiť s prostredím v rovnováhe. Poznáme tri základné typy odpovedí organizmu na zmeny ekologických faktorov[3]:

- reakcia
- adaptácia
- deformácia

1.2 Reakcia

Reakcia je rýchla fyziologická zmena prebiehajúca zvyčajne v krátkom časovom rozpätí. Jej podstatou sú biochemické zmeny enzymatického aparátu buniek. Reakcia nastáva najmä na jednorazový podnet, ktorý musí mať istú intenzitu. Pri náhlej zmene svetelných podmienok, na ktoré bola rastlina zvyknutá a vystaveniu priamemu slnečnému žiareniu reakcia rastliny sa prejaví spálenými listami a vädnutím rastliny[3].

1.3 Adaptácia

Nastáva ako odpoveď na podnet, ktorému bol organizmus dlhodobo alebo opakovane vystavený. Adaptácia predstavuje fyziologické zmeny organizmov potrebné k zachovaniu homeostatickej rovnováhy počas dlhodobého pôsobenia vonkajších faktorov nezodpovedajúcich valenčným podmienkam daného druhu. Tento proces sa vyvinul v priebehu dlhodobého fylogenetického vývoja organizmov. Adaptácia je výsledkom prírodného výberu. Vyvolali ich zmeny dedičných znakov, spôsobené náhodne mutáciami alebo novou kombináciou génov[3].

1.4 Deformácia

Pod pojmom deformácia rozumieme takú reakciu rastliny, ktorá vyvolá fyziologickú zmenu v ich raste. Nastáva na jednorazový dlhodobý podnet. Najčastejšie typy deformácií sú [3]:

- geotropizmus
- apikálna dominancia
- fototropizmus
- hydrotropizmus

1.5 Tolerancia a ekologická valencia

Tolerancia organizmu je vyjadrená rozmedzím, v ktorom dokáže organizmus optimálne fungovať. Túto závislosť vyjadruje Gaussova krivka. Toto rozmedzie je ohraničené dvoma hodnotami čiže hranicami tolerancie. Ohraničená je na oboch koncoch pesimálnymi bodmi – minimum a maximum, ktoré predstavujú dolnú a hornú, hraničnú alebo letálnu hranicu existencie pre daný druh.

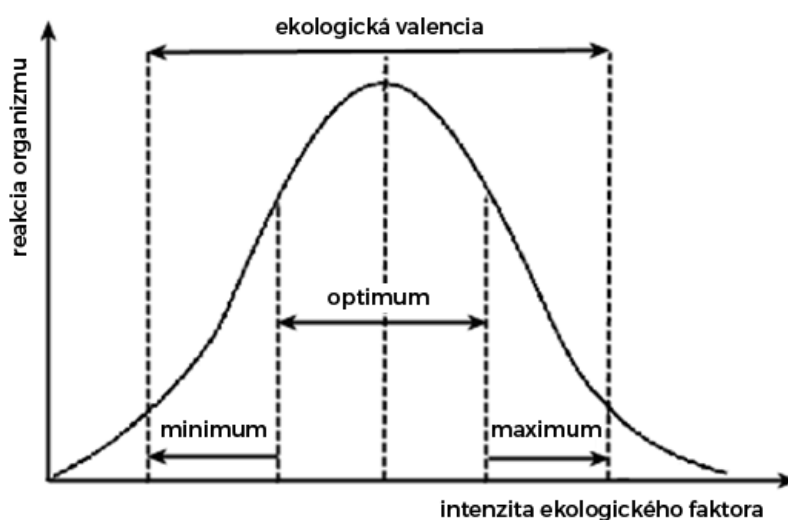


Figure 1: Gaussova krivka tolerancie

Rozmedzie tolerancie sa môže líšiť od faktora, ktorý sa preň skúma. Zákon tolerancie je formulovaný nasledovne: neprítomnosť alebo nemožnosť rozvoja ekosystému je daná nielen nedostatkom, ale aj nadbytkom niektorého z faktorov (teplo, svetlo, voda). V dôsledku toho sa organizmy vyznačujú ekologickým minimum aj maximum. Zákon tolerancie sformuloval W. Shelford v roku 1913[3].

2. Metodika

Pri analýze fytoocenóz (vegetácie) opisujeme fytoocenózu (predmet skúmania) podľa určitých charakteristických znakov, výsledkom je fytoocenologický zápis. Bežne sa hodnotia nasledovné znaky: floristická skladba (druhovú garnitúra), početnosť (abundancia), pokryvnosť (dominancia), príp. sociabilita a vertikálna štruktúra (etážovitnosť). Hodnota frekvencie sa vyjadruje v %, ako podiel počtu plôšok, na ktorých sa druh vyskytol, z celkového počtu skúmaných plôšok. Hodnoty frekvencie jednotlivých druhov sa používajú pri spracovaní vegetačných dát numerickými metódami. Jednotlivé znaky hodnotíme okulárnym odhadom pomocou zaužívaných klasifikačných stupníc. Typologický zápis obsahuje okrem popisu fytoocenózy popis pôdneho stavu, príp. aj

taxačno-dendrometrické merania. Pri fytoocenologickom (i typologickom) zápise je v prvom rade potrebné správne vybrať plochu fytoocenologického zápisu[4].

Braun-Blanquetova stupnice početnosti a pokryvnosti:

- r – ojedinele (užíva sa aj symbol –)
- + – roztrúsene, pokryvnosť zanedbateľná
- 1 – hojne až roztrúsene, pokryvnosť pod 5%
- 2 – hojne až veľmi hojne, pokryvnosť 5–25%
- 3 – pokryvnosť 25–50%
- 4 – pokryvnosť 50–75%
- 5 – pokryvnosť 75–100%

3. Výsledky a diskusia

V práci sa skúmali fytoocenologické zápisy od roku 1990 až do roku 2020 z výročných správ Gabčíkovo Nagymaros, zo stránky biomonitoringu a vlastných terénnych zápisov. Za pomoci týchto zápisov sme pre každé desaťrocie vyhodnotili priemernú pokryvnosť jednotlivých etáží na daných 15tich referenčných úsekoch panónskych lužných lesov. Čo nám pomohlo vytvoriť si reálny obraz o zmene morfológie lesa a skladbe lesa. Tieto zápisy sú situované pozdĺž Slovenského úseku Dunaja v urbanizovanom prostredí Petržalky sa skúma 13 areálov (s výmerou 50x50m) zodpovedajúci územiám NATURA200 a ďalších 6 mimo katastrálneho územia Bratislavy (s väčšou výmerou 250x250m). V článku prikladám typový fytoocenologický zápis z Veľkeho Zemníka, ktorý opisuje informácie o charakteristike porastu, pokryvnosti jednotlivých etáží. Tieto informácie sú dôležité pri syntéze, resp. diagnóze typologických jednotiek.

Table 1: Fytoocenologický zápis drevín na referenčnom úseku PE/VZ-12-10/2020

por. Č	latinský názov - slovenský názov		obvod kmena (cm)	výška dreviny (m)	priemer koruny (m)	Rast.	Etáž	Inv.	Pok %	Frekvencia výskytu	Pokrytie
1	<i>Populus alba</i>	topoľ biely	69	8	5	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
2	<i>Populus alba</i>	topoľ biely	24	4	4	strom	E2	-	1	1	1% a 25%
3	<i>Populus alba</i>	topoľ biely	557	16	5	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
4	<i>Populus alba</i>	topoľ biely	650	15	6	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
5	<i>Fraxinus excelsior</i>	jaseň štíhly	102	9	4	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
6	<i>Fraxinus excelsior</i>	jaseň štíhly	149	10	4	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
7	<i>Robidia pseudoacacia</i>	agát biely	80	8	4	strom	E3	áno	1	2	1% a 25%
8	<i>Acer platanoides</i>	javor mliečny	72	7	4	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
9	<i>Populus tremula</i>	topoľ osikavy	35	6	4	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
10	<i>Malus domestica</i>	jablň domáca	30	5	4	strom	E2	-	1	1	1% a 25%
11	<i>Prunus avium</i>	čerešňa vtáčia	80	9	6	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
12	<i>Robidia pseudoacacia</i>	agát biely	87	6	3	strom	E3	áno	1	2	1% a 25%
13	<i>Robidia pseudoacacia</i>	agát biely	80	6	3	strom	E3	áno	1	2	1% a 25%
14	<i>Populus tremula</i>	topoľ osikavy	236	16	5	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
15	<i>Prunus spinosa</i>	slivka trmková	46	4	3	ker	E3	-	1	1	1% a 25%
16	<i>Fraxinus excelsior</i>	jaseň štíhly	107	10	4	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
17	<i>Fraxinus excelsior</i>	jaseň štíhly	45	4	2	strom	E3	-	1	1	1% a 25%

18	<i>Fraxinus excelsior</i>	jaseň štíhly	149	10	4	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
19	<i>Robidia pseudoacacia</i>	agát biely	80	8	4	strom	E3	áno	1	2	1% a 25%
20	<i>Fraxinus excelsior</i>	jaseň štíhly	105	10	4	strom	E3	-	1	1	1% a 25%
21	<i>Malus domestica</i>	jabloň domáca	30	6	4	strom	E3	-	1	3	1% a 25%

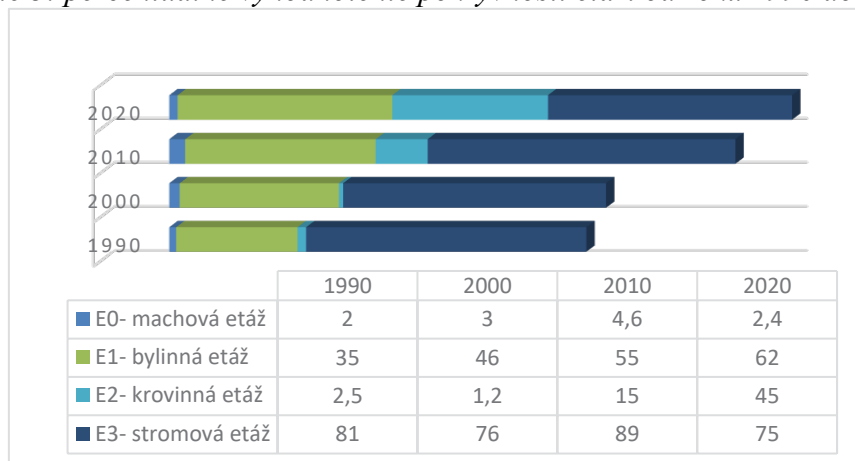
Výmera lesných pozemkov na Slovensku (LP) sa dlhodobo zvyšuje. V roku 2009 dosiahla 2 009 tis. ha. Od roku 1950 sa zvýšila o 238 tis. ha (13,4 %). Zvýšila sa aj výmera porastovej pôdy (PP), t. j. výmera lesných porastov, a to o 175 tis. ha (9,9 %) od roku 1950. Dlhodobu sa zvyšuje lesnatosť ako percentuálny podiel celkovej výmery lesných pozemkov z celkovej výmery Slovenska, ktorá bola v roku 2006 približne 41 %. Podľa výsledkov Národnej inventarizácie a monitoringu lesov (NIML) SR, ktorá zahrnila aj tzv. „biele plochy“ (les na nelesných pozemkoch), je lesnatosť Slovenska až $44,3 \pm 0,4$ %. [5]

Table 2: Fytcenologický zápis drevín na referenčnom úseku PE/VZ-12-10/2020

por. Č	latinský názov - slovenský názov		zastúpenie v %	výška porastu (m)	obvod pokryvu (axb) (m ²)	Pokrytie %	etáž	rastový stupeň
K1	<i>Sambucus nigra</i>	baza čierna	8	1.4	40	2	E2	nárast
K2	<i>Sambucus nigra</i>	baza čierna	18	2.4	90	2	E2	húština
K3	<i>Crataegus monogyna</i>	hloh jednozemenný	23	1.2	115	1	E1	nárast
K4	<i>Clematis vitalba</i>	plamienok plotný	67	3	335	2	E2	húština
K5	<i>Sambucus nigra</i>	baza čierna	26	3.5	130	2	E2	húština
K6	<i>Rosa canina</i>	ruža šípová	3	2.5	15	-	E2	húština
K7	<i>Humulus lupulus</i>	chmel obyčajný	1	4	80	-	E3	húština
K8	<i>Viburnum opulus</i>	kalina obyčajná	11	2	55	1	E1	húština
K9	<i>Sambucus nigra</i>	baza čierna	9	3	45	2	E2	húština

Komparáciou a spracovaním údajov z fytcenologických zápisov sme zistili zmeny v štruktúre lužných lesov. E0 machová etáž sa pohybuje okolo 3% pokryvnosti referenčných plôch čo zodpovedá typickej pokryvnosti machorastov v lužných lesov. Urbanizácia a výstavba komunikácií vo veľkej miere presvetlila lesné porasty čím nastala zmena v mikroklimatických podmienkach lesov. Tieto zmeny je vidno v tabuľke 3. po vyhodnotení formulárov sme zistili, že tieto zmeny zapríčinili prerod lužných biotopov na ekotón okraja lesa.

Table 3: percentuálne vyhodnotenie pokryvnosti etáží od roku 1990 do 2020



4. Záver

Prieskum poukázal na dopad zmeny klímy na biodiverzitu. Aktuálny stav a skladba lužných porastov vyplývajúci z fytologických zápisov a terénnych prieskumov značí o zvýšení ohrozenosti klimaticky senzitivných druhov/biotopov, ktoré majú úzku hranicu tolerancie . Zmeny v pokryvnosti etáží poukazujú na senzibilitu biotopov lužných porastov na zmenu svetelných, klimatických podmienok a vodného režimu. Narušením optimálnych a tolerančných limitov došlo k zmenám v prostredí čo je pre niektoré druhy limitujúce a obmedzuje pre vývoji. Preto nastáva prerod lužných porastov na ekotón okraja lesa. Zmenou svetelných podmienok sa zvyšuje teplota v poraste zároveň je vyššia evapotranspirácia z pôdy z dôsledku čoho sa vysušuje. Takto vytvorené podmienky sú optimálne pre druhy, ktoré nie sú autochtóne v tom prostredí.

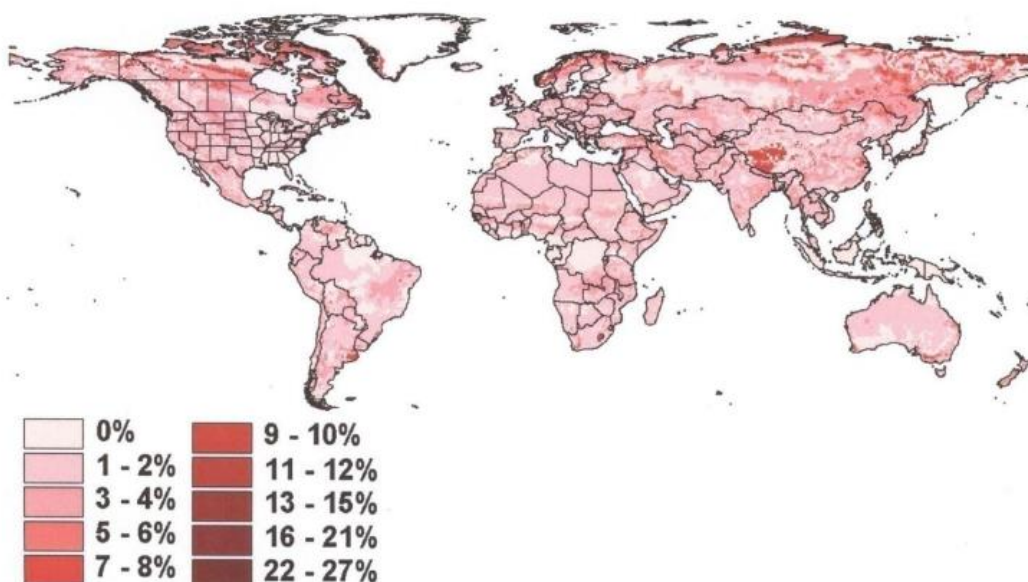


Figure 2: Predpokladaný percentuálny podiel druhovej straty v klimatických podmienkach s dvojnásobným zvýšením množstva CO₂ pre areály spoločností.

Literatúra

Použitá literatúra

- [1] VOLOŠČUK, I., SABO, P., ŠKODOVÁ, M., ŠVAJDA, J.: Teoréma vplyvu klimatických zmien na lesné vegetačné stupne Krivánskej Fatry.
https://publikacie.uke.sav.sk/sites/default/files/2016_1_ES_15-45_Voloscuk_a_kol.pdf
- [2] MINĎÁŠ, J., ŠKVARENINA, J.: Climate change and forest ecosystems in Slovakia. Život. Prostr., Vol. 34, No2, 84-88, 2000
- [3] FORMAN, R. T. T. a GODRON, M.: Krajinná ekologie. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-200-0464-5. 583s.
- [4] KRIŽOVÁ, E., NIČ, J.: *Fytocenológia a lesnícka typológia*. Zvolen, 2012, ISBN 978-80-228-2344-9
- [5] MINISTERSTVO PÔDOHOSPODÁRSTVA A ROZVOJA VIDIEKA SR.: *Správa o poľnohospodárstve a potravinárstve v Slovenskej republike za rok 2009*. Bratislava : NOI, 2010. 55 s. ISBN 978-80-89088-95-9

Figure 1: <https://biopedia.sk/ekologia/zakladne-ekologicke-pojmy>

Figure 2: DOI:10.1046/j.1365-2699.2002.00702.x

Timea Petrová¹

Študijný program: Krajinárstvo, IV. ročník

PROJEKTOVANIE PRVKOV ZELENEJ INFRAŠTRUKTÚRY MESTSKÉHO PROSTREDIA NA ÚZEMÍ ANTROZEME

DESIGNING THE GREEN INFRASTRUCTURE ELEMENTS OF THE URBAN ENVIRONMENT IN THE AREA OF URBIC ANTHROSOLS

Abstract

The article is focused on the issue of designing elements of the green infrastructure in an urbanized environment in urbic anthrosols. At first, article discuss the soil and microclimatic characteristics of the urbanized environment and the analysis of the study area. Then the problems, directions and challenges of the design are determined. In the project, a structural substrate with a biochar component was used for planting trees, which improved soil properties and conditions for the healthy development of trees and their rooting volume even in the post-planting period.

Kľúčové slová

Zelená infraštruktúra, urbánne komplexy, urbánne pôdy

1. Úvod

V minulosti boli urbanistické celky strategicky umiestňované v lokalitách s dostupnou úrodnou pôdou, ktorá zabezpečovala prísun potravín pre obyvateľstvo sídiel. Postupný rozvoj mestských štruktúr a sídiel nahradil funkčné využitie oblastí, v minulosti využívaných poľnohospodárstvom s úrodnou pôdou na zástavbu, priemyselné a banské oblasti. Vysoká miera redukcie poľnohospodársky vhodnej pôdy zvyšuje nároky a zintenzívňuje využívanie sídelných a poľnohospodárskych oblastí. Vysoká miera antropizácie pôdy ako v sídle, tak aj v krajine môže dospieť k degradácii pôvodných vlastností pôdneho profilu. Zmeny pôdy sa prejavujú na chemických, fyzikálnych a biologických vlastnostiach, genetickej skladbe, morfológii a môžu dospieť k úplnej strate pedónu.

1.1. Pôdy v urbanizovanom prostredí a „soil sealing“

Urbánne pôdy sú pôdy vyskytujúce sa v urbanizovaných územiach. Spojenie „urbánne pôdy“ bolo prvý krát použité a definované v roku 1963 a následne v roku 1994 Burghardtom bola vytvorená kategorizácia podľa miery ovplyvnenia. Rozdeľujú sa do 4 kategórii: prírodné, človekom ovplyvnené, človekom zmené alebo umelo vytvorené. Ďalšia kategorizácia urbánnych pôd podľa ich vzniku a typu pozostáva z 3 kategórii:

- pôdy zo zmesi materiálov, ktoré sa líšia od prilahlých lesných alebo poľnohospodárskych oblastí s hĺbkou min. 50 cm, ktoré vznikli ľudskou činnosťou (dovoz, vývoz, premiešavanie alebo kontaminácia)
- pôdy v parkoch a záhradách so zmeneným zložením, využitím a hospodárením ako poľnohospodársky využívaná pôda
- pôdy, ktorých vznik je spojený so stavebnou činnosťou v urbanizovanom priestore a pôdy, ktoré sú prekryté „soil sealing“ [1].

¹ Timea Petrová, Ing.

Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

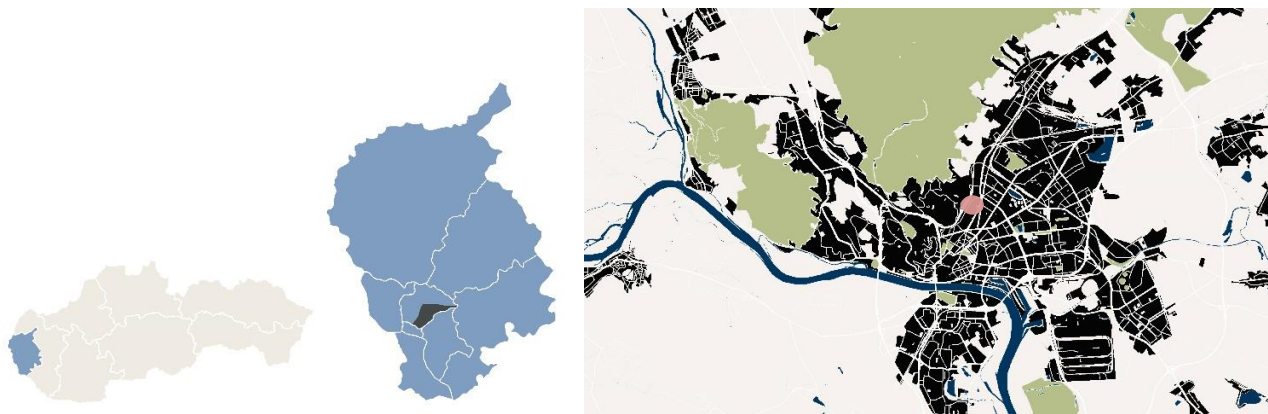
Podľa predchádzajúcej kategorizácie vyplýva, že urbánne pôdy sú pod silným antropogénnym vplyvom mestského prostredia. Zároveň možno povedať, že urbánne pôdy majú veľký vplyv na pôdny edafón, biologickú aktivitu v pôde, čo má priamy vplyv aj na ekosystém nad horizontom a následne aj na ľudí, jeho zdravie. Vlastnosti urbánnych pôd a prekrytie pôd má veľký vplyv aj na absorpciu, sedimentáciu, vsakovanie, infiltrácia, filtrácia, akumuláciu a evaporáciu zrážok. Pri úplnom prekrytí pôdy dochádza k zmenám zrážkovo - odtokového režimu, čo dlhodobo ovplyvňuje vlastnosti pôdy.

Pôdne typy v urbanizovanom prostredí sa nazývajú antropické/antropogénne a sú typické degradačným alebo kultivačným pôdotvorným procesom. Antropogénne pôdy – antroposol sú pôdy výrazne pretvorené ľudskou činnosťou s hrúbkou viac ako 10 cm. Do kategórie antroposolí možno zaradiť kultizeme, čo sú pôdy pretvorené ľudskou činnosťou a to hlbokým prekyprením a premiešavaním pôdneho profilu alebo terasovým pretváraním A- horizontu do 0,6m [2]. Vznik kultizeme je spojený s melioračnými zásahmi a snahami o zlepšenie vlastností pôdy hlbokým kyprením, zaprávaním, terasovaním a rigolovaním.

Druhou kategóriou antroposolí je antrozem s hrúbkou horizontu viac ako 60 cm, so vznikom viazaným na ľudskú činnosť a jeho pretváranie na umelo vytvorenom podloží[3]. Vznik môže byť viazaný na zmeny vlastností spôsobené premiestnením a úpravou prírodných materiálov alebo umelou zmenou zloženia. Antrozeme sa vyskytujú predovšetkým v sídelných štruktúrach miest a obcí, ktoré môžeme ďalej deliť na územia cintorínov - nekrosoly, na územia komunálnych odpadov - methanosoly a technosoly na územiach technického pôvodu priemyselnej alebo banskej činnosti.

2. Východiská a materiály

Témou článku je definovanie špecifických problémov spojených s navrhovaním prvkov zelenej infraštruktúry v mestskom prostredí s výrazne pretvoreným pôdnym profilom.



Obr. č. 1: Lokalizácia riešeného územia (Timea Petrová, 2022)

Riešené územie sa nachádza na Pionierskej ulici v Bratislave (Obr. č. 1), v katastrálnom území Nové Mesto. Ide o plochu na rozhraní hustej mestskej zástavby, priemyselných areálov a územia s reliktnami vinohradníckej činnosti. Dĺžka riešeného územia má 503 m. Riešené územie má prevažne rovinný charakter, iba v severovýchodnom úseku terén uličného priestoru mierne klesá. Z hľadiska frekventovanosti danej lokality vozidlami možno označiť daný úsek Pionierskej ulice za frekventovaný dopravný ťah. Dopravná komunikácia spadá do kategórie cesty 2. triedy a prepája Račiansku ulicu so Šancovou, lokalitu Stráže, Kolibu, Tehelné pole, Ľudovú štvrť a Staré Mesto. Frekventovanosť peších komunikácií daného územia je podmienená priamym napojením na viaceré objekty: materskou školou, športovým areálom, vinohradníckou osadou, strednou školou, domovom sociálnych služieb, obytnou štvrťou a zeleňou slúžiacou pre krátkodobú rekreáciu (plochou s výbehom pre psy). Vzhľadom na frekventovanosť vozovky bolo v uličnom priestore potrebné

zakomponovanie zelene do daného úseku najmä z dôvodu izolačnej, hygienickej a estetickej funkcie zo strany dopravnej komunikácie.

2.1. Terénne a odberové práce

Na riešenom území prebehlo niekoľko terénnych obhliadok pred realizáciou projektu, pre upresnenie zadania a stanovenie slabých stránok a problémov. Počas realizácie prebehli kontroly stavby a odberové práce pôdných vzoriek spojené s pedologickým výskumom. Po realizácii prebieha kontrola realizácie a následne pravidelná kontrola drevín a stavu projektu.

2.2. Definovanie slabých stránok a problémov riešeného územia

Na riešenom území bolo identifikovaných niekoľko problémov spojených s technickým stavom komunikácie, s prevádzkou dopravy a s existujúcou jednoradovou výsadbou stromov.

Na riešenom úseku Pionierskej ulice sa nachádzali úseky s výrazne zhoršenou kvalitou pešej komunikácie, ktorú bolo potrebné zrekonštruovať, nenachádzali sa žiadne debarierizačné prístupy na chodník a taktiež absentovali vodorovné značenia pre nevidiacich a slabozrakých.

Problémom bolo aj parkovanie automobilov vo viacerých úsekoch. Najnebezpečnejším úsekom bol výjazd Kyjevskej ulice na Pioniersku, pri materskej škole. Na danom úseku parkovali automobily v rozhládovom trojuholníku, v priamej blízkosti križovatky.



Obr. č. 2: Nároky na prekoreniteľný priestor stromov vo vzťahu veku a výšky v porovnaní s možnosťami v urbánnom prostredí

(Timea Petrová, 2020; zdroj údajov: LWG Veitshochheim, 2010)

Obr. č. 3: Pôvodný stav uličného priestoru na riešenom území (Timea Petrová, 2022)

Riešené územie bolo charakteristické nepriepustnými povrchmi a nedostatočným prekoreniteľným priestorom pre stromy vo veľkosti výsadbových štvorcov (Obr. č. 1), čo ovplyvňovalo rastový potenciál drevín a ich dlhodobú perspektívu. Nároky prekoreniteľného priestoru drevín boli v minulosti ignorované aj v tomto prípade výsadby stromoradia. Dreviny boli vysadené do výsadbových štvorcov, bez úpravy okolitého substrátu s minimálnymi dlhodobými možnosťami pre prežitie v zhutnenej ploche komunikácii. Urbánne pôdy boli úplne umelo vytvorené a ich vznik bol spojený so stavebnou činnosťou v danej lokalite. Na území úplne absentovala etáž krov a nízkych rastlín. Výhodou daného územia bola dostatočná vzdialenosť inžinierskych sietí a ich

ochranných pásiem v takmer celej dĺžke výsadbového pásu. Ochranné pásma sietí limitovali navrhovanú výsadbu predovšetkým v severnom úseku, no v danom úseku sa nachádza dostatok vzrastlej zelene v bezprostrednej blízkosti v areáli domova sociálnych služieb pre deti.

Pred realizáciou sa na území nachádzali fragmenty predchádzajúcej výsadby - 11 ks drevín *Negundo aceroides* Moench. – javorovec jaseňolistý, no tento druh v súčasnosti uvádzame ako invázny druh, preto boli dreviny odstránené. Realizácii výsadby predchádzalo aj vyfrézovanie 11 pňov. Z pôvodnej výsadby boli na danom území zachované len 3 dreviny: 2 ks druhu *Robinia pseudoaccacia* L. - Agát biely a 1 ks *Fraxinus excelsior* L. - Jaseň štíhly. 1 ks dreviny *Fraxinus excelsior* musel byť pred realizáciou odstránený zo zdravotného a bezpečnostného hľadiska bol považovaný za neperspektívny.

Dôležitým faktorom v danom projekte bol pôvodný typ výsadby drevín druhu *Negundo aceroides* oddeľujúcu dopravnú a pešiu komunikáciu. Druh je označovaný za invázny z dôvodu nenáročnosti na pôdne živiny a prostredie a svojou rýchlosťou rozmnožovania. V minulosti bol využívaný aj ako drevina vhodná do oblastí s degradovanými pôdami – asanačná a melioračná drevina. Napriek tejto adaptačnej schopnosti jedince vysadené v riešenom území postupne usychali, degradovali a zrezávaním mali výrazne narušenú stabilitu. V roku 2012 sa na riešenom území nachádzali len pozostatky pôvodnej výsadby – 16 ks drevín, pričom väčšina drevín bola v nevyhovujúcom zdravotnom stave. V roku 2014 sa na riešenom území už len 14 ks drevín, z toho boli ďalšie 2 jedince silne narušené a z 2 jedincov zostali už len torzá. V ďalšom kroku boli odstránené všetky dreviny z dôvodu invázneho charakteru (Obr. č. 2) . Z danej informácie možno konštatovať, že dreviny mali na danom území nevyhovujúce podmienky, ktoré neustálym pôsobením výrazne ovplyvnili rastový potenciál, perspektívu a zdravotný stav drevín. Negatívne prejavy dreviny na prostredie aj pre takto invázny a odolný druh boli kritické a preto bolo potrebné identifikovať faktory ovplyvňujúce zdravotný stav drevín.



Obr. č. 4: Pôdne profily výsadbových jám na území riešeného územia
(Timea Petrová, 2022)

Riešené územie je typickým príkladom projektov rekonštrukcie líniovej vegetácie komunikácií v mestskom prostredí. Pôvodne sa na území nachádzala komunikácia pre peších a zeleň tvorila len doplnkový prvok uličného priestoru. Stromy boli vsadené bodovo do výsadbových štvorcov v línii medzi dopravnou komunikáciou a chodníkom pre peších. Práve to ovplyvnilo ich dlhodobu neperspektívny charakter. Segmentovaná výsadba v oblasti s antrozemou bez dodatočnej adjustácie

je dlhodobou neperspektívna a končí postupným úhynom stromov. Z vizuálneho rozboru pôdnej vzorky bolo možné určiť, že sa jedná o plochu s výrazne zhutneným pôdnym profilom antropogénneho charakteru s predchádzajúcim úplným prekrytím a bez viditeľných známkov zoedafónu a iných mikroorganizmov. Pôda bola v celej dĺžke slabo humózná a kompaktná (Obr. č. 3). Odber pôdných vzoriek, pre následný pôdny prieskum, z výsadbových jám prebehol počas realizácie projektu po vykopaní výsadbových jám na 3 lokalitách. Vzorky boli odobrané z rôznych hĺbok: 50 cm, 75 cm pod a 100 cm pod úrovňou terénu. Odber pôdných vzoriek prebehol za účelom určenia pôdneho typu, na danom riešenom území a určenie pôdneho druhu, pH, nasýtenej hydrologickej vodivosti a pórovitosti.

3. Metodika navrhovania

Hlavnou zmenou návrhu voči pôvodnému stavu bolo vytvorenie kontinuálnej línie zeleného pásu s priemernou šírkou 1,5 m. Návrh pracoval s vytvorením novej líniovej vegetácie s kombinovanou výsadbou, so zastúpením strednej etáže krov a stromovej etáže a to predovšetkým z dôvodu vytvorenia vegetačnej bariéry zo strany komunikácie. Takéto prepojenie viacerých etáží vegetačného pásu popri cestnej komunikácii má viaceré benefity ako napr. vizuálna a zvuková izolácia od dopravnej komunikácie, filtrovanie a znižovanie dopadov dopravy na peších, estetická funkcia – zachovanie rytmu a kontinuálna výsadba drevín a krov s dlhým obdobím kvitnutia a kompaktným charakterom. Vytvorením jednotnej línie sa zabezpečilo aj obmedzenie parkovania v problémových úsekoch.

Plochy chodníka boli navrhnuté na čiastočnú výmenu s doplnením debarierizačných pozemných opatrení pre osoby s obmedzenou schopnosťou pohybu a orientácie na pozemných komunikáciách pri priechodoch pre chodcov. Ďalším doplneným prvkom boli aj zahradzovacie stĺpiky v úseku v minulosti využívanom pre potreby vjazdu vozidla.

3.1. Faktory ovplyvňujúce návrh

Navrhovanú plochu zelene možno označiť za líiovú vegetáciu pri komunikácii – jednoradové stromoradie, ktorej hlavná funkcia je izolácia (ochrana zo strany dopravnej komunikácie pred hlukom, znečistením a vetrom) a estetická (vytvorenie kompozičnej osi a uzatvorenie priestoru krátkodobej rekreácie).

Navrhnutím vegetačného pásu sa zmiernila otvorenosť uličného profilu a exponovanosť prúdeniu vetra a emisií zo severnej strany. Využitím stupňovitej vegetačnej bariéry je zvýšený filtračný potenciál a znížený negatívny dopad dopravy. Kombinovaná výsadba stromov a krov vytvára efektívnejšiu bariéru a príjemnejšiu prevádzku pre peších.

V roku 2021 bola vydaná príručka od Metropolitného inštitútu v Bratislave s názvom „Princípy a štandardy zelene,“ ktorá zahŕňa základné informácie a princípy k navrhovaniu zelenej infraštruktúry v sídelnom prostredí a ich samotné zakladanie. V danom projekte bolo potrebné zväžiť dostatočné výhľadové kužele (rozhlľadové trojuholníky) v prípade napájania ulice Kyjevská a Legerského.

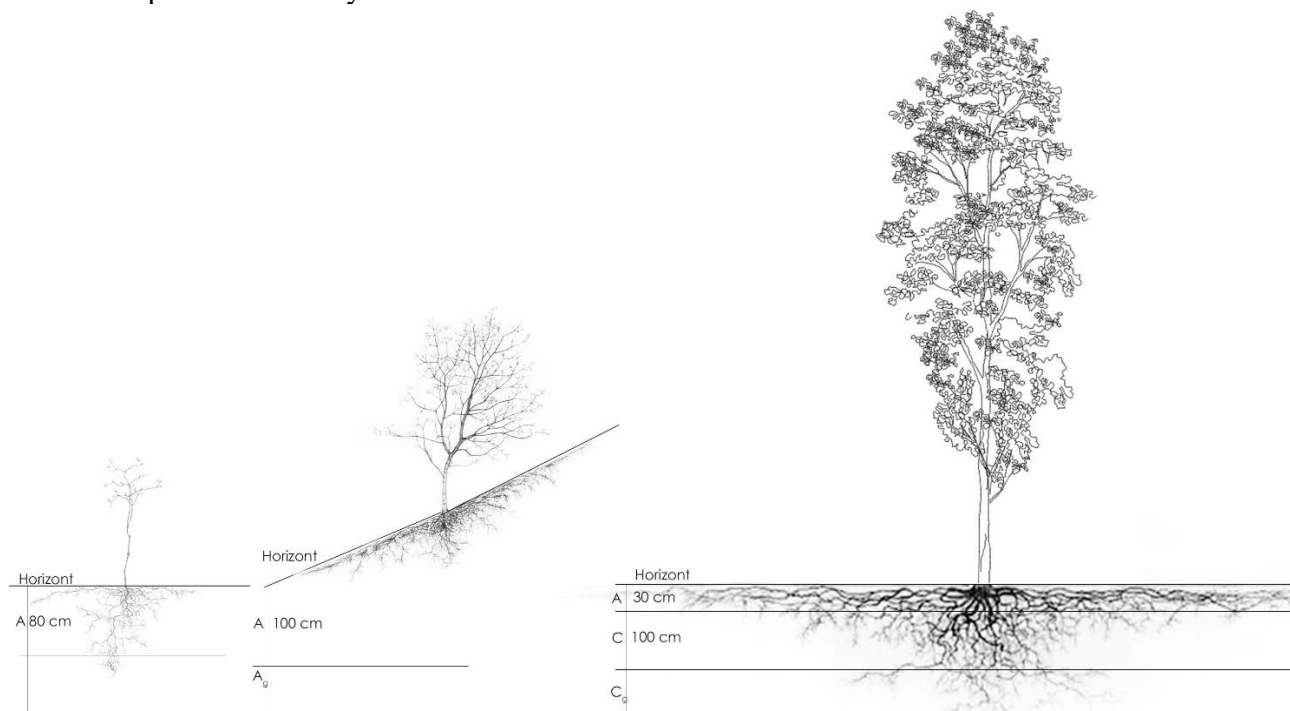
Z hľadiska usporiadania stromoradia je najvhodnejším typom súvislé stromoradie bez presahu korún stromov v dospelosti. Dostatočnou vzdialenosťou drevín a pravidelným rytmom osadenia je zvýšený evapotranspiračný potenciál, optimalizácia zatienenia a zníženie rizika napadnutia škodcom.

3.2. Výber vegetačného materiálu

Pri výbere drevín bol dôraz kladený na podmienky riešeného územia a prebiehajúce prejavy klimatickej zmeny. Ďalšími parametrami, ktoré určili výber vegetačného materiálu, bola tolerancia voči zasoľovaniu, alergénosť, znášanosť rezu a nároky na prekoreniteľný priestor. Ďalšie

vlastnosti dreveny ako veľkosť a tvar koruny, textúra, farba listov a typ plodov bolo potrebné zohľadniť vzhľadom na lokáciu a typ výsadby – stromoradie pri dopravnej komunikácii. Do najvyššej etáže bol vybraný druh *Fraxinus pennsylvanica* Marshall - jaseň červený v počte 34 ks v pravidelných 10m rozstupoch. *Fraxinus pennsylvanica* je nepôvodný, opadavý druh na našom území ale využívaný je najmä pre svoje vlastnosti pionierskej dreveny, ktorý dobre znáša narušené miesta a vplyvy mestského prostredia, pri dostatočnom prísune vlhky. Daný druh je vhodný použiť ako do uličného priestoru, tak aj do parkov a je odolný voči chorobám. Tvar koruny je oválny a cez zimu vyfarbuje do zlato-žlta. Maximálna výška stromu je v našich podmienkach 15-25 m a šírka 12-15 metrov. Drevena spadá do klimazóny (odolnosť voči mrazu) do kategórii 4A – 9B, zodpovedajúc -30 – 25 °C. Stromy boli navrhnuté v minimálnej vzdialenosti 1,5 m od osi známych inžinierskych sietí ako kanalizácia, vodovod, plynovod, optický kábel a horúcovod. Výsadba stromov dodržiava výhľadové pásma komunikácií v minimálnej vzdialenosti 15 m od priechodov pre peších a od križovaní dopravných komunikácií. Stromy boli navrhované vyvetvené v minimálnej výške 2,3 m, kvôli podjazdnej výške. Kotvenie stromov bolo navrhované kombinované: nadzemné kotvenie ku kolom a podzemné guľovité kotvenie koreňového balu z dôvodu vysokej miery exponovanosti vetru.

Na príkladoch koreňových systémov druhov *Fraxinus* (Obr. č. 5) možno identifikovať srdcovitý až plochý typ koreňovej sústavy dreven, s hlavným objemom všetkých koreňov stromu sústredených do vrchnej vrstvy 0,15-0,3 m pod hranicou horizontu (môže variať podľa pôdneho typu). Srdcovitý typ koreňovej sústavy je typický viacerými hrubými koreňmi, bez hlavného terminálneho koreňa. Dreveny so srdcovitým a kolovitým typom koreňovej sústavy sú odolnejšie voči vetru, majú stabilizačný charakter porastu. Plošný priemet koreňovej sústavy variuje, no podľa príkladov je to 3-6 násobok priemeru koruny.



Obr. č. 5: Koreňový systém druhu *Fraxinus* v rôznych pôdnych podmienkach
(Timea Petrová, 2022; zdroj údajov: images.wur.nl/digital/collection, 2002)

V návrhu bola stredná etáž krov spojená s pôdopokryvnou vrstvou druhom *Potentilla fruticosa* 'Klondike' - nátržník krovitý v počte 1317 ks. Masová výsadba v trojradovom trojspone bola prispôbená na šírku zeleného pásu 1,5 m v hustote 3-5 ks /b.m.. *Potentilla fruticosa* 'Klondike' je ker s maximálnym priemerom 0,6-1 m, s nízkymi nárokmi a dlhým obdobím kvitnutia od mája až do októbra. Pôdopokryvný habitus zabezpečí zníženú potrebu odburiňovania po zapojení. Úprava rezom

bola navrhovaná do maximálnej výšky 0,5 m z dôvodu bezpečnosti dopravnej prevádzky. Vyznačenie riešeného územia v kontexte lokality Pionierskej ulice s navrhovanou líniovou výsadbou do štruktúrneho substrátu je uvedené na obr. č. 6.



Obr. č. 6: Navrhované riešené územie
(Timea Petrová, 2022)

3.3. Úprava stanovištných podmienok

Z predchádzajúcich informácií bolo možné skonštatovať, že na riešenom území je potrebná modifikácia pôdných vlastností pred výsadbou. Ak by boli ponechané pôvodné podmienky a prebehla by iba výmena drevín vo výsadbových štvorcoch za nové, vplyvmi prostredia ako: povýsadbový stres spojený s kompaktnosťou pôvodnej pôdy a ďalšími stresovými faktormi ako nedostatočný prekoreniteľný priestor, demineralizácia pôdy, znečistenia pôdy a salinácia pôdy z dopravnej komunikácie, zvýšenie pH pôdy, nedostatočná infiltračná schopnosť, degradácia pôdnej štruktúry, zrezávanie koruny zo strany komunikácie a znečistenie kvality ovzdušia a zvýšenie teploty vzduchu zo strany komunikácie, by úspešnosť výsadby po 10 rokoch bola zanedbateľná. Pred každou výsadbou v urbánnych pôdach a predovšetkým v antrozemách je potrebné vytvorenie optimálnych podmienok pre rast drevín. Pôdy chudobné na živiny a organický materiál s pravdepodobnosťou zimného zasoľovania bez dostupnej vlhkosti sú spolu s vysokým výparom najdôležitejšími činiteľmi a stresovými faktormi. Jednotným cieľom úprav vlastností výsadbových miest je zlepšenie fyzikálnych, chemických, štruktúrnych a biologických vlastností pôdy.

Úpravy stanovištných podmienok majú individuálny postup a špecifický charakter. Pre daný projekt bola vybraná alternatíva úpravy pôvodného pôdneho zloženia na štruktúrny substrát so zložkou biouhľia. V danom projekte bola vybraná predpripravená zmes štruktúrneho substrátu so zložkou biouhľia a kompostu pre vytvorenie optimálnych podmienok a zlepšenie vlastností pôdy. Štruktúrny substrát vytvára vhodné podmienky pre rast koreňovej sústavy v uličných priestoroch. Tento typ substrátu je vhodné použiť v lokalitách so zhutneným pôdnym profilom alebo s potenciálom dlhodobého zhutňovania v uličných pochôdných alebo pojazdných priestoroch. Zložka biouhľia má filtračné schopnosti adsorbčného materiálu a je vhodnou alternatívou k súčasnému spôsobu filtrovania zrážkovej vody odvádzanej z pozemkov pozemných komunikácií a

parkovísk, ktorá sa považuje za odpadovú. Biouhlie je vhodný spôsob predčistenia v prípade ťažkých kovov, nerozpustných zlúčenín, uhlíkovodíkov a organickým látkam [4].

Po celej dĺžke výsadbového pásu bolo navrhnuté pôvodný povrch odstrániť na vrstvu 50-100 cm. Vzhľadom na rozsah projektu a vzdialenosti stromov bola základná výsadbová jama vykopaná do hĺbky 50- 70 cm a následne v úsekoch s plánovanou výsadbou drevín boli vytvorené výsadbové misy s hĺbkou 100 – 130 cm a šírkou 2,5 – 3,5 m.

Ďalšou etapou bude vyhodnotenie pedologických vzoriek z riešeného územia, pôvodnej antrozeme a štruktúrného substrátu. Pri štruktúrnom substráte budú následne určené aj charakteristiky, ktoré môžu vplývať koreňovú sústavu a vegetačný potenciál. Kontroly v teréne a povýsadbová starostlivosť je monitorovaná terénymi obhliadkami.

4. Záver

Cieľom realizácie bolo využitie štruktúrného substrátu so zložkou biouhlia na územiach s kompaktnou antrozemou bez možnosti prekoreniteľnosti pre dreviny. Ďalším cieľom projektu bolo využitie uličného priestoru v prospech zelene a podporenie zeleno-modrej infraštruktúry v urbanizovanom prostredí. Aplikovaním vegetačnej bariéry zabezpečí lepšie podmienky pre využívanie lokality pre krátkodobú rekreáciu a pozitívne ovplyvní celkový estetický a psychologický charakter územia. Doplnenie hodnotných drevín zlepší mikroklimatické podmienky, umožní lepšie vsakovanie vody do pôdneho profilu a zmierni tryskové prúdenie.

Literatúra

- [1] S. Survey, S. Quality, A. Soils, a J. L. Morel, “Urban Soils Global Change and Forest Soils”, č. 1963, 2019.
- [2] Bedrna Zoltán, “Príspevok ku klasifikácii a mapovaniu pôd pozmenených antropogénnou činnosťou”, *Geogr. Cas.*, č. ScLuaps 1987, 1995.
- [3] Z. Bedrna a M. Jenčo, “Pedogeografia”, s. 125, 2016.
- [4] S. cestnej dopravy a pozemných komunikácií Ministerstvo dopravy a výstavby SR, *NAKLADANIE SDAŽŽOVÝMI VODAMI ODVÁDZANÝMI Z POZEMKOV POZEMNÝCH KOMUNIKÁCIÍ A PARKOVÍSK*. 2019.

PodĎakovanie

Článok vznikol vďaka podpore projektu VEGA: 1/0068/19 a spolupráci s Magistrátom Hlavného mesta Bratislava.

Barbora Považanová¹

Študijný program: krajinárstvo, 2. ročník

VYHODNOTENIE SUCHA V POVODÍ PARNEJ

EVALUATION OF DROUGHT IN THE PARNA CATCHMENT

Abstract

Drought in each geographical area is quantified relatively to the typical climatic, hydrological and other conditions of the given territory. Therefore, this paper focused on the meteorological and hydrological investigation of the area of the Trnava Table in Western Slovakia, which is partly foothill and partly flat. This is not the typically the driest area of the flat, southern parts of Slovakia, but the analysis showed that drought also threatens such regions. The article demonstrated the suitability of the methods used using standardized drought coefficients. The standardized runoff coefficient method has rarely been used in Slovakia, and the contribution of the work is that a suitable statistical distribution was found, which is appropriate for our territory for the standardization of flow deviations (Generalized Extreme Value distribution).

Kľúčové slová / Key Words

analýza sucha; SPI; SRI

1. Úvod

Sucho je prírodný jav, postihujúci v podstate každý región sveta [1]. Tento jav sa hodnotí relatívne - v oblastiach s menšími zrážkami a väčšími teplotami bude pri tom istom zrážkovom úhrne ako v obvykle vlhšej oblasti sucho hodnotené ako menej závažné. V stredoeurópskej oblasti bude preto napríklad závažné sucho ohrozujúce tunajšie ekosystémy a poľnohospodárstvo už za podmienok, ktoré sú v rovníkovej oblasti bežné. Sucho sa preto vyskytuje rovnako v oblastiach s nízkym aj vysokým množstvom zrážok a vo všetkých klimatických oblastiach [2]. Pre potreby tejto práce môžeme použiť definíciu z Encyclopedia of Climate and Weather [3], v ktorej je sucho definované ako 'dlhšie obdobie (sezóna, rok alebo niekoľko rokov) s podpriemernými zrážkovými úhrnmi vzhľadom na viacročný priemer v danom regióne'. Z tejto definície vyplýva, že vznik sucha súvisí najmä s dlhodobým poklesom množstva zrážok na určitom území. Existujú však aj ďalšie faktory ovplyvňujúce vznik sucha, napríklad zvýšené teploty, nízka relatívna vlhkosť, silné vetry, sila a trvanie dažďa alebo charakter a načasovanie preháňok [2]. Sucho je síce prirodzene sa vyskytujúci jav, avšak klimatická zmena a s ňou spojený nárast tepla v atmosfére výrazne zrýchlili proces vysušovania krajiny [4] [5].

Sucho patrí medzi prírodné katastrofy (živelné pohromy). Podľa rýchlosti nástupu ide o prírodnú katastrofu s pomalým nástupom [6]. V porovnaní s inými prírodnými katastrofami (povodne, zemetrasenia, zosuvy pôdy, lesné požiare...) zasahuje sucho najväčšie plochy a zároveň obdobia, v

¹ Barbora Považanová, Ing., Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, Bratislava

ktorých je možné pozorovať jeho následky sú najdlhšie. Škody spôsobené suchom sú aj z týchto dôvodov mnohonásobne vyššie ako pri iných prírodných katastrofách [2][7]. Sucho je taktiež na prvom mieste v počte osôb zasiahnutých prírodnou katastrofou [8][9][10].

Sucho je možné rozdeliť do 4 kategórií: meteorologické, agrikultúrne, hydrologické a socioekonomické [1]. V tomto článku sa venujeme meteorologickému a hydrologickému suchu. Meteorologické sucho je definované ako nedostatok zrážok za dlhší čas v určitom regióne alebo ako obdobie s podpriemerným množstvom zrážok [4][2]. Meteorologické sucho však nemá len jednu príčinu. Nedostatok zrážok často sprevádzajú nadpriemerné teploty a znížená vlhkosť pôdy [4][11][12].

Hydrologické sucho je definované ako nedostatok vody v riekach, nedostatok podzemnej vody a nedostatok vody v jazerách a umelých vodných nádržiach [13]. Podľa definície Mishra a Singh [2] nastáva hydrologické sucho vtedy, keď sa na danom území nenachádzajú dostatočné vodné zdroje pre plnenie funkcií vodného hospodárstva územia.

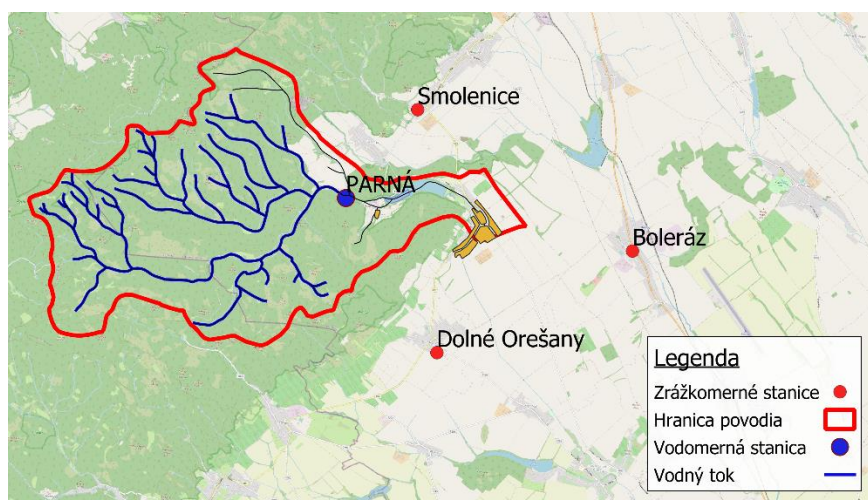
Vo väčšine prípadov sucho vzniká nedostatkom zrážok (meteorologické sucho) a ďalej sa šíri podľa zákonitostí hydrologického cyklu. Nedostatok zrážok (meteorologické sucho), v kombinácii so zvýšeným výparom, vyvoláva nedostatok pre rastliny dostupnej vody v pôde (agronomické sucho). Tento jav, pri ktorom jeden druh sucha priamo ovplyvňuje vznik iného sa nazýva propagácia (šírenie) sucha. Znížená vlhkosť pôdy môže, spolu s nedostatkom zrážok, ďalej ovplyvňovať množstvo vody vo vodných tokoch (hydrologické sucho) [14] [15] [16].

Na sledovanie sucha sa používajú indexy sucha. Indexy sucha (drought indices) sú číselné hodnoty reprezentujúce výdatnosť sucha. Počítané sú z klimatických alebo hydrologických údajov. V tejto práci sme používali pre analýzu sucha indexy SPI a SRI, ktoré dobre popisujú spomínaný relatívny charakter tohto javu a sú bližšie popísané v kapitole Metódy.

2. Údaje a metódy

2.1 Údaje

Analýza meteorologického a hydrologického sucha je v tejto práci realizovaná v podhorskej oblasti Malých Karpát v západnej časti Slovenska a na priľahlej nížine (Obrázok 1).



Obrázok 1: Situácia záujmového územia

V tejto práci sme počítali index meteorologického sucha SPI a index hydrologického sucha SRI. Ako vstupné údaje pre výpočet SPI sa používajú mesačné zrážkové úhrny. Zrážkové úhrny pochádzajú zo zrážkomerných staníc Boleráz (18340), Dolné Orešany (18400) a Smolenice (18320). Ako vstupné údaje pre výpočet SRI sme použili mesačné odtečené množstvá vody, určené z denných prietokových údajov toku Parná. Všetky tieto údaje boli poskytnuté Slovenským hydrometeorologickým ústavom. Meracie stanice sa nachádzajú v okrese Trnava, v Trnavskom kraji (viď. *Obrázok 1*). Údaje zo všetkých staníc boli dostupné v dennom kroku pre obdobie 1.1.1985 – 31.12.2021 (13514 dní, 36 rokov).

2.2 Metódy

Štandardizovaný zrážkový index (SPI)

Tento ukazovateľ vyjadruje relatívne odchýlky úhrnu zrážok v danom období od dlhodobej strednej hodnoty. SPI Index bol vyvinutý kolektívom McKee et al. [17]. Pre jeho výpočet je postačujúci 20-ročný historický rad, avšak odporúčaná dĺžka údajov pre tento výpočet je minimálne 30 rokov [18][19][20]. Pre tento rad údajov je potrebné určiť parametre rozdelenia pravdepodobnosti (fitting). Následne je transformovaný na normálne rozdelenie [17][21]. Najčastejšie používanými rozdeleniami pravdepodobnosti pri výpočte SPI sú gamma [17][21][22] a Pearson III. typu [19]. SPI môže nadobúdať kladné aj záporné hodnoty, korelujúce s intenzitou suchých a vlhkých období. O suchu môžeme hovoriť, ak sú hodnoty SPI dlhodobo záporné (viď. *Tabuľka 1*). Sucho potom trvá do momentu, kým SPI dosiahne alebo prekročí nulu [17][20].

Tabuľka 1: Klasifikácia sucha na základe indexu SPI

Kategória	Hodnota SPI
Extrémne vlhko	$SPI > 2$
Stredné vlhko	$1.5 \leq SPI < 2$
Mierne vlhko	$1 \leq SPI < 1.5$
Normálne podmienky	$0 \leq SPI < 1$
Mierne sucho	$0 < SPI < -1$
Stredné sucho	$-1 \leq SPI < -1.5$
Extrémne sucho	$-1.5 \leq SPI < -2$

Štandardizovaný odtokový index (SRI)

Je založený na rovnakom princípe ako SPI, ale používa sa pri posudzovaní hydrologického sucha, nakoľko vstupnými údajmi sú údaje o prietokoch. Vytvorili ho Shukla a Wood [23]. SRI môže nadobúdať kladné aj záporné hodnoty v intervale -2 (extrémne suchý) až 2 (extrémne mokrý), viď. *Tabuľka 2*. Rovnako ako pri SPI je potrebné pre údaje o historických prietokoch určiť parametre rozdelenia pravdepodobnosti (fitting). McKee et al. [17] odporučil gamma rozdelenie (rovnaké ako pre SPI) aj pre iné charakteristiky spojené so suchom, napríklad prietok. Autori indexu SRI [23] zdôrazňujú, že gamma rozdelenie vykazuje dobré výsledky pri menších prietokoch, avšak nie je vhodné pre posudzovanie väčších prietokov. V tomto prípade odporúčajú rozdelenie log normal (LN). Katipoğlu a Acar [24] porovnávali vhodnosť rôznych rozdelení pravdepodobnosti pri výpočte SRI, pričom najlepším rozdelením pre 3, 6, aj 12-mesačný SRI bolo Generalized extreme value

(GEV). Výber správneho rozdelenia pravdepodobnosti údajov nie je teda v prípade indexu SRI v dostupnej literatúre jednoznačne odporúčaný a je kľúčovým krokom pri výpočte indexu SRI. Použitie nesprávneho rozdelenia môže viesť ku skresleniu hodnôt indexu, k nadhodnocovaniu alebo podhodnocovaniu hydrologického sucha na danom území [25]. Preto sme výberu vhodného rozdelenia venovali v práci väčší priestor. Pri výpočte SRI bolo najskôr zvolených niekoľko rozdelení pravdepodobnosti, z ktorých bolo vybrané najvhodnejšie na základe Kolmogorov-Smyrnovho testu. Pre najvhodnejšie rozdelenie boli určené jeho parametre rozdelenia pravdepodobnosti a tieto sú následne využité na transformovanie na normálne rozdelenie. Týmto procesom sa zároveň odstráni sezonalita prítomná v údajoch [26].

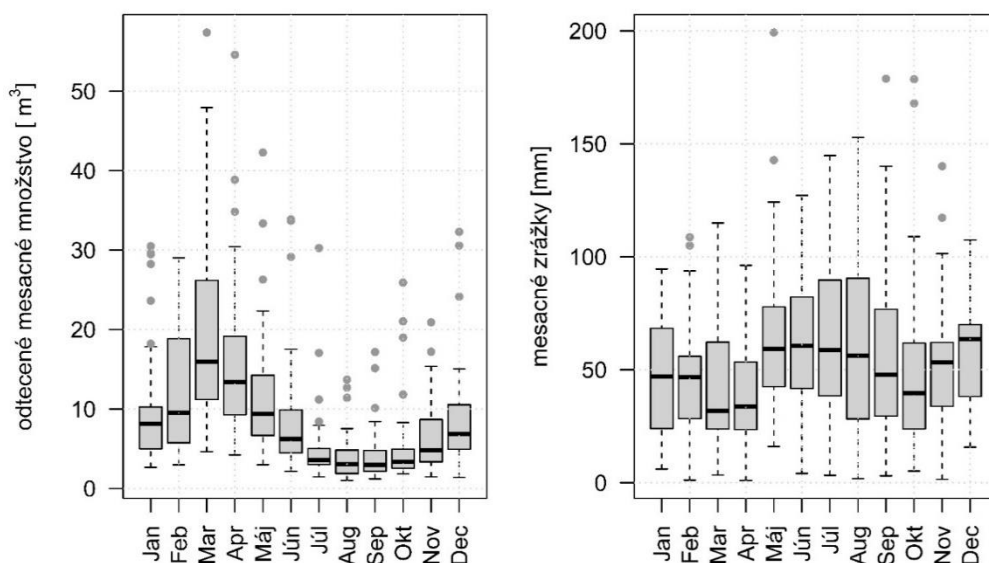
Keďže rovnakým procesom prechádzajú aj zrážkové údaje pri výpočte SPI, sú tieto dva indexy veľmi dobre porovnateľné. Pre určenie parametrov rozdelenia pravdepodobnosti prietokových údajov sme v tejto práci používali software EasyFit.

Tabuľka 2: Klasifikácia sucha na základe indexu SRI

Kategória	Hodnota SRI
Extrémne vlhko	$SRI \geq 2$
Stredné vlhko	$1.5 \leq SRI < 2$
Mierne vlhko	$1 \leq SRI < 1.5$
Normálne podmienky	$-1 < SRI < 1$
Mierne sucho	$-1.5 < SRI \leq -1$
Stredné sucho	$-2 < SRI \leq -1.5$
Extrémne sucho	$SRI \leq -2$

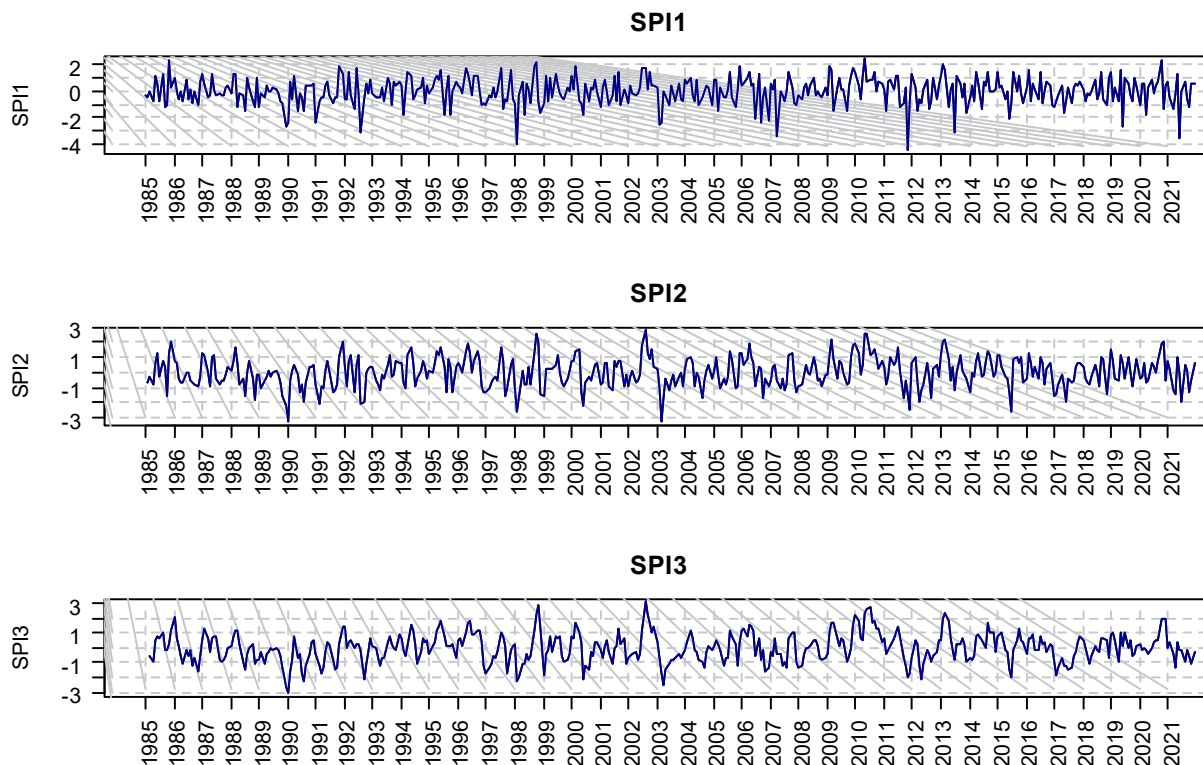
3. Výsledky a diskusia

Hlavnou časťou tejto práce bol výpočet indexov sucha SPI a SRI. Štandardizovaný zrážkový index (SPI) slúži na analýzu meteorologického sucha. Vstupnými údajmi sú mesačné úhrny zrážok. V tejto práci sme mali k dispozícii merané zrážkové úhrny v dennom kroku pre obdobie 1.1.1985 – 31.12.2021 z troch staníc v okrese Trnava – Boleráz, Dolné Orešany, Smolenice. Krabicové grafy (boxploty) meraných údajov sú na *Obrázok 2*. Na základe týchto grafov je možné povedať, že meteorologicky najsuchším mesiacom bol marec a hydrologicky najsuchším mesiacom bol august.



Obrázok 2 Rozloženie vstupných údajov

Pre každý deň sme vypočítali priemer zrážok z troch staníc. Následne sme z priemerných zrážok vypočítali mesačné úhrny pomocou funkcie `daily2monthly()` z balíka `hydroTSM` v prostredí `RStudio`. Index SPI predstavuje hodnotu odchýlky zrážkových úhrnov v určitom mesiaci od n-mesačného priemeru. Index SPI sme počítali funkciou `spi()` z balíka `SPEI` [27] v prostredí `RStudio`. Počet mesiacov, na základe ktorých je počítaný referenčný priemer pre nasledujúci mesiac (mierka SPI) je možné prispôbiť (1-48+). V tejto práci sme počítali s mierkami 1,2 a 3 mesiace. Pri výpočte indexu SPI je možné meniť aj rozdelenie pravdepodobnosti. Na výber sú rozdelenia log-logistic, gamma a Pearson III. Použili sme implicitne nastavené rozdelenie gamma, ktoré pri výpočte SPI odporúčajú aj autori indexu SPI [17]. V procese výpočtu SPI sú údaje transformované na normálne rozdelenie, čím sa odstráni sezonalita. Priebeh vypočítaných indexov SPI je zobrazený na *Obrázok 3*. Je možné vidieť, že ak je index počítaný s menšou mierkou (napr. 1 mesiac), zachytí síce menej intenzívne a kratšie suché obdobia, avšak takisto môže predčasne indikovať ich koniec. Pri indexe s mierkou 3 mesiace sú lepšie viditeľné dlhšie a výdatnejšie suché obdobia sezónneho charakteru.



Obrázok 3: Priebeh vypočítaných indexov SPI v mierkach 1,2 a 3 mesiace

Pre analýzu hydrologického sucha sme v tejto práci používali Štandardizovaný odtokový index SRI, ktorý funguje na rovnakom princípe ako SPI, t.j. porovnáva údaje daného mesiaca s predchádzajúcim n-mesačným priemerom. Vstupnými údajmi pre jeho výpočet sú mesačné odtokové množstvá, ktoré sme vypočítali ako sumu denných prietokov meraných na toku Parná. Index SRI sme počítali pomocou funkcií $fitSCI()$ a $transformSCI()$ z balíka SCI [26] v prostredí RStudio pre mierku 1,2 a 3 mesiacov. Pred samotným výpočtom SRI je potrebné prietokovým údajom určiť rozdelenie pravdepodobnosti. Kvôli väčšej variabilite prietokov (v závislosti od geografickej polohy toku) neexistuje nijaké univerzálne rozdelenie a je potrebné v prvom kroku určiť parametre rozdelenia pravdepodobnosti (fitting). Na určenie parametrov sme použili software EasyFit. V tomto programe je možné zistiť najvhodnejšie rozdelenie pravdepodobnosti pre nahraté údaje na základe Kolmogorovovho-Smirnovovho testu. Tento test sleduje najväčšiu odchýlku medzi teoretickou distribučnou funkciou a empirickou distribučnou funkciou (v našom prípade časovým radom meraných údajov). Parametre rozdelenia pravdepodobnosti je vhodné určiť pre každý mesiac. V tejto práci sme vypočítali dlhodobé priemery pre každý mesiac (36 rokov). Výsledky Komogorovovho-Smirnovovho testu pre náš súbor prietokov sú uvedené v Tabuľka 3.

Tabuľka 3 Najvhodnejšie rozdelenia pravdepodobnosti na základe Kolmogorovovho-Smirnovovho testu

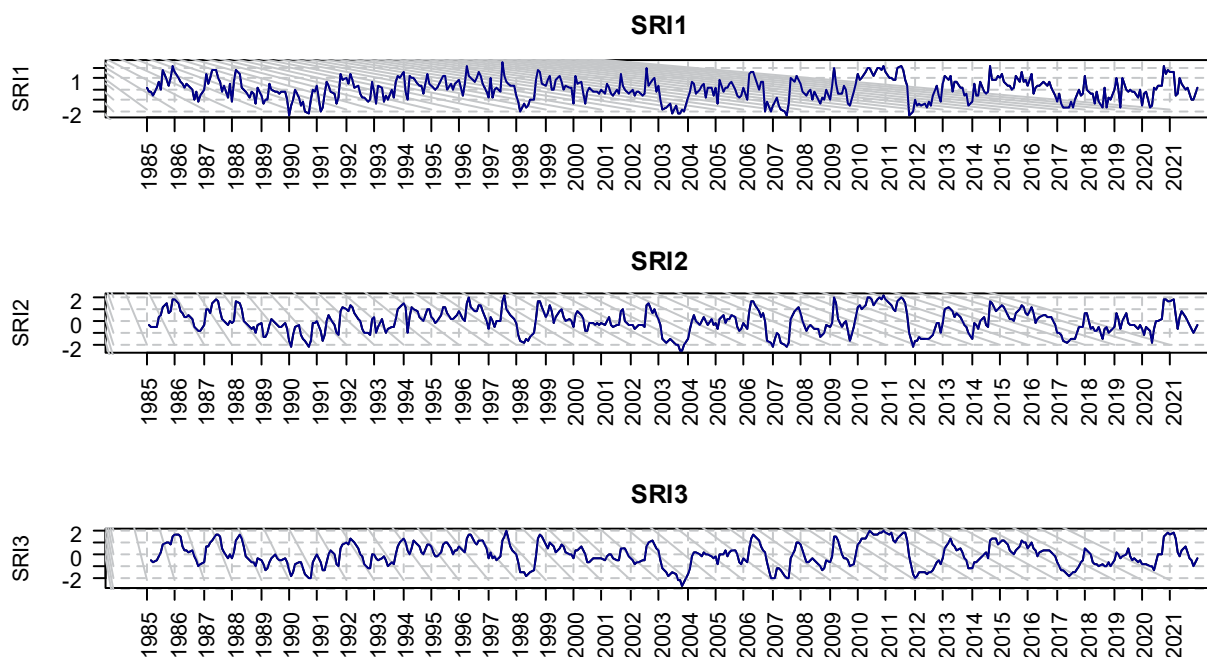
	Jan	Feb	Mar	Apr	Máj	Jún	Júl	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
DIST	LN (3P)	Weib (3P)	Gamma	GEV	GEV	LN	LN (3P)	GEV	GEV	GEV	LN (3P)	GEV

Najvhodnejšie rozdelenie pre výpočet SRI sme určili na základe početnosti v predchádzajúcej tabuľke, t.j. ktoré rozdelenie sa umiestnilo na prvom mieste najviac krát (viď. Tabuľka 4). V našom prípade bolo najvhodnejším rozdelením GEV (Generalized extreme value).

Tabuľka 4 Početnosť rozdelení pravdepodobnosti

Dist.	Početnosť
GEV	6
LN (3P)	0
LN	1
Weib (3P)	0
Gamma	1

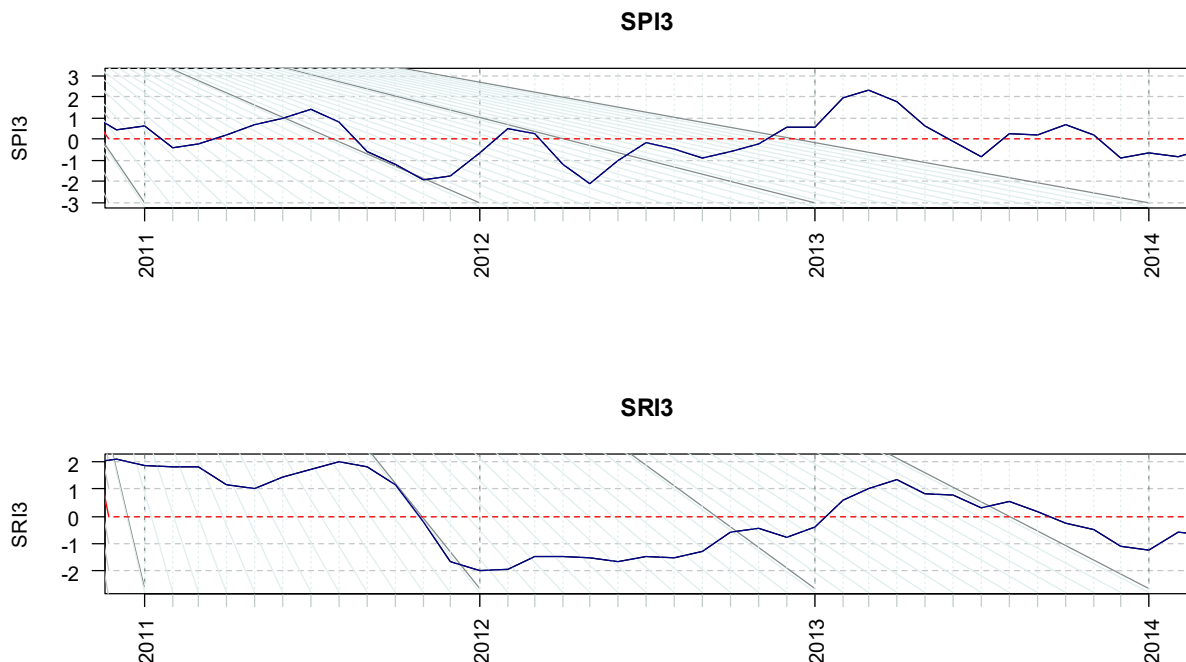
Rozdelenie GEV bolo následne použité pri výpočte SRI. Priebeh vypočítaných indexov pre mierku 1,2 a 3 mesiacov je zobrazený nižšie, na *Obrázok 4*. Rovnako ako pri indexe SPI platí, že index počítaný s menšou mierkou (napr. 1 mesiac) je vhodný na pozorovanie okamžitých, krátkodobých zmien hydrologického sucha. Index s mierkou 3 mesiace je schopný lepšie zachytiť dlhodobejšie a výdatnejšie hydrologické suchá.



Obrázok 4 Priebeh indexov SRI v mierkach 1,2 a 3 mesiace

Pri porovnaní vybraných suchých období je možné pozorovať, že hydrologické sucho nastupuje s istým oneskorením oproti meteorologickému. Tento jav sa označuje ako propagácia, alebo šírenie sucha. Ilustrujeme tento jav na období 2011-2013. Rok 2011 bol na Slovensku veľmi teplý [28][29]. V roku 2012 bolo prekonaných 23 rekordov absolútnej najvyššej dennej teploty od roku 1960 [30] je teda tiež možné hovoriť o výrazne teplom roku. Na *Obrázok 5* Je možné vidieť, že meteorologické sucho začalo (SPI kleslo pod hodnotu 0) v polovici augusta 2011. Hydrologické sucho začalo na konci októbra 2011. Jedná sa teda o 2 a pol – mesačný posun. Ďalšie meteorologické sucho začalo na

začiatku mája 2013. Hydrologické sucho v roku 2013 začalo na začiatku septembra. V tomto prípade ide o 4-mesačný posun.



Obrázok 5 Porovnanie indexov SPI a SRI pre obdobie 2011-2013

Jav propagácie sucha je možné hodnotiť a pozorovať na základe indexov sucha SPI a SRI. Aby však bolo možné povedať, aký je charakter propagácie sucha na Slovensku, bol by potrebný ďalší výskum zameraný na skúmanie korelácie SPI a SRI.

4. Záver

Sucho je jav postihujúci takmer všetky regióny sveta, Slovensko nevynechajúc. Keďže je sucho veľmi závažnou a nebezpečnou živelnou pohromou, je jeho monitoring mimoriadne dôležitý. Cieľom tejto práce bolo navrhnúť metódy kvantifikácie sucha vhodné pre Slovensko, konkrétne pre oblasť Trnavskej tabule. Na základe vykonaných analýz sme dokázali, že aj táto oblasť, ktorá nie je na Slovensku typicky najsuchšou, je často suchom postihovaná. Pre účely analýz sucha a včasný monitoring sa zväčša používajú indexy sucha, ktoré je možné vypočítať z relatívne ľahko dostupných klimatických a hydrologických údajov. V článku sme sa venovali meteorologickému a hydrologickému suchu. Na kvantifikáciu meteorologického sucha sme používali Štandardizovaný zrážkový index SPI a na kvantifikáciu hydrologického sucha Štandardizovaný odtokový index SRI. Oba indexy boli počítané pre obdobie 1.1.1985 – 31.12.2021 v mesačnom kroku. Dôležitou súčasťou výpočtu oboch indexov je správne určenie ich rozdelenia pravdepodobnosti. Pre index SPI je zaužívaným rozdelením gamma, ktoré bolo použité aj v tejto práci. Pre údaje odtečeného množstva, ktoré sa používajú pre výpočet SRI, však neexistuje univerzálne použiteľné rozdelenie. Časť článku je preto venovaná práve určaniu najvhodnejšieho rozdelenia distribúcie pre naše územie (Generalized Extreme Value distribution). Nakoľko tento index je na Slovensku používaný zriedka, považuje autorka takúto analýzu za prínosnú a užitočnú. Porovnanie indexov SPI a SRI načrtlo možnosť skúmania propagácie meteorologického a hydrologického sucha na Slovensku, čo je téma, ktorej sa chce autorka v budúcnosti venovať.

Literatúra

- [1] D. A. Wilhite and M. H. Glantz, "Understanding the Drought Phenomenon: the role of definitions", *Water International*, vol. 10, no. 3, pp. 111-120, 1985.
- [2] A. K. Mishra and V. P. Singh, "A review of drought concepts", *Journal of Hydrology*, vol. 391, no. 1-2, pp. 202-216, 2010.
- [3] S. H. Schneider, T. L. Root, and M. D. Mastrandrea, *Encyclopedia of Climate and Weather*, 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [4] A. Dai, "Drought under global warming: a review", *WIREs Climate Change*, vol. 2, no. 1, pp. 45-65, 2010.
- [5] S. Shukla, M. Safeeq, A. AghaKouchak, K. Guan, and C. Funk, "Temperature impacts on the water year 2014 drought in California", *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 11, pp. 4384-4393, 2015.
- [6] J. Tosun and M. Howlett, "Managing slow onset events related to climate change: the role of public bureaucracy", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 50, pp. 43-53, 2021.
- [7] K. Xu, D. Yang, H. Yang, Z. Li, Y. Qin, and Y. Shen, "Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective", *Journal of Hydrology*, vol. 526, pp. 253-264, 2015.
- [8] G. O. P. Obasi, "WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 75, no. 9, pp. 1655–1662, 1994.
- [9] K. Hewitt, *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*, 1st ed. UK: Addison-Wesley Longman, 1997.
- [10] D. A. Wilhite, "Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions", no. 69, pp. 1-22, 2000.
- [11] A. Dai, "Increasing drought under global warming in observations and models", *Nature Climate Change*, vol. 3, no. 1, pp. 52-58, 2013.
- [12] J. Kam, J. Sheffield, and E. F. Wood, "A multiscale analysis of drought and pluvial mechanisms for the Southeastern United States", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 119, no. 12, pp. 7348-7367, 2014.
- [13] M. T. Vu, V. S. Raghavan, and S. -Y. Liang, "Ensemble Climate Projection for Hydro-Meteorological Drought over a river basin in Central Highland, Vietnam", *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 427-433, 2015.
- [14] S. M. Vicente-Serrano, S. M. Quiring, M. Peña-Gallardo, S. Yuan, and F. Domínguez-Castro, "A review of environmental droughts: Increased risk under global warming?", *Earth-Science Reviews*, vol. 201, 2020.
- [15] D. Młyński, A. Wałęga, and A. Kuriqi, "Influence of meteorological drought on environmental flows in mountain catchments", *Ecological Indicators*, vol. 133, 2021.
- [16] X. Zhang, Z. Hao, V. P. Singh, Y. Zhang, S. Feng, Y. Xu, and F. Hao, "Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors", *Science of The Total Environment*, vol. 838, 2022.
- [17] T. B. McKee, N. J. Doesken, and J. Kleist, "The relationship of drought frequency and duration to time scales", 8th Conference on Applied Climatology, 1993.
- [19] N. B. Guttman, "Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm", *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 35, no. 2, pp. 311-322, 1999.
- [18] N. B. Guttman, "Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 34, no. 1, pp. 113-121, 1998.
- [20] World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), *Handbook of Drought Indicators and Indices*, 1st ed. Geneva: Integrated Drought Management Programme (IDMP), 2016.

- [21] D. C. Edwards and T. B. McKee, "Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Times Scales.", Atmospheric Science Paper, no. 634, pp. 1-30, 1997.
- [22] A. K. Mishra and V. P. Singh, "Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty", Journal of Geophysical Research, vol. 114, no. D6, 2009.
- [23] S. Shukla and A. W. Wood, "Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought", Geophysical Research Letters, vol. 35, no. 2, 2008.
- [24] O. M. Katipoğlu and R. Acar, "Evaluation of hydrologic droughts by using Standardized Runoff Index (SRI)", 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, 2019.
- [25] F. Sienz, O. Bothe, and K. Fraedrich, "Monitoring and quantifying future climate projections of dryness and wetness extremes: SPI bias", Hydrology and Earth System Sciences, vol. 16, no. 7, pp. 2143-2157, 2012.
- [26] J. H. Stagge, L. M. Tallaksen, L. Gudmundsson, A. F. Van Loon, and K. Stahl, "Response to comment on 'Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)'", International Journal of Climatology, vol. 36, no. 4, pp. 2132-2138, 2016.
- [27] S. Beguería and S. M. Vicente-Serrano, "SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index: R package version 1.7.", 2017.
- [28] O. Bochníček, "Rok 2011 je 10-tým najteplejším rokom, najteplejším s La Niña, s najnižším objemom arktického ľadu", 2011.
- [29] P. Matejovič, P. Faško, J. Pecho, P. Kajaba, and J. Košťálová, "Leto 2011 sa zaradilo medzi desať najteplejších liet najmenej za posledných 140 rokov", 2011.
- [30] G. Ivaňáková, "Bol rok 2012 „rekordérom“ v teplotných rekordoch?", 2013.

Pod'akovanie

Článok vznikol vďaka podpore projektu VEGA 1/0662/19.

Viera Rattayová¹

Študijný program: Krajinárstvo, ročník:2

ČASOVÁ A PRIESTOROVÁ DISTRIBÚCIA HODNÔT REFERENČNEJ EVAPOTRANSPIRÁCIE NÍŽINNÝCH OBLASTÍ SLOVENSKA

Abstract

The increasing occurrence of meteorological, hydrological and soil drought is caused by the changes in climatological variables, as the result of the global climate change. Evapotranspiration is one of the most important parts of the hydrological cycle, which affects surface runoff and drought effect.

Identifying the changes in evapotranspiration on the spatial and temporal scale gives us an essential tool for managing watersheds and agricultural land. The research aims to change in values of reference evapotranspiration (RE), designed to estimate the potential values of evapotranspiration in agricultural land. The source of the data is the database of the Slovak Hydrometeorological Institute. Missing values were supplemented by remote sensing data from dataset ERA5. The results showed significant differences in the seasonal course of RE in the Slovakia lowlands and the different trends in RE and related variables in selected areas.

Kľúčové slová / Key Words

referenčná evapotranspirácia, trendová analýza, solárna radiácia

1. Úvod

Evapotranspirácia je jednou z najdôležitejších hydrologických premenných, je nenahraditeľnou súčasťou rovnice hydrologickej bilancie a významne ovplyvňuje objem povrchového odtoku. Je ovplyvnená množstvom faktorov, vrátane klimatologických podmienok, podmienok prostredia a spôsobu využívania a manažmentu povodí.

Referenčná evapotranspirácia je klimatická charakteristika, ktorá vyjadruje evapotranspiračnú silu atmosféry (Allen et al., 1998). Jej hodnota je metodikou viazaná na referenčný porast, ktorým je hypotetická referenčná plodina s výškou 0,12m, povrchovou drsnosťou 70s/m a albedom 0,23, ktorá je blízka podmienkam extenzívne obrábanej trávnej plochy (Smith et al., 1990).

Zvýšenie dostupnosti dát využívaných na výpočet referenčnej evapotranspirácie priniesol rozvoj diaľkového prieskumu zeme. Mnohé vstupné parametre sú súčasťou globálnych modelov a reanalýz satelitných dát, čo otvára možnosti širokému spektru užívateľov v hydrológii, vodnom hospodárstve, manažmente povodí aj poľnohospodárstve pre širšie aplikovanie tohto konceptu.

Cieľom práce je špecifikovať priestorovú distribúciu hodnôt referenčnej evapotranspirácie pre vybrané územia na Slovensku a určiť trend vývoja jej hodnôt, ktorých znalosť je nevyhnutná pre správny manažment povodí, najmä v súvislosti s návrhom opatrení na predchádzanie sucha.

2. Metodika

Záujmovou oblasťou výskumu sú nížinné oblasti Slovenska, ktoré majú vysoký produkčný potenciál. Zoznam 27 vybraných nížinných klimatologických staníc bol rozdelený podľa geografického členenia na západ- Záhorská a Podunajská nížina, stred- Juhoslovenská kotlina a východ- Východoslovenská nížina. Klimatologické časové rady v dennom kroku pre obdobie 40 rokov (1980-2019) sme získali z databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMU).

Vstupnými dátami v dennom časovom kroku nevyhnutnými pre výpočet boli maximálna, minimálna a priemerná teplota vzduchu, aktuálny tlak vodných pár, rýchlosť vetra vo výške 2m nad povrchom a informácie o dĺžke slnečného svitu.

Radiácia na povrchu (net radiation) bola vypočítaná na základe rovnice opísanej v metodike FAO "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements" (Allen et al., 1998):

$$R_n = [(1 - \alpha) * R_s] - \left[\sigma * \left[\frac{T_{max,K} + T_{min,K}}{2} \right] * (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) * \left(1.35 * \frac{R_s}{R_{s0}} 0.35 \right) \right] \quad (1)$$

kde

R_n je radiácia na povrchu [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]; α je albedo; σ je Stefan-Boltzmannova konštanta [$4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]; R_s je prichádzajúca slnečná radiácia [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]; R_{s0} je slnečná radiácia jasnej oblohy [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]; $T_{max,k}$ je maximálna absolútna teplota vzduchu počas 24-hodinovej periódy [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$]; $T_{min,k}$ je minimálna absolútna teplota vzduchu počas 24-hodinovej periódy [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$]

Slnečná radiácia sa podľa FAO metodiky vypočíta na základe vzorca, kde je vstupným parametrom hodnota dĺžky slnečného svitu.

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (2)$$

Kde: R_s je krátkovlnná solárna radiácia [$\text{MJ m}^{-2} \text{ deň}^{-1}$]; n je aktuálna dĺžka slnečného svitu [h]; N je maximálne možné trvanie slnečného svitu [h]; R_a je extraterestriálna radiácia [$\text{MJ m}^{-2} \text{ deň}^{-1}$]; $a_s + b_s$ sú konštanty ($a_s = 0.25$, $b_s = 0.5$)

Časové rady aktuálnej dennej dĺžky slnečného svitu však obsahujú veľké množstvo chýbajúcich hodnôt a ich dĺžka tam, kde je táto veličina meraná, je často oveľa kratšia ako v prípade iných meraných veličín v stanici (Fig. 1). Dĺžku slnečného svitu zároveň nie je možné spoľahlivo odvodiť zo žiadnej inej klimatologickej premennej, čo predstavovalo značný nedostatok v získaných dátach, nakoľko je táto premenná nevyhnutná pre výpočet radiácie (net radiation). Tá je vstupným parametrom pre výpočet referenčnej evapotranspirácie a nedostupnosť dát by preto spôsobila diskontinuitu časového radu.

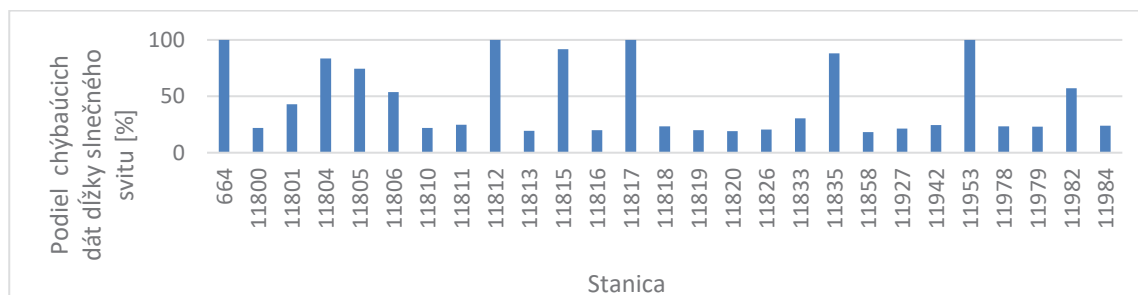


Fig. 1: Podiel chýbajúcich dát dĺžky slnečného svitu v jednotlivých staniciach

Rozhodli sme sa preto chýbajúce dáta radiácie, ktoré nebolo možné vypočítať, nahradiť reanalýzou satelitných dát radiácie ERA5 zo zdroja Copernicus. Dáta reanalýzy boli spracované z pôvodného hodinového kroku na denný, a následne boli pomocou jednoduchého lineárneho modelu

kalibrované na základe vypočítaných hodnôt radiácie z dostupných klimatologických dát. Lineárna závislosť a prislúchajúce konštanty boli odvodené pre každú stanicu individuálne. Medzi všetkými časovými radmi radiácie vypočítanými z klimatologických vstupov a dátami z reanalízy Era5 je stredná korelácia s hodnotou Pearsonovho korelačného koeficientu 0,69 s priemernými hodnotami korelačného vzťahu $x=6.64$ a $y=10.67$. Nakalibrovanými hodnotami radiácie z reanalízy Era5 boli následne nahradené chýbajúce denné dáta v časových radoch.

Na výpočet referenčnej evapotranspirácie (ET₀) bola využitá celosvetovo využívaná FAO Penman–Monteith metóda (Allen et al., 1998), ktorá je zároveň považovaná za referenčnú metódu pre výpočet ET₀. Táto metóda vyžaduje veľké množstvo vstupných dát, preto je na našom území využívaná minimálne, prevažne v štúdiách zaoberajúcich sa analýzou na malých územiach či jednotlivých staniaciach (Kaya et al., 2021; Matejka & Hurtalová, 2005). Jej výsledky sú však veľmi dobre aplikovateľné v hydrológii malých povodí, v manažmente povodí aj v poľnohospodárstve. Rovnica na výpočet referenčnej evapotranspirácie má tvar (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (3)$$

Kde : ET₀ je referenčná evapotranspirácia [mm.deň⁻¹]; R_n je radiácia na povrchu plodiny [MJ m⁻² deň⁻¹]; G je hustota tepelného toku pre pôdu [MJ m⁻² deň⁻¹]; T je priemerná denná teplota vyduchu v 2 m nad povrchom [°C]; u₂ je rýchlosť vetra v 2m nad povrchom [m s⁻¹]; e_s je tlak nasýtených vodných pár [kPa]; e_a je aktuálny tlak vodných pár [kPa]; D je sklon krivky tlaku vodných pár [kPa °C⁻¹]; g je psychrometrická konštanta [kPa °C⁻¹].

Hodnoty dennej referenčnej evapotranspirácie boli následne prepočítané na mesačný a ročný časový krok, ktorý je vhodnejší pre porovnanie rozdielov medzi skúmanými územiami a na určenie sezónnej distribúcie hodnôt a trendov.

Na testovanie trendov v mesačných a ročných hodnotách referenčnej evapotranspirácie bola použitá Menn-Kendallová neparametrická metóda (Bevan & Kendall, 1971; Mann, 1945). Táto metóda je odporúčanou metódou na testovanie trendov v klimatologických dátach podľa Svetovej Meteorologickej Organizácie (WMO, 2009). Pre výpočet sklonu trendovej čiary bola využitá metóda Theil-Sena (Sen, 1968; Theil, 1992). Trendy boli vizualizované pomocou jednoduchej lineárnej regresie, s využitím rovnice lineárnej trendovej čiary.

3. Výsledky

Výsledky výskumu ukazujú maximálne hodnoty priemernej mesačnej evapotranspirácie vo všetkých skúmaných oblastiach v mesiaci júl, minimálne v mesiacoch december a január (Fig.2). Sezónne hodnoty mesačnej referenčnej evapotranspirácie sú v priemere najvyššie v staniaciach Východoslovenskej nížiny a najnižšie v Juhoslovenskej kotline. Inflexné body týchto priebehov sú však situované v rovnakých mesiacoch a hodnoty v jednotlivých mesiacoch majú relatívne nízky rozptyl, čo vypovedá o rovnakom správaní ročného chodu mesačných hodnôt referenčnej evapotranspirácie na celom území Slovenska.

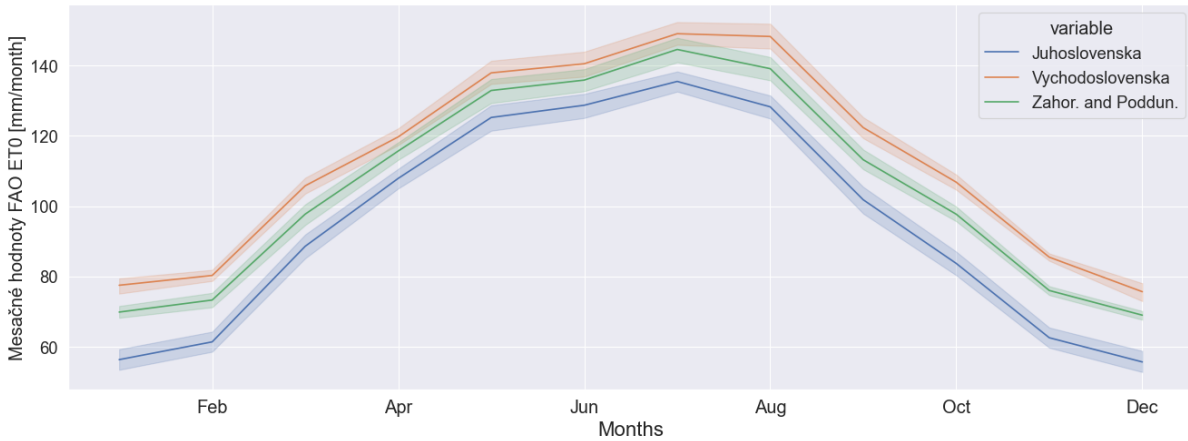


Fig.2: Sezónny priebeh mesačných hodnôt referenčnej evapotranspirácie pre vybrané povodia

Jednoduchou lineárnou regresiou bol odvodený lineárny trend zmeny ročných hodnôt referenčnej evapotranspirácie, priemerných ročných hodnôt teploty vzduchu a ročných úhrnov zrážok ako priemer zo staníc na vybraných územiach (Fig. 3).

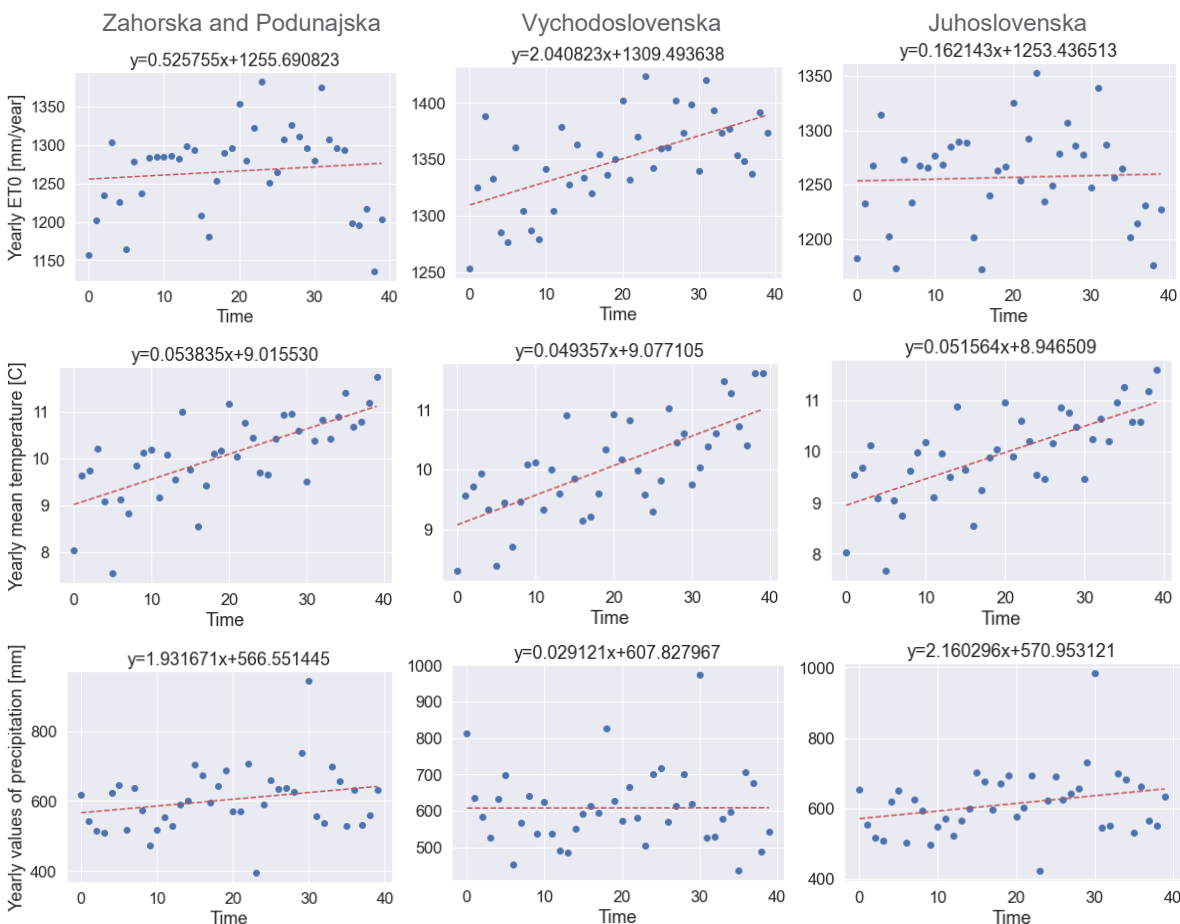


Fig.3: Trendy v hodnotách ročnej referenčnej evapotranspirácie, ročných úhrnov zrážok a priemernej ročnej teploty vzduchu

Trendy v mesačných hodnotách referenčnej evapotranspirácie, zrážok a teploty vzduchu boli následne testované pomocou Mann-Kendallovej metódy testovania lineárnych trendov a priebeh týchto trendov bol vyjadrený Theil-Senovym sklonom.

V dátach referenčnej evapotranspirácie v mesačnom kroku bol zaznamenaný významný rastúci trend v prípade klimatologických staníc na území Východoslovenskej nížiny s p-hodnotou 0.029 a sklonom 0,01. Pri podrobnejšej analýze po rozdelení časového radu na teplý a chladný polrok bol zaznamenaný významný rastúci trend len v prípade teplého polroku s p-hodnotou $9,53 \cdot 10^{-7}$. Tento trend je rastúci v apríli a od júna do augusta. Dôvodom sú pravdepodobne vzrastajúce trendy priemernej mesačnej teploty vzduchu (Tab.1).

V prípade trendov mesačných hodnôt referenčnej evapotranspirácie v staniách v Záhorskej a Podunajskej nížine môžeme zaznamenať rastúci trend len v mesiaci jún. Tento trend korešponduje s trendom nárastu priemernej dennej teploty v letných mesiacoch (Tab. 1).

Analýzou trendov mesačných hodnôt referenčnej evapotranspirácie bol zaznamenaný významný klesajúci trend v staniách Juhoslovenskej Kotliny. Tento trend bol identifikovaný v chladnom polroku v mesiacoch október až február. Príčinu tohto javu nie je možné na základe výsledkov trendovej analýzy mesačných zrážok a priemernej mesačnej teploty identifikovať.

Tab.1: Sezónne trendy mesačných hodnôt referenčnej evapotranspirácie, zrážok a priemernej teploty vzduchu

Juhoslovenská nížina	Mesiac											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
ET ₀	↓	↓							↓	↓	↓	↓
Zrážky	↑	↑					↑	↑				
Tpriem		↑		↑		↑	↑	↑			↑	

Zahor. and Podd. Nížina	Mesiac											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
ET ₀				↑		↑						
Zrážky												
Tpriem				↑		↑	↑	↑			↑	

Východoslovenská nížina	Mesiac											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
ET ₀				↑		↑	↑	↑			↑	
Zrážky												
Tpriem		↑		↑		↑	↑	↑			↑	

4. Záver

Z výsledkov výskumu môžeme identifikovať rastúci trend referenčnej evapotranspirácie na území Záhorskej, Podunajskej a Východoslovenskej nížiny a to najmä v letných mesiacoch. Dôvodom tohoto nárastu je pravdepodobne rastúci trend mesačných zrážok v rovnakom období na týchto územiach. V prípade Juhoslovenskej kotliny bol zaznamenaný klesajúci trend mesačných hodnôt referenčnej evapotranspirácie v studenom polroku v mesiacoch október až február. Tento trend nie je možné vysvetliť zmenou v trendoch zrážok alebo teplôt, preto bude predmetom ďalšej štúdie, kde bude potrebné zohľadniť vplyv iných klimatologických premenných, prípadne vyhodnotiť zmeny vo využívaní krajiny.

Sezónny priebeh mesačných hodnôt referenčnej evapotranspirácie je približne rovnaký pre všetky územia, rozdiel je zreteľný v priemerných hodnotách v jednotlivých mesiacoch, kedy sú najvyššie hodnoty kontinuálne pozorované v prípade Východoslovenskej nížiny a najnižšie v prípade Podunajskej kotliny.

Záverom výskumu je zistenie, že zatiaľ čo na území Východoslovenskej a Záhorskej a Podunajskej nížiny sa referenčná evapotranspirácia mení v čase podobne, teda rastie v teplom polroku, v prípade Juhoslovenskej kotliny je trend klesajúci v chladnom polroku. Nakoľko trendy v priemerných mesačných teplotách neboli v zimnom období pre toto územie identifikované a trendy v zrážkach sú naopak rastúce v letnom období a vo februári, vyžaduje si toto zistenie rozsiahlejšiu štúdiu so zohľadnením viacerých možných vplyvov zmeny prostredia aj klímy.

5. PodĎakovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: „Údajová a vedomostná podpora pre systémy rozhodovania a strategického plánovania v oblasti adaptácie poľnohospodárskej krajiny na klimatické zmeny a minimalizáciu degradácie poľnohospodárskych pôd“ (kód ITMS2014+ 313011W580), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

6. Literatúra

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & W, a B. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Bevan, J. M., & Kendall, M. G. (1971). Rank Correlation Methods. *The Statistician*, 20(3). <https://doi.org/10.2307/2986801>
- Kaya, Y. Z., Zelenakova, M., Üneş, F., Demirci, M., Hlavata, H., & Mesáros, P. (2021). Estimation of daily evapotranspiration in Košice City (Slovakia) using several soft computing techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1–2). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03525-z>
- Mann, H. B. (1945). Non-Parametric Test Against Trend. *Econometrica*, 13(3).
- Matejka František, & Hortalová Tatjana. (2005). VZŤAH MEDZI POTENCIÁLNOU A REFERENČNOU EVAPOTRAN-SPIRÁCIU. 39–46.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324). <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Smith, M., Segeren, A., Santos Pereira, L., Perrier, A., & Allen, R. (1990). *Report on the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. Rome, Italy, 28-31 May 1990*. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UIJS>
- Theil, H. (1992). *A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis*. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8_20
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1). <https://doi.org/10.2307/210739>
- World Meteorological Organisation (WMO). (2009). Guide to Hydrological Practices: Volume II: Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices (sixth edition). In *WMO Report No. 168: Vol. II* (Issue 168). <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.546602>
- Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. In *Agricultural Water Management* (Vol. 232). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>

**THEORY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY
OF BUILDINGS**

Viktória Állóová¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, ročník: druhý

FAKTORY VPLÝVAJÚCE NA VNÚTORNÉ PROSTREDIE SKLENÍKOV A ICH VPLYV NA ENERGETICKÚ NÁROČNOSŤ

FACTORS AFFECTING THE INDOOR CLIMATE OF GREENHOUSES AND THEIR IMPACT ON ENERGY DEMAND

Abstract

When evaluating the indoor environment of a greenhouse, consideration of various factors affecting its quality is vital. Besides the conventional factors, such as air temperature, relative humidity and air velocity, some uncommon factors are considered. Vapor pressure deficit, for example, is an interesting factor based on temperature and relative humidity ratio between the leaves of the crop and the air. Based on this factor we can determine the condition of the crop and prevent diseases and fungi, and thereby ensure expected amount of crop. An interesting phenomena occurs during the sunrise, when the difference between the indoor and outdoor air temperature and high relative humidity in the greenhouse lead to water condensating on the inner surface of the glass – the outer shell of the greenhouse. This article focuses on identifying the factors affecting the indoor air and deals with the issue of high humidity in greenhouses.

Kľúčové slová / Key Words

vnútorné prostredie; skleník; relatívna vlhkosť vzduchu; teplota vzduchu; rozdiel tlaku vodných pár

1. Faktory vplyvajúce na vnútorné prostredie skleníkov

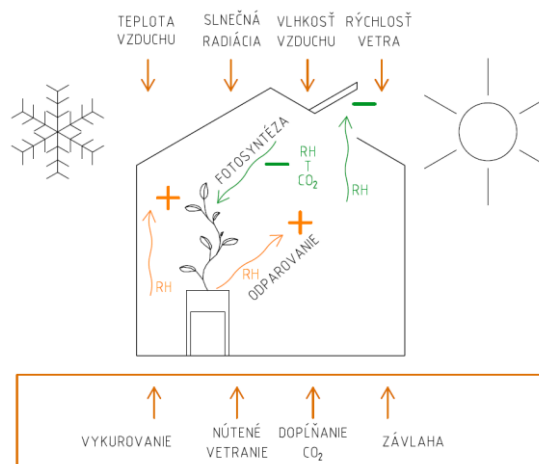
Niektoré faktory ovplyvňujúce vnútorné prostredie skleníkov sa zásadne líšia od faktorov ovplyvňujúcich obytnú budovu. Teplota vzduchu, relatívna vlhkosť vzduchu, svetelné podmienky, koncentrácia oxidu uhličitého vo vzduchu, teplota listov rastlín, výskyt chorôb a hmyzu, ako aj miera dávkovania oxidu uhličitého sa v priebehu dňa môže veľmi rýchlo meniť a je nutné tieto hodnoty priebežne sledovať. Nezanedbateľným faktorom je aj tepelná strata, ktorá vznikne pri biologickej funkcii pestovaných rastlín. Rastliny pri fotosyntéze za prítomnosti vody premieňajú oxid uhličitý na kyslík. Tento proces je endotermickou chemickou reakciou, kedy sa časť tepla z okolia absorbuje a dochádza k ochladeniu okolitého vzduchu. Ak zohľadníme veľkosť teplovýmennej plochy listov rastlín, môžeme uvažovať s veľkým úbytkom tepla pri samotnej fyziologickej funkcii rastlín, ktorý je nutné kompenzovať vykurovacou sústavou aj v prechodnom období.

Svetlo je podmieňujúcim faktorom priebehu fotosyntézy, preto sa niektoré skleníky počas zimného obdobia umelo osvetľujú, čo vedie k zvýšeniu množstva úrody a skráteniu vegetačného obdobia. V letných mesiacoch je naopak nutnosť aplikácie tienenia za účelom neprekročenia maximálnej teploty vzduchu v skleníku. Na tienenie sa využívajú nátery z exteriérovej strany obvodového plášťa alebo špeciálne clony z priesvitného materiálu, ktoré sú naopak aplikované na vnútornú stranu obvodového plášťa a v závislosti od miery oslnenia sú nastaviteľné.

¹ Viktória Állóová, Ing. , Stavebná fakulta, Katedra TZB, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Vetranie je spravidla zabezpečené prirodzeným spôsobom, prostredníctvom otvárateľných okenných tabúl na strešnej a obvodovej konštrukcii, prípadne je doplnené o nútené vetranie pomocou vzduchotechnických zariadení a prvkov – ventilátorov či distribučných prvkov.

V prechodnom a zimnom období roka je v skleníkoch zabezpečené vykurovanie a kontrolované dopĺňanie oxidu uhličitého. Počas celého roka je v skleníkoch zabezpečená závlaha predovšetkým hydroponickou metódou, kedy sa priamo ku koreňom pestovanej rastliny distribuuje potrebné množstvo vody a zmesi minerálnych látok [1], [2].



Obr. 1: Faktory pôsobiace na vnútorné prostredie skleníkov [autor]

1.1 Teplota vnútorného vzduchu θ_{air}

Požadovaná teplota vnútorného vzduchu je vo vykurovacom období spravidla zabezpečená teplovodným vykurovaním s použitím teplovodných rozvodov a vykurovacích telies z hladkých, prípadne rebrových rúr osadených v rôznych výškach skleníka. Jedná sa o teplotu suchého teplomera. Požadovaná teplota vzduchu v skleníkoch určených na pestovania paradajok a uhoriek je uvedená v Tab. 1.

1.2 Teplota listov rastlín θ_{leaf}

Teplota listov rastlín tiež ovplyvňuje rast paradajok, je zohľadnená pri rozdiel tlaku vodných pár a priamo súvisí s fyziologickými procesmi prebiehajúcimi v rastline [3]. Povrchová teplota listov sa sníma pomocou infračervených snímačov. V prípade zdravej rastliny je teplota listov o 2 K nižšia, ako teplota okolitého vzduchu.

1.3 Relatívna vlhkosť vzduchu φ_{air}

Celkové množstvo vlhkosti v skleníku je výsledkom kondenzácie vodných pár na povrchu obvodového plášťa dôsledkom rozdielu vonkajšej a vnútornej teploty vzduchu, straty vlhkosti vzduchu prirodzeným alebo núteným vetraním, odparovania závlahovej vody z pôdy a absorpciou vlhkosti samotnými rastlinami (Obr. 1). Pre väčšinu skleníkových odrôd paradajok a uhoriek sa odporúča rozsah relatívnej vlhkosti medzi 60 – 85 %. Navyše, optimálny rozsah relatívnej vlhkosti počas celého štádia rastu paradajok sa navrhuje medzi 50 – 70 %. Z fyziologického hľadiska má relatívna vlhkosť vzduchu najvýraznejší vplyv na rastliny ovplyvňovaním rýchlosti transpirácie. Hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu mimo optimálnych hodnôt výrazne vplyvajú na množstvo absorbovanej vody rastlinami [1], [2], [3].

1.4 Rozdiel tlaku vodných pár (VPD – Vapour pressure deficit)

Hlavný parameter na kontrolu príjmu vody rastlinami v skleníkovom prostredí, ktorý ovplyvňuje fyziologické procesy rastliny, je rozdiel tlaku vodných pár. Je hnacou silou pohybu vody medzi koreňmi a listami, tzv. transpirácie. Tlak nasýtenej vodnej pary rastie exponenciálne so zvýšením teploty vzduchu. Vysoký rozdiel tlaku vodných pár (suchý vzduch) urýchľuje transpiračné sily pôsobiace na rastlinu, môže spôsobiť vädnutie, a v prípade, ak príjem vody cez koreňovú sústavu dlhodobo nekorešponduje množstvu úbytku vody spôsobeným vyparovaním cez listovú plochu, rastlina odumiera. Naopak, veľmi nízky rozdiel tlaku vodných pár (vysoká relatívna vlhkosť vzduchu), na ktorú rastliny reagujú aj pri dostatočnom zavlažovaní uzatváraním prieduchov, vedie k znemožneniu transpirácie. Spomalenie alebo zastavenie transpirácie spôsobuje v rastlinách nedostatok minerálov vedúci k vzniku nekrózy. Rozdiel tlaku vodných pár môžeme číselne určiť nasledujúcim vzťahom [3]:

$$VPD(\theta_{air}, \theta_{leaf}, \varphi_{air}) = VP_{sat} - VP_{air} \quad (\text{kPa}) \quad (1)$$

$$VP_{sat} = \frac{610,7 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot \theta_{leaf}}{\theta_{leaf} + 237,3}}}{1000} \quad (\text{kPa}) \quad (2)$$

$$VP_{air} = \frac{610,7 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot \theta_{air}}{\theta_{air} + 237,3}}}{1000} \cdot \frac{\varphi_{air}}{100} \quad (\text{kPa}) \quad (3)$$

kde: θ_{air} – teplota vzduchu, φ_{air} – relatívna vlhkosť vzduchu, VPD – rozdiel tlaku vodných pár

1.5 Obsah oxidu uhličitého (CO₂)

Oxid uhličitý je jeden zo základných prvkov zabezpečujúcich priebeh fotosyntézy, z toho dôvodu je bezpodmienečné pri pestovaní rastlín v krytých priestoroch zabezpečiť jeho prísun. V prechodnom a zimnom období vzniká na rozdiel od letných mesiacov potreba dopĺňania CO₂ do priestorov skleníka z dôvodu zníženej miery výmeny vzduchu pri nevýraznom vetraní. Hraničná úroveň koncentrácie CO₂ pri pestovaní zeleniny je 360 ppm, ktorá predstavuje prirodzenú koncentráciu oxidu uhličitého v exteriéri. Z hľadiska maximálnej efektívnosti pestovania sa uvádza najvyššia povolená hodnota koncentrácie CO₂ 1500 ppm. Pri vyšších koncentráciách sa znižuje efektívnosť produkcie z dôvodu nižšej intenzity fotosyntézy. V prípade prekročenia tejto koncentrácie dochádza k poškodeniu plodov rastlín, pri koncentrácií nad 3000 ppm dochádza k odumretiu rastliny [5], [1]. Zvyšovanie koncentrácie CO₂ vo vzduchu má isté obmedzenia, pretože nadmerná hladina CO₂ môže viesť k poškodeniu rastlín, resp. byť nebezpečná pre pracovníkov. Zo zdravotného hľadiska ľudí môže byť hladina 2000 ppm indikátorom bolesti hlavy, pocitu ospalosti a porúch koncentrácie. Pri úrovni CO₂ nad 5000 ppm sa vyskytuje zrýchlený tep a koncentrácia nad 45000 ppm vedie k strate vedomia a smrti [1]. Maximálna povolená úroveň koncentrácie CO₂ pre ľudí je 1350 ppm nad vonkajšie parametre [4].

Tab. 1 Súhrn okrajových podmienok pestovania paradajok a uhoriek v skleníkoch [3], [4]

	Optimálny rozsah parametrov				Hraničný rozsah parametrov			
	θ_{air} (°C)	φ_{air} (%)	VPD (kPa)	CO ₂ (ppm)	θ_{air} (°C)	φ_{air} (%)	VPD (kPa)	CO ₂ (ppm)
Minimálna hodnota	17	60	0,4	500	10	55	-	360
Maximálna hodnota	30	80	1,6	1 200	35	85	-	3 000

2. Spotrebiteľské okruhy vykurovacej sústavy v skleníkoch

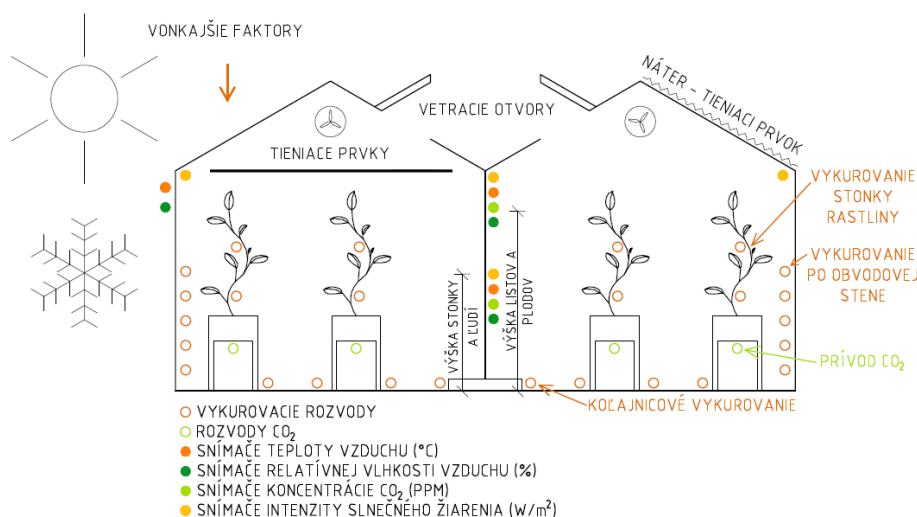
Vykurovacie okruhy sú tvorené oceľovými potrubiami bez tepelnej izolácie uloženými v rôznych výškach a miestach. Vďaka chýbajúcej tepelnej izolácii dochádza k prenosu tepla medzi potrubím s vykurovacou vodou a okolitým vzduchom. V skleníkoch rozlišujeme spravidla 3 vykurovacie okruhy, a to:

- vykurovací okruh po obvode skleníka (teplotný spád 50/40 °C),
- vykurovací okruh koľajnicový – nad podlahou (teplotný spád 50/40 °C),
- vykurovací okruh vegetačný – pri stonke rastlín (teplotný spád 40 / 20 °C).

V skleníkoch sa zabezpečuje aj ohrev závlahovej vody, ktorá sa ohrieva v akumuláčnych zásobníkoch podobným spôsobom ako v zásobníkových ohrievačoch (teplotný spád 25/10 °C).

Ďalšími spotrebiteľskými okruhmi môžu byť:

- vykurovanie skladových priestorov a priestorov baliarní,
- vykurovanie kancelárskych priestorov a šatní,
- ohrev teplej vody (TV) pre personál.



Obr. 2: Umiestnenie vykurovacích okruhov a snímačov v skleníkoch [autor]

3. Prvky a zariadenia na meranie faktorov a zabezpečenie požadovanej mikroklimy

Za účelom vhodného posúdenia vnútornej klímy skleníka je nutné vykonať merania pre rôzne faktory ovplyvňujúce vnútornú klímu súčasne. V skleníku je nutné uvažovať s vysokými tepelnými ziskami v dôsledku slnečnej radiácie. Pre tento faktor sa uvažuje s meraniami tepelných ziskov na viacerých miestach a výškach skleníka. Teplota a relatívna vlhkosť vzduchu sa spravidla zaznamenáva jedným snímačom. Pre monitoring CO₂ v skleníkoch a fóliovníkoch sa využívajú infračervené analyzátory, ktoré vykazujú dlhodobú stabilitu a umožňujú kontinuálne meranie jeho koncentrácie. Z hľadiska veľkosti pôdorysných rozmerov skleníkov sa väčšinou využívajú bezdrôtové snímače, ktoré odosielajú namerané údaje do centrálného riadiaceho počítača, kde sa nazbierané dáta vyhodnocujú a v prípade potreby sa pristupuje k regulácii jednotlivých parametrov [6].

Snímače jednotlivých parametrov prostredia sa prednostne umiestňujú v skupinách, v otvorenom priestore, upevňujú sa na konštrukciu skleníka v určitých vzdialenostiach (určené rozponom medzi nosnými konštrukciami – stĺpmi). Umiestnenie skupín snímačov je závislé od

pôdorysných rozmeroch skleníka. Výška osadenia meracích prístrojov závisí od výšky samotnej konštrukcie skleníka a výšky osadenia rastlín. Spravidla sa výška skleníkov používaných na Slovensku pohybuje v rozmedzí 5 - 6,5 m. Pri hydroponickej závlaha sú korene rastlín uložené na stoloch vo výške približne 1 m od podlahy. Vo výške približne 1,5 m sa osadzuje najnižšie uložená skupina snímačov intenzity slnečného žiarenia, teploty vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu a koncentrácie CO₂. Táto výška je vhodná na vyhodnotenie parametrov meraní pre personál vykonávajúci starostlivosť o rastliny a zber, ako aj pre stonku rastlín, prípadne v začiatkových fázach vývinu pre celú rastlinu. Druhá skupina týchto snímačov sa osadzuje vo výške približne 2,5 - 3,0 m. Táto výška sa považuje za najvyššiu výšku rastliny – listov a plodov. V prípade, ak rastlina dosiahne túto výšku, jej stonka sa po dĺžke stola posúva bočným smerom, čím je zabezpečená väčšia pestovateľská plocha. V tejto výške sa ľudia zdržiavajú len výnimočne a krátkodobo a to počas zberu z vysokozdvížných vozíkov, ktoré sa posúvajú po rozvodoch vykurovania – koľajniciach. Snímače teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu sa umiestňujú aj na fasádu skleníka z exteriérovej strany, spravidla na každú svetovú stranu [6]. Schéma osadenia snímačov a vykurovacej sústavy je znázornená na Obr. 2.

Zariadeniami na zabezpečenie požadovanej mikroklimy rozumieme technické vybavenie skleníka ako vykurovanie, vetranie (prirodzené alebo nútené), prívod oxidu uhličitého. Základným predpokladom správnej funkcie a efektívneho pestovania je priebežné sledovanie (meranie) a zaznamenanie údajov jednotlivých faktorov ovplyvňujúcich vnútorné prostredie skleníka. Zaznamenané údaje sa zobrazujú a vyhodnocujú v centrálnom počítači v riadiacej miestnosti. Z tejto miestnosti sa automaticky ovládajú všetky funkcie ako regulácia vykurovania a vetrania, dodávky CO₂, závlahy a iné funkcie chemického a biologického charakteru súvisiace s pestovaním. Z praxe je však zrejmé, že mnoho skleníkových hospodárstiev na Slovensku nedisponuje automatickou reguláciou všetkých parametrov vplyvujúcich na vnútorné prostredie skleníkového hospodárstva.

4. Kondenzácia vodných pár na vnútornej strane obvodovej konštrukcie

Obvodovú konštrukciu skleníka tvorí oceľová konštrukcia v spojení so sklenenou výplňou. Jedná sa o číre sklo hrúbky 4 - 6 mm. Počas výskumu sme spozorovali kondenzáciu vodných pár na vnútornej strane obvodovej konštrukcie skleníka v čase svitu slnka. Dôvodom tohto fenoménu je náhla zmena teploty vnútorného vzduchu v dôsledku slnečného žiarenia. Skleník je schopný zachytiť slnečné lúče, ktoré sa vo vnútri skleníka premenia na teplo, ktoré bez vetrania nedokáže zo skleníka uniknúť. Pri slnečnom svite sa náhle zvýši teplota vzduchu, a keďže je vlhkosť vzduchu veľmi vysoká, v rozmedzí 70 - 85 %, zvyšuje sa aj teplota rosného bodu. V mieste styku vnútorného nadmerne vlhkého vzduchu so studenou konštrukciou skleníka dochádza ku kondenzácii pary na vnútornom povrchu obvodovej konštrukcie. Toto však vedie k zvýšenej pravdepodobnosti vzniku plesne, čomu je v skleníkoch nutné zabrániť za účelom ochrany pestovaných rastlín.

5. Záver

V skleníkoch bez dostatočnej miery vetrania (či už prirodzeného, alebo núteného) sa problém kondenzácie vodných pár na povrchu obvodovej konštrukcie rieši spustením vykurovacej sústavy na niekoľko hodín (v niektorých prípadoch len minút) za účelom suchého ohrevu vzduchu, čím sa zníži relatívna vlhkosť, ako aj teplota rosného bodu. Takéto spustenie je energeticky veľmi náročné, pretože vyžaduje spustenie kotlov vysokého výkonu (spravidla sa výkon kotlov v skleníkoch pohybuje okolo 4 - 5 MW). Riešením by mohlo byť zabezpečenie dostatočnej výmeny vzduchu, čím by sa znížila teplota vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu a teplota rosného bodu. Energetická náročnosť vetracej sústavy je mnohonásobne menšia, pretože sa uvažuje len so spotrebou elektrickej energie pre ventilátory, pričom pri ohreve vzduchu vykurovacou sústavou uvažujeme s potrebou

elektrickej energie pre pohon čerpadiel, pre spustenie kotlov a so spotrebou plynu alebo iného primárneho zdroja tepla.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantu VEGA 1/0303/21, grantu VEGA 1/0304/21 a projektu KEGA 005/STU-4/2021.

Literatúra

- [1] Šlosár, J. Špeciálne zeleninárstvo. Nitra: Vydavateľstvo SPU, 2017. ISBN 978-80-5521625-6
- [2] Kóňa, J. - Kóňová, E. Rajčiak jedlý (*Lycopersicum esculentum* Mill.). Nitra: Garmond, 2008. 96 s. ISBN 978-80-89148-46-2.
- [3] Shamshiri, R.R. – Jones, J.W – Thorp, K.R. – Ahmad, D. – Che Man H. – Taheri, S. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics*, 2018. 32. 287-302. 10.1515/intag-2017-0005.
- [4] STN EN 16798-1 (2019)
- [5] Li, G. et al. Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018. 167. 012019. 10.1088/1755-1315/167/1/012019.
- [6] Rezvani, Moin & Abyaneh, Hamid & Shamshiri, Redmond & Balasundram, Siva & Dworak, Volker & Goodarzi, Mohsen & Sultan, Muhammad & Mahns, Benjamin. IoT-Based Sensor Data Fusion for Determining Optimality Degrees of Microclimate Parameters in Commercial Greenhouse Production of Tomato. *Sensors*, 2020. 20. 6474. 10.3390/s20226474.

Barbora Junasová¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 4. ročník

OPTIMALIZÁCIA SYSTÉMOV SÁLAVÉHO VYKUROVANIA A CHLADENIA V OBNOVOVANÝCH BUDOVÁCH

ADAPTATION OF RADIANT HEATING AND COOLING SYSTEMS IN RENOVATED BUILDINGS

Abstract

This paper focuses on the design adaptation of a ceiling and wall radiant heating/cooling system with pipes placed in plaster and a wall system with pipes embedded in additional masonry. These systems are suitable for use in new buildings, but the aim of this study is to provide conceptual recommendations regarding the design of radiant heating and cooling in renovated buildings. Two radiant systems were chosen, which are potentially suitable for the reconstruction of the building. These systems are ceiling mounted with pipes attached to the supporting structure and pipes attached to the existing wall. The systems were studied in the heating operation mode, but the results are also applicable to cooling conditions, provided that the temperature difference between the water temperature and the room temperature is similar to the heating cases. Parameters considered in this study included placement of thermal insulation on the inner/outer surface of the thermal core, tube spacing, wall thickness, and thermal conductivity of the core. The influence of these parameters on the heat output and losses and on the homogeneity of the surface temperature was studied. To achieve this goal, a simulation model was created in a specialized and verified computer program. The result is recommendations for the design of radiant heating systems that can be applied to existing buildings.

Kľúčové slová

Sálavé vykurovanie/chladenie, rekonštrukcia budov

1. Úvod

Sálavé vykurovanie a chladenie sa bežne používa v novopostavených budovách, pretože poskytuje výhody v porovnaní s konvekčnými systémami, ako sú fancoily, radiátory a vzduchové výustky [1], [2], [3], [4]. Medzi najznámejšie výhody sálavých systémov patrí vhodnosť kombinácie s obnoviteľnými zdrojmi energie vďaka teplote vody blízkej izbovej teplote [5], [6], [7], [8], komfortnému tepelnému prostrediu [9], [10], [11] a využitie tepelnej hmoty na posun špičkového zaťaženia [12], [13], [14]. Tieto priaznivé vlastnosti by mohli urobiť zo sálavých systémov vhodné riešenie vykurovania a chladenia pre modernizáciu budov.

Pri modernizácii budov môže byť umiestnenie rúrok priamo na existujúcu stropnú alebo stenovú konštrukciu praktické, pretože je to jednoduché a vedie k relatívne vysokému tepelnému výkonu a nízkym tepelným stratám [15]. Tepelné charakteristiky systému závisia od vodivosti tepelného jadra a vzdialenosti potrubia. Použitie izolačného tepelného jadra má za následok rýchlu tepelnú odozvu, zatiaľ čo vodivé jadro spomaľuje tepelnú odozvu, ale poskytuje potenciál na akumuláciu tepla a zvyšuje maximálny tepelný výkon [16], [17].

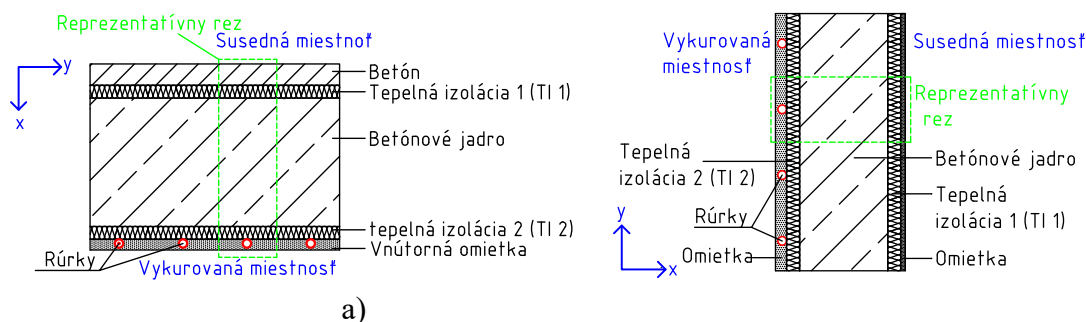
¹ Barbora, Junasová, Ing., Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Numerický model reprezentatívnych sálavých stien a stropov bol vytvorený pomocou overeného výpočtového modelu. Konštrukčné parametre zahŕňali prítomnosť, hrúbku a umiestnenie tepelnej izolácie, vzdialenosť a umiestnenie rúrok, tepelnú vodivosť a hrúbku betónového jadra, strednú teplotu vody, prítomnosť hliníkového roznášacieho plechu na zvýšenie prenosu tepla a umiestnenie systému na jednej alebo oboch stranách steny. Výsledky simulácií uľahčia proces navrhovania systémov a možno ich aplikovať na rôzne situácie, ktoré môžu nastať počas rekonštrukcie budov. Štúdia sa zameriava predovšetkým na existujúce miestnosti, ale výsledky je možné aplikovať aj na novostavby.

Tento príspevok sa zameriava na prispôsobenie návrhu vybraných dvoch systémov stropného a stenového sálavého vykurovania/chladenia s rúrkami umiestnenými v omietke. Na tento účel bol vytvorený simulačný model na výpočet šírenia tepelného toku v odovzdávacom prvku. Skúmal sa vplyv umiestnenia tepelnej izolácie na vnútorný/vonkajší povrch tepelného jadra, rozstupu rúrok, hrúbky steny a tepelnej vodivosti jadra na tepelný výkon a straty a na homogenitu povrchovej teploty. Výpočty sa vykonali najmä pre režim vykurovania, no výsledky sú použiteľné aj pre chladenie. Prezentované informácie predstavujú čiastkové výsledky výskumu zameraného na aplikovanie systémov sálavého vykurovania a chladenia v existujúcich budovách v rámci obnovy.

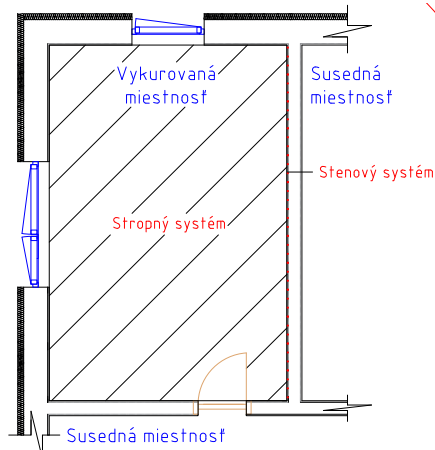
2. Vylepšenie konštrukcie sálavých systémov

Vo výpočtoch a porovnaníach sa uvažovalo len s dvoma vybranými sálavými vykurovacími a chladiacimi systémami s rúrkami pod vnútornou omietkou. Dva vybrané sálavé systémy pozostávajú zo sálavého stropu s rúrkami pripevnenými k nosnej konštrukcii (obr. 1a) a rúrkami pripevnenými k existujúcej stene (obr. 1b). Obidva systémy sú vhodné pre prevádzku vykurovania aj chladenia, to znamená, že môžu byť prevádzkované počas celého roka za predpokladu, že sú napojené na zodpovedajúci zdroj energie, napr. tepelné čerpadlo. Tepelná vodivosť jednotlivých vrstiev materiálu je uvedená v Tab. 1. V analýze boli termofyzikálne vlastnosti materiálov považované za izotropné, na teplote nezávislé a konštantné.



Obr. 1 a) Sálavý strop b) Sálavá stena

Na výpočet bol vytvorený numerický model, ktorý riešil počet možných návrhov sálavých systémov. Model bol vytvorený v overenom softvérovom nástroji a validovaný s experimentálne nameranými hodnotami. Ako výskumná metóda boli použité podrobné výpočty prestupu tepla, pretože umožňujú presnú formuláciu okrajových podmienok pre všetky testované systémy.



Obr. 2 Situovanie kancelárie a sálavého systému

Vo výpočtoch boli pre všetky fragmenty sálavého vykurovania použité rovnaké okrajové podmienky. Teplota miestnosti (T_i) bola 20 °C. Teplotný rozdiel medzi klimatizovanou miestnosťou a príslušnými miestnosťami ($T_i - T_{i,adj}$) bol 5 K, okrem prípadu C-3 a W-3, kde rozdiel teplôt ($T_i - T_{i,adj}$) bol 15 K. Súčiniteľ prestupu tepla na vonkajšom povrchu vo vedľajšej miestnosti bol vždy 8 W/(m².K). Koeficient prestupu tepla na vonkajšom povrchu sa môže meniť v závislosti od orientácie povrchu. Vplyv rozdielu medzi stenou a podlahou na rozvod tepelného toku je však malý a preto bol zanedbaný. Súčiniteľ prestupu tepla medzi rúrkou a vodou v systéme bol predpokladaný 1274 W/(m².K). Táto hodnota je reálna a ďalšie zvyšovanie alebo znižovanie tejto hodnoty o niekoľko stoviek W/(m².K) má na výsledky zanedbateľný vplyv.

Tab. 1 Termofyzikálne vlastnosti materiálov

Materiál	Objemová hmotnosť P (kg/m ³)	Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ (W/(m·K))	Špecifická tepelná capacity c J/(kg.K)
1 – Betón	1400	0.6	890
2 – Železobetón	2400	1.58	1020
3 – Pórobetón	475	0.15	1000
4 – Tepelná izolácia	17	0.035	1270
5 – Rúrka PE-Xa*			
* vonkajší priemer 10.1 mm, hrúbka steny 1.1 mm	1200	0.35	1000
6 – Vnútoraná omietka	1300	0.49	840

Vo výpočte sa uvažuje, že dva systémy sú umiestnené v rohovej miestnosti s dvoma deliacimi stenami oddelujúcimi klimatizovanú miestnosť od susedných miestností (Obr. 2). Ďalšia susedná miestnosť sa nachádzala nad klimatizovanou miestnosťou. To znamená, že v týchto výpočtoch stropy alebo steny, na ktorých sú umiestnené rúrky, neboli vystavené poveternostným vplyvom. V súčasnej štúdii je miestnosť určená ako kancelárska miestnosť; výsledky sú však použiteľné aj pre iné typy miestností s podobnými okrajovými podmienkami.

Vo všetkých skúmaných prípadoch bola stredná teplota vody (T_w) 35 °C, čo predstavuje relatívne vysokú teplotu vody na pokrytie tepelných strát. Pre stenový systém táto teplota vody zaisťuje, že povrchová teplota je hlboko pod maximálnou hranicou pre stenové systémy približne 40 °C. Pre stropný systém je teplota vody pomerne vysoká a v závislosti od výslednej povrchovej teploty a geometrie miestnosti by mohla viesť k riziku diskomfortu v dôsledku sálavej teplotnej asymetrie. Preto je v praktických situáciách potrebné dbať na to, aby sa overili, či sú dodržané limity pohodlia a podľa potreby by sa upravila teplota vody.

3. Skúmané prípady

Všetky skúmané systémy boli počítané pomocou numerického modelu, ktorý bol vytvorený a riešený pomocou softvéru CalA [18] vyvinutého na výpočet dvojrozmerného prestupu tepla v stavebných konštrukciách. Softvér bol overený podľa postupu v ISO 11855 [19], časť 2 (príloha D).

V týchto výpočtoch bol uvažovaný sálavý stropný a stenový systém s rúrkami pripevnenými k vnútornému povrchu konštrukcie. Takéto systémy sú efektívne z hľadiska prenosu tepla medzi potrubím a miestnosťou a poskytujú variabilitu konštrukčných riešení a tepelného správania. Sálavé systémy s rúrkami na vonkajšej strane boli vynechané, pretože nie sú také účinné. Nebrali sa do úvahy ani systémy s rúrkami uloženými hlboko v jadre, pretože sa ťažko realizujú ako súčasť modernizácie. Tieto skúmané systémy pokrývali celý rad návrhov, ktoré sú potenciálne uskutočniteľné pre inštaláciu v existujúcich miestnostiach.

Stropný systém (C) je možné jednoducho skonštruovať pridaním tepelne aktívnej vrstvy k nosnej konštrukcii (Obr. 1a). Predvolená hrúbka nosnej konštrukcie a rozstup rúrok použitých pri výpočtoch boli 30 cm, resp. 10 cm. Zvažované konštrukčné faktory, ktoré môžu ovplyvniť tepelný výkon stropu, boli prítomnosť tepelnej izolácie v podlahe susednej miestnosti, prítomnosť izolácie medzi termoaktívnou vrstvou a tepelným jadrom a tepelná vodivosť nosného betónu (železobetón - RC, pórobetón - AC). Skúmaných bolo 5 prípadov. Prípady, ktoré sa navzájom porovnávajú, sú vysvetlené takto:

- C-1 a C-2 – vplyv prítomnosti pôvodnej izolácie v podlahe nevykurovanej susednej miestnosti na tepelné straty do susednej miestnosti,
- C-1 a C-4 – vplyv tepelnej vodivosti betónového jadra v prípade absencie tepelnej izolácie,
- C-3 a C-4 – vplyv tepelnej vodivosti betónového jadra a nízkej teploty v susednej miestnosti v prípade absencie tepelnej izolácie pre teplotný rozdiel medzi miestnosťami $T_i - T_{i,adj} = 15$ K,
- C-1 a C-5 – efekt prídania izolačnej vrstvy medzi termoaktívnu vrstvu a tepelné jadro.

Stenový systém (W) s rúrkami v omietke je možné skonštruovať napr. umiestnením rúrok v novovytvorenej vnútornej omietke (Obr. 1b). Predvolená hrúbka tepelného jadra bola 20 cm v porovnaní s hrúbkou 30 cm použitou pre strop. Predvolený rozstup rúrok bol 10 cm. Zvažované konštrukčné faktory, ktoré môžu ovplyvniť tepelný výkon, sú vodivosť tepelného jadra (železobetón – RC alebo pórobetón – AC), rozstup rúrok a prítomnosť izolácie medzi termoaktívnou vrstvou a jadrom. Bolo skúmaných sedem prípadov. Prípady sa navzájom porovnávajú takto:

- W-1 a W-2 – efekt prídania izolačnej vrstvy na vonkajšiu stranu betónového jadra,
- W-1 a W-4 – vplyv tepelnej vodivosti betónového jadra v prípade absencie tepelnej izolácie,
- W-3 a W-4 – vplyv tepelnej vodivosti betónového jadra a nízkej teploty v susednej miestnosti v prípade absencie tepelnej izolácie pre teplotný rozdiel medzi miestnosťami $T_i - T_{i,adj} = 15$ K,
- W-1 a W-5 – efekt prídania izolačnej vrstvy medzi termoaktívnu vrstvu a tepelné jadro,
- W-5, W-6 a W7 – vplyv rozstupu rúrok.

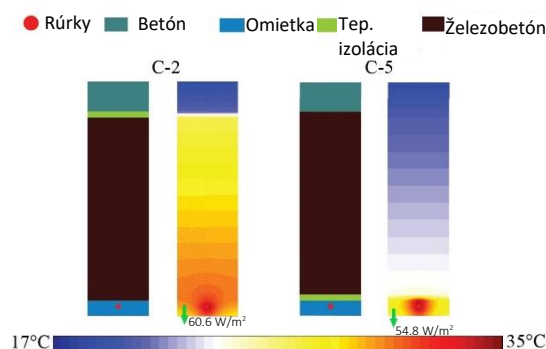
4. Výsledky

Výsledky pre reprezentatívne časti sálavých vykurovacích systémov sú znázornené na obr. 3 až 5. Znázornené je rozloženie teploty v reprezentatívnych sekciách pre vybrané prípady. Tepelný výkon (q_i) a straty (q_e) sú znázornené na Obr. 6 pre strop a na Obr. 7 pre stenu. Všetky uvedené hodnoty tepelného toku sa vzťahujú na štvorcový meter plochy povrchu steny.

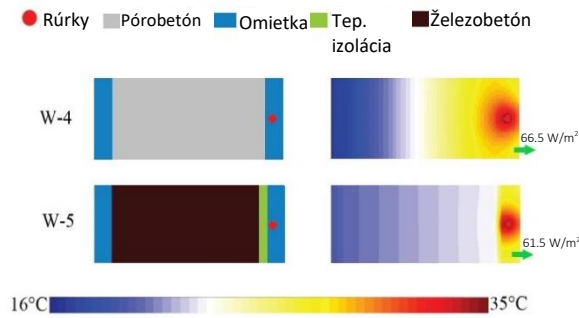
Porovnanie prípadov C-1 a C-2, kde bola v prípade C-2 zachovaná pôvodná izolačná vrstva v podlahe, ukázalo, že prítomnosť len 1 cm izolácie znížila tepelné straty o 37 % (Obr. 6). Straty boli podobné, keď bola izolácia umiestnená na vnútornej strane stropu medzi termoaktívnou omietkou a betónovým jadrom (C-1 vs. C-5). Výkon a akumulačná kapacita však boli rôzne v závislosti od umiestnenia izolácie. V prípade C-2 (izolácia na vonkajšej strane) bol výkon o 10 % vyšší v porovnaní s C-5 (izolácia na vnútornej strane) v dôsledku rovnomernejšieho rozloženia povrchovej teploty, ako je znázornené na Obr. 3. Okrem toho v C-5 je tepelná akumulačná kapacita v porovnaní s C-2 veľmi nízka, čo má za následok veľmi rýchlu tepelnú odozvu. Rovnaké princípy platili aj pre stenový systém, ale ešte dôležitejší bol efekt pridania tepelnej izolácie z dôvodu nižšej hrúbky betónového jadra. Dodatočné výpočty ukázali, že pridanie izolácie do 3 cm sa javí ako opodstatnené. Ďalšie zvýšenie hrúbky izolácie znížilo straty, ale zníženie strát na 1 cm pridanej izolácie bolo relatívne malé.

Porovnanie C-1 a C-4 ilustruje vplyv tepelnej vodivosti betónového jadra v prípade bez použitia tepelnej izolácie. Tepelné straty boli o 80 % nižšie, keď bolo betónové jadro vyrobené z tepelne izolačného materiálu (AC) v porovnaní s vodivým betónom (RC), za predpokladu žiadnej dodatočnej tepelnej izolácie. Zväčšenie teplotného rozdielu (C-3) viedlo k vyšším celkovým tepelným stratám, ale nižšej mernej strate na 1 K teplotného rozdielu medzi vykurovanou a susednou miestnosťou. To znamená, že ak je betónové jadro vyrobené z izolačného materiálu, nemusí byť potrebné pridávať izoláciu, aby sa zabránilo stratám. Tento bod je znázornený aj porovnaním stenových systémov W-4 a W-5. Použitie izolačného betónového jadra (W-4) znížilo straty o 57 % v porovnaní s vodivým jadrom pri 1 cm tepelnej izolácie (W-5). Navyše, s izolačným jadrom bol výkon o 8% vyšší a systém zároveň poskytoval určitý potenciál pre akumuláciu tepla.

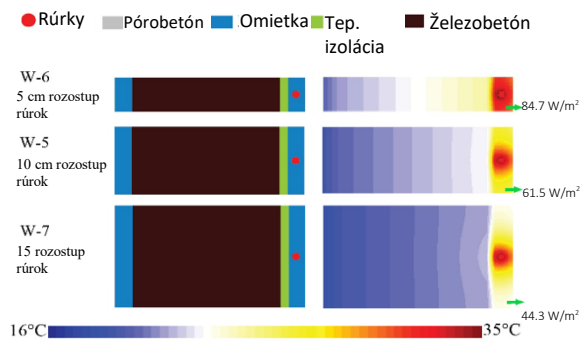
Porovnanie tepelného výkonu pre rozstup rúrok 5 cm (W-6), 10 cm (W-5) a 15 cm (W-7) na Obr. 5 ukázalo, že zmenšením rozstupu z 15 na 10 cm sa výkon zvýši o 28 %. Zníženie rozstupu na 5 cm zvýšilo výkon o 48 % v porovnaní s 15 cm. Ďalšie zvyšovanie výkonu zmenšovaním rozstupu rúrok je možné, ale nemusí byť efektívne. Tieto výsledky ukazujú, že je rozumné zmenšiť rozstupy na 5 cm, ak to konštrukcia systému umožňuje. Toto je obzvlášť dôležité pre chladiace systémy, aby sa maximalizoval výkon a zároveň sa zabránilo kondenzácii.



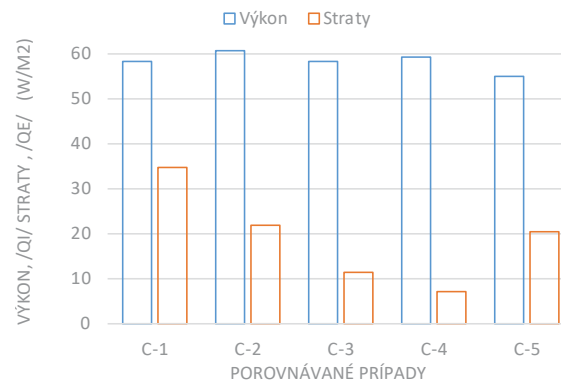
Obr. 3 Detail rozloženia teploty v stropnom systéme



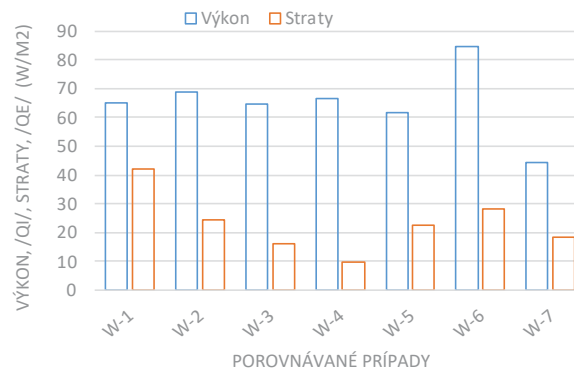
Obr. 4 Detail rozloženia teploty v stenovom systéme



Obr. 5 Vplyv rozostupu rúrok na povrchovú teplotu



Obr. 6 Tepelný výkon a straty pre sáľavý strop



Obr. 7 Tepelný výkon a straty pre sáľavú stenu

5. Záver

V tejto štúdií sa skúmal vplyv tepelnej vodivosti tepelného jadra, prítomnosti a polohy tepelnej izolácie, rozstupu rúrok a teploty priľahlej miestnosti na tepelný výkon dvoch sálavých vykurovacích systémov vhodných na inštalovanie v rekonštruovaných budovách. V závere možno výsledky zhrnúť nasledovne:

- Rozdiel v tepelných stratách pri umiestnení izolácie na vnútornej alebo vonkajšej strane konštrukcie bol malý. Výkon bol však vyšší pre izoláciu umiestnenú na vonkajšej strane z dôvodu rovnomernejšieho rozloženia povrchovej teploty. Takéto konštrukčné riešenie však zároveň viedlo k pomalšej tepelnej odozve a vyššej akumulácii tepla v dôsledku priameho kontaktu termoaktívnej vrstvy a betónového jadra.
- Ak je tepelné jadro vyrobené z izolačného materiálu, tepelná izolácia nemusí byť potrebná ani pri väčšom rozdiel teplot medzi miestnosťami.
- Pri tepelne vodivom betónovom jadre je potrebná tepelná izolácia. Pre relatívne malý teplotný rozdiel medzi miestnosťami stačí tenká izolačná vrstva (napr. 1 cm). Hrúbka izolácie väčšia ako 3 cm nemusí byť efektívna.
- Rozstup rúrok 15 cm je neefektívny. Zníženie rozstupu na približne 5 cm bolo efektívne z hľadiska zvýšenia výkonu na 1 cm rozstupu.
- Pri rozstupe rúrok 10 cm bola povrchová teplota menej rovnomerná v dôsledku rúrok umiestnených tesne pod povrchom v porovnaní so systémami s rúrkami uloženými hlbšie v konštrukcii. Zmenšením vzdialenosti rúrok bola povrchová teplota oveľa rovnomernejšia. To je podstatné pre systémy sálavého chladenia na dosiahnutie vyššieho výkonu, resp. dosiahnutie rovnakého výkonu pri vyššej teplote vody, čím sa zvýši účinnosť zdroja chladu.

POĎAKOVANIE

Tento výskum bol podporovaný Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-21-0144 a Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantov VEGA 1/0303/21 a 1/0304/21.

Literatúra

- [1] Stetiu C. Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings. *Energy and Buildings* 1999;vol. 30:127-138. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00080-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00080-2).
- [2] Kazanci O. Olesen B. IEA EBC Annex 59 - Possibilities. Limitations and Capacities of Indoor Terminal Units. *Energy Procedia* 2015;vol. 78:2427-2432. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.213>.
- [3] Bojić M. Cvetković D. Miletić M. Malešević J. Boyer H. Energy. cost. and CO₂ emission comparison between radiant wall panel systems and radiator systems. *Energy and Buildings* 2012;vol. 54:496-502. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.024>.
- [4] Guruprakash G. VAV vs. Radiant: Side-by-Side Comparison. *ASHRAE Journal* 2014;5:16-24.
- [5] Babiak J. Olesen B. Petráš D. *Rehva Guidebook: Low Temperature Heating and High Temperature Cooling*. 2007 ed. Finland.: Rehva; 2007.
- [6] Romani J. Pérez G. de Gracia A. Experimental evaluation of a cooling radiant wall coupled to a ground heat exchanger. *Energy and Buildings* 2016;vol. 129:484-490. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.028>.
- [7] Romani J. Pérez G. de Gracia A. Experimental evaluation of a heating radiant wall coupled to a ground source heat pump. *Renewable Energy* 2017;vol. 105:520-529. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.087>.
- [8] Masaryk M. Mlynár P. Solar air-condition by ejector cooling. *AIP Conference Proceedings* 2000. 2018. pp. 020013-. <https://doi.org/10.1063/1.5049920>.

- [9] Karabay H. Arıcı M. Sandık M. A numerical investigation of fluid flow and heat transfer inside a room for floor heating and wall heating systems. *Energy and Buildings* 2013;vol. 67:471-478. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.037>.
- [10] Myhren J. Holmberg S. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel. floor and wall heating. *Energy and Buildings* 2008;vol. 40:524-536. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.011>.
- [11] Kim T. Kato S. Murakami S. Rho J. Study on indoor thermal environment of office space controlled by cooling panel system using field measurement and the numerical simulation. *Building and Environment* 2005;vol. 40:301-310. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.010>.
- [12] Romani J. Belusko M. Alemu A. Cabeza L. de Gracia A. Bruno F. Control concepts of a radiant wall working as thermal energy storage for peak load shifting of a heat pump coupled to a PV array. *Renewable Energy* 2018;vol. 118:489-501. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.036>.
- [13] Gwerder M. Lehmann B. Tödtli J. Dorer V. Renggli F. Control of thermally-activated building systems (TABS). *Applied Energy* 2008;vol. 85:565-581. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.08.001>.
- [14] Arteconi A. Costola D. Hoes P. Hensen J. Analysis of control strategies for thermally activated building systems under demand side management mechanisms. *Energy and Buildings* 2014;vol. 80:384-393. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.053>.
- [15] Oravec J. Šikula O. Krajčák M. Arıcı M. Mohapl M. A comparative study on the applicability of six radiant floor. wall. and ceiling heating systems based on thermal performance analysis. *Journal of Building Engineering* 2021;vol. 36. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102133>.
- [16] Krajčák M. Šikula O. Heat storage efficiency and effective thermal output: Indicators of thermal response and output of radiant heating and cooling systems. *Energy and Buildings* 2020;vol. 229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110524>.
- [17] Krajčák M. Šikula O. The possibilities and limitations of using radiant wall cooling in new and retrofitted existing buildings. *Applied Thermal Engineering* 2020;vol. 164. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114490>.
- [18] Šikula O. Software CalA User Manual. Brno. Czech Republic: Tribun; 2011.
- [19] EN ISO 11855:2012 Building Environment Design—Design. Dimensioning. Installation and Control of Embedded

Veronika Mučková¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 2. ročník

PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA A ANALÝZA FRAGMENTOV OBVODOVÉHO PLÁŠŤA S APLIKÁCIOU AKTÍVNEJ TEPELNEJ OCHRANY

PARAMETRIC STUDY AND ANALYSIS OF FRAGMENTS OF THE PERIMETER SHEATH WITH THE APPLICATION OF ACTIVE THERMAL PROTECTION

Abstract

In this article, we deal with fragments of perimeter walls with energetically active elements, or active thermal protection (ATO) in the function of thermal barrier (TB). The methodology with the results is divided into a part of the application of active thermal protection (TB) in three fragments of the circuit structure, a part with an analysis of energy savings during the application of active thermal protection (ATO) and the third part is a description and procedure of computer simulation in the ANSYS program with results. The fragment for which the computer simulation was performed is part of the test cell. The aim of the study and analyzes is to determine the potential of energy savings, to interpret the energy, economic and environmental potential of fragments with active thermal protection. Another goal of the study is the basis for measurements on a physically built test cell.

Kľúčové slová / Key Words

aktívna tepelná ochrana, tepelná bariéra, vykurovanie, chladenie, obnoviteľné zdroje energie, active thermal protection, thermal barrier, heating, cooling, renewable energy sources

1. Úvod

Aktívna tepelná ochrana (ATO) je dynamický proces charakteristický pre stavebné konštrukcie s integrovanými energeticky aktívnymi prvkami charakterizovaný jednou alebo viacerými funkciami v rôznych prevádzkových režimoch energetických systémov. Energetické funkcie ATO sú tepelná bariéra, veľkoplošné sálavé nízkoteplotné vykurovanie/vysokoteplotné chladenie, skladovanie tepla/chladu, zachytávanie solárnej a okolitej energie a rekuperácia tepla/chladu. Tepelná bariéra má funkciu eliminácie tepelných strát/získov cez plášť budovy. Riadením prestupu tepla/chladu v tepelnej bariére je možné eliminovať hrúbku tepelnej izolácie obvodového plášťa budovy a dosiahnuť tak ekvivalentný tepelný odpor stavebnej konštrukcie, ktorý sa rovná normovej požadovanej hodnote. Myšlienka použitia tepelnej bariéry na elimináciu hrúbky tepelnej izolácie vychádza zo znalosti teplôt medzi jednotlivými vrstvami, konkrétne medzi staticky zaťaženou – nosnou a tepelnoizolačnou vrstvou stavebnej konštrukcie.

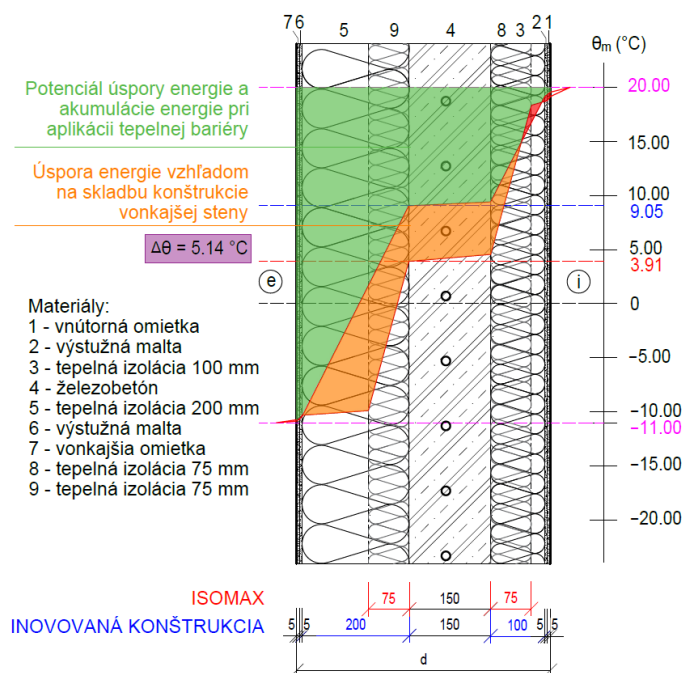
Cieľom tejto štúdie bolo zistiť potenciál úspory energie a akumulácie energie plášťa budovy s integrovanými energeticky aktívnymi prvkami vo funkcii tepelnej bariéry a závislosť medzi jednotlivými parametrami súvisiacich s aktívnou tepelnou ochranou, resp. tepelnou bariérou od rôznych faktorov. Cieľom parametrickej štúdie je aj príprava na merania na testovacej bunke, pričom bola uskutočnená počítačová simulácia fragmentu steny testovacej bunky.

¹ Ing. Veronika Mučková; STU SvF, Katedra TZB, Radlinského 11, Bratislava, 810 05

2. Aplikácia aktívnej tepelnej ochrany vo fragmentoch obvodových konštrukcií

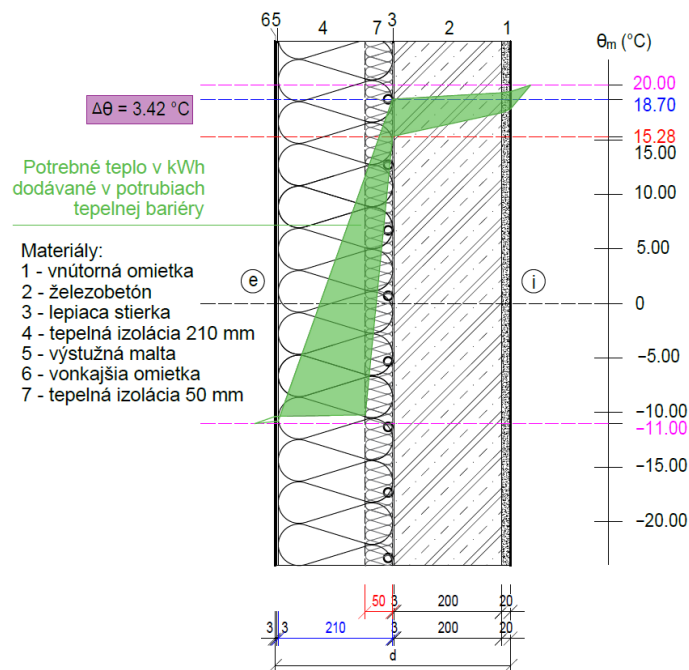
Parametrická štúdia na zistenie potenciálu úspory energie a akumulácie energie plášťa budovy sa uskutočňovala pre viaceré fragmenty obvodových konštrukcií, pričom v tomto článku uvádzame tri typy fragmentov. Prvým krokom v tejto parametrickej štúdie bolo zistiť priebehy teplôt v rôznych obvodových stenových konštrukciách. Priebeh teplôt v konštrukciách závisí v prvom rade od exteriérovej a interiérovej teploty vo vykurovacom období. Ďalšími parametrami ovplyvňujúce priebeh teplôt sú tepelnotechnické vlastnosti jednotlivých vrstiev konštrukcie a samotné vrstvy konštrukcie.

Prvým fragmentom je zobrazenie klasického panelu ISOMAX a inovovaného panelu. Klasický ISOMAX panel sa skladá zo železobetónovej nosnej konštrukcie hrúbky 150 mm, ktorá je izolovaná tepelnou izoláciou 75 mm z exteriérovej aj interiérovej strany konštrukcie. Inovovaná konštrukcia sa líši hrúbkou tepelných izolácií, a to: z interiéru 100 mm a z exteriéru 200 mm. Potenciál úspory energie a akumulácie energie pri aplikácii tepelnej bariéry, ako aj úspora energie vzhľadom na skladbu konštrukcie sú znázornené na *Obrázku 1*.

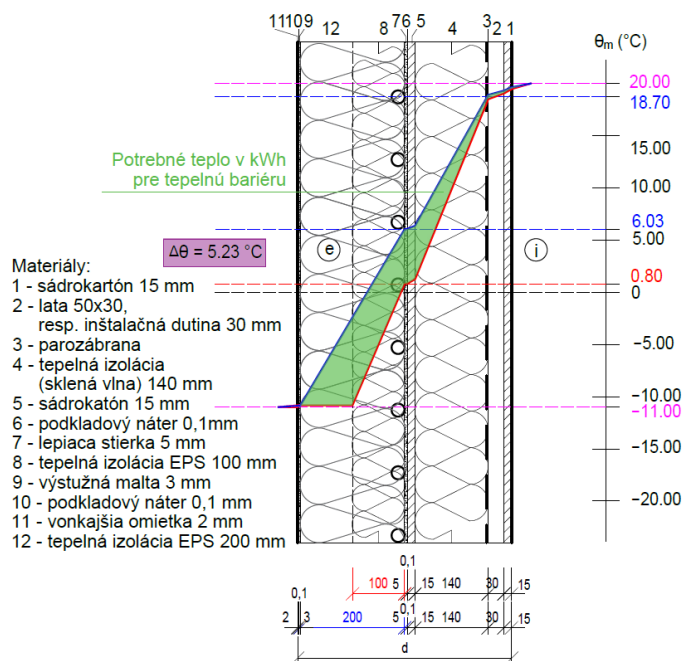


*Obrázok 1: Potenciál úspory energie a akumulácie energie: ISOMAX [Autor]:
 θ_m - teplota v konštrukcii ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta$ — teplotný rozdiel ($^{\circ}\text{C}$), i - interiér, e — exteriér.*

Druhým fragmentom je železobetónová nosná konštrukcia hrúbky 200 mm, ktorá je tepelne izolovaná tepelnou izoláciou 210 mm, pričom táto hrúbka izolácie vyhovuje normovým požiadavkám na tepelný odpor konštrukcie obvodovej steny. Cieľom pri tejto konštrukcii bolo zníženie hrúbky tepelnej izolácie. Uvažovalo sa s hrúbkou izolácie 50 mm, kde sa zároveň aplikovali aj potrubia aktívnej tepelnej ochrany vo funkcii tepelnej bariéry. Potrebné teplo v kWh dodávané v potrubíach tepelnej bariéry, t.j. v konštrukcii je teplota medzi staticky nosnou a tepelnoizolačnou vrstvou stavebnej konštrukcie pri hrúbke tepelnej izolácie 50 mm $\theta_m = 15,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pri štandardnej hodnote pri hrúbke tepelnej izolácie 210 mm $\theta_m = 18,70\text{ }^{\circ}\text{C}$, čo môžeme vidieť na *Obrázku 2*. To znamená, že teplo dodané vo forme teplonosnej látky do tejto vrstvy, ktorá zvýši jej teplotu o $\Delta\theta = 3,42\text{ }^{\circ}\text{C}$, znižuje hrúbku tepelnej izolácie o 160 mm.



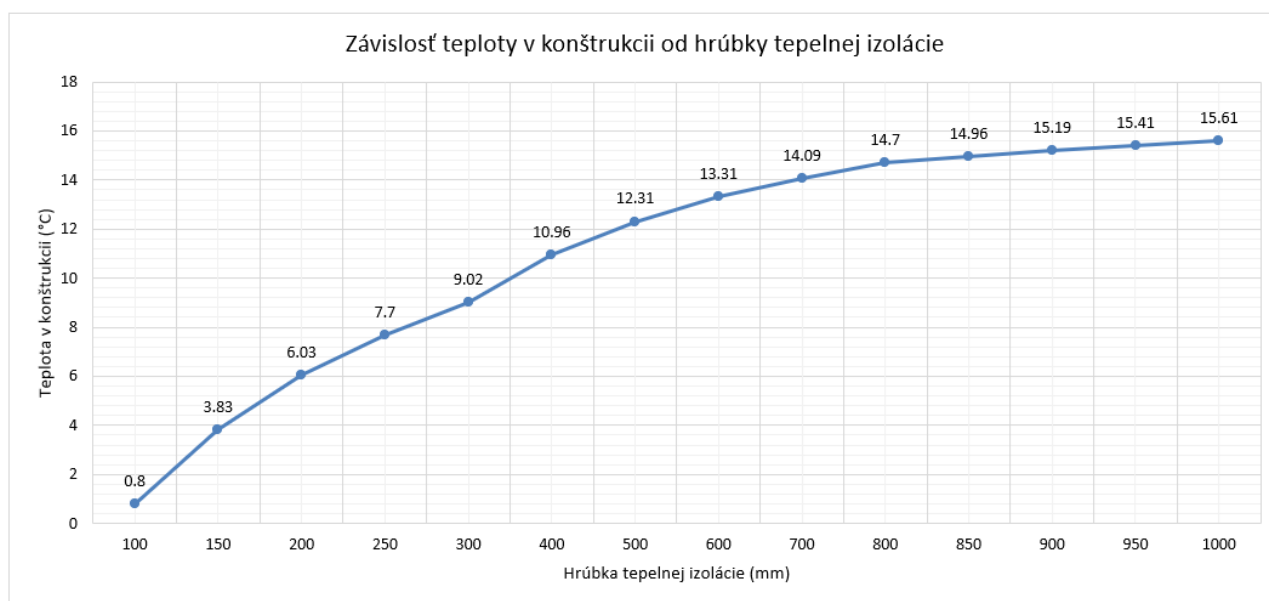
Obrázok 2: Potrebné teplo dodávané v potrubíach tepelnej bariéry: železobetón + tepelná izolácia [Autor]: θ_m - teplota v konštrukcii ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta$ — teplotný rozdiel ($^{\circ}\text{C}$), i - interiér, e — exteriér.



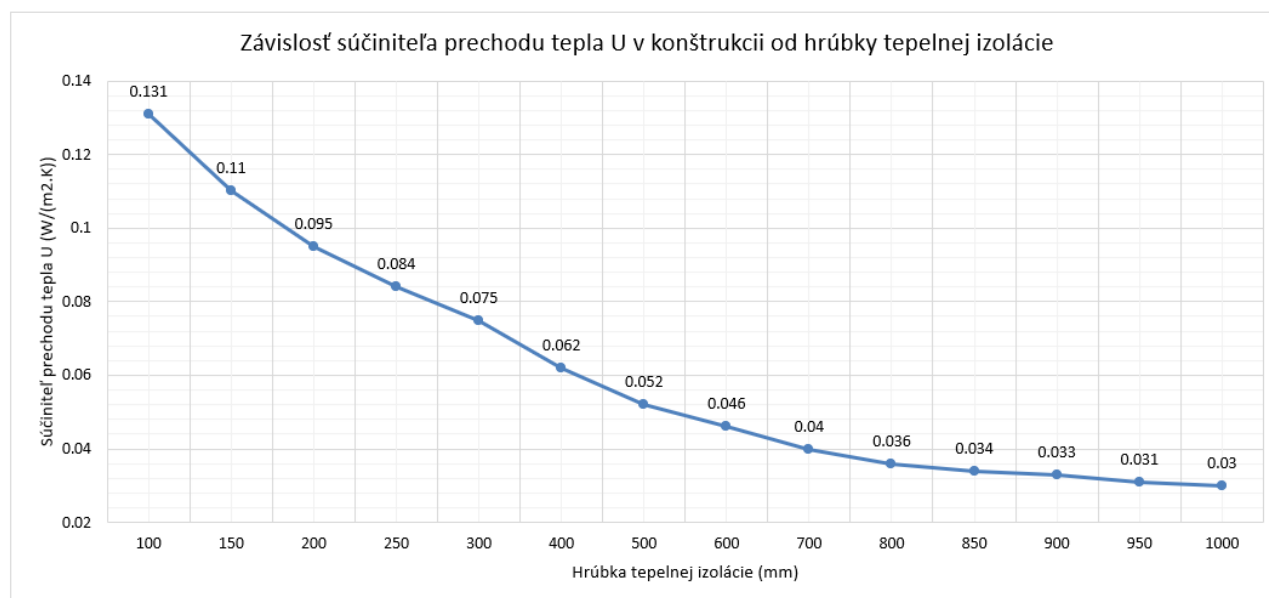
Obrázok 3: Potrebné teplo pre tepelnú bariéru: montovaný dom – testovacia bunka [Autor]: θ_m - teplota v konštrukcii ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta$ — teplotný rozdiel ($^{\circ}\text{C}$), i - interiér, e — exteriér.

Na treťom fragmente je znázornené potrebné teplo pre tepelnú bariéru v konštrukcii montovaného domu (testovacej bunky), Obrázok 3. Na túto konštrukciu nadväzuje počítačová simulácia v Kapitole 3. Nosná časť konštrukcie je tvorená nosnými stĺpmi drevenej obvodovej konštrukcie montovaného domu rozmeru 60 x 140 mm, pričom sú vyplnené tepelnou izoláciou hrúbky 140 mm. Z exteriéru je drevodom izolovaný tepelnou izoláciou hrúbky 100 mm. Teplota medzi staticky nosnou konštrukciou a tepelnoizolačnou vrstvou pri hrúbke EPS 100 mm je $\theta_m = 0,80\text{ }^{\circ}\text{C}$, EPS 200 mm je $\theta_m = 6,03\text{ }^{\circ}\text{C}$.

To znamená, že teplo dodané vo forme teplonosnej látky do tejto vrstvy, ktorá zvýši jej teplotu o $\Delta\theta = 5,23\text{ }^{\circ}\text{C}$, znižuje hrúbku tepelnej izolácie o 100 mm. Taktiež z Obrázku 4 a Obrázku 5 možno dedukovať, že teplota teplonosnej látky $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pre tepelnú bariéru, ktorá je ekvivalentom tepelnej izolácie EPS 200 mm, je postačujúca. Argumentom pre teplotu teplonosnej látky v tepelnej bariére je závislosť súčiniteľa prechodu tepla $U_{200} = 0,095\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ pre hrúbku tepelnej izolácie 200 mm, pričom znižovanie súčiniteľa prechodu tepla nemá zmysel, pretože by sa mnohonásobne zvyšovala hrúbka tepelnej izolácie. Pre potrebu interiérovej teploty v zimnom období $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, je teplota v tepelnej bariére $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyhovujúca.



Obrázok 4: Závislosť teploty v konštrukcii od hrúbky tepelnej izolácie [Autor]



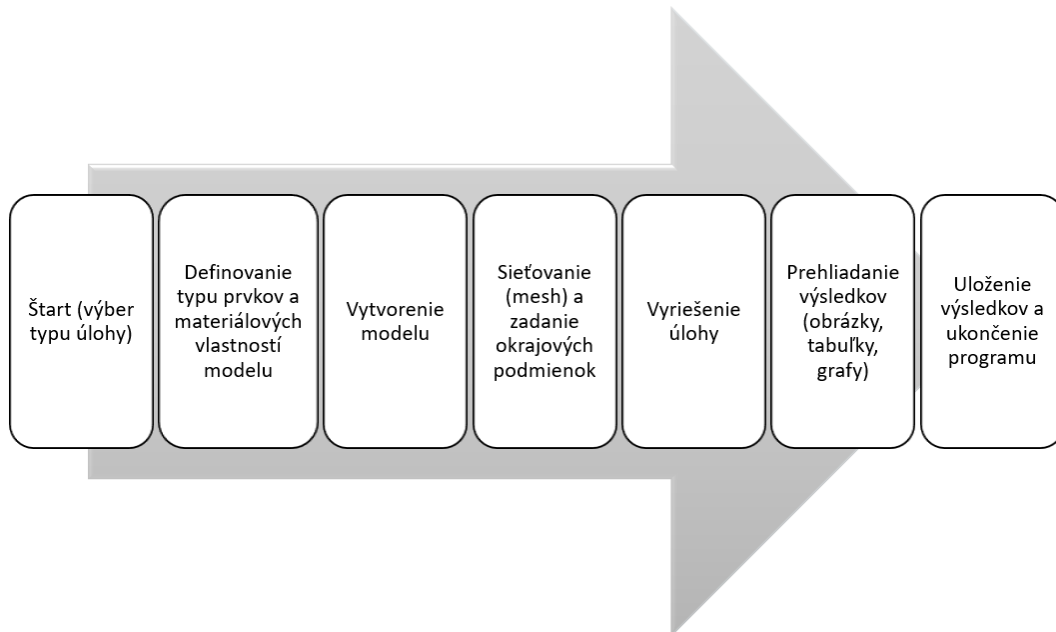
Obrázok 5: Závislosť súčiniteľa prechodu tepla U v konštrukcii od hrúbky tepelnej izolácie [Autor]

3. Počítačová simulácia v programe ANSYS

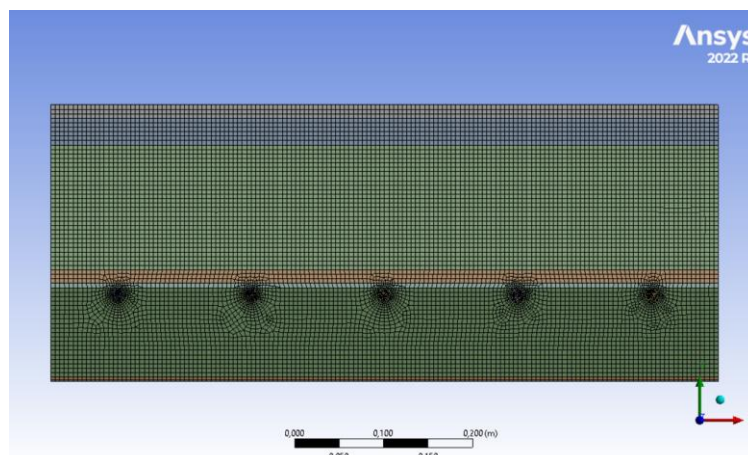
Zadaním na simuláciu bola stenová konštrukcia s energeticky aktívnymi prvkami ATO (aktívna tepelná ochrana). ATO bude využívaná len ako tepelná bariéra, t.j. nevykuruje ani nechladí, len bráni tepelným stratám do exteriéru. Bol uvažovaný časový režim tepelnej bariéry.

Uvažovaný 2D model pozostáva z 5 vykurovacích potrubí, kde teplonosnou látkou je voda, ktorá má 6 °C, t.j. slúži len ako tepelná bariéra. Počiatočná teplota v konštrukcii je uvažovaná 0,8 °C, keďže bez ATO je v konštrukcii 0,8°C, čo bolo zistené výpočtom. Bližší popis teplôt je v *Kapitole 2*. Na *Obrázku 3* je znázornený fragment, ktorý bol použitý na počítačovú simuláciu.

Postup simulácie je znázornený na *Obrázku 6*. Prvým krokom simulácie bolo zadať materiálové charakteristiky jednotlivých vrstiev konštrukcie, vyhotoviť model fragmentu v programe a vygenerovať sieť (mesh) s vhodnou veľkosťou elementov, v našom prípade 5^{-003} m, *Obrázok 7*. Ďalej bolo potrebné určiť okrajové podmienky, kde prvou podmienkou bola podmienka konvekcie pre interiér, druhou podmienka konvekcie pre exteriér a poslednou podmienkou bola teplota vody v potrubíach 6 °C.



Obrázok 6: Postup riešenia počítačovej simulácie v programe ANSYS [Autow]



Obrázok 7: Model fragmentu konštrukcie s vygenerovanou sieťou (mesh) [Autow]

Newtonové okrajové podmienky, t.j. konvekcia na hranici s vonkajším a vnútorným vzduchom sú určené vzťahmi:

$$q_i = h_i \cdot (\theta(x,y) - \theta_i) = \lambda(x,y) \cdot \left(\frac{\partial \theta(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial \theta(x,y)}{\partial x} \right), \text{ pre } x \in \Gamma_I, \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

$$q_e = h_e \cdot (\theta(x,y) - \theta_e) = -\lambda(x,y) \cdot \left(\frac{\partial \theta(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial \theta(x,y)}{\partial x} \right), \text{ pre } x \in \Gamma_E, \quad [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

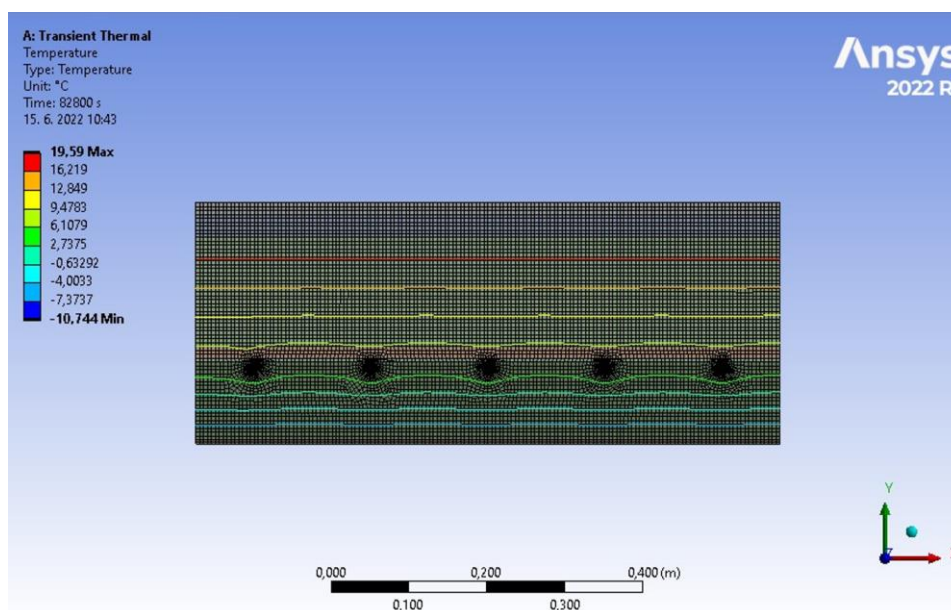
kde q_i je hustota sálavého toku smerom do interiéru $[\text{W/m}^2]$, q_e je hustota sálavého toku smerom do exteriéru $[\text{W/m}^2]$, h_i je koeficient prestupu tepla z vnútorného vzduchu do konštrukcie ($h_i = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), h_e je koeficient prestupu tepla z konštrukcie do vonkajšieho vzduchu ($h_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), θ_i je teplota vnútorného okolitého vzduchu ($\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), θ_e je teplota vonkajšieho okolitého vzduchu ($\theta_e = -11 \text{ }^\circ\text{C}$), $\theta(x,y)$ je teplota je funkciou dvoch premenných, $\lambda(x,y)$ je koeficient tepelnej vodivosti je pre každý z izotropných materiálov tvoriacich oblasť $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$, Γ_I , Γ_E je hranica oblasti na strane interiéru, resp. exteriéru.

Úloha bola riešením teplotnej úlohy aktívnej tepelnej ochrany, kde sa aplikovala dvojrozmerná nestacionárna rovnica vedenia tepla na danej oblasti (zadaná stenová konštrukcia). Kde platí matematický vzťah:

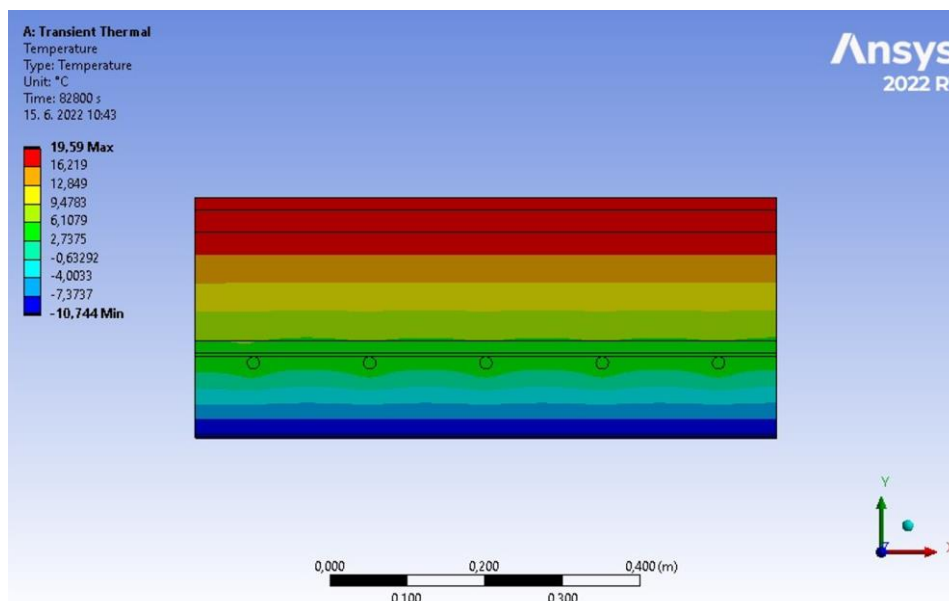
$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \theta(x,y)}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) \cdot (\lambda(x,y) \cdot \left(\frac{\partial \theta(x,y)}{\partial x}, \frac{\partial \theta(x,y)}{\partial y} \right)) \quad (3)$$

kde c je merná tepelná kapacita materiálu $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$, ρ je objemová hmotnosť materiálu $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ $\theta(x,y)$ je teplota je funkciou dvoch premenných, τ je čas (s), x,y sú premenné, $\lambda(x,y)$ je koeficient tepelnej vodivosti je pre každý z izotropných materiálov tvoriacich oblasť $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$,

Program následne po výpočte vygeneroval výsledky simulácie, a to: priebehy teplôt v konštrukcii vo forme modelu na konštrukcii, tabuľky, grafy. Priebeh teplôt v konštrukcii sa dá zobrazit' aj vo forme izoterm *Obrázok 8* a zvolit' si preferované zobrazenie, *Obrázok 9*.



Obrázok 8: Zobrazenie výsledkov vo forme izoterm [Autor]



Obrázok 9: Zobrazenie výsledkov s viditeľnou skladbou konštrukcie [Autor]

Vo výsledkoch môžeme vidieť ako prebieha teplota v konštrukcii. Na farebných obrázkoch máme farebnú škálu, kde je maximálna teplota 20 °C, ktorá je červenou farbou a minimálna teplota -11°C, ktorá je tmavomodrou farbou. Časové rozmedzie simulácie bolo 27 hodín, kde v programe môžeme spustiť aj video, kde môžeme vidieť ako sa priebeh teplôt v konštrukcii mení.

4. Záver

Z parametrickej štúdie uvedenej v článku vyplýva:

- aplikáciou potrubí aktívnej tepelnej ochrany, resp. tepelnej bariéry vieme v niektorých prípadoch až o 160 mm eliminovať hrúbku tepelnej izolácie,
- znížením hrúbky tepelnej izolácie, s integrovaním potrubí aktívnej tepelnej ochrany ušetríme náklady na tepelnú izoláciu,
- zároveň získame vysoký potenciál úspory energie a akumulácie energie,
- získame úsporu energie vzhľadom na skladbu konštrukcie vonkajšej steny,
- potrebné teplo, ktoré je nutné v konštrukcii vieme dodať potrubiami tepelnej bariéry, pričom v niektorých prípadoch stačí dodať len 6 °C do potrubí tepelnej bariéry,
- teplota v konštrukcii rastie v závislosti od narastajúcej hrúbky tepelnej izolácie,
- súčiniteľ prechodu tepla U v konštrukcii sa znižuje v závislosti od narastajúcej hrúbky tepelnej izolácie,
- pre simuláciu v PC programe je dôležité správne zadať vstupné údaje a okrajové podmienky,
- tepelná bariéra pri teplote teplotnosnej látky 6 °C vo fragmente montovaného domu je postačujúca a plní úlohu tepelnej bariéry, ak je teplota vnútorného okolitého vzduchu ($\theta_i = 20$ °C) a θ_e je teplota vonkajšieho okolitého vzduchu ($\theta_e = -11$ °C).

Z jednotlivých analýz môžeme vidieť, že tepelná bariéra a ATO eliminujú hrúbku tepelnej izolácie na fasáde objektu. Tento systém vykurovania/chladenia má veľmi dobrú perspektívu a má vysoký potenciál. Aktívnu tepelnú ochranu možno kombinovať s nízko- a vysokoteplotným vykurovaním, vysokoteplotným chladením, je vhodné ju kombinovať s obnoviteľnými zdrojmi energie a je v nej možné využiť odpadové teplo, napríklad z bazénového hospodárstva, kde sa mnohokrát vypúšťa a aj 35 °C voda do vodných recipientov.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantu **VEGA 1/0304/21** a **KEGA 005/STU-4/2021**.

Literatúra

[1] Kalús, D., Koudelková, D., Mučková, V., Sokol, M., Kurčová, M., & Janík, P. (2022). Practical Experience in the Application of Energy Roofs, Ground Heat Storages, and Active Thermal Protection on Experimental Buildings. *Applied Sciences*, 12(18), 9313.

[2] Kalús, D., Janík, P., Koudelková, D., Mučková, V., & Sokol, M. (2022). Contribution to research on ground heat storages as part of building energy systems using RES. *Energy and Buildings*, 267, 112125.

[3] Kalús D, Mučková V, Koudelková D. Energy, Economic and Environmental Assessment of Thermal Barrier Application in Building Envelope Structures. *Coatings*. 2021 Dec;11(12):1538.

[4] Kalús D, Gašparík J, Janík P, Kubica M, Šťastný P. Innovative building technology implemented into facades with active thermal protection. *Sustainability*. 2021 Jan;13(8):4438.

[5] Kalús, D., Koudelková, D., Mučková, V., Sokol, M., & Kurčová, M. (2022). Contribution to the Research and Development of Innovative Building Components with Embedded Energy-Active Elements. *Coatings*, 12(7), 1021.

[6] D. Kalús, "EUROPEAN PATENT EP 2 572 057 B1: Heat insulating panel with active regulation of heat transition." Date of publication and mention of the grant of the patent: 15.10.2014 In: *Bullettin 2014/42* European Patent Office, international application number: PCT/SK2011/000004, international publication number: WO 2011/146025 (24.11.2011 Gazette 2011/47), 67 p.

[7] Krzaczek, M.; Kowalczyk, Z. Thermal Barrier as a technique of indirect heating and cooling for residential buildings. In *An International Journal Devoted to Investigations of Energy Use and Efficiency in Buildings-Energy and Buildings*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011; Volume 43, pp. 823–837.

[8] Meggers, F.; Baldini, L.; Leibundgut, H. An innovative use of renewable ground heat for insulation in low exergy building systems. *Energies* 2012, 5, 3149–3166.

[9] Dahlsveen, T.; Petráš, D.; Chmúrny, I.; Smola, A.; Lulkovičová, O.; Furi, B.; Konkol', R. *Energetický Audit a Certifikácia Budov*; Jaga: Bratislava, Slovakia, 2008; ISBN 978-80-8076-063-2.

[10] Krajčík, M.; Petráš, D.; Skalíková, I. *Energetické Hodnotenie Budov*; SPEKTRUMSTU: Bratislava, Slovakia, 2019; ISBN 978-80-227-4903-9.

Martina Mudrá¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, ročník: 4.

SIMULÁCIA PRIEBEHU OPERATÍVNEJ TEPLoty V BYTOVOM DOME NAPOJENOM NA SÚSTAVU CZT

SIMULATION OF THE OPERATIVE TEMPERATURE IN AN APARTMENT BLOCK CONNECTED TO A DISTRICT HEATING SYSTEM

Abstract

Natural gas is most often used to cover heat supplies in district heating systems (DHS's). However, the current energy crisis forces operators of DHS's to think about the application of alternative energy sources in their central heat sources. Before optimizing the DHS in the form of replacing a fossil heat source with a renewable heat source, it is important to know the given system. At the same time, it is also necessary to think about how the optimization of the DHS will affect the end customers - how it will affect the thermal comfort of the occupants. The content of the contribution is a comparison of the simulation of the operative temperature when a gas boiler is used in the central heat source and when a heat pump is used in the central heat source. A simulation comparison was performed for two scenarios. In Scenario 1, the devices worked without power regulation. In Scenario 2, the power of the devices was regulated. The simulation was performed for a typical floor of an apartment block, which is part of a DHS.

Kľúčové slová / Key Words

operatívna teplota; simulácia; softvér DesignBuilder; plynový kotol; tepelné čerpadlo; sústava centralizovaného zásobovania teplom.

1. Úvod

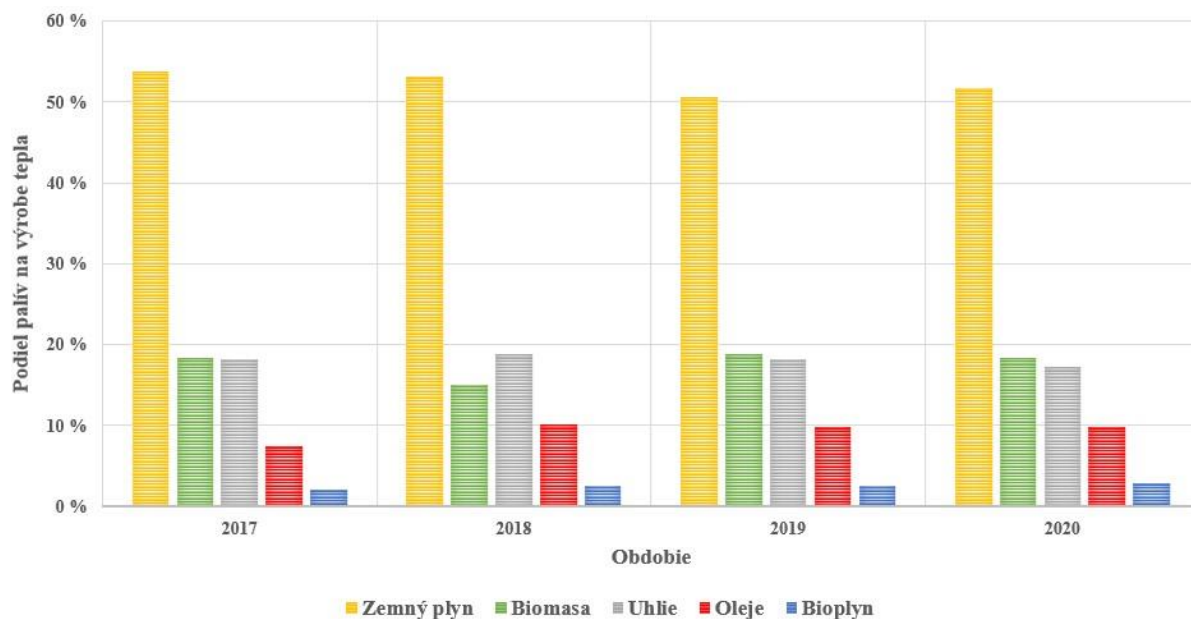
Energia je nevyhnutne potrebná pre fungovanie priemyslu, dopravy a energetiky. Sektor tepelnej energetiky na Slovensku je tvorený sústavami centralizovaného zásobovania teplom (CZT), v ktorých sa na výrobu tepla používajú dostupné zdroje energie. Energetický mix – škálu dostupných zdrojov energie v Európskej únii (EÚ) a na Slovensku tvoria jadrová energia, neobnoviteľné a obnoviteľné zdroje energie (OZE) [3].

Podiel jednotlivých palív na výrobe tepla v období rokov 2017 až 2020 je zobrazený na Obr. 1.

Z grafu vyplýva, že podiel jednotlivých druhov palív je pomerne stabilizovaný a medziročné zmeny v podieloch súvisia so zmenou celkovej dodávky tepla v jednotlivých rokoch. Z grafu ďalej vyplýva, že na pokrytie dodávok tepla sa používa najmä zemný plyn [4].

Počet sústav CZT, ktoré využívajú energiu z OZE by sa mohol v nasledujúcich desaťročiach výrazne zvýšiť, nakoľko majú na ich uplatnenie vhodné podmienky a vysoký potenciál. Pred samotnou optimalizáciou sústavy CZT v podobe výmeny fosílného zdroja tepla za obnoviteľný zdroj tepla je dôležité poznať jej charakter z hľadiska zloženia, usporiadania, druhu teplonosnej látky a tlakových pomerov v potrubí. Súčasne je potrebné myslieť aj na to, ako sa optimalizácia sústavy CZT prejaví u koncových odberateľov – ako ovplyvní tepelný komfort obyvateľov a teplotu v interiéri.

¹ Martina Mudrá, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra technických zariadení budov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava



Obr. 1: Podiel palív na výrobe tepla v sektore tepelnej energetiky na Slovensku [4, autor]

2. Charakteristika skúmanej sústavy centralizovaného zásobovania teplom

Pri porovnaní simulácie priebehu operatívnej teploty ak je použitý v centrálnom zdroji tepla plynový kotol a ak je použité tepelné čerpadlo sa uvažovalo so sústavou CZT, nachádzajúcou sa v Bratislave, ktorá je tvorená:

- centrálneho zdrojom tepla;
- primárnou tepelnou sieťou;
- odovzdávacími stanicami tepla s doskovými výmenníkmi tepla;
- sekundárnou tepelnou sieťou s odovzďaním tepla prostredníctvom doskových vykurovacích telies.

2.1. Opis typického podlažia bytového domu

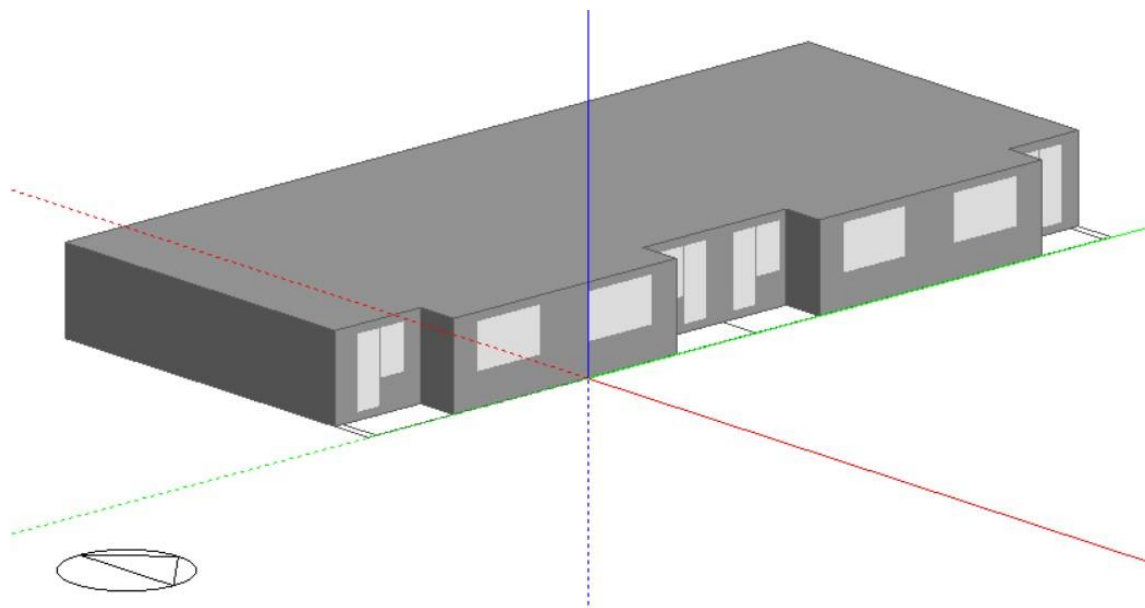
Simulácia sa vykonala pre bytové jednotky typického podlažia na 6. NP bytového domu, ktorý je napojený na vyššie uvedenú sústavu CZT. Bytový dom pozostáva z deviatich nadzemných podlaží (NP). 1. NP tvoria vstupné a pivničné priestory. Ďalšie podlažia sú obytné. Na každom podlaží sa nachádzajú chodbové priestory a štyri trojizbové byty.

2.2. Modelovanie typického podlažia bytového domu v softvéri DesignBuilder

Na modelovanie typického podlažia bytového domu sa použil softvér DesignBuilder.

Softvér DesignBuilder je modelovací a simulačný nástroj určený na vytváranie virtuálnych modelov budov (existujúcich aj nových) a ich následnú analýzu z hľadiska spotreby energie, vnútorného prostredia, nákladov, emisií uhlíka, denného osvetlenia, certifikáciu BREEAM/LEED v súlade s národnými predpismi a certifikačnými štandardmi. Jednou z najväčších výhod tohto softvéru je užívateľsky prijateľné pracovné prostredie v ktorom je možné priamo modelovať budovy, alebo ich importovať z BIM softvérov [5].

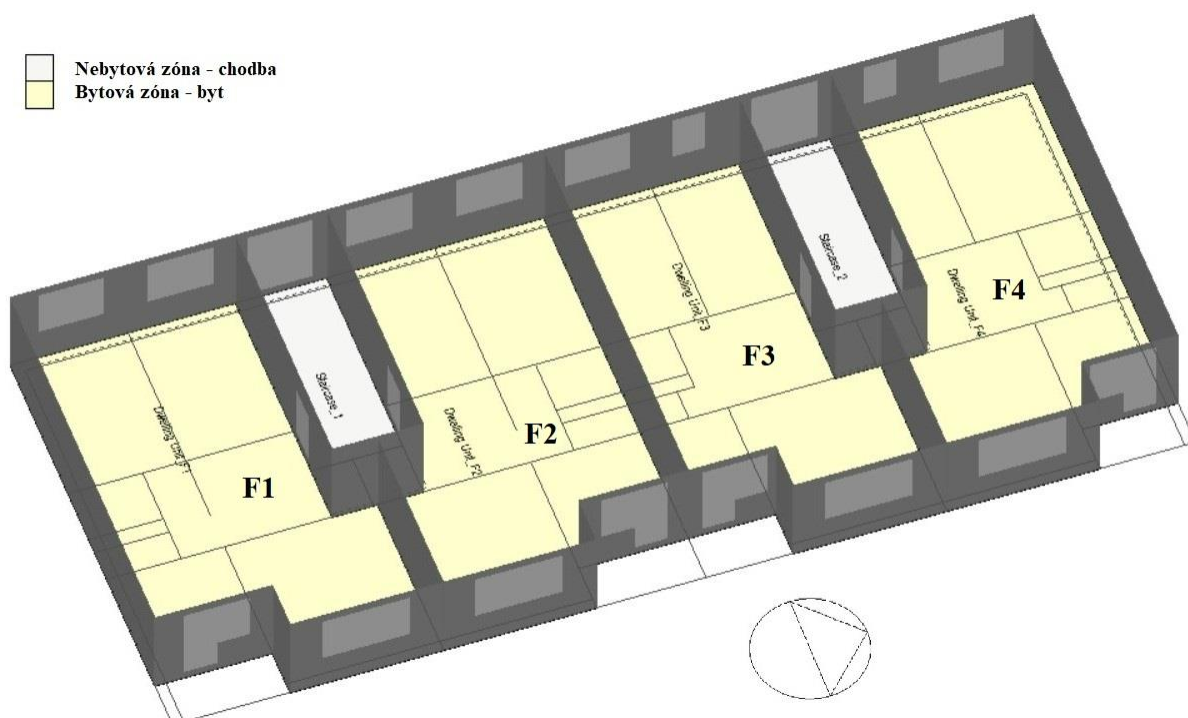
Na Obr. 2 je zobrazená axonometria riešeného typického podlažia bytového domu.



Obr. 2: Axonometrický vonkajší pohľad na typické podlažie [6, autor]

Podlažie bolo potrebné v softvéri rozdeliť do tzv. zón – bytových a nebytových. Bytové zóny tvoria byty – každý byt predstavuje jednu zónu (F1 až F4). Nebytové zóny tvoria chodby, ktoré sú nevykurované a v simulácii sa s nimi neuvažovalo.

Rozdelenie typického podlažia v softvéri DesignBuilder do zón je zobrazené na Obr. 3.



Obr. 3: Axonometrický vnútorný pohľad na typické podlažie s rozdelením do zón [6, autor]

Jednotlivým obytným zónam sa následne priradili základné okrajové podmienky ako: vonkajšia výpočtová teplota ($\theta_e = -11 \text{ }^\circ\text{C}$), vnútorná výpočtová teplota ($\theta_i = +21 \text{ }^\circ\text{C}$), obsadenosť bytu (3 osoby/byt), obsadenosť bytu osobami v priebehu 24 hodín, metabolický faktor obyvateľov bytu (muž=1,0; žena=0,85; dieťa=0,75), miera tvorby CO_2 osobami, výkon sietídiel, dávka vzduchu na osobu, časový plán prirodzeného vetrania a ďalšie.

Aby bolo možné stanoviť tepelné straty prechodom a určiť projektovaný tepelný príkon vykurovacích telies sa v softvéri DesignBuilder priradili stavebným konštrukciám ich materiálové zloženia:

- Obvodová stena ($U=0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)** – vnútorná vápenno-cementová omietka (5 mm), železobetón (150 mm), EPS polystyrén (80 mm), železobetón (70 mm), lepiaca malta (3 mm), EPS polystyrén (10 mm), výstužná malta (2 mm), silikátová omietka (5 mm).
- Vnútorná stena ($U=3,01 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)** – vnútorná vápenno-cementová omietka (5 mm), železobetón (150 mm), vnútorná vápenno-cementová omietka (5 mm).
- Vnútorná podlaha/strop ($U=0,92 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)** – laminátová podlaha (8 mm), separačná vrstva (0,5 mm), betónový poter (40 mm), separačná vrstva (0,5 mm), tepelná izolácia (25 mm), železobetón (150 mm), vnútorná vápenno-cementová omietka (5 mm).
- Okno ($U=1,10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)** – UPVC okno: zasklenie (6 mm), vzduchová medzera (13 mm), zasklenie (6 mm), vnútorné žalúzie.
- Vnútorné dvere ($U=2,31 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)** – drevené (50 mm).

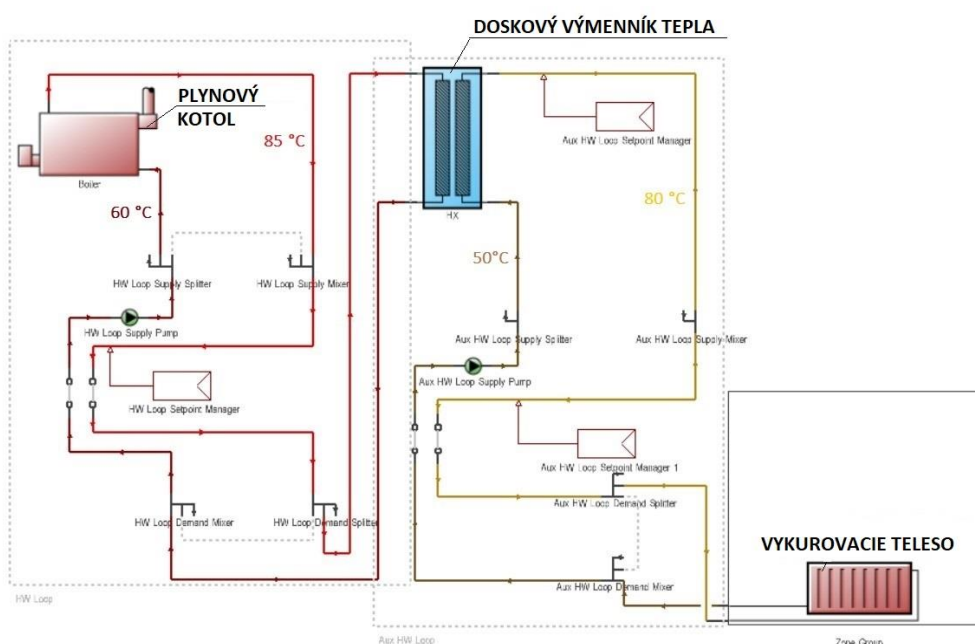
Následne sa výpočtom stanovili tepelné straty prechodom a vetraním z ktorých sa určil projektovaný tepelný príkon pre každú zónu, ktorý je definovaný v Tab. 1.

Tab. 1: Výsledný projektovaný tepelný príkon v obytných zónach [autor]

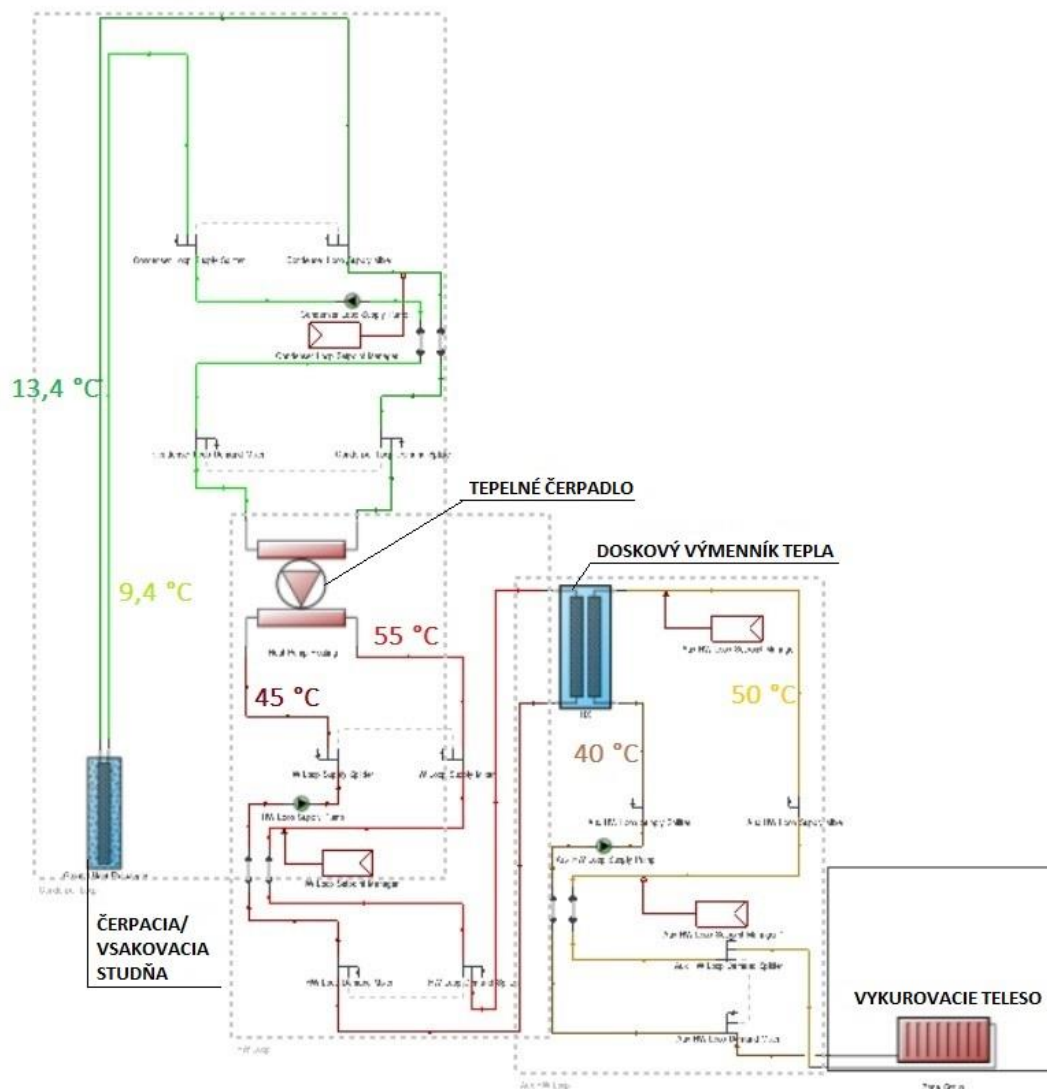
Označenie zóny	Podlahová plocha (m^2)	Objem zóny (m^3)	Projektovaný tepelný príkon (W)
F1	80	224	4 000
F2	78	218	3 650
F3	73	205	3 400
F4	73	205	3 700

2.3. Modelovanie vykurovacej sústavy v softvéri DesignBuilder

Softvér DesignBuilder sa použil aj na modelovanie vykurovacích sústav. Schéma zapojenia vykurovacej sústavy s plynovým kotlom je zobrazená na Obr. 4 a s tepelným čerpadlom na Obr. 5.



Obr. 4: Schéma zapojenia vykurovacej sústavy – zdroj tepla je plynový kotol [6, autor]



Obr. 5: Schéma zapojenia vykurovacej sústavy – zdroj tepla je tepelné čerpadlo [6, autor]

Vzhľadom k tomu, že sa simulácia priebehu operatívnej teploty vykonáva súčasne pre všetky obytné zóny na typickom podlaží, každú zónu reprezentuje vykurovacie teleso s projektovaným tepelným príkonom pre danú zónu.

Jednotlivým prvkom vykurovacích sústav sa priradili vlastnosti ako: typ paliva, tepelný výkon zdroja tepla, elektrický príkon zdroja tepla, navrhovaný objemový prietok teplotonosnej látky, teplota prívodnej a vratnej vykurovacej vody na primárnej a sekundárnej strane, výkony vykurovacích telies a k nim prislúchajúce objemové a hmotnostné prietoky teplotonosnej látky.

Vykurovacia sústava bola pôvodne navrhnutá so zdrojom tepla s plynovým kotlom a s panelovými vykurovacími telesami. Hmotnostný prietok pre každé vykurovacie teleso v danej zóne bol stanovený na základe vzťahu (1) a výsledné hodnoty sú uvedené v Tab. 2.

$$M = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} \quad (\text{kg/s}) \quad (1)$$

kde:

Q – projektovaný tepelný príkon pre vykurovanie (kW),

c – merná tepelná kapacita vody (kJ/(kg.K)),

ΔT – teplotný spád (K) – teplota prívodnej vody na sekundárnej strane: $\theta_p = +80 \text{ }^\circ\text{C}$; teplota vratnej vody na sekundárnej strane: $\theta_v = +50 \text{ }^\circ\text{C}$ [1].

Tab. 2: Výsledné hodnoty hmotnostných a objemových prietokov pre panelové vykurovacie telesá v obytných zónach [autor]

Označenie zóny	Projektovaný tepelný príkon	Merná tepelná kapacita vody	Teplotný spád	Hmotnostný prietok	Objemový prietok
	(kW)	(kJ/(kg.K))	(K)	(kg/s)	(m ³ /s)
F1	4,00	4,187	30	0,0319	0,0000319
F2	3,65	4,187	30	0,0291	0,0000291
F3	3,40	4,187	30	0,0271	0,0000271
F4	3,70	4,187	30	0,0295	0,0000295

Tepelné čerpadlo je zariadenie, ktoré transformuje energiu z nízko-teplotného zdroja tepla (podzemnej vody) na vyššiu teplotnú úroveň [2]. V tomto prípade sa uvažovalo, že teplota prírodnej podzemnej vody bude +13,4 °C a teplota ochladenej vratnej vody bude +9,4 °C. Pri optimalizácii zdroja tepla – náhrade plynového kotla za tepelné čerpadlo dôjde aj k zníženiu teplotného spádu na primárnej strane z 85/60 °C na 55/45 °C, a na sekundárnej strane vykurovacej sústavy z 80/50 °C na 50/40 °C. Dimenzie potrubí a vykurovacie telesá zostávajú pôvodné.

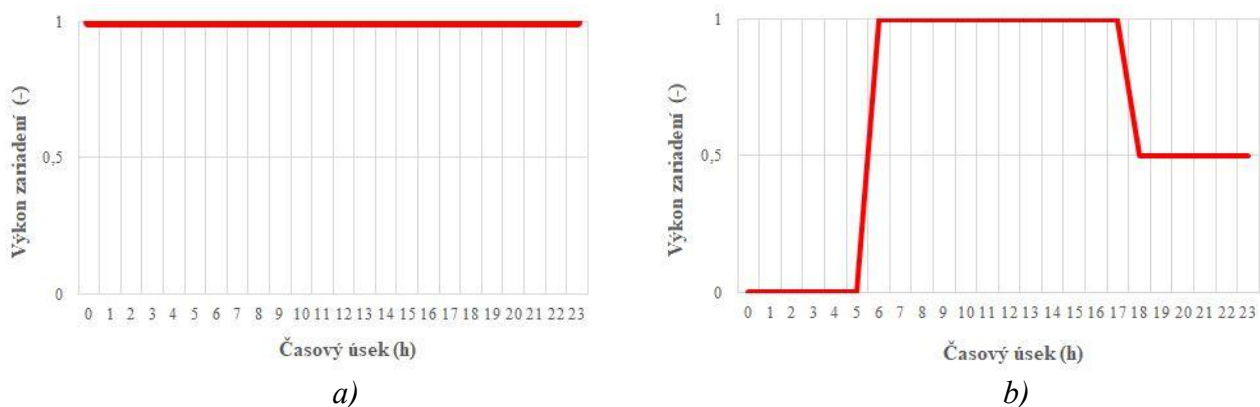
Už v tejto chvíli možno konštatovať, že pri trojnásobnom znížení teplotného spádu na sekundárnej strane vykurovacej sústavy, pri pôvodných vykurovacích telesách a pri pôvodných dimenziách potrubí tepelné čerpadlo nepokryje tepelné straty v jednotlivých zónach.

3. Simulácia priebehu operatívnej teploty

Softvér DesignBuilder využíva na dynamickú tepelnú simuláciu program EnergyPlus. Toto grafické rozhranie umožňuje návrhy budov a simulácie zobrazit' v 3D priestore. Súčasne umožňuje výsledné údaje filtrovať a prezentovať v grafoch, alebo exportovať v tabuľkovom formáte pre použitie v iných aplikáciách [5].

Simulácia priebehu operatívnej teploty pre plynový kotol a tepelné čerpadlo prebehla v hodinových intervaloch v období vykurovacej sezóny od 20.10.2019 do 31.3.2020 v dvoch alternatívach (Obr. 6):

- Alternatíva 1 – zariadenia pracovali bez regulácie ich tepelného výkonu,
- Alternatíva 2 – zariadenia pracovali s reguláciou ich tepelného výkonu na 50 % alebo 0 %.

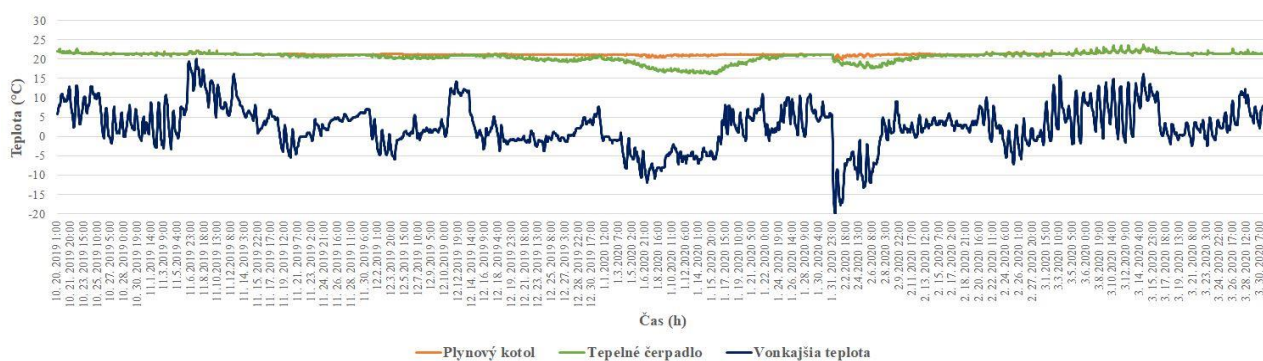


Obr. 6: Alternatívy pre simuláciu priebehu operatívnej teploty [autor]

- Alternatíva 1 – zariadenia pracujú bez regulácie ich tepelného výkonu,
- Alternatíva 2 – zariadenia pracujú s reguláciou ich tepelného výkonu

3.1. Výsledky simulácie pre Alternatívu 1

Z Obr. 7, na ktorom je zobrazené porovnanie priebehu operatívnej teploty pre plynový kotol a tepelné čerpadlo bez regulácie ich tepelných výkonov a z Tab. 3, v ktorej sú číselne uvedené výsledky simulácie vyplýva, že priebeh operatívnej teploty je pri plynovom kotli konštantný, bez väčších odchýlok. Priebeh operatívnej teploty pri tepelnom čerpadle kolíše a pri poklese vonkajšej teploty klesá aj operatívna teplota v priestore.



Obr. 7: Simulácia priebehu operatívnej teploty pre plynový kotol a tepelné čerpadlo – Alternatíva 1 [6, autor]

Počas vykurovacej sezóny je pri plynovom kotli minimálna hodnota operatívnej teploty na úrovni 19,87 °C. Pri tepelnom čerpadle klesá operatívna teplota až na úroveň 16,16 °C. Počet hodín, kedy operatívna teplota klesá pod 21 °C počas vykurovacej sezóny je pri plynovom kotli 247 hodín a pri tepelnom čerpadle je to až 1886 hodín. Z uvedeného vyplýva, že tepelné čerpadlo nedokáže prostredníctvom pôvodných vykurovacích telies pokryť tepelnú stratu miestnosti, čo sa prejaví na nízkej hodnote operatívnej teploty.

Tab. 3: Výsledky simulácie priebehu operatívnej teploty pre plynový kotol a tepelné čerpadlo – Alternatíva 1 [6, autor]

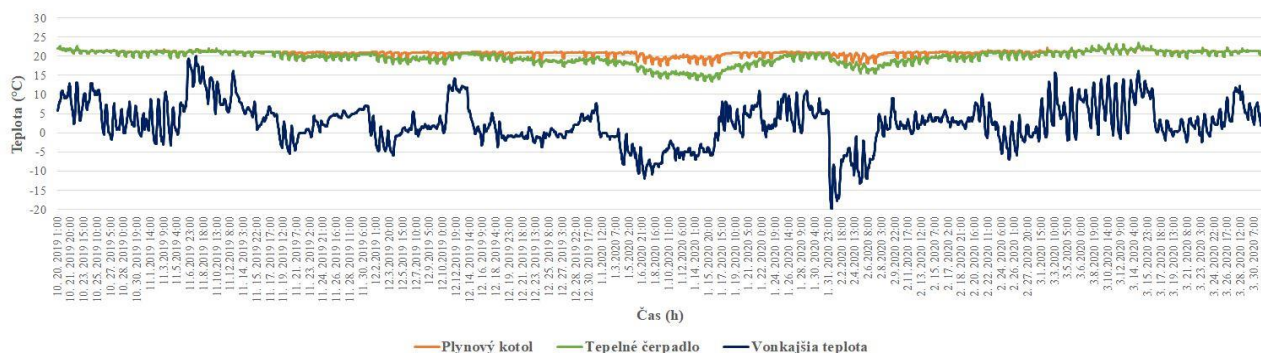
Zdroj tepla	Priemerná hodnota operatívnej teploty	Minimálna hodnota operatívnej teploty	Čas kedy je operatívna teplota < 21 °C
	(°C)	(°C)	(h)
Plynový kotol	21,30	19,87	247
TČ	20,56	16,16	1886

3.2. Výsledky simulácie pre Alternatívu 2

Z Obr. 8 na ktorom je zobrazené porovnanie priebehu operatívnej teploty pre plynový kotol a tepelné čerpadlo s reguláciou ich tepelných výkonov a z Tab. 4, v ktorej sú číselne uvedené výsledky simulácie vyplýva, že priemerná hodnota operatívnej je pri plynovom kotli na úrovni 20,79 °C, avšak priebeh operatívnej teploty v priebehu dňa kolíše, čo je spôsobené reguláciou tepelného výkonu kotla.

Počas nočného útlmu, kedy je kotol vypnutý, klesá operatívna teplota približne o 2 °C oproti času, kedy kotol pracuje na plný alebo polovičný tepelný výkon. Priemerná hodnota operatívnej teploty pri tepelnom čerpadle je na úrovni 19,68 °C. Rovnako ako pri plynovom kotli tak, aj pri tepelnom čerpadle priebeh operatívnej teploty v priebehu dňa kolíše, čo je spôsobené reguláciou jeho výkonu.

Počas nočného útlmu, kedy je tepelné čerpadlo vypnuté, klesá operatívna teplota približne o 2 °C oproti času, kedy tepelné čerpadlo pracuje na plný alebo polovičný tepelný výkon. Zároveň platí, že pri poklese vonkajšej teploty klesá aj operatívna teplota v priestore.



Obr. 8: Simulácia priebehu operatívnej teploty pre plynový kotol a tepelné čerpadlo – Alternatíva 2 [6, autor]

Počas vykurovacej sezóny je pri plynovom kotli minimálna hodnota operatívnej teploty na úrovni 17,49 °C. Pri tepelnom čerpadle klesá operatívna teplota až na úroveň 13,34 °C. Počet hodín, kedy operatívna teplota klesá pod 21 °C počas vykurovacej sezóny je pri plynovom kotli 2067 hodín, pri tepelnom čerpadle je to až 2780 hodín. Z uvedeného vyplýva, že regulácia výkonu zdrojov tepla – ich vypínanie je energeticky neefektívne. Dochádza tak nielen k opotrebovaniu zariadení, ale aj k tepelnej nepohode obyvateľov.

Tab. 4: Výsledky simulácie priebehu operatívnej teploty pre plynový kotol a tepelné čerpadlo – Alternatíva 2 [6, autor]

Zdroj tepla	Priemerná hodnota operatívnej teploty	Minimálna hodnota operatívnej teploty	Čas kedy je operatívna teplota < 21 °C
	(°C)	(°C)	(h)
Plynový kotol	20,79	17,49	2067
TČ	19,68	13,34	2780

4. Záver

Cieľom príspevku bolo poukázať na fakt, že prípadná výmena zdroja tepla, ktorý využíva fosílny zdroj energie za obnoviteľný zdroj tepla, ktorý využíva nízkotepelný zdroj energie, a súčasné ponechanie pôvodnej vykurovacej sústavy v bytovom dome môže mať negatívny vplyv na operatívnu teplotu v obytných miestnostiach. Tepelné čerpadlo, ktoré pracuje s nízkymi teplotami vykurovacej vody, nedokáže prostredníctvom pôvodných doskových vykurovacích telies pokryť tepelné straty miestností vo vykurovacom období, čím sa nedosiahne požadovaná hodnota operatívnej teploty, čo sa negatívne prejaví aj na tepelnom komforte obyvateľov.

Medzi možné riešenia, ako dosiahnuť požadovanú hodnotu operatívnej teploty patrí: vyvarovanie sa nočným útlmom na zariadeniach, lepšie zaizolovanie obvodových konštrukcií a zväčšenie teplo-výmennnej plochy vykurovacích telies. Najideálnejším riešením je výmena pôvodných vykurovacích telies za podlahové vykurovanie, ktoré je vhodné kombinovať práve s nízkotepelnými zdrojmi tepla, akými sú tepelné čerpadlá. Aplikáciou podlahového vykurovania do obytných miestností sa zároveň zväčší aj teplo-výmenná plocha, čo prispeje k tepelnému komfortu obyvateľov.

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantov VEGA 1/0304/21, VEGA 1/0303/21 a KEGA 005/STU-4/2021.

Literatúra

- [1] PEKAROVIČ, J. K. a kol.: *Vykurovanie I. a II.* Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1994. 493 s. ISBN 80-227-0648-5.
- [2] PETRÁŠ, D. – LULKOVIČOVÁ, O. – TAKÁCS, J. – FŮRI, B. *Obnoviteľné zdroje energie pre nízkotepelné systémy.* Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o, 2009. 223 s. ISBN 978-80-8076-075-5.
- [3] Energy – Overview. Introduction. The importance of energy statistics. Eurostat.
<<https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/overview>>.
- [4] Výročné správy Úradu pre reguláciu sieťových odvetví: 2017-2020.
<<http://www.urso.gov.sk/?q=content/%C3%BArad-spr%C3%A1vy-%C3%BAradu>>.
- [5] <https://designbuilder.co.uk/>
- [6] Softvér DesignBuilder

Anna Predajnianska¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 4. ročník

EXPERIMENTÁLNE MERANIE A ANALÝZA PREVÁDZKY BAZÉNA TERMÁLNEHO KÚPALISKA

EXPERIMENTAL MEASUREMENT AND ANALYSIS OF THERMAL SWIMMING POOL OPERATION

Abstract

The operation of thermal swimming pools is a complex system that has many parameters affecting different properties. The most important are the parameters of the pool water that is filled into the pool. The goal is to ensure the parameters of the pool water so that they are satisfactory for the visitors of the thermal swimming pool. However, we must not forget the waste water produced by thermal swimming pools. In today's environmentally friendly era, it is necessary to ensure that the wastewater parameters are also observed. Currently, it is quite difficult to meet the strict parameters with which waste water can be discharged into the river. The contribution is focused on the analysis of the pool of the thermal swimming pool, experimental measurement in the engine room, compliance with the safety of discharge of waste water into the recipient and the proposal of safety measures in case of improper discharge of waste water.

Kľúčové slová / Key Words

experimentálne meranie, analýza, prevádzka, termálne kúpalisko / experimental measurements, analysis, operation, thermal bath

1. Úvod

Na Slovensku máme 32 termálnych kúpalísk. V mnohých z nich nastáva problém pri vypúšťaní odpadovej bazénovej vody z prevádzky do chladiaceho kanála, alebo jazierka a následne do recipientu [1, 2]. Maximálna teplota odpadovej bazénovej vody, ktorá môže byť odvedená do recipientu je stanovená na 26 °C [4, 5]. Toto ustanovuje Zákon č. 364/2004 Z. z. o vodách a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov (alebo vodný zákon) a Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 239/2010 z 25. mája 2010, ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd. V mnohých prípadoch termálne kúpaliská vypúšťajú príliš teplú vodu priamo do recipientu, čím poškodzujú životné prostredie a ekosystém v rieke. Maximálna výška sankcií za znečisťovanie životného prostredia môže dosiahnuť až 160 000 € v závislosti od rozsahu a spôsobu poškodenia životného prostredia [4, 5].

Na Slovensku sa geotermálna energia využíva v najväčšej miere na rekreačné účely. V týchto prípadoch prichádza geotermálna voda do styku s pokožkou a so vzduchom, preto už nemôže byť navrátená do geologického podložja. V rekreačných zariadeniach je využitých až 60 % z celkového inštalovaného tepelného výkonu, čo predstavuje približne 129 MW_t [1, 2]. Viac ako polovica tejto energie nie je užitočne využitá a je vypúšťaná do recipientu v podobe odpadovej vody s príliš vysokou teplotou, ktorá má stále značný energetický potenciál. Príspevok bude ďalej zameraný na

¹ Ing. Anna Predajnianska; STU SvF, Katedra TZB, Radlinského 11, Bratislava, 810 05

analýzu prevádzky bazéna v konkrétnom termálnom kúpalisku. Taktiež bude popísané experimentálne meranie rôznych parametrov v prevádzke a v navrhnuté opatrenia na zabezpečenie bezpečnej teploty odpadovej vody.

2. Popis prevádzky riešeného bazéna v termálnom kúpalisku

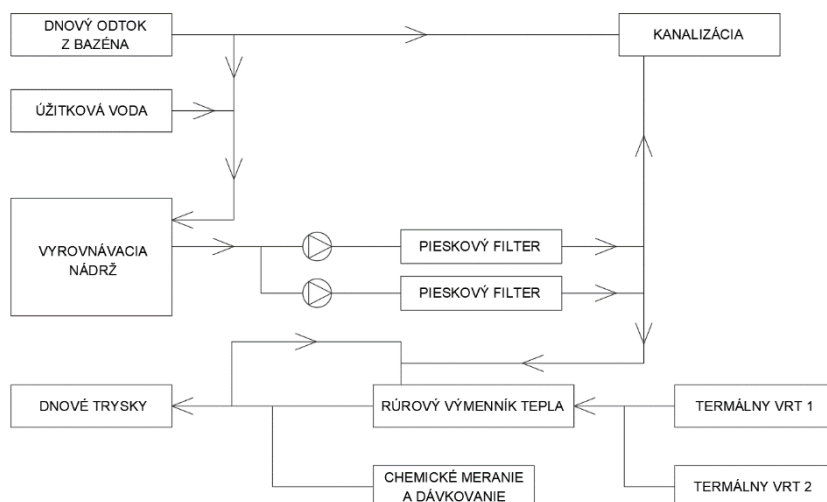
Predmetom riešenia je termálne kúpalisko na južnom Slovensku. Termálne kúpalisko využíva na prevádzku bazénov termálnu vodu z dvoch vrtov, ktoré poskytujú vodu s teplotou priemerne 75 °C. Termálna voda má mineralogické zloženie, ktoré má blahodárne účinky na pohybové ústrojenstvo. Bazénové hospodárstvo poskytuje 7 bazénov s celoročnou prevádzkou a 6 vonkajších bazénov, ktoré sú v prevádzke počas letnej sezóny. Vzhľadom na to, že termálne kúpalisko využíva termálnu vodu čerpanú z vrtov, jedná sa o geotermálny energetický systém, ktorý je klasifikovaný ako otvorený. Pojem otvorený geotermálny energetický systém je založený na využívaní termálnej vody v odberných miestach, ktorými sú v tomto prípade bazény a následným vypustením odpadovej vody do chladiaceho kanála a recipientu. Vzhľadom na to, že termálna voda prichádza do styku s okolitým vzduchom, ale najmä s ľudskou pokožkou, nemôže byť vrátená do geologického podložia cez injektážne vrty a preto musí byť vypustená do chladiaceho kanála a následne do recipientu.

Bazénové hospodárstvo poskytuje 13 bazénov. Analýza prevádzky a experimentálne meranie bolo vykonané na krytom plaveckom bazéne, ktorý je v prevádzke celoročne. Jedná sa o bazén, ktorý využíva rúrový výmenník tepla na ohrev bazénovej vody. Princiipiálne je systém založený na tom, že výmenníkom tepla prúdi studená voda, ktorá je ohrievaná vďaka termálnej vode, ktorá taktiež prúdi výmenníkom tepla v protiprúde. Problémom ktorý tu vzniká, je nedostatočné ochladenie termálnej vody. Tomu je venované experimentálne meranie a samotná analýza prevádzky. Základné informácie o riešenom bazéne sú zhrnuté v *Tabuľke 1*.

Tabuľka 1: Základné údaje o riešenom bazéne [Autor]

Názov bazéna	Typ bazéna			Vodná plocha	Objem	Hĺbka bazéna	Teplota vody
				A (m ²)	V (m ³)	h (m)	θ (°C)
Krytý plavecký	celoročný	plavecký	cirkulačný	212,5	297,5	1,0 – 1,8	28

Voda je do bazéna napúšťaná pomocou dnových trysiek. Systém bazéna je cirkulačný, čo znamená, že studená voda v systéme cirkuluje. Voda, ktorá pretečie priepadmi v bazéne je znova dopravená do strojovne do výmenníka tepla pred pieskový filter, kde sú opätovne zabezpečené potrebné parametre. Princiipiálna schéma zapojenia strojovne bazéna je znázornená na *Obr. 1*.



Obrázok 1: Princiipiálna schéma zapojenia strojovne riešeného plaveckého bazéna [Autor]

Systém využíva rúrový výmenník tepla, do ktorého je privádzaná termálna voda z termálneho vrtu 1. Výmenník tepla je znázornený na Obr. 2 V prípade, že prvý zdroj nie je postačujúci, využíva sa napojenie na termálny vrt 2. Termálna voda prechádza výmenníkom tepla a odovzdáva svoje teplo bazénovej vode. Na druhej strane je využívaná cirkulujúca bazénová voda, ktorá je do strojovne privádzaná z dnového odtoku a priepadov bazéna. Bazénová voda je privádzaná do vyrovnávacej nádrže. Dopúšťanie vyrovnávacej nádrže je riešené úžitkovou vodou zo studne umiestnenej v areáli termálneho kúpaliska. Voda z vyrovnávacej nádrže je filtrovaná dvojstupňovo. Prvým stupňom filtrácie je zachytávanie mechanických nečistôt. Druhým stupňom je piesková filtrácia. Pohyb vody je zabezpečený obehovými čerpadlami. Následne je cirkulujúca voda privádzaná do výmenníku tepla, kde je opätovne ohrievaná na požadovanú teplotu. V prípade preplnenia vyrovnávacej nádrže je prebytočná voda odvádzaná do odpadového potrubia a následne do chladiaceho kanála.



Obrázok 2: Rúrový výmenník tepla v strojovni plaveckého bazéna [Autor]

3. Experimentálne meranie teploty vody

Cieľom experimentálneho merania prietoku a teploty bazénovej, studenej a termálnej vody, bolo zistiť mieru využívania termálnej vody v riešenom bazénovom hospodárstve. Termálne kúpalisko využíva chladiaci kanál na zabezpečenie požadovanej teploty odpadovej vody. Vďaka jednoduchému meraniu teploty vody v chladiacom kanáli bolo zistené, že na konci chladiaceho kanála prúdi voda s teplotou až 50 °C. Následne bol problém hľadaný aj v strojovniach jednotlivých bazénov, kde bol zistený rovnaký fenomén.

Meranie teploty bolo vykonané 10.5.2022 do 25.5.2022. Na meranie boli použité príložené snímače teploty na potrubie Comet. Osadených bolo 8 kusov. Interval záznamu bol nastavený na každú hodinu, t. j. 24 záznamov teploty za deň. Snímače boli napojené na spoločný dataloger Comet, ktorý zaznamenával priebeh merania.

Tabuľka 2: Prehľad snímačov teploty vody [Autor]

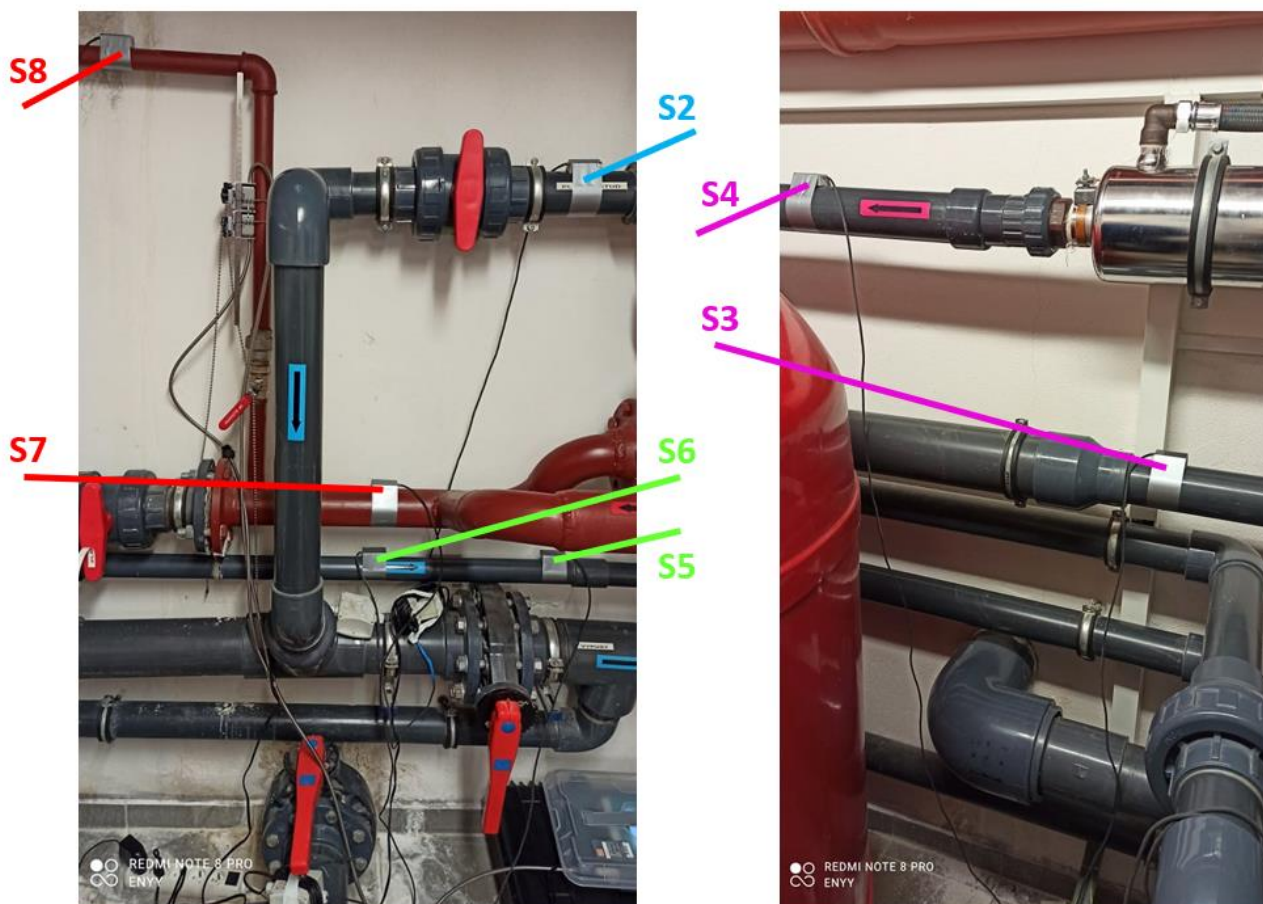
Označenie snímača	Poloha snímača	Poznámka
S1	Potrubie studenej vody	
S2		
S3	Potrubie bazénovej vody k tryskám bazéna	Potrubie s bazénovou vodou, na ktorom sú osadené aj snímače prietokomeru.
S4		
S5	Odpadové potrubie	
S6		
S7	Potrubie termálnej vody	Pred snímačmi prietokomeru (v smere toku prúdenia termálnej vody).
S8		Za snímačmi prietokomeru (v smere toku prúdenia termálnej vody).

Na potrubí studenej vody boli osadené dva snímače teploty. Na potrubí bazénovej vody, ktorá je dopravovaná k tryskám v bazéne, boli osadené taktiež dva snímače teploty. Ďalšie dva snímače teploty boli osadené na potrubí termálnej vody. Posledné dva snímače boli osadené na odpadovom potrubí. Prehľad snímačov teploty je uvedený v *Tabuľke 2*.

Tabuľka 3: Prehľad materiálov potrubí [Autor]

Potrubie	Materiál	Vonkajší priemer (mm)	Hrúbka steny (mm)
Bazénová voda	PVC	75,0	3,6
Termálna voda	Oceľ	33,5	3,25

Snímače teploty boli osadené dvojmo na každé potrubie pre prípad poruchy jedného z nich. Táto situácia nastala pri snímačoch teploty studenej vody, kde jeden zo snímačov prešiel do chybového režimu približne 2 dni od spustenia meraní. Zvyšné snímače teploty zaznamenali celý priebeh merania bez poruchy. V strojovni bazéna sú využívané dva druhy materiálu potrubí. Potrubie termálnej vody je vyhotovené zo závitovej čiernej ocele s vonkajším priemerom 33,5 mm, s vnútorným priemerom 27,0 mm a hrúbkou steny 3,25 mm. Potrubie bazénovej a studenej vody je vyhotovené z materiálu PVC s vonkajším priemerom 75,0 mm a hrúbkou steny 3,6 mm. Prehľad použitých materiálov je uvedený v *Tabuľke 3*. Miesta osadenia snímačov teploty v strojovni bazéna sú znázornené na *Obr. 3*.



Obrázok 3: Miesta osadenia snímačov teploty v strojovni bazéna [Autor]

Cieľom merania bolo zistiť aktuálnu prevádzku bazéna z hľadiska teplôt vody. Vďaka meraniu je okrem iného možné zistiť maximálnu, priemernú a minimálnu teplotu studenej, bazénovej, termálnej a odpadovej vody v strojovni riešeného bazéna. Z výsledkov je zrejmé, že priemerná teplota studenej vody v systéme je 22,65 °C. Priemerná teplota bazénovej vody je 27,84 °C, čo odpovedá údajom

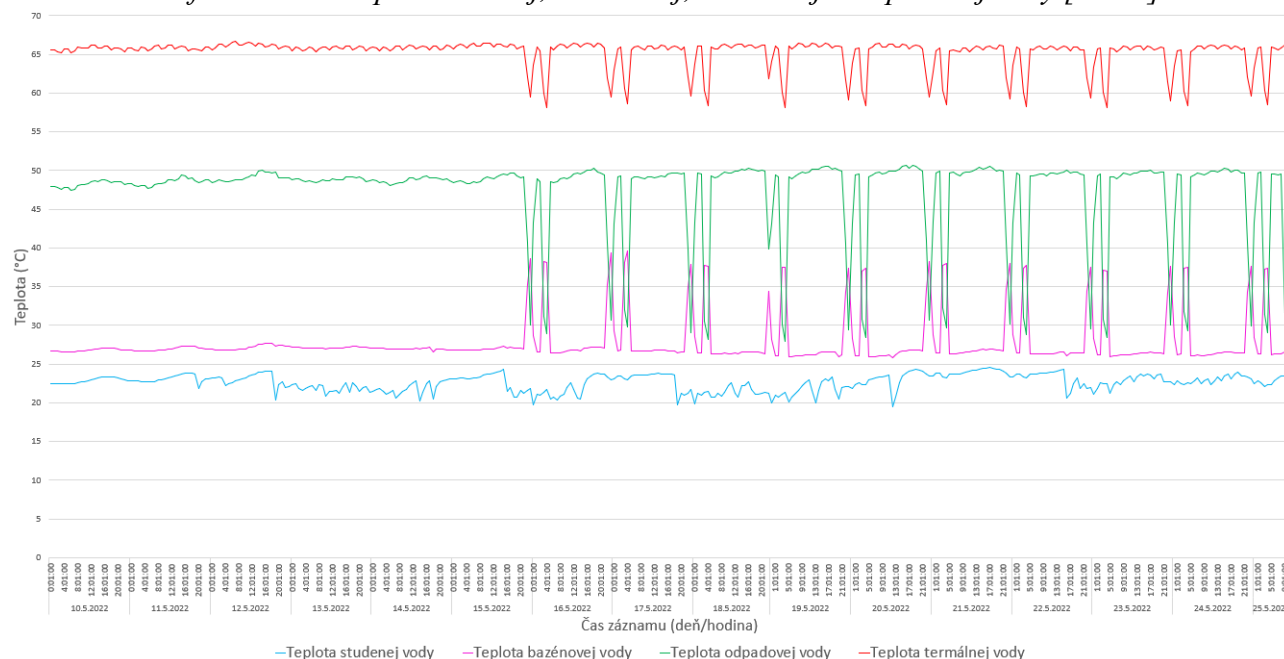
poskytnutým prevádzkovateľom bazénového hospodárstva. Priemerná teplota termálnej vody je 65,24 °C, čo taktiež odpovedá údajom poskytnutým prevádzkovateľom. Najzarážajúcejšia je však priemerná teplota odpadovej vody, ktorá je 47,25 °C.

Tabuľka 4: Výsledky meraní teploty vody [Autor]

Teplota vody	Maximálna (°C)	Priemerná (°C)	Minimálna (°C)
Studená voda	24,53	22,65	19,47
Bazénová voda	40,07	27,84	25,88
Termálna voda	66,66	65,24	58,09
Odpadová voda	50,62	47,25	27,90

Meranie ukázalo, že teplota odpadovej vody, ktorá je vypúšťaná do chladiaceho kanála je približne 47 °C. Teplota odpadovej vody meranej priamo v chladiacom kanáli bola 50 °C, čo je spôsobené tým, že v chladiacom kanáli prúdi voda z celého bazénového hospodárstva, nie len z riešeného plaveckého bazéna. Priebeh teplôt studenej, bazénovej, termálnej a odpadovej vody je uvedený v Grafe 1.

Graf 1: Priebeh teplôt studenej, bazénovej, termálnej a odpadovej vody [Autor]



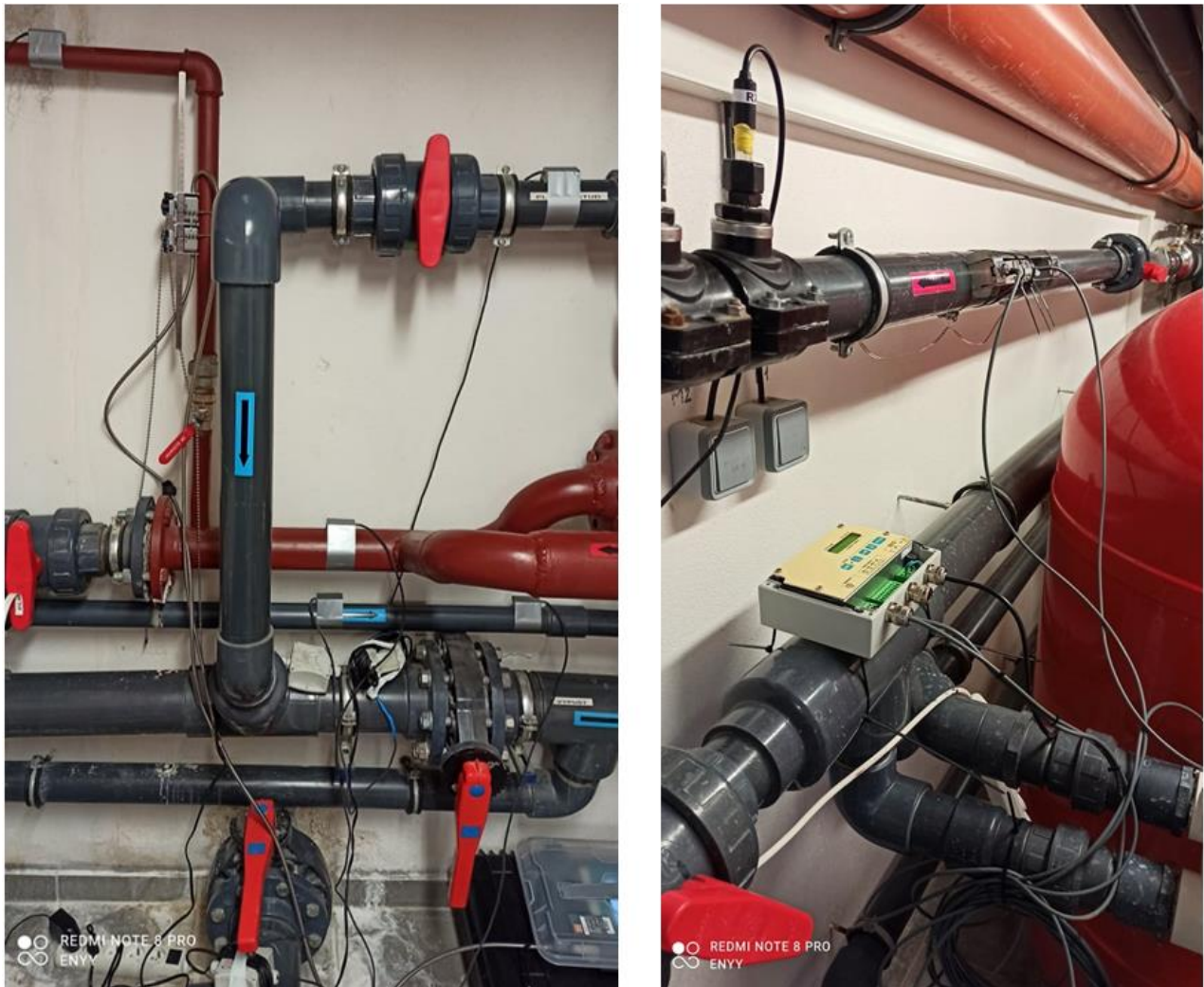
V Grafe 1 sú viditeľné pravidelné výkyvy teplôt odpadovej, bazénovej a termálnej vody. Výkyv teploty nastal každý deň v rovnakom čase približne o pol noci a nadržanom, kedy bolo podľa prevádzkovateľa realizované odstavenie prevádzky z dôvodu drobných prác na údržbe systému.

Meranie preukázalo, že teplota odpadovej vody má trvale vysokú teplotu, priemerne 47 °C. Voda s takto vysokou teplotou má nemalý energetický potenciál, ktorý nie je v tomto prípade nijak využívaný. Ďalším aspektom je, že je environmentálne neakceptovateľné, aby bola vypúšťaná do recipientu voda s takto vysokou teplotou. Preto je potrebné zrealizovať opatrenia, vďaka ktorým bude možné dosiahnuť vyhovujúce kvalitatívne parametre odpadovej vody. Dôležitým údajom je taktiež prietok odpadovej vody. Vďaka znalosti tejto hodnoty je možné navrhnúť vhodné úsporné opatrenie.

4. Experimentálne meranie prietoku vody

Dôležitým parametrom pri návrhu úsporných opatrení nie je len teplota, ale aj prietok odpadovej vody, ktorý je k dispozícii. Preto v rámci experimentálneho merania bol meraný aj prietok termálnej

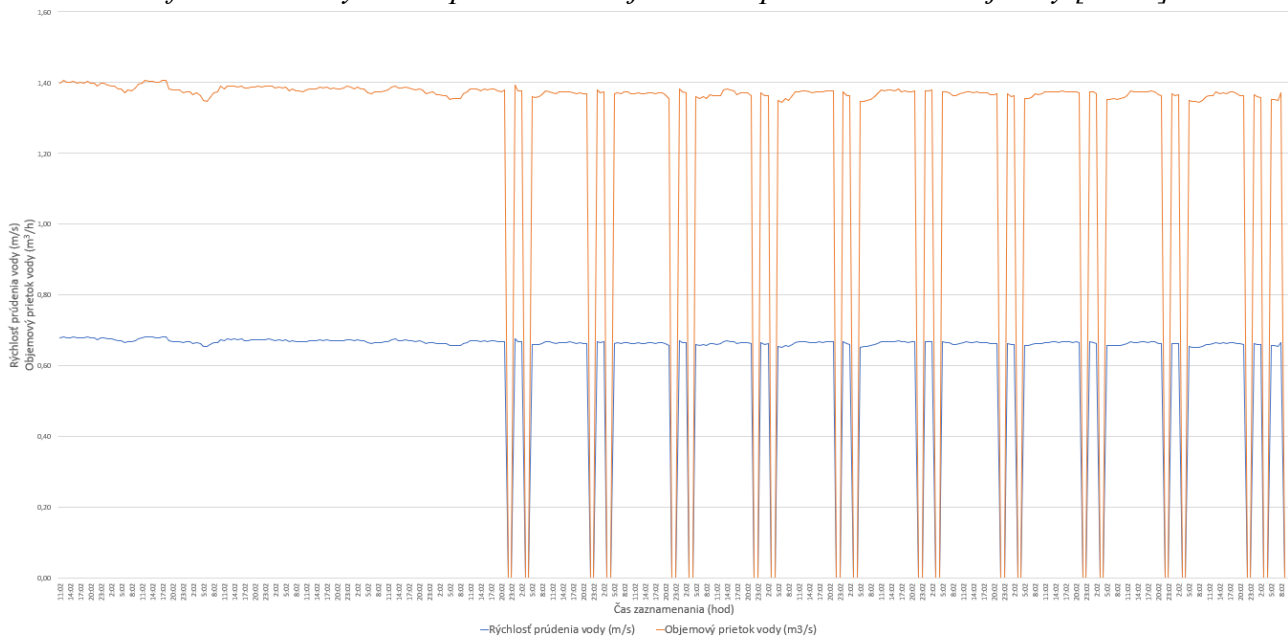
a bazénovej vody. Počas merania boli využívané ultrazvukové prietokomery. Na potrubí termálnej vody bol osadený prenosný ultrazvukový prietokomer FLEXIM Fluxus F60x. Na potrubí bazénovej vody bol osadený stacionárny ultrazvukový prietokomer FLEXIM Fluxus ADM 5107. Meranie prebiehalo v časovom horizonte od 10.5.2022 do 25.5.2022, súbežne s meraním teploty vody. Osadené prietokomery v strojovni krytého plaveckého bazéna sú znázornené na *Obr. 4*. Okrem objemového prietoku vody meracie zariadenia zaznamenávali aj rýchlosť prúdenia vody a rýchlosť zvuku.



Obrázok 4: Miesta osadenia prietokomerov v strojovni bazéna (geotermálna voda vľavo, bazénová voda vpravo) [Autor]

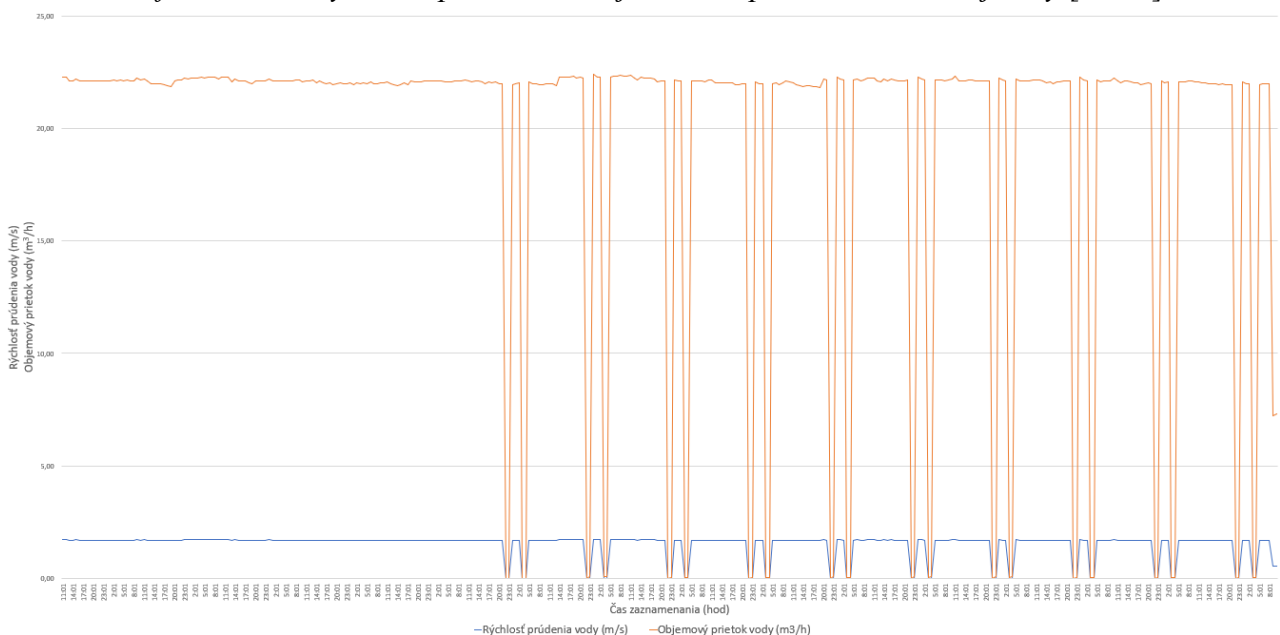
Z priebehu rýchlosti prúdenia termálnej vody je zrejmé, že hodnota kolísala len minimálne v rozmedzí od 0,67 do 0,71 m/s. Priemerná rýchlosť prúdenia termálnej vody v potrubí je 0,69 m/s. Objemový prietok termálnej vody čerpanej zo zdroja sa pohyboval v rozmedzí od 1,37 do 1,49 m³/h. Priemerný objemový prietok termálnej vody čerpanej z termálneho vrtu je 1,43 m³/h. V *Grafe 2* sú viditeľné prudké poklesy rýchlosti prúdenia aj objemového prietoku termálnej vody v rovnakom čase, kedy nastali aj poklesy teplôt v predchádzajúcom grafe. Dôvod nulových prietokov je totožný s dôvodom poklesov teplôt vody v potrubí a teda, že v tomto čase bola vykonávaná každodenná drobná údržba systému.

Graf 2: Priebeh rýchlosti prúdenia a objemového prietoku termálnej vody [Autor]



Obdobný priebeh rýchlosti prúdenia a objemového prietoku bazénovej vody je znázornený v Grafe 3. Z priebehu rýchlostí prúdenia bazénovej vody je zrejmé, že hodnota kolísala opäť len minimálne a to v rozmedzí od 1,64 do 1,71 m/s. Priemerná rýchlosť prúdenia bazénovej vody v potrubí je 1,68 m/s. Objemový prietok bazénovej vody sa pohyboval v rozmedzí od 21,98 do 22,25 m³/h. Priemerný objemový prietok bazénovej vody je 22,12 m³/h. V grafe sú znova viditeľné prudké poklesy rýchlosti prúdenia aj objemového prietoku bazénovej vody v rovnakom čase. Dôvod poklesov už bol objasnený. Prehľad výsledkov je uvedený v Tabuľke 5.

Graf 3: Priebeh rýchlosti prúdenia a objemového prietoku bazénovej vody [Autor]



Tabuľka 5: Prehľad výsledkov merania rýchlosti prúdenia a objemového prietoku vody [Autor]

Potrubie	Rýchlosť prúdenia minimálna (m/s)	Rýchlosť prúdenia maximálna (m/s)	Rýchlosť prúdenia priemerná (m/s)	Objemový prietok minimálny (m ³ /h)	Objemový prietok maximálny (m ³ /h)	Objemový prietok priemerný (m ³ /h)
Bazénová voda	1,64	1,71	1,68	21,98	22,25	22,12
Termálna voda	0,67	0,71	0,69	1,37	1,49	1,43

Vzhľadom na finančnú náročnosť ultrazvukových prietokomerov, nebolo možné merať aj rýchlosť prúdenia a objemový prietok odpadovej vody. V prípade, ak by bol využívaný prietokový bazénový systém, objemový prietok bazénovej vody by bol totožný s objemovým prietokom odpadovej vody. V riešenom prípade je však bazénový systém cirkulačný, čo znamená, že časť vody z bazéna neustále cirkuluje v systéme. Až po preplnení vyrovnávacej nádrže zo systému odteká odpadová voda. Podľa Vyhlášky Ministerstva zdravotníctva Slovenskej Republiky z 11. februára 2008 o podrobnostiach a požiadavkách na kvalitu vody kúpalísk, vody na kúpanie a jej kontrolu na kúpaliskách, musí byť zabezpečená minimálna výmena vody za deň 10 % z celkového objemu bazéna [6]. Ak je z meraní zrejmé, že priemerný objemový prietok bazénovej vody je 22,12 m³/h, potom je možné uvažovať s priemerným objemovým prietokom bazénovej vody 530,88 m³/deň. Podľa informácií od prevádzkovateľa bazénového hospodárstva je ďalej uvažované, že za deň sa vymení 10 % z objemu vody v bazéne, čo predstavuje 5,31 m³/deň.

Väčší podiel na objemovom prietoku odpadovej vody tvorí prietok termálnej vody, ktorá prechádza výmenníkom tepla a následne je odvádzaná do odpadového potrubia a chladiaceho kanála. Objemový prietok termálnej vody v bazénovom systéme 1,43 m³/h, je hodnota meraná počas experimentálnych meraní. Pri prepočte objemového prietoku za deň dostávame hodnotu 34,32 m³/h. Minimálny, maximálny a priemerný objemový prietok odpadovej vody odtekajúcej z bazénového systému za deň, je uvedený v Tabuľke 6.

Tabuľka 6: Objemový prietok odpadovej vody z bazénového systému [Autor]

Potrubie	Objemový prietok minimálny (m ³ /deň)	Objemový prietok maximálny (m ³ /deň)	Objemový prietok priemerný (m ³ /deň)
Odpadová voda	5,31 + 32,88	5,31 + 35,76	5,31 + 24,32
Odpadová voda spolu	38,19	41,07	29,63

Vzhľadom na to, že je známa teplota odpadovej vody a je možné vypočítať prietok odpadovej vody, môže byť vyjadrený taktiež energetický potenciál, ktorý odpadová voda má. Výpočet je možné spraviť pomocou kalorimetrickej rovnice v nasledujúcom tvare:

$$Q = m_{ov} \cdot \rho \cdot c_{ov} \cdot \Delta T \quad (kW) \quad (1)$$

kde: m_{ov} – je objemový prietok odpadovej vody (l/s, m³/s),
 ρ – hustota vody pre strednú teplotu odpadovej vody (kg/m³),
 c_{ov} – merná tepelná kapacita vody (kJ/kg.K),
 ΔT – rozdiel teploty termálnej a odpadovej vody (°C).

Po dosadení veličín do vzorca je možné orientačne vyčíslieť množstvo tepla, ktoré by bolo možné využiť, ak by bola odpadová voda vychladená na požadovanú teplotu 26 °C a množstvo tepla, ktoré je reálne využívané.

$$Q = m_{ov} \cdot \rho \cdot c_{ov} \cdot \Delta T = 0,0002963 \cdot 998,0 \cdot 4,173 \cdot (65,24 - 47,25) = 22,2 \text{ kW} \quad (2)$$

$$Q = m_{ov} \cdot \rho \cdot c_{ov} \cdot \Delta T = 0,0002963 \cdot 998,0 \cdot 4,173 \cdot (65,24 - 26) = 48,4 \text{ kW} \quad (3)$$

$$Q = m_{ov} \cdot \rho \cdot c_{ov} \cdot \Delta T = 0,0002963 \cdot 998,0 \cdot 4,173 \cdot (47,25 - 26) = 25,2 \text{ kW} \quad (4)$$

5. Záver

Experimentálne merania v termálnom kúpalisku ukázali priebeh teplôt, rýchlosti prúdenia a prietokov vody využívanej na prevádzku riešeného bazéna. Cieľom meraní bolo zistiť, akým spôsobom je zabezpečená prevádzka bazéna a či sú zdroje využívané dostatočne. Hlavným zdrojom v tomto prípade je termálny vrt, ktorý poskytuje vodu s teplotou približne 65 °C. Meraniami bola zistená teplota odpadovej vody, ktorá opúšťa bazénový systém. Nie veľmi šťastným zistením je, že bazén opúšťa termálna voda s teplotou až 47 °C. Je environmentálne neakceptovateľné, aby bola do recipientu vypúšťaná voda s takouto teplotou. Druhou nevýhodou je, že voda s touto teplotou má nemalý energetický potenciál, ktorý nie je nijak využitý. Je niekoľko možností, ako by bolo možné užitočne využívať energetický potenciál, ktorý je považovaný za odpadový. Prvou, ideálnou možnosťou je, zabezpečiť viacnásobný obeh termálnej vody a ohrev studenej vody v strojovni bazéna pred tým, ako bude odvedená do odpadového potrubia. Sú však aj iné možnosti ako môže byť energetický potenciál využitý, môžu však byť technicky náročnejšie. V prípade, že v prevádzke je využívané vzduchotechnické zariadenie, je možné odpadové teplo využívať na adiabatické chladenie. Pomerne náročnou aplikáciou by bolo rozmrazovanie chodníkov. Táto aplikácia by vyžadovala zásadné zásahy a úpravy v prevádzke bazénového hospodárstva. Možnosti využívania sú rôzne, je však potrebné dôkladne zvážiť, ktoré z energeticky úsporných opatrení je pre daný prípad vhodné.

V riešenom prípade je ideálnym návrhom energeticky úsporného opatrenia osadenie regulačného ventilu na odpadovom potrubí s nastavením teploty približne na 30 °C. Týmto opatrením by bolo možné obmedziť maximálnu teplotu odpadovej vody, ktorá je následne odvedená do chladiaceho kanála. Týmto krokom by bolo možné taktiež zabezpečiť menší odber termálnej vody zo zdroja.

Z výsledkov jednoduchého prepočtu je zrejme, že 53 % z celkovej energie ktorá je k dispozícii je nevyužitých. Zvyšných 47 % je užitočne využívaných počas prevádzky bazéna. Táto bilancia platí v prípade, ak zo systému odteká odpadová voda s teplotou približne 47 °C, ktorá je overená meraniami. Za predpokladu, že by bolo možné zabezpečiť teplotu odpadovej vody na hodnotu 30 °C, miera využívania energie by stúpala až na 89 % a zároveň by bola zabezpečená vyhovujúca teplota odpadovej vody.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporená Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantu VEGA 1/0303/21 a VEGA 1/0304/21.

PodĎakovanie Ing. Jánovi Il'kovi, PhD. a Ing. Martinovi Šimkovi, PhD. za pomoc pri experimentálnych meraniach v termálnom kúpalisku.

Literatúra

[1] PETRÁŠ, D. a kol.: Obnoviteľné zdroje energie pre nízko-teplotné systémy, Nakladateľstvo JAGA, Bratislava 2009, 223 str., ISBN 978-80-8076-075-5

[2] FRANKO, O. a kol.: Atlas geotermálnej energie Slovenska, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra v Bratislave, 1995, Bratislava

[3] BODIŠ, D., FRANKO, O.: Genéza geotermálnych vôd Slovenska vo vzťahu k ich explotácii, In Zborník referátov z vedeckého seminára Geotermálna energia Slovenska a jej využitie, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 1986

[4] Zákon č. 364/2004 Z. z. o vodách a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov (vodný zákon)

[5] Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 239/2010 z 25. mája 2010, ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd

[6] Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej Republiky z 11. februára 2008 o podrobnostiach a požiadavkách na kvalitu vody kúpalísk, vody na kúpanie a jej kontrolu na kúpaliskách

*Martin Sokol*¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, ročník: 2.

SIMULÁCIA TLAKOVÝCH POMEROV V SPLAŠKOVOM ODPADOVOM POTRUBÍ PRI POUŽITÍ RÔZNYCH TYPOV TVAROVIEK

SIMULATION OF PRESSURE CONDITIONS IN A FOUL WATER STACK USING DIFFERENT TYPES OF FITTINGS

Abstract

Pressure fluctuation in the foul water stack is influenced by many factors. One of the basic factor is the type of the used fittings, which by their shape influence the closure of the air core in the stack. The closure of the air core leads to a piston effect which causes a negative pressure in the stack. When the maximum negative pressure is exceeded, the water is completely sucked out of the trap. If there is no water in the trap, they lose their function of preventing the spread of unpleasant odors and possible viruses in the building interior from the drainage system. Paper deals with the simulation of the effect of the type of used fittings on the pressure fluctuation in the foul water stack in Ansys 2022 Workbench R1.

Kľúčové slová

zápachové uzávierky; odpadové potrubia; tvarovky; kolísanie tlaku

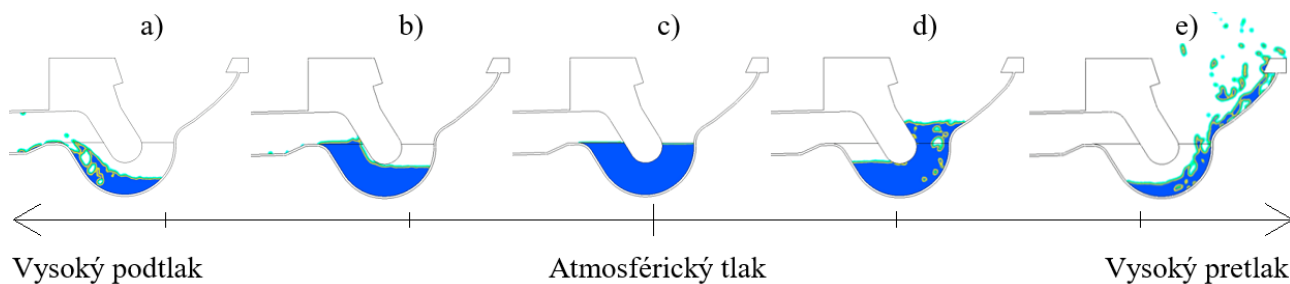
1. Úvod

Splaškové odpadové potrubia v budovách by mali byť navrhnuté tak, aby v nich nedochádzalo k vzniku nežiadúceho podtlaku alebo pretlaku (Obr. 1c) a zároveň aby sa z kanalizačných potrubí nešírili nadmerné vibrácie a hluk. Typ použitých tvaroviek patrí k jedným zo základných faktorov, ktoré ovplyvňujú kolísanie podtlaku v odpadových potrubíach. Pretlak sa v odpadovom potrubí najčastejšie vyskytuje nad zmenami smeru odpadových potrubí, podtlak v miestach pripojenia pripájacích potrubí s prítokom alebo pod zmenou smeru odpadového potrubia [6]. Pri menšom podtlaku (do 450 Pa) dochádza k odsávaniu časti vody zo zápachovej uzávierky (Obr. 1b), pri väčšom podtlaku k úplnému vysatiu vody zo zápachovej uzávierky (nad 450 Pa) (Obr. 1a). Pri menších hodnotách pretlaku dochádza k bublaniu vody v zápachovej uzávierke (Obr. 1d) a pri vyšších hodnotách k vyrážaniu vody zo zariadení predmetov (Obr. 1e). Ak sa v zápachovej uzávierke nenachádza žiadna voda, alebo voda v zápachovej uzávierke buble, stráca svoju funkciu brániť šíreniu nepríjemného zápachu a prípadne vírusov do interiéru budovy z kanalizačného systému (Obr. 1) [1].

V posledných rokoch boli vykonané zahraničné výskumy, ktoré potvrdzujú napríklad prítomnosť vírusu SARS-CoV-2 v kanalizačných systémoch budov, ktorý sa pri takejto strate funkcie zápachovej uzávierky môže dostať do interiéru budovy a ohroziť užívateľov budovy na zdraví [1, 2, 5, 7].

Úlohou simulácie v programe Ansys 2022 Workbench R1 [8] bolo zistiť vhodnosť použitia 6-tich referenčných tvaroviek v odpadovom potrubí 9 podlažnej budovy pri 2 prietokových stavoch 2,0 a 4,0 l/s. Pri simulácii neboli prekročené dovolené prietoky v odpadovom a pripájacom potrubí vyplývajúce z normy STN EN 12056 [9] a STN 73 6760 [10]. Podrobné zhrnutie nadobudnutých výsledkov na základe simulácie je popísané v kap. 4.3.

¹ Martin Sokol, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra Technických zariadení budov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava



Obr. 1: Vplyv tlaku v odpadovom potrubí na funkciu zápachového uzáveru/uzávierky na základe simulácie

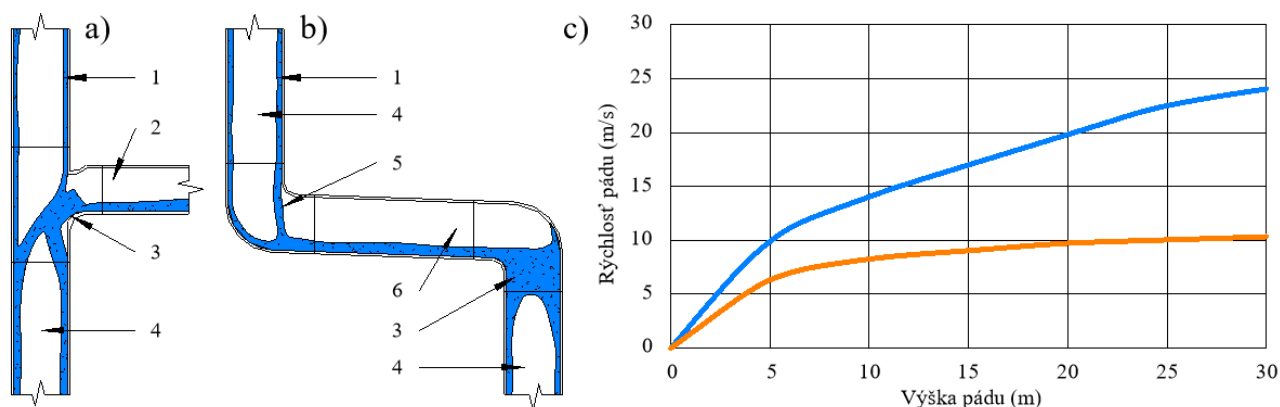
a) úplné vysatie vody (strata funkcie), b) vysatie časti vody (bez straty funkcie), c) bez vplyvu na hladinu vody, d) bublanie vody (možná strata funkcie), e) vyrazenie/vytlačenie vody (strata funkcie)

2. Kolísanie tlaku a rýchlosť prúdenia v splaškovom odpadovom potrubí

Voda v splaškovom odpadovom potrubí počas gravitačného prúdenia obteká vnútorné steny potrubia a vytvára dutý valec so vzduchovým jadrom. V mieste pripojenia pripájacích potrubí s prítokom sa vzduchové jadro postupne uzatvára, čo vedie k piestovému efektu a následnému vzniku podtlaku (Obr. 2a). Pri piestovom efekte je do odpadového potrubia z atmosféry prisávané až 35 násobne väčšie množstvo vzduchu, ako je prietok vody. V prípade nesprávneho návrhu odpadového potrubia sa vzduch začne prisávať aj z pripájacích potrubí, čo spôsobuje neželané vysatie vody zo zápachových uzávierok. Ak je v odpadovom potrubí malý alebo nulový prietok, vzduch prúdi v odpadovom potrubí zdola nahor. Tlaková strata, ktorá vzniká pri takomto prúdení je jednou z ďalších príčin vzniku podtlaku [4].

Medzi ďalšie problematické miesta patria aj zmeny smeru odpadových potrubí. Ak sa smer odpadového potrubia zmení o viac ako 45°, prierez potrubia sa v mieste zmeny smeru začína zaplňovať a vzniká hydraulický skok. Prúdiaci vzduch zmení v mieste zaplnenia prierezu náhle smer a prúdi zdola nahor, čo spôsobí podtlak, ktorý môže vyraziť vodu zo zariadení predmetov (Obr. 2b). Okrem iného sa pri takýchto zmenách smeru generujú nadmerné vibrácie a hluk, ktoré sa šíria do okolitých priestorov a konštrukcií z kanalizačného systému [6].

Na Obr. 2c sú znázornené dva stavy rýchlosti prúdenia vody v odpadovom potrubí. Modrá krivka predstavuje teoretickú rýchlosť prúdenia podľa Torricelliho zákona a oranžová krivka reálnu rýchlosť prúdenia vody v odpadovom potrubí (zohľadňuje odpor vzduchu a trenie o vnútorné steny potrubia).



Obr. 2: Charakter a rýchlosť prúdenia vody v splaškovom odpadovom potrubí [1]

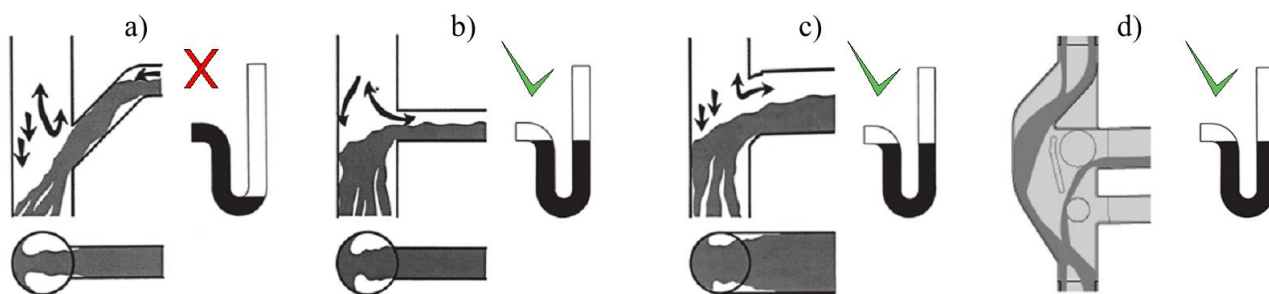
a) prúdenie vody v mieste pripojenia pripájacieho potrubia na odpadové potrubie, b) prúdenie vody v mieste zmeny smeru odpadového potrubia, c) rýchlosť prúdenia vody, ■ teoretická rýchlosť prúdenia, ■ reálna rýchlosť prúdenia, 1 – obtekanie vnútorných stien odpadového potrubia, 2 – prítok vody z pripájacieho potrubia, 3 – uzavretie vzduchového jadra (vznik piestového efektu), 4 – vzduchové jadro, 5 – náraz vody na stenu oblúka, uzavretie vzduchového jadra, 6 – ustálené prúdenie

Z modrej krivky vyplýva, že voda po približne 20 metroch dosahuje rýchlosť 12 m/s, nárast rýchlosti je od tejto hranice minimálny. Po približne 35 metroch dosiahne svoju maximálnu rýchlosť 13 m/s, ktorú kvôli odporu vzduchu a treniu o steny potrubia ďalej nepresahuje. Na základe týchto javov možno konštatovať, že navrhovať na odpadovom potrubí zalomenia a odskoky s cieľom znížiť rýchlosť prúdenia vody nemá význam. Najväčší nárast rýchlosti predstavuje prvých 10 m pádu.

3. Tvarovky pre odpadové potrubia

Voda z pripájacieho potrubia naráža na protíľahlú stenu odpadového potrubia a následne klesá smerom nadol. Tvarovky, ktoré sa nachádzajú na odpadovom potrubí svojim tvarom ovplyvňujú zaraďovanie vody z pripájacieho potrubia do hlavného toku a tak isto ovplyvňujú aj uzatváranie vzduchového jadra. Tieto faktory výrazne ovplyvňujú tlakové pomery v odpadových potrubíach. Experimentálne merania ukázali, že pri pripojení pripájacieho potrubia na odpadové potrubie pomocou jednoduchej odbočky 45° môže dôjsť pri väčších prietokoch k uzavretiu prierezu pripájacieho potrubia, čo môže viesť k vysatiu vody zo zápachovej uzávierky, obr. 3a. Z hľadiska tlakových pomerov v pripájacích potrubíach nastáva priaznivejšie prúdenie pri:

- jednoduchej odbočke 88,5° bez oblúkovej úpravy, obr. 3b,
- jednoduchej odbočke 88,5° s oblúkovou úpravou, obr. 3c,
- tvarovke Sovent, obr. 3d.



Obr. 3: Vybrané typy tvaroviek pre odpadové potrubia [1, 11]

a) jednoduchá odbočka 45°, b) jednoduchá odbočka 88,5° bez oblúkovej úpravy, c) jednoduchá odbočka 88,5° s oblúkovou úpravou, d) tvarovka Sovent, X - nevyhovuje, ✓ - vyhovuje

Voľba typu tvarovky výrazne ovplyvňuje celý návrh odpadového potrubia z hľadiska dovoleného prietoku Q_{max} (l/s). Dovoľené prietoky odpadovým potrubím s priamym vetraním sú znázornené v Tab. 1.

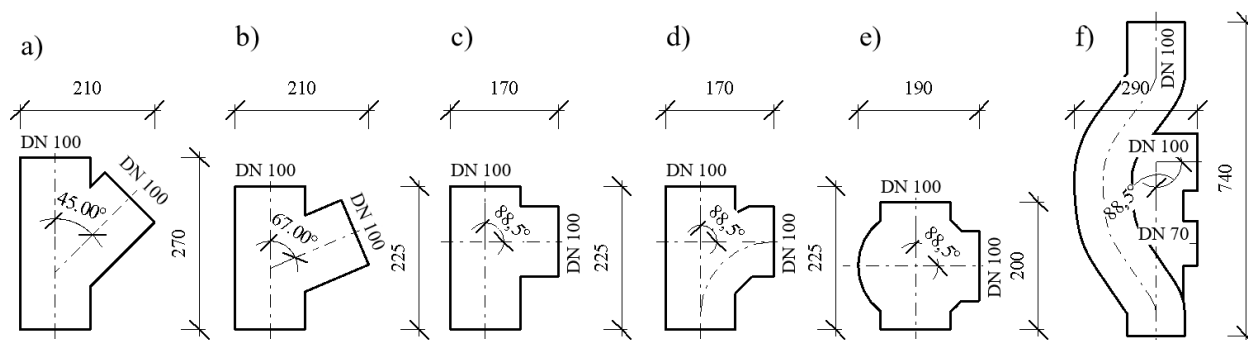
Tab. 1: Dovoľené prietoky v odpadovom potrubí s priamym vetraním pri rôznych typoch použitých tvaroviek [9, 11]

Menovitá svetlosť odpadového potrubia (DN)	Dovoľený prietok Q_{max} (l/s)		
	odbočky > 45°	jednoduchá odbočka 45°, jednoduchá odbočka 88,5° s oblúkovou úpravou	tvarovka Sovent
DN 70	1,5	2,0	-
DN 100	4,0	5,2	12,0
DN 125	5,8	7,6	-
DN 150	9,5	12,4	17,0

Okrem spomenutých tvaroviek existujú aj mnohé iné, o ktorých nie sú k dispozícii experimentálne overené údaje o charaktere prúdenia. Cieľom simulácií bolo znázorniť priebeh prúdenia vody aj v iných typoch tvaroviek.

4. Hodnotenie simulácie tlakových pomerov v odpadovom potrubí

Simulácia tlakových pomerov pozostávala zo sledovania kolísania tlaku v odpadovom potrubí pri použití 6 typov odbočiek (Obr. 4). Získané hodnoty boli vyhodnocované z hľadiska vplyvu tlaku na hladinu vody v zápachovej uzávierke tak, aby nedochádzalo k šíreniu nepríjemného zápachu a vírusov v budove. V odpadovom potrubí DN 100, ktoré bolo vysoké 27,5 m (9.NP) bol simulovaný krátkodobý prietok, ktorý nepresiahol 4,0 l/s. Do odpadového potrubia pritekala voda z pripájacích potrubí DN 100 na 9 a 8. NP, na ktorých bolo osadené 1 WC.



Obr. 4: Simulované tvarovky na splaškovom odpadovom potrubí

a) jednoduchá odbočka 45°, b) jednoduchá odbočka 67°, c) jednoduchá odbočka 88,5° bez oblúkovej úpravy, d) jednoduchá odbočka 88,5° s oblúkovou úpravou, e) guľová odbočka, f) tvarovka Sovent

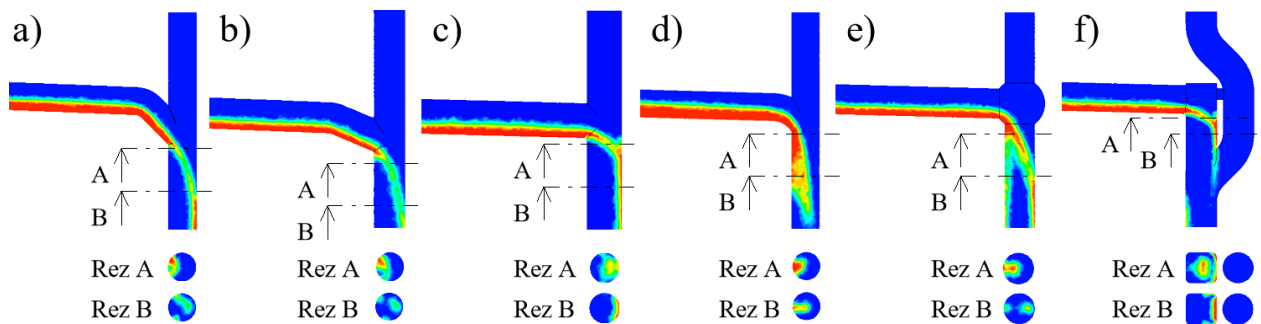
V grafe priebehu tlaku v odpadovom potrubí (Obr. 6), pri použití rôznych typov odbočiek, sú znázornené 2 hraničné podtlaky. Podtlak s hodnotou ≤ 300 Pa nemá žiadny vplyv na zápachovú uzávierku s výškou vody 50 mm, po prekročení tejto hodnoty začína dochádzať ku kolísaniu hladiny vody a jej malým úbytkom. Pri prekročení podtlaku 450 Pa (v praxi pri približne 464 Pa) stráca zápachová uzávierka svoju funkciu.

4.1 Uzatváranie prierezu vzduchového jadra v odpadovom potrubí

V mieste pripojenia pripájacieho potrubia na odpadové potrubie (na 9.NP) bolo pozorované uzatváranie prierezu vzduchového jadra. Prietok z pripájacieho potrubia predstavoval spláchnutie 1 WC, ktorého výpočtový odtok DU je 2,0 l/s. Priebehy uzatvárania prierezu vzduchového jadra v % sú znázornené v Tab. 2 a Obr. 5. Pri tvarovke Sovent však 50 %-né uzatvorenie prierezu neznamená, že priebeh podtlaku bude horší ako napríklad pri jednoduchej odbočke 88,5°. Tým, že hlavný tok je pri tejto tvarovke odklonený, nedochádza ku kolíznej turbulencii dvoch prúdov. Väčšie zaplnenie prierezu bolo spôsobené tým, že táto tvarovka nemá oblúkovú úpravu, ktorá by zvýšila veľkosť vzduchového jadra.

Tab. 2: Uzatváranie prierezu vzduchového jadra v odpadovom potrubí

Typ tvarovky	Uzatvorenie prierezu vzduchového jadra (%)
Jednoduchá odbočka 45°	30
Jednoduchá odbočka 67°	45
Jednoduchá odbočka 88,5° bez oblúkovej úpravy	55
Jednoduchá odbočka 88,5° s oblúkovou úpravou	30
Guľová odbočka	35
Tvarovka Sovent	50

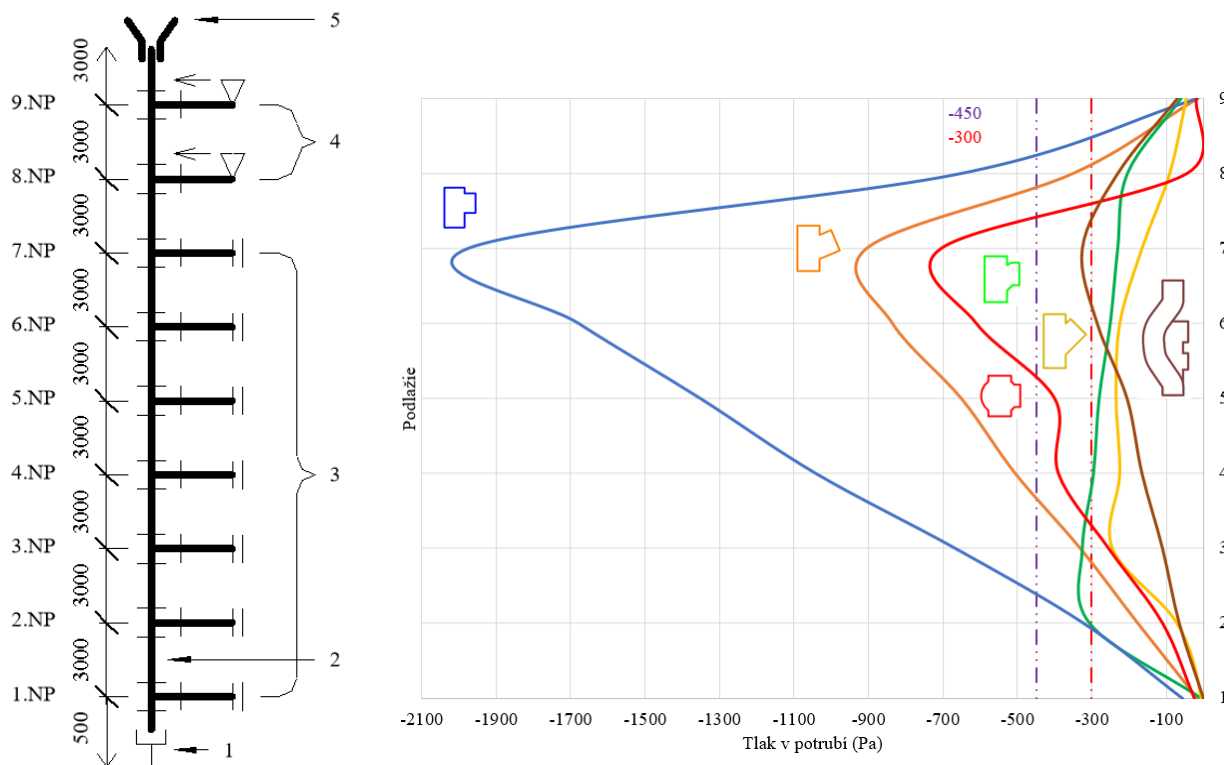


Obr. 5: Uzatváranie prierezu odpadového potrubia v mieste pripojenia pripájacieho potrubia

a) s jednoduchou odbočkou 45°, b) s jednoduchou odbočkou 67°, c) s jednoduchou odbočkou 88,5° bez oblúkovej úpravy, d) s jednoduchou odbočkou 88,5° s oblúkovou úpravou, e) s guľovou odbočkou, f) s tvarovkou Sovent

4.2 Kolísanie tlaku v odpadovom potrubí

Na Obr. 6 je znázornené kolísanie tlaku v odpadovom potrubí 9 podlažnej budovy pri použití rôznych typov odbočiek. Krivky predstavujú hraničné hodnoty podtlaku, ktoré vznikli pri maximálnom prietoku v odpadovom potrubí 4,0 l/s (spláchnutie WC na 9 a 8.NP). Z grafu je vidieť, že tlak v odpadovom potrubí s guľovou odbočkou, jednoduchou odbočkou 67° a 88,5° bez oblúkovej úpravy prekročil maximálnu hranicu podtlaku 450 Pa na viacerých podlažiach. Na týchto podlažiach by došlo k strate funkcie zápachovej uzávierky, čo by viedlo k šíreniu nepríjemného zápachu a vírusov do interiéru budovy. Ostatné tvarovky ako Sovent, jednoduchá odbočka 45° a 88,5° s oblúkovou úpravou maximálnu hranicu podtlaku neprekročili.



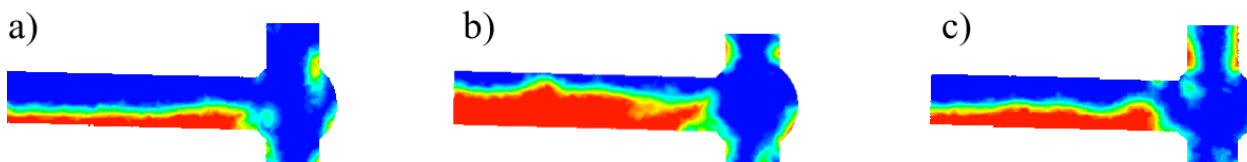
Obr. 6: Kolísanie tlaku v odpadovom potrubí 9 podlažnej budovy

Priebeh tlaku: ■ jednoduchá odbočka 88,5° bez oblúkovej úpravy, ■ jednoduchá odbočka 67°, ■ guľová odbočka, ■ jednoduchá odbočka 88,5° s oblúkovou úpravou, ■ jednoduchá odbočka 45°, ■ tvarovka Sovent
1 – voľný výtok, 2 – odpadové potrubie DN 100, 3 – pripájacie potrubie DN100 bez prítoku, 4 – pripájacie potrubie DN100 s prítokom, 5 – vetranie odpadového potrubia

4.3 Zhrnutie výsledkov a nadobudnutých poznatkov

Na základe výsledkov simulácie tlakových pomerov v odpadovom potrubí, pri použití rôznych typov tvaroviek, možno konštatovať:

- počas prietoku 2,0 l/s z pripájacieho potrubia nedochádzalo pri jednoduchej odbočke 45° k neželanému uzatváraniu prierezu pripájacieho potrubia v mieste zmeny smeru, ktoré by spôsobovalo stratu funkcie zápachových uzávierok,
- pri jednoduchej odbočke 88,5° bez oblúkovej úpravy dochádzalo už pri spláchnutí 1 WC (2,0 l/s) k prekročeniu maximálnej hranice podtlaku z čoho vyplýva, že je nevhodné používať jednoduchú odbočku 88,5° bez oblúkovej úpravy na pripojenie pripájacieho potrubia s WC,
- oblúčková úprava výrazne znižuje podtlak v odpadovom potrubí, v porovnaní s jednoduchou odbočkou 88,5° bez oblúkovej úpravy je to menej až o 60 %,
- priebeh kolísania tlaku v odpadovom potrubí s jednoduchou odbočkou 88,5° s oblúčkovou úpravou bolo podobné a porovnateľné s jednoduchou odbočkou 45°,
- pri guľovej odbočke dochádza k zaplňaniu pripájacích potrubí na nižších podlažiach, ktoré sú bez prítoku (Obr. 7), z tohto dôvodu by sa malo nachádzať na odpadovom potrubí čo najmenej typov týchto tvaroviek,



Obr. 7: Zaplňanie pripájacích potrubí na nižších podlažiach pri prietoku vody odpadovým potrubím
a) pripájacie potrubie na 1.NP, b) pripájacie potrubie na 4.NP, c) pripájacie potrubie na 6.NP

- najvhodnejšie riešenie z hľadiska kolísania tlaku v odpadovom potrubí pre budovy vyšším počtom podlaží predstavuje tvarovka Sovent, jednoduchá odbočka 45° a 88,5° s oblúčkovou úpravou (Tab. 3).

Tab. 3 Maximálne dosiahnuté hodnoty podtlaku v odpadovom potrubí pri použití rôznych typov tvaroviek a daných okrajových podmienkach

Použité tvarovky na odpadovom potrubí		Prietok (l/s)	
		2,0	4,0
jednoduchá odbočka 45°	Maximálna hodnota podtlaku (Pa)	-125	-245
jednoduchá odbočka 67°		-340	-905
jednoduchá odbočka 88,5° bez oblúkovej úpravy		-645	-1975
jednoduchá odbočka 88,5° s oblúčkovou úpravou		-290	-325
guľová odbočka		-90	-705
tvarovka Sovent		-215	-325

■ *vyhovuje*, ■ *nevyhovuje*

5. Záver

Pri návrhu splaškových odpadových potrubí zohráva veľmi dôležitú úlohu výber typu tvarovky. Správnym výberom je možné predísť nežiadúcim vplyvom, ktoré sú spojené s vysávaním vody zo zápachových uzávierok/uzáverov a následným šírením zápachu a vírusov do interiéru budovy. Táto problematika sa vo veľkej miere týka vysokých budov, no v súčasnosti nastávajú problémy so stratou

funkcie zápachových uzávierok už v budovách s nižším počtom podlaží. Simuláciou tlakových pomerov v odpadovom potrubí sa potvrdili niektoré poznatky z prúdenia splaškovej odpadovej vody v odpadovom potrubí. Treba si uvedomiť, že odpadovým potrubím počas simulácie pretekala čistá voda, ktorá má iné zloženie ako reálna splašková voda. V realite by sa niektoré výsledky experimentálneho merania mohli líšiť.

Pod'akovanie

Príspevok bol podporovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantov VEGA 1/0303/21 a KEGA 005STU-4/2021.

Literatúra

- [1] GORMLEY, M. - KELLY, D. - CAMPBELL, D. - XUE, Y. - STEWART, C. (2021) *Building Drainage System Design for Tall Buildings: Current Limitations and Public Health Implications*. In: *Buildings*, 11 (2). <https://doi.org/10.3390/buildings11020070>
- [2] GORMLEY, M. - ASPRAY, T. - KELLY, D. *Building Drainage System Design for Tall Buildings: Current Limitations and Public Health Implications*. In: *Buildings*. 2020, 11 (2). Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30112-1](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30112-1)
- [3] HEINRICHS, F. - RICKMANN, B. - SONDERGELD, K. - STÖRRLEIN, K. *Kommentar zum DIN 1986-100 and EN 12056-4*. Gebäude und Grund stücksentwässerung: 2010, DIN Deutsches Institut für Normung, s. 126–127 ISBN 978-3-410-20533-3.
- [4] PERÁČKOVÁ, J. (2018) *Dimenzovanie splaškových odpadových potrubí*. TZBinfo. Available at: <https://voda.tzb-info.cz/kanalizace-splaskova/17916dimenzovaniesplaskovych-odpadovych-potrubi>.
- [5] SCHEUTZ, F. - STROCKBINE, N. A. (2015) *Escherichia*. In: *Bergey's Manual of Systematics in Archaea and Bacteria*. Eds. M. E. Trujillo, P. Dedysh, B. DeVos, B. Hedlund, P. Kampf, F. A. Rainey et al. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.). <https://doi.org/10.1002/9781118960608.gbm01147>
- [6] VRÁNA, J. *Vnitřní kanalizace ve vysokých budovách*. In: TZBinfo [online]. 2004. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vyskove-budovy/2029-vnitri-kanalizace-ve-vysokych-budovach>
- [7] ZHENG, S. - FAN, J. - YU, F. - FENG, B. - LOU, B. - ZOU, Q., et al. (2020) *Viral Load Dynamics and Disease Severity in Patients Infected with SARS-CoV-2 in Zhejiang Province, China, Jan-Mar 2020: Retrospective Cohort Study*. In: *BMJ* 369, m1443. <https://doi.org/10.1136/bmj.m1443>
- [8] Ansys:2009 User Fluent 12.0 guide. Dostupné z: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm
- [9] STN EN 12056 - Gravitačné kanalizačné systémy vnútri budov.
- [10] STN 736760 - Kanalizácia v budovách.
- [11] Geberit – firemné podklady.

*Tomáš Strenk*¹

Teória a technika prostredia budov, 2. ročník

KVALITA VNÚTORNÉHO PROSTREDIA V BYTOVÝCH DOMOCH PO KOMPLEXNEJ OBNOVE

THE QUALITY OF THE INDOOR ENVIRONMENT IN APARTMENT BUILDINGS AFTER COMPLEX RENOVATION

Abstract

The quality of the indoor environment in apartment buildings that have undergone reconstruction is currently a highly debated topic. Sealing of building envelopes causes problems with indoor air quality. Condensation of water vapour on window structures, mould on interior surfaces, poor sleep quality and various respiratory diseases are the result of the rapid increase in the tightness of building envelopes and also of worse ventilation of apartment spaces. The aim of the evaluation was to compare the measured values of the thermal-humidity microclimate parameters with the values set by the relevant legislation, to elaborate graphs, to identify deficiencies in the quality of the indoor environment and to propose possible solutions to the deficiencies.

Kľúčové slová

kvalita vnútorného prostredia; koncentrácia oxidu uhličitého; komplexná obnova; relatívna vlhkosť vzduchu; teplota vzduchu; kvalita spánku; vetranie

1. Úvod

Primárnym cieľom komplexnej obnovy bytových domov je zlepšenie energetických, ekonomických a environmentálnych parametrov budov. Tento cieľ býva dosahovaný zlepšením tepelno-technických vlastností stavebných konštrukcií obálky budov, výmenou otvorových konštrukcií, výmenou systémov na vykurovanie a prípravu teplej vody v budovách, a s tým spájajúce sa hydraulické vyregulovanie vykurovacích sústav. Najmä opatrenia spojené so zateplením obvodových plášťov a výmenou otvorových konštrukcií spôsobujú značné problémy s kvalitou vnútorného prostredia obytných priestorov. Tieto problémy sú zapríčinené zvýšením tesnosti obálky budovy, čo spôsobuje rapídne zníženie výmeny vzduchu infiltráciou cez netesnosti v stavebných konštrukciách. Faktorom, ktorý nemožno zanedbať, je aj správanie sa obyvateľov daných priestorov, ich povedomie o tom, ako a kedy správne vetrať tak, aby mal vzduch v interiéri optimálne parametre pre zdravý pobyt osôb.

Tento príspevok sa venuje analýze kvality vnútorného prostredia v bytovom dome, ktorý prešiel komplexnou obnovou budovy. V objekte boli hodnotené dve bytové jednotky situované na rôznych podlažiach, v rámci ktorých sa hodnotili miestnosti s rôznou orientáciou na svetové strany. Meraniami vnútorného prostredia sme zistili stav kvality vnútorného vzduchu v obytných miestnostiach bytových jednotiek.

¹ Autori: Ing. Tomáš Strenk, Stavebná fakulta STU Bratislava, Katedra TZB, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Legislatívne požiadavky na vnútorné prostredie obytných budov

Najdôležitejšími parametrami, ktorými je definované vnútorné prostredie obytných budov, sú teplota vnútorného vzduchu, relatívna vlhkosť vnútorného vzduchu a koncentrácia oxidu uhličitého a iných škodlivín vo vzduchu. Súvisiacim parametrom, ktorý je výsledkom výpočtu z predchádzajúcich parametrov, je teplota rosného bodu, ktorá je dôležitý ukazovateľ pri problémoch s kondenzáciou vodnej pary alebo pri vzniku plesní a iných mikrobiologických ukazovateľov v miestnostiach. Ďalšími parametrami, ktoré sme v tomto prípade nehodnotili sú napríklad hladina hluku a rýchlosť prúdenia vzduchu v priestore, ktorý sa hodnotí najmä v budovách s núteným vetraním.

Požiadavky pre parametre vnútorného prostredia obytných budov vychádzajú z viacerých legislatívnych predpisov. Pre túto analýzu sú podstatné STN EN 16798-1:2019 a Vyhláška MZ SR č. 124/2017 Z. z.. Súhrn požiadaviek na vnútorné prostredie obytných budov je uvedený v Tab. 1.

Tab. 1 Súhrn požiadaviek na parametre vnútorného prostredia obytných budov [1], [2]

Trieda práce / Kategória obytnej budovy	Optimálna operatívna teplota θ_o (°C)	Prípustná relatívna vlhkosť vzduchu φ (%)	Návrhová koncentrácia CO ₂ pre obytné miestnosti (ppm) (nad koncentráciu v exteriéri)	Návrhová koncentrácia CO ₂ pre spálne (ppm) (nad koncentráciu v exteriéri)
0 / III	22 až 26	30 až 70	1350	950

Hodnotený bytový dom sa nachádza v meste Bratislava v mestskej časti Rača. V rámci analýzy sme hodnotili tri spálne, pričom každá bola obývaná jednou dospelou osobou. Miestnosti boli orientované na západnú a východnú stranu. Hodnotenú byty sa nachádzali na 10. a 14. podlaží. V hodnotenom bytovom dome je zabezpečené len prirodzené vetranie oknami.

3. Experimentálne meranie

Za účelom hodnotenia stavu kvality vnútorného prostredia v konkrétnom bytovom dome sme vykonali meranie charakteristických parametrov vnútorného prostredia. Predmetom merania boli tri spálne s plochou približne 13 m², ktoré vo všetkých troch prípadoch obývala jedna dospelá osoba. Merania prebiehali po dobu 21 dní, v zimnom období, na prelome rokov 2021 a 2022.



Obr. 1 Pohľad na hodnotený bytový dom [Google]

3.1 Ciele merania

Cieľmi experimentálnych meraní bolo:

- zistiť, či teplota vnútorného vzduchu, koncentrácia oxidu uhličitého CO₂ a relatívna vlhkosť vzduchu v priestore spálne spĺňajú požiadavky stanovené príslušnými legislatívnymi predpismi a technickými normami,
- na základe nameraných hodnôt zistiť možné nedostatky v kvalite vnútorného prostredia a navrhnúť opatrenia na odstránenie týchto nedostatkov.

3.2 Metodika merania

3.2.1 Metodika z hľadiska meracích prístrojov

Na účely merania parametrov vnútorného prostredia boli použité meracie prístroje Comet U3430 [4]. Tieto meracie prístroje zaznamenávajú teplotu vzduchu, teplotu rosného bodu, koncentráciu oxidu uhličitého CO₂ vo vzduchu a relatívnu vlhkosť vzduchu.

3.2.2 Metodika z hľadiska meraných parametrov vnútornej mikroklímy

Použité meracie prístroje sú vybavené snímačmi na meranie teploty vzduchu v interiéri, relatívnej vlhkosti vzduchu, koncentrácie oxidu uhličitého CO₂ vo vzduchu a automaticky počítajú teplotu rosného bodu vzduchu v interiéri na základe predchádzajúcich parametrov.

Kritériom pre vnútorné prostredie v zimnom období je spodná hraničná hodnota operatívnej teploty vnútorného vzduchu. Ak je sálavá teplota okolitých povrchov v priestore približne rovnaká ako teplota vnútorného vzduchu, môžeme vo výpočtoch uvažovať operatívnu teplotu vnútorného vzduchu rovnakú ako teplotu vnútorného vzduchu.

3.2.3 Metodika z hľadiska času a podmienok merania

Meranie parametrov vnútornej mikroklímy prebiehalo v období od 18.12.2021 do 08.01.2022, celkom 21 kalendárnych dní vrátane víkendov. Hodnoty merania sa zaznamenávali v 5-minútových intervaloch. Pre prehľadnosť výsledkov sa vybrané merané obdobie skrátilo na jeden kalendárny týždeň od 24.12.2021 do 31.12.2021.

3.2.4 Metodika z hľadiska umiestnenia meracích prístrojov

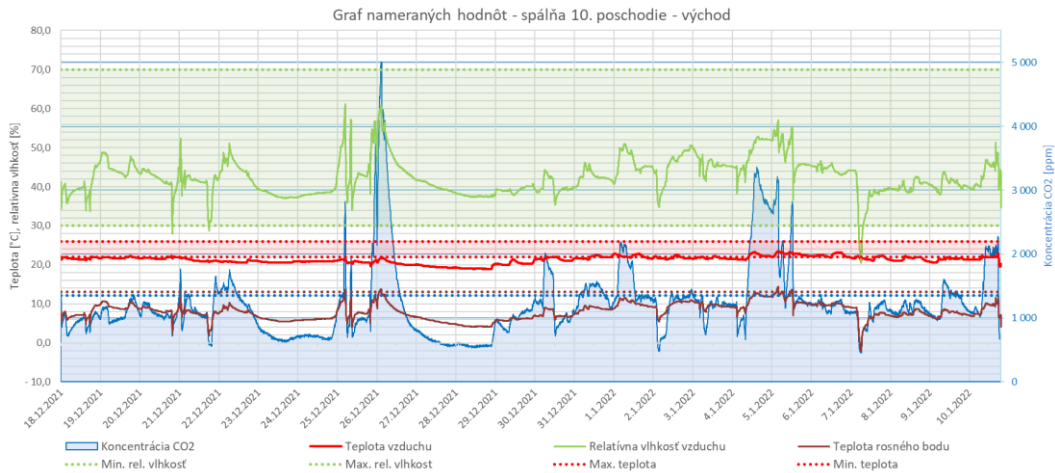
Pre čo najpresnejšie a najobjektívnejšie výsledky meraní je optimálne umiestniť meracie prístroje do stredu dispozície meranej miestnosti do výšky približne 1,5 m nad podlahou, avšak z praktického hľadiska je takéto umiestnenie prístrojov problematické. V rámci našich meraní boli meracie prístroje umiestnené na policiach pri stenách miestností vo výške približne 1,3 m. Prístroje boli umiestnené tak, aby sa nenachádzali priamo nad priestorom spiacich obyvateľov, čo by mohlo negatívne ovplyvniť výsledky meraní.

3.3 Požiadavky na vnútornú mikroklímu a kvalitu vzduchu

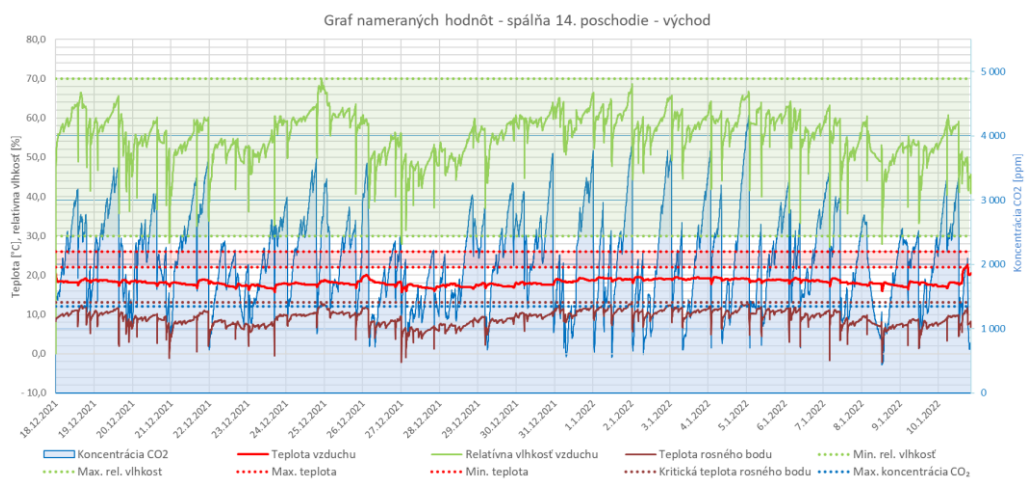
Analyzovanými parametrami, ktoré ovplyvňovali tepelno-vlhkostnú mikroklímu, boli teplota vnútorného vzduchu, teplota rosného bodu, koncentrácia oxidu uhličitého CO₂ a relatívna vlhkosť vzduchu. Požiadavky na tepelno-vlhkostnú mikroklímu vychádzali z Vyhlášky MZ SR č. 124/2017 Z. z. [1] a STN EN 16798-1:2019 [2].

3.4 Výsledky meraní

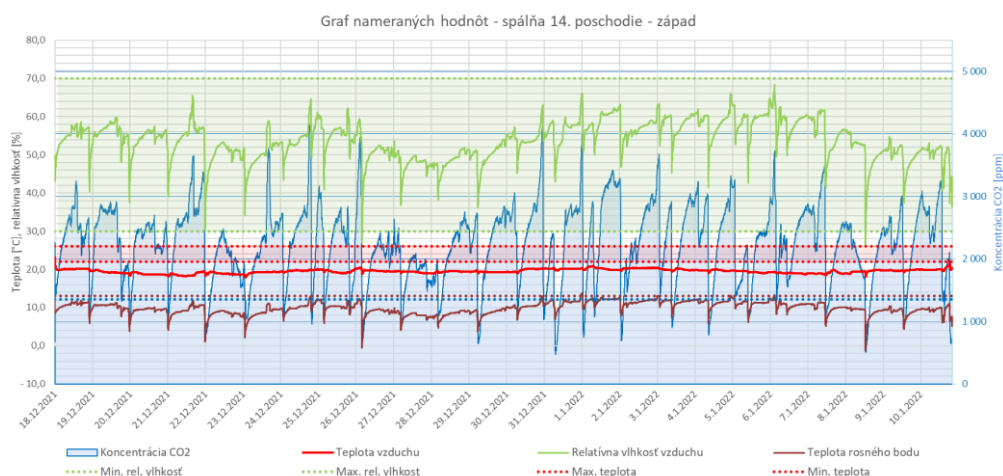
Analýza výsledkov bola vykonaná prostredníctvom grafov (Obr. 2 – Obr. 4) na základe údajov jednotlivých meraných parametrov z meracích prístrojov.



Obr. 2 Graf nameraných hodnôt pre spáľňu na 10. poschodí orientovanú na východ [zdroj: autor]



Obr. 3 Graf nameraných hodnôt pre spáľňu na 14. poschodí orientovanú na východ [zdroj: autor]



Obr. 4 Graf nameraných hodnôt pre spáľňu na 14. poschodí orientovanú na západ [zdroj: autor]

3.5 Analýza výsledkov

Na základe nameraných hodnôt možno konštatovať, že vo veľkej miere ovplyvňujú kvalitu vnútorného prostredia samotní obyvatelia daného bytu. Z grafov je zrejmé, že optimálnu teplotu v chladnom období podľa Vyhlášky MZ SR č. 124/2017 Z. z. [1] nedosahovala ani jedna hodnotená miestnosť, avšak komfortná teplota v priestoroch spálne je pomerne subjektívny parameter, preto optimálna teplota +22 °C môže byť pre obyvateľov bytov príliš vysoká.

Relatívna vlhkosť vzduchu je vo všetkých troch prípadoch v prípustnom rozmedzí hodnôt medzi 30 až 70 %. Faktom ostáva, že pri relatívnej vlhkosti nad 60 % sa ľudia začínajú v miestnosti výraznejšie potiť a hrozí vznik rôznych škodlivých látok a mikroorganizmov. Na druhej strane, ak je relatívna vlhkosť vzduchu nižšia ako 40 %, vzduch v miestnosti začína byť suchý a môže dochádzať k nepriaznivému zvýšenému pohybu jemných častíc vo vzduchu, ktoré obyvatelia môžu vdychovať.

Teplota rosného bodu, ktorá je výsledkom výpočtu z teploty vnútorného vzduchu a relatívnej vlhkosti vzduchu nedosahovala ani v jednej hodnotenej miestnosti hodnoty vyššie ako je kritická teplota rosného bodu, pri ktorej hrozí vznik plesní a iných mikroorganizmov. Takisto v miestnostiach nedochádzalo ani v jednom prípade ku kondenzácii vodnej pary na vnútorných povrchoch, preto možno konštatovať, že obálka budovy po komplexnej obnove spĺňa hygienické kritérium povrchovej teploty na vnútornom povrchu podľa STN 73 0540-2+Z1+Z2: 2019 [3].

Najzaujímavejším meraným parametrom bola koncentrácia oxidu uhličitého CO₂ vo vzduchu. Na základe normy STN EN 16798-1:2019 [2] by koncentrácia nemala pre miestnosti spálni prekročiť hodnotu vyššiu ako 950 ppm nad koncentráciu oxidu uhličitého obsiahnutého vo vonkajšom vzduchu. V spálni na 10. poschodí sa koncentrácia oxidu uhličitého udržiavala na veľmi dobrých hodnotách, len v ojedinelých momentoch koncentrácia presahovala kritickú hodnotu stanovenú normou. V ostatných dvoch meraných miestnostiach možno sledovať nestále meniacu sa krivku koncentrácie oxidu uhličitého, ktorá v priemere dosahuje hodnoty vyššie ako 2 000 ppm. Z grafov je zrejmé, že k problému s vysokou koncentráciou dochádza najmä počas noci, kedy obyvatelia miestnosti spia a nemajú možnosť vzduch v miestnosti prirodzeným spôsobom vyvetrať. V najhorších prípadoch dosahovala koncentrácia oxidu uhličitého hodnoty nad 4 000 ppm, čo predstavuje kvalitu vzduchu, ktorá môže ohroziť zdravie človeka obývajúceho daný priestor. Takýto vzduch môže spôsobovať problémy s dýchaním, vznik astmy, alergií a ďalších zdravotných problémov.

4. Pripravované merania

V rámci meraní kvality vnútorného prostredia pripravujeme experimentálne merania v testovacej bunke tvorenej dvomi malými miestnosťami. V týchto miestnostiach sa bude rôznymi spôsobmi aplikovať prirodzené a nútené vetranie, pričom sa budú sledovať parametre kvality vnútorného prostredia a zároveň spotreby energie núteného vetrania. Nútené vetranie bude tvorené lokálnymi vzduchotechnickými jednotkami inštalovanými do obvodovej steny testovacej bunky, ktoré sú vhodné najmä pre obnovované objekty, v ktorých z technických dôvodov nie je možné aplikovať centrálny systém núteného vetrania s potrubnými rozvodmi vedenými pod stropom. Cieľom týchto meraní bude zaznamenať problémy s prirodzeným vetraním pri veľmi tesných obálkach budov, zaznamenať vplyv, výhody a účinnosti núteného vetrania lokálnymi vzduchotechnickými jednotkami a zistiť ideálny spôsob nastavenia a regulácie lokálnych vzduchotechnických jednotiek pri pobyte osôb vo vetraných priestoroch.

5. Záver

Cieľom meraní bolo posúdenie a analýza tepelno-vlhkostnej mikroklímy a kvality vnútorného prostredia v obytných miestnostiach objektu, ktorý prešiel komplexnou rekonštrukciou.

Experimentálnymi meraniami troch spálni sme zistili problémy s nestabilitou kvality vnútorného prostredia v miestnostiach v zimnom období. Pri pobyte osôb v miestnostiach dochádza pomerne rýchlo k nárastu koncentrácie oxidu uhličitého nad kritické hodnoty stanovené príslušnou normou a taktiež k rýchlemu zvyšovaniu relatívnej vlhkosti vzduchu. Z tohto dôvodu sú obyvatelia bytov nútení často vetrať oknami, čo v zimnom období môže spôsobovať zdravotné problémy spojené s prechladnutím a prievanom. Taktiež časté vetranie vykurovaných priestorov vedie k značným tepelným stratám vetraním, zníženiu teploty vzduchu v interiéri a následnému dokurovaniu priestorov na požadované teploty, čím sa znižuje efektivita cieľa komplexnej obnovy o znižovaní spotreby energie v objektoch.

Z analýzy je zrejmé, že dôležitým faktorom ovplyvňujúcim tepelno-vlhkostnú mikroklímu v jednotlivých bytoch a miestnostiach sú samotní obyvatelia daných priestorov, ich osobné preferencie na teplotu vnútorného vzduchu, a s tým súvisiace nastavenie vykurovacieho telesa v miestnosti, ale aj subjektívne vnímanie nekvalitného vydýchaného vzduchu v miestnosti a ochota obyvateľov vetrať oknami, čím v chladnom zimnom období dochádza k rýchlemu poklesu teploty vzduchu v miestnosti.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantu VEGA 1/0303/21, grantu VEGA 1/0304/21 a projektu KEGA 005/STU-4/2021.

Literatúra

- [1] Vyhláška MZ SR č. 124/2017 Z. z., ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška MZ SR č. 259/2008 Z. z. o podrobnostiach o požiadavkách na vnútorné prostredie budov a o minimálnych požiadavkách na byty nižšieho štandardu a na ubytovacie zariadenia v znení vyhlášky MZ SR č. 210/2016 Z. z.
- [2] STN EN 16798-1:2019 Energetická hospodárnosť budov. Vetranie budov. Časť 1: Vstupné údaje o vnútornom prostredí budov na navrhovanie a hodnotenie energetickej hospodárnosti budov – kvalita vzduchu, tepelný stav prostredia, osvetlenie a akustika. Modul M1-6.
- [3] STN 73 0540-2+Z1+Z2 Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 2: Funkčné požiadavky.
- [4] Merací prístroj Comet U3430, www.cometsystem.cz, COMET s.r.o. [online, prístupné dňa 26.5.2022], dostupné na: <https://www.cometsystem.cz/produkty/zaznamnik-teploty-vlhkosti-a-co2-s-vestavenymi-cidly/reg-u3430>

Pavol Štefanič¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 3. ročník

VÝPOČET INTENZITY VÝMENY VZDUCHU PROSTREDNÍCTVOM STOPOVACIEHO PLYNU PRI PRIRODZENOM VETRANÍ

CALCULATION OF AIR CHANGE RATE BY TRACER GAS WITH NATURAL VENTILATION

Abstract

The measure of air change rate (ACR) in the building is a difficult and usually expensive task. The tracer gas method is the reference technique but its implementation is difficult and the interpretation of results is not straightforward. The present work uses the concentration decay method by tracer gas-Freon (R134a), to calculate the air change rate. Air change was calculated at four different window positions in the office. This method depends on the complete mixing of tracer gas with the air in the ventilated volume under consideration.

Klíčové slová / Key Words

Výmena vzduchu; objem miestnosti; stopovací plyn.

1. Úvod

Vetrание je výmena vzduchu medzi vonkajším a vnútorným prostredím. Výmena vzduchu sa uskutočňuje buď prirodzeným alebo núteným spôsobom alebo ich kombináciou. Nedostatočné vetranie môže zapríčiniť zhoršenie kvality vnútorného vzduchu, tá je kľúčovým faktorom pre zdravie a koncentráciu užívateľov priestorov. Intenzita vetrania preto ovplyvňuje kvalitu vnútorného vzduchu. Tá sa v predpisoch udáva dvoma spôsobmi, buď ako dávka vonkajšieho vzduchu napríklad v l/s na osobu či l/s na m² podlahovej plochy alebo ako počet výmen vzduchu za hodinu. Do úvahy tiež treba brať ďalšie faktory ovplyvňujúce kvalitu vzduchu a to najmä produkcia znečisťujúcich látok, počet osôb v priestore, ich činnosť, použité materiály, teplota a vlhkosť vzduchu a účinnosť vetrania[1].

2. Prirodzené vetranie

Vetrание, resp. vetracie zariadenie zabezpečuje prívod čerstvého vonkajšieho vzduchu do vnútorného priestoru objektu a odvod vzduchu znehodnoteného primiešanými látkovými škodlivinami, prípadne produkovaným teplom. Prirodzené vetranie je typ vetrania, pri ktorom dochádza k výmene vzduchu v miestnosti pôsobením prírodných síl. Tieto sily sa prejavujú ako dôsledok vonkajších klimatických podmienok a ich pôsobením vzniká tlakový rozdiel medzi vonkajším a vnútorným prostredím, vďaka ktorému sa vzduch pohybuje. Ide o gravitačnú silu a sily spôsobené vetrom [2].

V reálnych podmienkach prostredia, v ktorom sa budova nachádza, je však táto transformácia ovplyvnená viacerými faktormi. Okrem rýchlosti a smeru vetra sú to tvar a poloha miesta na budove, konfigurácia terénu v okolí budovy, tvar a poloha prípadných prekážok pred budovou atď. [2], [3].

¹Pavol Štefanič, Ing., Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Vetrание oknami je najpoužívaným systémom prirodzeného vetrania v obytných a kancelárskych budovách. Využíva oba princípy prirodzeného vetrania.

3. Výmena vzduchu vo vnútorných priestoroch

Výmena vzduchu je definovaná ako pomer prívodu vzduchu Q do zóny (t. j. miestnosti alebo priestoru) vo vzťahu k objemu tejto zóny V (objem miestnosti) a vo všeobecnosti sa vyjadruje ako výmena vzduchu za hodinu n . Túto definíciu vyjadruje nasledujúca rovnica:

$$n_{(\tau)} = \frac{Q_{(\tau)}}{V} \quad (h^{-1}) \quad (1)$$

kde:

$n_{(\tau)}$ je intenzita výmeny vzduchu (h^{-1}),
 $Q_{(\tau)}$ – objemový prietok vzduchu (m^3/h),
 V – objem miestnosti (m^3).

3.1 Predpoklady výpočtu

Pre výpočet opísaný v bode (1), ktorý je určený na výpočet rýchlosti výmeny vzduchu pomocou koncentrácie stopovacieho plynu, boli prijaté tieto zjednodušujúce predpoklady:

- Sledovací plyn sa považuje za chemicky stabilný a inertný, t. j. v miestnosti nebudú prebiehať žiadne chemické reakcie, ktoré by mohli zmeniť koncentráciu sledovacieho plynu.
- Na stenách, strope alebo nábytku miestnosti nebudú prebiehať žiadne adsorpčné procesy, ktoré by mohli znížiť koncentráciu stopovacieho plynu v miestnosti.
- Vzduch sa počas meraní považuje za úplne zmiešaný. V miestnosti nie sú žiadne koncentračné gradienty, t. j. koncentrácia stopovacieho plynu je v danom čase rovnaká v celej miestnosti.
- K výmene vzduchu obsahujúceho stopovací plyn s okolitým vzduchom dochádza len v tých oblastiach, ktoré sú v kontakte s vonkajším prostredím, t. j. výmena vzduchu s ostatnými vnútornými priestormi sa považuje za zanedbateľnú. Miestnosť, v ktorej sa uvoľnil stopovací plyn, sa považuje za jednozónový systém.
- Predpokladá sa, že procesy výmeny, ktoré prebiehajú počas obdobia merania, sú časovo nemenné. Objemový prietok vzduchu $Q(\tau)$, a teda aj intenzita výmeny vzduchu $n(\tau)$ sú konštantné. $Q(\tau)$ a $n(\tau)$ možno nahradiť Q a n .

3.2 Stanovenie intenzity výmeny vzduchu

Okrem fyzikálnych vlastností uvedených v časti 3.1 by stopovacie plyny mali spĺňať niektoré ďalšie požiadavky, pokiaľ ide o ich praktickú vhodnosť. Patria k nim aspekty zdravotnej bezpečnosti, nízke zaťaženie životného prostredia, vysoká dostupnosť a dobrá manipulácia pri praktickom použití s čo najnižšími nákladmi a v neposlednom rade by stopovacie plyny mali byť dobre zaznamenateľné zavedenými meracími technikami v širokom rozsahu koncentrácií a s vysokou selektivitou [4].

3.3 Metódy stanovenia intenzity výmeny vzduchu

V zásade existujú tri vhodné metódy na stanovenie intenzity výmeny vzduchu pomocou stopovacích plynov, a to:

- metóda rozpadu koncentrácie,

- metóda konštantného vstrekovania,
- metóda konštantnej koncentrácie.

3.4 Metóda rozpadu koncentrácie

Do miestnosti sa na krátky čas vstreknú stopovací plyn, a to buď z plynovej fľaše s redukčným ventilom, alebo ručne z naplnených plynových nádrží. Po zmiešaní so vzduchom v miestnosti sa v pravidelných časových intervaloch meria koncentrácia stopovacieho plynu. Keďže krivka rozpadu koncentrácie stopovacieho plynu C má po úplnom zmiešaní so vzduchom v miestnosti exponenciálny priebeh (Obrázok 1), pri každom odbere vzorky sa odstráni nielen starý vzduch, ale aj určité množstvo čerstvého vzduchu.

Pomocou funkcie rozpadu koncentrácie a použitím nelineárnej regresnej analýzy môžeme určiť intenzitu výmeny vzduchu n (C_0 – koncentrácia sledovaného plynu v čase $\tau=0$ h) [5]. Vo väčšine prípadov sa však používajú logaritmické hodnoty koncentrácie, aby sa získal lineárny vzťah medzi logaritmom koncentrácie stopovacieho plynu $C_i(\tau)$ a časom τ (Obrázok 2) (2a).

Intenzita výmeny vzduchu n sa potom vypočíta pomocou lineárnej regresnej analýzy podľa (2a). Obe možnosti vyhodnotenia - lineárna aj nelineárna regresná analýza - sú obzvlášť vhodné na skúmanie kriviek koncentrácie a času zaznamenaných počas dlhšieho časového obdobia. Ak je k dispozícii len niekoľko meraní, napr. keď sa odber vzoriek vykonáva pomocou injekčných striekačiek alebo iných vhodných zariadení, potom sa rýchlosť výmeny vzduchu môže určiť pomocou nasledujúceho vzťahu (2b).

$$C_t = C_0 e^{-n\tau} \quad (2)$$

$$\ln C_i(\tau) = \ln C_0 - n(\tau_i) \quad (2a)$$

$$[\ln C_i(\tau = \tau_i) - \ln C_i(\tau = \tau_{i+1})]/(\tau_{i+1} - \tau_i) = n \quad (2b)$$

kde:

C_τ – je koncentrácia plynu v čase τ (ppm),

C_0 – počiatočná koncentrácia plynu (ppm),

e – Eulerovo číslo (-),

n – intenzita výmeny vzduchu (h^{-1}),

τ – čas (h),

$C_i(\tau_i)$ – koncentrácia stopovacieho plynu v čase τ_i (ppm),

$\tau_{i+1} - \tau_i$ – časový interval medzi dvomi nameranými koncentraciami (h).

4. Experimentálne meranie

Za účelom zistenia reálnej výmeny vzduchu pomocou stopovacieho plynu pri prirodzenom vetraní, bolo vykonané meranie v budove Dánskej technickej univerzity.

4.1 Cieľ merania

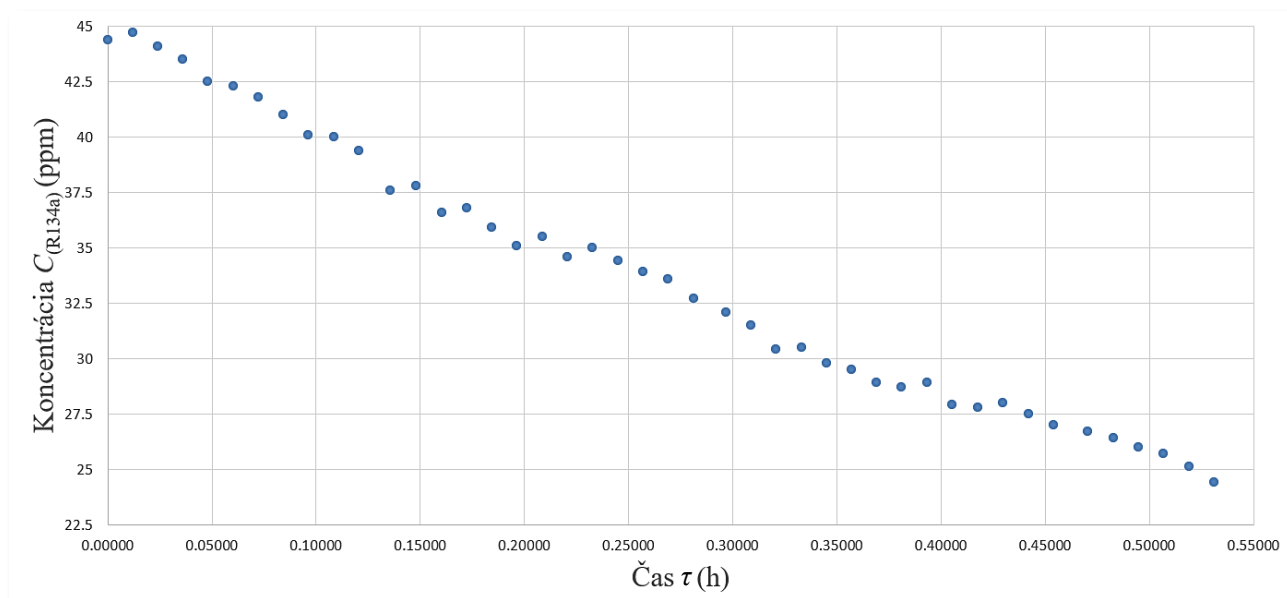
Cieľom experimentálneho merania bolo:

- odmerať koncentráciu stopovacieho plynu pri rozličných polohách okna,
- zistiť výmenu vzduchu v miestnosti pri rozličných polohách okna.

4.2 Metodika merania

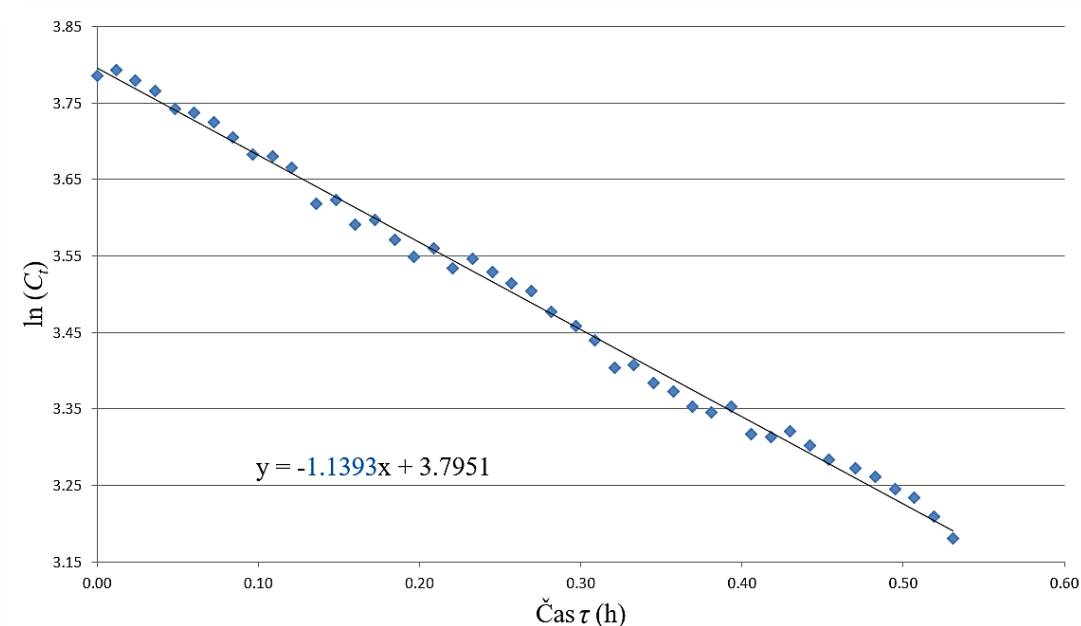
4.2.1 Metodika z hľadiska meraných parametrov

Meraným parametrom bola koncentrácia stopovacieho plynu-freónu R134a., avšak želaným parametrom bola výmena vzduchu. Výmena vzduchu sa po každom meraní vypočítala z rovnice, metódy rozpadu koncentrácie.



Obrázok 1 Graf – nameraná koncentrácia $C_{(R134a)}$ pri otvorenom okne na 4 cm [zdroj: autor]

Z nameraných hodnôt koncentrácie stopovacieho plynu, vytvoríme logaritmickú (\ln) stupnicu, z ktorej následne pomocou lineárnej regresie odčítame výmenu vzduchu n . Výmena vzduchu sa zobrazí ako koeficient pri neznámej x v rovnici lineárnej regresie (Obrázok 2).



Obrázok 2 Graf – intenzita výmeny vzduchu pri otvorenom okne na 4 cm [zdroj: autor]

4.2.2 Metodika z hľadiska meracích prístrojov

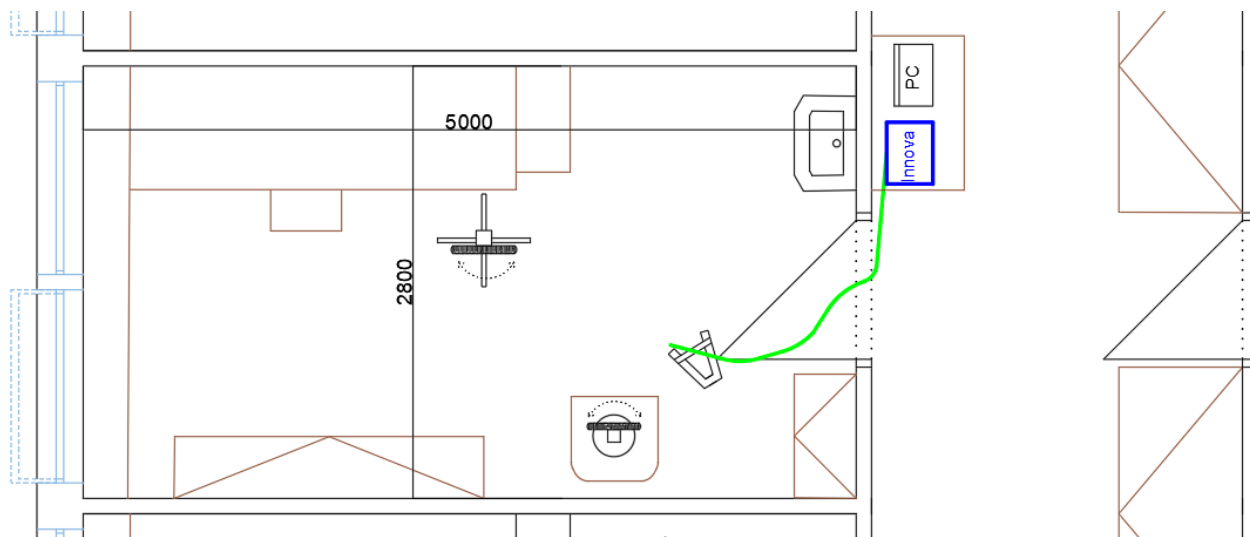
Merania koncentrácie R134a sa uskutočnili pomocou meracieho prístroja Innova 1312. Viacplynový monitor Innova typ 1312 je prenosný fotoakustický spektrofotometer určený na monitorovanie prchavých organických zlúčenín (VOC) v plynnej fáze. Meracia technika prístroja využíva fotoakustický efekt, ktorý je založený na premene svetelnej energie na zvukovú energiu plynu, kvapaliny alebo pôdy.

4.2.3 Metodika z hľadiska času a podmienok merania

Merania koncentrácie prebiehali 16.09.2022. Jednalo sa o štyri krátkodobé merania, v trvaní 30 minút. Hodnoty sa zaznamenávali v cca 40 sekundových intervaloch. Merania prebiehali pri štyroch rôznych polohách okna – zatvorené okno, otvorené okno na 2 cm, 4 cm a 6,5 cm. Pred začiatkom meraní, sa stopovací plyn vypustil za hlavicu ventilátora. Predpokladáme, že po 10 minútach došlo k úplnému premiešaniu stopovacieho plynu s vnútorným vzduchom. Pre lepšie premiešanie stopovacieho plynu v priestore boli použité dva ventilátory, jeden v strede miestnosti a druhý, menší, oproti na stoličke (Obrázok 3). Oba ventilátory mali otáčavú hlavicu. Počas merania sa v kancelárii nenachádzali žiadne osoby.

4.2.4 Metodika z hľadiska umiestnenia meračov

Prístroj určený na kontinuálne meranie sa umiestnil na stôl, na chodbe (Obrázok 3). Všetky osoby boli informované o prebiehajúcich meraniach interným oznamom a boli požiadaní o zvýšenú opatrnosť, ktorá by predišla posunutiu, prípadne poškodeniu meracieho prístroja.



Obrázok 3 Pôdorys miestnosti – umiestnenie meracieho prístroja Innova [zdroj: autor]

4.2.5 Analýza výsledkov

Meranie bolo zamerané na zistenie výmeny vzduchu, pomocou koncentrácie stopovacieho plynu. Freón (R134a) sa uvoľňoval v kancelárskom priestore (objem 42 m³, vybavenom jedným dvojitém oknom). Počas merania bola kancelária neobývaná. Stopovací plyn a vzduch v miestnosti sa nepretržite miešali pomocou ventilátora alebo podobného zariadenia. Najvýraznejšími faktormi, ktoré ovplyvňujú výmenu vzduchu, sú rozdiel teplôt vonkajšieho a vnútorného vzduchu, rýchlosť vetra (Tabuľka 1).

Tabuľka 1 Výmena vzduchu pri rôznych polohách okna [zdroj: autor]

Začiatok merania (hh:mm)	Poloha okna	Vonkajšia teplota t_o (°C)	Rýchlosť vetra w (m/s)	Výmena vzduchu n (h ⁻¹)	Objem miestnosti V (m ³)	Objemový prietok Q (m ³ /h)
10:59	Zatvorené (0 cm)	13	8,33	0,411	2,8*5,0*3,0	17,262
11:31	Otvorené (2 cm)	12	7,22	1,107	42	46,494
12:09	Otvorené (4 cm)	13	6,11	1,139	42	47,46
12:42	Otvorené (6,5 cm)	13	5,55	1,742	42	73,164

5. Záver

Merania stopovacích plynov uľahčujú určenie zmeny vzduchu medzi vnútorným a vonkajším prostredím pri rôznych podmienkach vetrania. V tomto článku je opísaná jedna z metód, ktorú možno použiť na určenie intenzity výmeny vzduchu pomocou meraní stopovacích plynov. Účinnosť vetrania oknami výrazne závisí od rozdielu teplôt medzi vzduchom v miestnosti a vonkajším vzduchom, zatiaľ čo vplyv vetra sa zdá byť menej dôležitý. Vetranie so široko otvorenými oknami alebo krížové prevetrávanie sú zďaleka najlacnejšie spôsoby, ako čo najrýchlejšie odstrániť znečisťujúce látky z vnútorného ovzdušia, avšak nie z energetického hľadiska. Zlepšenie vetrania, t. j. zvýšenie rýchlosti výmeny vzduchu, je účinným opatrením na dodatočné zníženie zaťaženia znečisťujúcimi látkami vo vnútorných priestoroch. Preto na dosiahnutie obmedzenia nezdravých znečisťujúcich látok vo vnútornom prostredí možno dôrazne odporučiť kombináciu prirodzeného vetrania s nútením vetraním.

Literatúra

- [1] JUNASOVÁ, B., KRAJČÍK, M. Výpočet dávky vzduchu pre nebytové priestory, alebo koľko vzduchu treba na vetranie kancelárií? In Vzduchotechnika 2020. Bratislava: SSTP, 2020. ISBN 978-80-89878-64-2. s. 34-39.
- [2] SZÉKYOVÁ, M. – FERSTL, K. – NOVÝ, R., Vetranie a klimatizácia, Bratislava: Jaga, 2004. 422 s. ISBN 80-8076-000-4.
- [3] GERBAUER, G., RUBINOVÁ, O. a Horká, H. Vzduchotechnika. Brno : ERA group, spol. s.r.o., 2007. str. 146. ISBN: 978-7366-091-8.
- [4] RAATSCHEN, W. Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik: Luftaustausch- Messung und Simulation. GI- Gesundheits-Ingenieur: Haustechnik, Bauphysik, Umwelttechnik, 116 2-3 , (April, June 1995), 7887 and 129-138, 0932-6200.
- [5] SHERMAN, M. H. Tracer-gas techniques for measurement ventilation in a single zone. Building and Environment, 25 4 (April 1990), 365374 , 0360-1323.
- [6] Vyhláška MZ SR č. 259/2008 Z. z. o podrobnostiach o požiadavkách na vnútorné prostredie budov a o minimálnych požiadavkách na byty nižšieho štandardu a na ubytovacie zariadenia.
- [7] STN EN 16798-1:2019 Energetická hospodárnosť budov. Vetranie budov. Časť 1: Vstupné údaje o vnútornom prostredí budov na navrhovanie a hodnotenie energetickej hospodárnosti budov – kvalita vzduchu, tepelný stav prostredia, osvetlenie a akustika. Modul M1-6.
- [8] ČURIK, M. The Required Air Exchange in Buildings – How to be acquainted in current legislation. In: TZB Haustechnik 4/2010, 48-50, ISSN 1210-356X.

Eva Švarcová¹, Dragos-Ioan Bogatu², Jun Shinoda³, Ongun B. Kazanci⁴
Študijný program: Teória a technika prostredia budov, ročník: 3

METHODOLOGY OF CALCULATION FOR THE RADIANT PANEL WITH PHASE CHANGE MATERIAL

METODOLÓGIA VÝPOČTU PRE SÁLAVÝ PANEL S FÁZOVOU PREMENOU MATERIÁLU

Abstract

The main objective of the calculation methodology is to determine the calculation for the radiant panel with phase change material (PCM) and subsequently validation of the calculation model. There is no calculation model for radiant panels with PCM, which can be used for heating and cooling. This article describes two calculation models for calculating radiant panels with PCM. The first calculation model is made by ISO Standard 11855: 2012, the second calculation model is made by ISO Standard 18566.

Kľúčové slová / Key Words

Radiant panel; phase change material; heating and cooling; thermally active building structure

Introduction

The methodology of calculation has to validate the correctness of the calculation model. According to Standards, there is no calculation model for the radiant panel with phase change material used in the heating and cooling systems. The focus was on the comparison of the calculation between thermally active building systems and the radiant panel, where the results will be evaluated. The characteristic properties of the systems with PCM are mostly the same as the application of thermally active building systems [1]. The study, which was researched at International Centre for Indoor Environment and Energy, declares the similarity between these two heating/cooling systems [2]. The cooling radiant panel with PCM can achieve the same energy savings (15%) and peak cooling power reduction (30%) as TABS [1, 2, 3].

1. Description of radiant systems

1.1 Thermally active building structures (TABS)

Thermally active building structures have heating/cooling pipes embedded into the concrete construction. The heat/cold is accumulated in the concrete core [4, 5]. Figure 1 describes the layers of the thermally active building structure.

¹ Eva Švarcová, Ing., Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 2766/11, 810 05 Staré Mesto

² Dragos-Ioan Bogatu, Ing., International Centre for Indoor Environment and Energy, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Nils Koppels All'e Building 402, 2800, Kgs. Lyngby, Denmark

³ Jun Shinoda, Ing., Phd., International Centre for Indoor Environment and Energy, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Nils Koppels All'e Building 402, 2800, Kgs. Lyngby, Denmark

⁴ Ongun B. Kazanci, Ing., Phd., International Centre for Indoor Environment and Energy, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Nils Koppels All'e Building 402, 2800, Kgs. Lyngby, Denmark

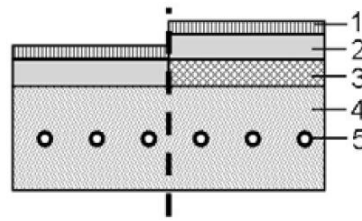


Fig.1 TABS with and without acoustic insulation,
1 = floor surface covering, 2 = screed, 3 = acoustic insulation,
4 = building structure and 5 = plastic pipes [4]

1.2 Radiant panel

The radiant heating/ cooling panels are divided according to manufacturing the whole radiant panel- the placement of pipes, materials of the radiant panel and pipes, and insulation. Figure 2 shows one of the possible construction of the radiant panel. This radiant panel has metal construction, where the copper pipes are integrated into it [6].

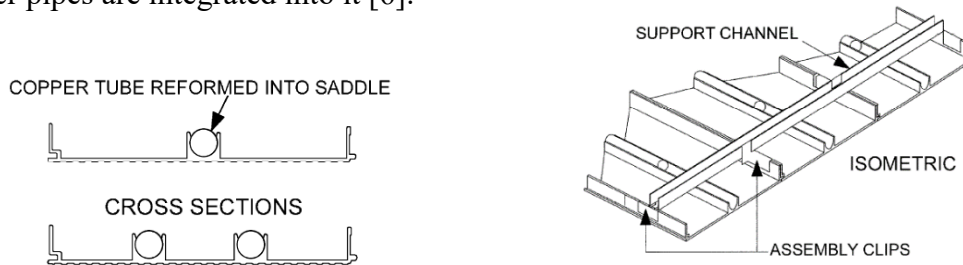


Fig.2 Metal radiant heating/cooling panel [4, 6]

1.3 Radiant panel with PCM

The researched radiant panel with PCM is steel construction with dimensions 0.595 x 0.595 x 0.029 m [1, 7]. The structure is composed of a system of copper pipelines with an outside dimension of 0.01 m. Phase change material is paraffine, a non-corrosive material with high latent heat capacity, and no supercooling effect [1, 7, 8]. Figure 3 shows the evaluated radiant panel with PCM.

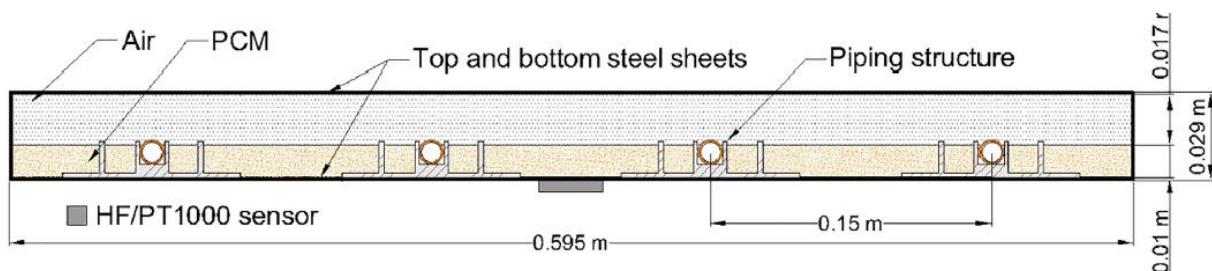


Fig. 3 Radiant panel filled with paraffine (MEP- macro-encapsulated ceiling panel) [8]

To specify calculations for the radiant panel, which has phase change material it needs to compare the calculations depending on TABS and radiant panel without PCM. The final results will be validated in the simulation program and then set up and measured in the chamber.

2. Calculation of radiant panel with PCM according to the calculation of TABS, Standard ISO 11855

The thermal resistances [10]:

$$R_o = \frac{1}{h} + R_{\lambda,B} + \frac{s_u}{\lambda_u} \quad [(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}] \quad (1)$$

$1/h$ is the heat transfer resistance on the heating ceiling surface = $1/11 = 0.091$ ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$,

$R_{\lambda,B}$ is thermal resistance of material in the upper part of construction = steel + PCM = 0.025 ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$,

s_u dimension of material, in which are embedded the pipes = PCM = 0.005 m,

λ_u thermal conductivity of the material, in which are embedded the pipes = PCM = 0.2 $\text{m}/(\text{K}.\text{W})$.

$R_o = 0.116$ ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$

The modified equation for the materials are in a radiant panel with PCM:

$$R_u = R_{\lambda,PCM} + R_{\lambda,air} + R_{\lambda,steel} + R_{\lambda,floor} \quad [(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}] \quad (2)$$

$R_{\lambda,PCM}$ is thermal resistance of material above the pipes, PCM = 0.025 ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$,

$R_{\lambda,air}$ is thermal resistance of material above the pipes, air = 0.813 ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$,

$R_{\lambda,steel}$ is thermal resistance of material above the pipes, steel = 0.00002 ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$,

$R_{\lambda,floor}$ is heat transfer resistance of floor construction = 0.10 ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$.

$R_u = 0.938$ ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$

The design cooling flow rate [10]:

$$m = \frac{A_f \cdot q}{\sigma \cdot c_w} \left(1 + \frac{R_o}{R_u} + \frac{\theta_i - \theta_u}{q \cdot R_u} \right) \quad [\text{kg/s}] \quad (3)$$

where:

A_f is an effective area, one radiant panel = 0.352 m^2 ,

q is heat flux, required amount for cooling = 25.3 W/m^2 ,

σ is temperature drop = 3 K,

c_w is the specific heat capacity of water = 4190 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,

R_o is the downwards partial heat transmission resistance of the structure = 0.116 ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$,

R_u is the upwards partial heat transmission resistance of the structure = 0.938 ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$,

θ_i is the standard indoor room temperature in accordance with ISO 11855-2 = 26 K,

θ_u is the indoor temperature of a room under the floor heated room = 26 K.

$m = 0.000801$ $\text{kg/s} = 2.88$ kg/hr

The resistance between the fluid and the pipe wall is calculated [9]:

$$R_w = \frac{W^{0.13}}{8 \cdot \pi} \left(\frac{d_a - 2 \cdot s_r}{m_{H,sp} \cdot l} \right)^{0.87} \quad [(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}] \quad (4)$$

where:

W is pipe spacing = 0.15 m,

d_a is pipe wall thickness = 0.01 m,

s_r is pipe wall thickness = 0.001 m,

$m_{H,sp}$ is design heat/ cool flow rate = 0.000801 kg/s ,

l is pipe circuit length = 2.36 m.

$R_w = 0.10918$ ($\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$

The resistance of the pipe wall s defined through [9]:

$$R_r = \frac{W \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_a - 2 \cdot s_r}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_r} \quad [(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}] \quad (5)$$

where:

λ_r is thermal conductivity of pipe wall, copper = 390 m/(K.W).
 $R_r = 0.00001 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$

The resistance between the pipe outside wall and the conductive layer [9]:

$$R_x = \frac{W \cdot \ln\left(\frac{W}{\pi \cdot d_a}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_b} \quad [(\text{m}^2\text{.K)/W}] \quad (6)$$

where:

λ_b is the thermal conductivity of a material, where the pipes are embedded, PCM = 0.2 m/(K.W).
 $R_x = 0,18661 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$

The heat transfer coefficient U_i is calculated according to [9]:

$$U_i = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_i}{\lambda_b}\right)} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (7)$$

where:

h_i heat transfer coefficient = 11 W/(m² .K),

s_i dimension from the center of pipe to the end of the construction 0.005 m.

$U_i = 8.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

The corresponding resistances are [9]:

$$R_i = \frac{1}{U_i} \quad [(\text{m}^2\text{.K)/W}] \quad (8)$$

$R_i = 0.12 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$

For the cooling season:

$$\Delta\theta_H = \frac{\theta_R - \theta_v}{\ln \frac{\theta_v - \theta_i}{\theta_R - \theta_i}} \quad (9)$$

θ_R is return temperature of the cooling medium = 21 K,

θ_v supply temperature of heating/ cooling medium = 18 K,

θ_i design indoor temperature = 26 K.

$\Delta\theta_H = 6.4 \text{ K}$

K_H , equivalent heat transmission coefficient for type E is [9]:

$$K_H = \frac{1}{(R_W + R_r + R_x + R_i)} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (10)$$

$K_H = 2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Heat flux at the surface q [W/m²]

$$q = K_H \cdot \Delta\theta_H \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (11)$$

$q = 15.5 \text{ W}/\text{m}^2$

3. Calculation of radiant panel with PCM according to the calculation of mounted radiant panel, Standard 18655

For calculating the radiant panels is used Standard 18655-3: 2017. This calculation is used for the mounted radiant panels. To see, what the difference will be between these two calculations.

Thermal resistance of pipe wall per unit pipe spacing [11]:

$$r_t = \frac{\ln(D_0/D_i)}{2\pi \cdot k_t} \quad [(\text{m.K})/\text{W}] \quad (11)$$

$$r_t = 0.00009 \text{ (m.K)/W}$$

where:

d_0 is outside diameter of the pipe = 0.01 m,

d_i is the inside diameter of the pipe = 0.008 m,

k_t is the thermal conductivity of the pipe, and copper = 390 W/(m. K).

The thermal resistance of the panel [11]:

$$r_p = \frac{x_p}{k_p} \quad [(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}] \quad (12)$$

$$r_p = 0.05 \text{ (m}^2.\text{K)/W}$$

where:

x_p is the thickness of the radiant panel, steel + PCM = 0.01 m,

k_p is thermal conductivity of the radiant panel, steel 50 W/m. K, PCM 0.2 W/(m. K).

Characteristic panel thermal resistance [11]:

$$r_u = r_t \cdot M_p + r_s \cdot M_p + r_p + r_c \quad [(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}] \quad (13)$$

where:

r_t is the thermal resistance of pipe wall per unit pipe spacing in a hydronic system = 0.00009 (m.K)/W,

M_p is pipe spacing = 0.15 m,

r_s is thermal resistance between the pipe and the panel per unit spacing = 0.10 (m.K)/W,

r_p is the thermal resistance of panel = 0.05 (m².K)/W,

r_c is the thermal resistance of panel covers = 0 (m².K)/W.

$$r_u = 0.065 \text{ (m}^2.\text{K)/W}$$

The heat transfer coefficient U_i is calculated according to [9]:

$$U_i = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_i}{\lambda_b}\right)} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (7)$$

where:

h_i is heat transfer coefficient = 11 W/(m².K),

s_i is dimension from the center of pipe to the end of the construction 0.005 m.

$$U_i = 8.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

The corresponding resistances are [9]:

$$R_i = \frac{1}{U_i} \quad [(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}] \quad (8)$$

$$R_i = 0.12 \text{ (m}^2.\text{K)/W}$$

Where K_H , equivalent heat transmission coefficient for radiant panel is [9]:

$$K_H = \frac{1}{(R_u + R_i)} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (10)$$

$$K_H = 5.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

For the cooling season:

(9)

$$\Delta\theta_H = \frac{\theta_R - \theta_v}{\ln \frac{\theta_v - \theta_i}{\theta_R - \theta_i}}$$

θ_R is return temperature of the cooling medium = 21 K,

θ_v is supply temperature of heating/ cooling medium = 18 K,

θ_i is design indoor temperature = 26 K.

$$\Delta\theta_H = 6.4 \text{ K}$$

Heat flux at the surface q [W/m^2] is utilized in the resistance method [9]:

$$q = K_H \cdot \Delta\theta_H \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (11)$$

$$q = 35.2 \text{ W}/\text{m}^2$$

Conclusion

This calculation procedure shows some differences between these two calculation of heat flux at the surface from Standard 11855 and Standard 18566. Thermal resistance method is used in both calculations. In the calculation of TABS (Standard 11855), it needs to be calculated the flow rate. The following research will be focused on the simulations in the calculating program, where we can validate the calculating model. The final step of the research to completely find the calculation for radiant panel with PCM will be experiment in the chamber, where we will make measurements.

References:

- [1] D. Bogatu D., J. Q. Allerhand, O. B. Kazanci, B. W. Olesen, D6.3 Report on the usability of TABS panels (radiant ceiling panels with PCM), hybrid GEOTABS, Version: 2.0, pp. 3, 2021
- [2] J. Q. Allerhand, O. B. Kazanci, B. W. Olesen, Energy and thermal comfort performance evaluation of PCM ceiling panels for cooling a renovated office room, CLIMA 2019, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2019111030>
- [3] L. B. Boccardo, O. B. Kazanci, J. Q. Allerhand, B. W. Olesen, Economic comparison of TABS, PCM ceiling panels and all-air systems for cooling offices, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109527>
- [4] J. Babiak, B. W. Olesen, D. Petráš, *Low temperature heating and high temperature cooling: REHVA GUIDEBOOK No 7. REHVA*, pp. 43, 2017
- [5] M. Carli, G. Hauser, D. Schmidt, P. Zecchin, R. Zecchin, An innovative building based on active thermal slab systems, 2003
- [6] Standard ISO 18566-1:2017: Building environment design – Design, test method and control of hydronic radiant heating and cooling panel systems – Part 1: Vocabulary, symbols, technical specifications and requirements
- [7] E. Bourdakis, Low temperature heating and high temperature cooling systems using Phase Change Materials for new buildings and energy renovation of existing buildings PhD. Thesis., Technical University of Denmark, 2018.
- [8] D. Bogatu, O. B. Kazanci, B. W. Olesen, An experimental study of the active cooling performance of a novel radiant ceiling panel containing phase change material (PCM)
- [9] Standard ISO 11855- 2: 2012: Building environmental design – Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems- Part 2: Determination of the design heating and cooling capacity
- [10] Standard ISO 11855- 3: 2012: Building environmental design – Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems- Part 3: Design and dimensioning
- [11] Standard ISO 18566-3:2017: Building environment design – Design, test method and control of hydronic radiant heating and cooling panel systems – Part 1: Design of ceiling mounted radiant panels

THEORY AND STRUCTURES OF BUILDINGS

Alžbeta Danková¹

Študijný program: D-TKPS: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 2. ročník

VYUŽITIE ENERGIE SLNEČNÉHO ŽIARENIA INTEGRÁCIOU SOLÁRNYCH SYSTÉMOV DO FASÁDY BUDOVY

UTILIZATION OF SOLAR ENERGY BY INTEGRATING SOLAR SYSTEMS TO THE FACADE OF THE BUILDING

Abstract

This article is focused on different types of solar energy systems and their advantages and disadvantages. These systems require relatively large collection areas. The envelope structures of buildings (roofs and facades) with large surface areas are predestined to collect and on-site converse solar energy. Transparent facades belong to aesthetic elements of architecture and at the same time fulfill the functional role of building envelope.

Kľúčové slová

slnečné žiarenie; solárne systémy; adaptívna fasáda; experimentálne zariadenie Twin Rooms

1. Úvod

V súčasnom období rieši ľudstvo jeden z najťažších technicko-ekonomických problémov, zabezpečenie dostatku energie pre kontinuálny rozvoj spoločnosti bez negatívneho dopadu na ekológiu, výrobu a ochranu životného prostredia. Pre úspešné vyriešenie tohto problému musí prehodnotiť svoje priority v investíciách, ktoré predstavujú zmenu na trvalo udržateľnú spoločnosť. Transformáciou energetického sektora smerom k environmentálne čistým obnoviteľným zdrojom energie a ich konverziou, transformáciou sektora materiálov smerom k ekologicky čistým materiálom a ich výroby a transformáciou celej ekonomiky smerom k nízkoenergetickým a nízkoemisným technológiám a produktom šetrným k životnému prostrediu.

Aj Európska únia má ciele vo výraznom znižovaní emisií a vo využívaní obnoviteľných zdrojov energie. Tie sa odrážajú v Smernici Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2018/844 z 30. mája 2018 o energetickej hospodárnosti budov² (EPBD) [1] a tiež v Smernici Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2018/2001 z decembra 2018 o podpore využívania energie z obnoviteľných zdrojov [2]. Tieto smernice vyžadujú, aby boli obnoviteľné zdroje energie (OZE) aktívne využívané v stavebnom sektore, v budovách, ako protistrana využívaných konvenčných fosílnych palív.

Cestou k naplneniu týchto ambiciózných cieľov je prechod na OZE, z ktorých najväčší potenciál sa pripisuje práve slnečnému žiareniu, ktorému sa venuje tento článok.

Zber a premena energie slnečného žiarenia je možná pomocou solárnych systémov. Prvky týchto systémov sa môžu integrovať do obvodového plášťa budovy. Pri administratívnych budovách, kde je vyššia konštrukčná výška a tým vyšší modul fasády, sa tieto prvky integrujú do parapetnej časti, ak sa jedná o fotovoltické sklá, môžu sa použiť na celú plochu vonkajšieho zasklenia, prípadne do vybraných častí kvôli psychickej pohode užívateľov budovy.

¹ Alžbeta Danková, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

² Názov v anglickom jazyku: Energy Performance of Buildings Directive (EPBD).

2. Solárne systémy

Energia zo Slnka dopadá na Zem vo forme slnečného žiarenia. Množstvo slnečného žiarenia dopadajúce na Zem za jeden rok je až 20tisíc krát väčšie, ako je celosvetová spotreba energie. Dokonca aj energia dopadajúca na strechu rodinného domu v oblastiach chudobných na slnečné žiarenie (napr. severná Európa) je až 10-krát vyššia ako je jeho spotreba na vykurovanie a prevádzku elektrospotrebičov. V našich zemepisných podmienkach energia dopadajúca na plochu 1 m² dosahuje hodnotu 2450-5400 kJ energie. Slnečné žiarenie je homogénnejšie rozložené ako zásoby akýchkoľvek iných palív na Zemi [3].

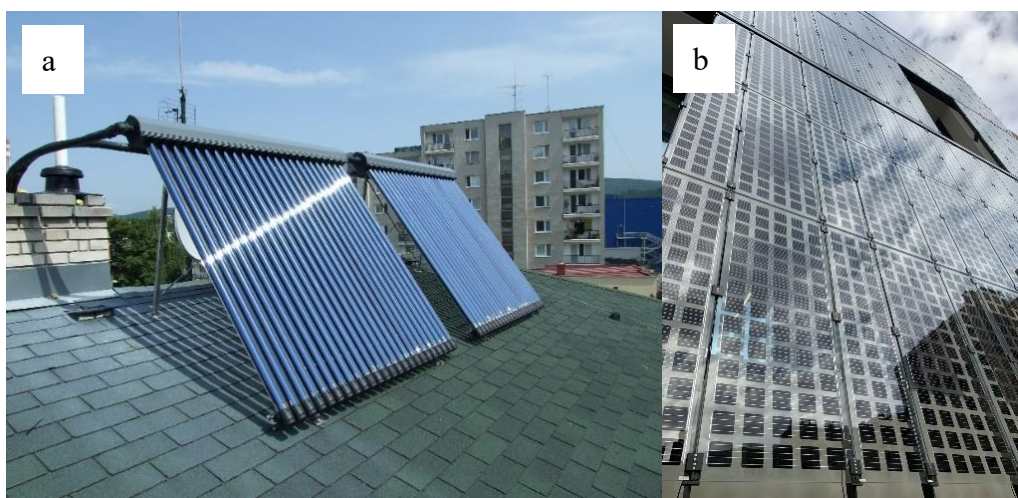
Hlavnou limitáciou tohto zdroja je nízka hustota energetického toku, čo má za následok potrebu pomerne veľkých kolektčných plôch. Obalové konštrukcie budov (strechy a fasády) s veľkými plošnými výmerami sú na zber slnečnej energie predurčené. Zber a využívanie ekologicky čistej energie slnečného žiarenia je možné pri budovách realizovať aktívnou, pasívnou alebo hybridnou formou.

Viacstupňové využitie obnoviteľného zdroja energie slnečného žiarenia:

- transformáciou krátkovlnného slnečného žiarenia na dlhovlnné tepelné vo fyzikálnom medzipriestore dvojitej transparentnej fasády s pozitívnou redukciou energetických tokov do jadra budovy (redukcia tepelnej záťaže zo slnečného žiarenia v letnom období a eliminácia tepelných strát v období zimnom),
- využitím teplotne upraveného vzduchu vo fyzikálnom medzipriestore dvojitej fasády v zimnom období pre fasádnu rekuperačnú jednotku integrovanú vo fasádnom elemente s pozitívnym dopadom na zníženie potreby tepla na vykurovanie,
- využitím fotovoltaickej transformácie krátkovlnného slnečného žiarenia na elektrickú energiu s priamym využitím v budove.

2.1 Aktívne solárne systémy

Pri aktívnej forme sa využívanie slnečnej energie realizuje cez technické zariadenie a to prostredníctvom fototermálnej alebo fotoelektrickej konverzie. Kolektory pracujú na princípe fototermálnej konverzie, teda premene slnečného žiarenia na tepelnú energiu. Absorpčná plocha transformuje dopadajúce slnečné žiarenie na tepelnú energiu a odovzdáva ho teplonosnej látke. Fotoelektrická konverzia je priama výroba elektrickej energie zo slnečného žiarenia cez solárny článok – fotovoltaický panel/ sklo.



Obr. 1: a - solárny kolektor – fototermálna konverzia [4]
b – fotovoltaické sklo – fotoelektrická konverzia [5]

Rozdelenie aktívnych solárnych systémov:

- **Teplovzdušné helioenergetické systémy**
Na prenos tepla slúži vzduch. Teplý vzduch je vedený potrubím do zásobníku tepla, ktorým býva drobné kamenivo, štrk alebo betónové bloky, umiestnené v izolovanom obale. Teplý vzduch sa zo zásobníka vháňa do jednotlivých miestností pomocou ventilátorov. Nevýhodou tohto systému je, že sa môže využívať len na vykurovanie teplovzdušnými vykurovacími sústavami [6].
- **Kvapalinové helioenergetické systémy**
Sú omnoho výhodnejšie ako teplovzdušné, pretože majú vyššiu akumuláciu schopnosť a možno ich využiť aj na vykurovanie, aj na prípravu TV (teplej vody). Teplo z kolektora sa odvádza pomocou teplotnosného média do zásobníka inštaláčnymi rozvodmi. Ako teplotnosné médium sa najčastejšie využíva voda, oleje a nemrznúce zmesi [6].
- **Fotovoltaické helioenergetické systémy**
Zachytená solárna energia sa premieňa priamo na elektrický prúd. Absorpčnú plochu tvoria solárne články (najčastejšie z kremíku), ktoré slnečné svetlo nabíja elektrickým nábojom. 100 cm² solárneho článku vyprodukuje 1,5 W. Účinnosť týchto systémov je rôzna, pohybuje sa v rozmedzí 4 – 28 % z celkového množstva dopadajúceho žiarenia [6].

2.2 Pasívne solárne systémy

Pri pasívnej forme sa slnečná energia využíva špeciálnymi stavebnými konštrukciami, pričom transport energie sa realizuje prirodzenou cestou – konvekciou, radiáciou a kondukciou. Tento systém umožňuje zachytiť väčšie množstvo slnečnej energie prostredníctvom pasívnych prvkov.

Pasívne systémy spočívajú vo využívaní slnečného žiarenia na „vyhrievanie alebo ochladzovanie“ miestnosti. Väčšinou fungujú na princípe premeny neviditeľného - svetelného slnečného žiarenia po jeho dopade na povrchy stien, podláh (absorbér) na dlhovlnné infračervené - tepelné žiarenie (fototerická premena). Základom využitia slnečnej energie, je zodpovedajúci architektonicko - ekologický koncept (stratégia získavania energie z prostredia kontroly dopadajúceho žiarenia). To znamená vhodné umiestnenie a orientácia objektu v teréne, faktor tvaru, presklenie priečelí, usporiadanie vnútorných priestorov, teplotncké vlastnosti stavebných materiálov atď [7].



Obr. 2: Trombova stena [8]

Ďalšou možnosťou je vytvorenie medzipriestoru, ktorý existuje medzi vonkajškom a priestorom. Rovnako ako v prípade systémov priameho slnečného zberu je východiskovým bodom priame žiarenie, ktoré dopadá na zasklený povrch. Z tohto povrchu sa teplo rôznymi spôsobmi vracia do záujmovej oblasti. Jednou z najpoužívanejších metód je metóda tepelnej hmoty alebo konvekcie.

Uvedené teplo môže byť tiež smerované cez regulačné otvory alebo kombináciou oboch systémov. Inými slovami ide o transformáciu krátkovlnného slnečného žiarenia na dlhovlnné tepelné vo fyzikálnom medzipriestore dvojitej transparentnej fasády s pozitívnou redukciou energetických tokov do jadra budovy (redukcia tepelnej záťaže zo slnečného žiarenia v letnom období a eliminácia tepelných strát v období zimnom).

2.3 Hybridné solárne systémy

Pri hybridnej forme sa spravidla jedná o pasívny systém, ktorého účinnosť je zvýšená technickým zariadením. Hybridné solárne systémy sú vo všeobecnosti systémy kombinujúce dva obnoviteľné zdroje energie, ako je slnečná a veterná. Nedávno však hybridné solárne energetické systémy zmenili svoju konfiguráciu. Teraz sú to často solárne energetické systémy pripojené k batériám na ukladanie vytvorenej energie.

V knihe od Vincenta Salasa [9] sa píše: „ Ukázalo sa, že hybridné energetické systémy (obnoviteľné zdroje energie v spojení s konvenčnými zdrojmi energie) výrazne znižujú celkové náklady životného cyklu samostatných napájacích zdrojov v mnohých lokalitách mimo siete a súčasne poskytujú spoľahlivú dodávku elektriny z kombinácie zdrojov energie.“

2.4 Sumárne vyhodnotenie

Solárne systémy	Výhody	Nevýhody
AKTÍVNE	<ul style="list-style-type: none"> - nevytvára skleníkové plyny - napredovanie technológie - rozmanitosť aplikácie - redukovanie závislosti od verejnej elektrickej siete 	<ul style="list-style-type: none"> - výroba prvkov v systéme (ťažba) - zložitá recyklácia - životnosť - účinnosť - celkové náklady - systém akumulácie energie
PASÍVNE	<ul style="list-style-type: none"> - znižuje záťaž na vykurovanie - znižuje záťaž na chladenie - minimalizuje uhlíkovú stopu 	<ul style="list-style-type: none"> - závisí od svojho okolia - závislosť od počasia - potrebuje efektívnu orientáciu - oslnenie vznikajúcim odrazom - produktivita v extrémoch
HYBRIDNÉ	<ul style="list-style-type: none"> - nepretržité napájanie - nízke náklady na údržbu - vysoká účinnosť - postupné zaťažovanie systémov 	<ul style="list-style-type: none"> - zložitý proces kontroly - vysoké náklady na inštaláciu - menšia výdrž batérie - ekologické hľadisko – batérie - obmedzený počet pripojiteľných prvkov

Tabuľka 1: Súhrn a porovnanie solárnych systémov

Využitie energie slnečného žiarenia integrovaním solárnych systémov do fasád budov má výrazný potenciál pri riešení energetických a environmentálnych problémov. So svojimi výhodami prináša aj niekoľko negatív, nevýhod. Problémom sú systémy samotné, konkrétne komponenty, ktoré nedosahujú dostatočnú účinnosť, či už z hľadiska životnosti, obmedzenia použitia alebo miesta a spôsobu integrácie.

3. Experimentálne zariadenie Twin Rooms

V areáli Centrálnych laboratórií STU v Bratislave v mestskej časti Trnávka sa nachádza novovybudované zariadenie TWIN ROOMS na experimentálne meranie testovacích fragmentov fasád (Obr.3). Do oboch testovacích modulov fasády sú integrované na mieru vyrobené fotovoltické sklá.



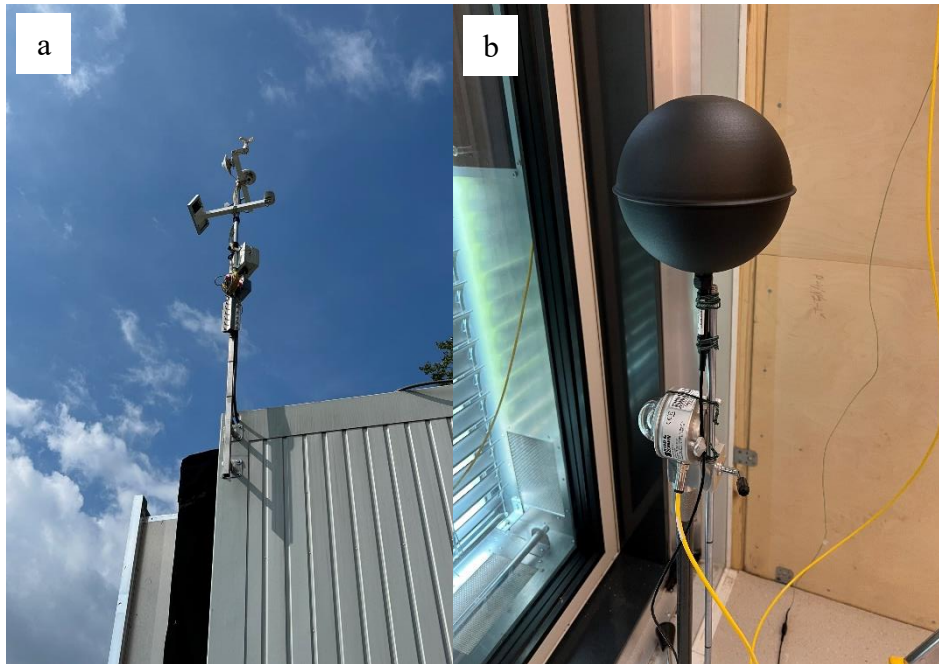
Obr. 3: a – experimentálne zariadenie Twin Rooms; b – fotovoltické sklo

Fotovoltické sklá sú integrované do fasádneho modulu dvojitej transparentnej fasády a do jednoduchej fasády, obe sa nachádzajú v parapetnej časti. Použité je fotovoltické sklo SoliTEK SOLID Bifacial – 60 Cell Frameless, jedná sa o sklo bez typického vonkajšieho orámovania so 60 bunkami (Obr.3b).



Obr. 4: fotovoltické sklo integrované do modulov fasád v Twin-Rooms [10]

Integrácia fotovoltaických zasklení do vonkajšej steny dvojitej transparentnej fasády (DTF) a experimentálne overenie ich účinnosti v porovnaní s klasickou inštaláciou do jednoduchej fasády je predmetom aktuálneho výskumu, v ktorom sa pripravujú prvotné merania v novembri a decembri 2022. Vzhľadom ku skutočnosti, že zvýšená teplota fotovoltaického článku negatívne ovplyvňuje jeho účinnosť a v medzipriestore DTF dochádza počas pôsobenia slnečného žiarenia ku vzrastu teploty prúdiaceho vzduchu medzipriestorom, je potrebné preveriť ako sa inštalácia fotovoltaického zasklenia na vonkajšom plášti DTF prejaví na jeho účinnosti v porovnaní s klasickou inštaláciou do jednoduchej fasády. Porovnávacie meranie bude realizované pavilónovým výskumom v podmienkach reálnej klímy.



Obr. 4: a – meteorologická stanica, b – príprava v experimentálnom zariadení, pyranometer a guľový teplomer (pred finálnym umiestnením v bunke)

Merané veličiny/ získavané hodnoty pomocou meteorologickej stanice umiestnenej na streche Twin Rooms:

- teplota a vlhkosť vonkajšieho vzduchu,
- rýchlosť a smer vetra,
- intenzita slnečného žiarenia na vertikálnej a horizontálnej rovine,
- množstvo zrážok.

Pre vyhodnotenie lokálnych tepelnotechnických parametrov meraných konštrukcií je potrebné merať:

- lokálne tepelné toky pomocou tepelných platní,
- povrchové teploty na vonkajšej a vnútornej strane konštrukcie snímačmi Pt100,
- rýchlosti prúdenia pozdĺž meraných štruktúr,
- rozdiely tlaku vzduchu na vonkajšej a vnútornej strane konštrukcie,
- intenzita slnečného žiarenia na zvislom povrchu obvodového plášťa.

4. Záver

Využitie slnečnej energie je jednou z najslubnejších ciest riešenia svetových energetických a environmentálnych problémov. Má mnohé výhody, vrátane jeho bohatej a pohodlnej dostupnosti, a

jeho udržateľný charakter bez znečistenia. Problémy predstavuje najmä výroba komponentov solárnych systémov a rozsiahle obmedzenie v oblasti použitia.

V klimatických pomeroch Strednej Európy je možné využiť všetky spomínané solárne systémy. Táto klimatická oblasť je ale limitovaná striedaním ročných období, ktoré v tomto prípade predstavujú negatívny vplyv. V tomto prípade je efektívne využitie viacerých obnoviteľných zdrojov alebo spolu so solárnym systémom použiť aj technické zariadenia (napr. rekuperáciu – využitie prúdenia vzduchu).

Ďalším predmetom výskumu bude experimentálne meranie vybraných prvkov integrovaných do fasády, analýza výsledkov a tvorba nových konceptov, ktoré budú analyzované a upravované na základe počítačových simulácií.

Pod'akovanie

Tento výskum bol podporený Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVŠ SR a SAV pod VEGA 1/0113/19: „Klimaticky adaptívne fasády pre udržateľnú architektúru a ich potenciál v lokalite strednej Európy“ a projektom APVV-21-0144: "Vývoj a experimentálne overenie klimaticky adaptívnej transparentnej fasády s viacstupňovým využívaním obnoviteľných zdrojov energie pre nízkoenergetické sálavé systémy".

Literatúra

- [1] Energy Performance of Buildings Directive (2018/844/EU). EU; 2018.
- [2] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance.)
- [3] [online] Článok z webovej stránky Ministerstva Životného prostredia Slovenskej republiky: <<https://www.minzp.sk/klima/obnovitelne-zdroje-energie/slnecna-energia/>>
- [4] [online] Článok z webovej stránky - názov: SOLÁRNY KOLEKTOR ONS-HPC: <<http://www.solarne-kolektory.com/solarne-systemy/>>
- [5] [online] Článok z webovej stránky - názov: SunEwat Paseo de Gracia: <<https://agc-activeglass.com/en/projects/paseo-de-gracia/>>
- [6] KEPPL, J.: Ekologicky viazaná tvorba, Kontexty architektúry a ekológie, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2001
- [7] [online] Článok z webovej stránky - názov: Solárny systém (zariadenie) <[https://sk.wikipedia.org/wiki/Sol%C3%A1rny_syst%C3%A9m_\(zariadenie\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Sol%C3%A1rny_syst%C3%A9m_(zariadenie))>
- [8] [online] Článok z webovej stránky - názov: How Does a Trombe Wall Work? <<https://www.archdaily.com/946732/how-does-a-trombe-wall-work>>
- [9] SALAS, V., Editor(s): Nicola Pearsall: 9 - The Performance of Photovoltaic (PV) Systems, Woodhead Publishing, 2017, str. 251-296, ISBN 9781782423362, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-336-2.00009-4>.
- [10].pdf brožúra výrobcu SoliTEK - Solid Bifacial Glass

Jakub Hanzl

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb D-TKPS4, 3.

VÝCHODISKÁ PRE NÁVRH ZANIKNUTÉHO ZASTREŠENIA HISTORICKÉHO OBJEKTU PRI RÔZNYCH STATICKÝCH SITUÁCIÁCH

STARTING POINTS OF THE DESIGN OF DEFUNCT ROOFING OF THE HISTORICAL SACRAL OBJECT UNDER VARIOUS STATIC SITUATIONS

Abstract

Restoration of monuments, or approach to historically, culturally or socially valuable buildings is a highly topical topic in recent times. There are currently a number of disturbed monuments in Slovakia that require a specific approach to restoration. A correctly set system of possible solutions even in the pre-project stage of the restoration process will prevent the realization of the wrong approach to the restoration of a historical object. Roofing a building in a certain stage of destruction requires atypical solutions from an architectural, structural, static or technological point of view. Their main goal is to protect the building from weather effects and create a functional space with the same or adapted function. Among the conservation professions, roofing is a strong and controversial topic with objective views and opinions from all parties concerned. In the roofing of historical buildings, in addition to the generally applicable determinants, there is no overall overview of the criteria determining their design and implementation.

Kľúčové slová / Key Words

metódy pamiatkovej obnovy; rámcová pamiatková obnova; zastrešenie historických objektov; architektonické dedičstvo

1. Úvod

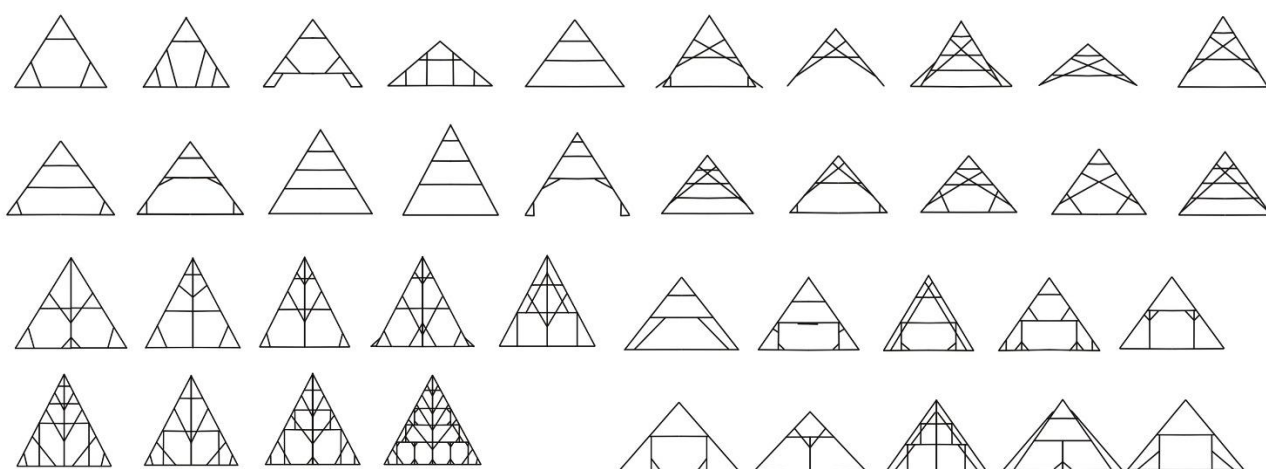
Zastrešenie objektu v určitej fáze deštrukcie si vyžaduje atypické riešenia či z architektonického, konštrukčného, statického alebo technologického hľadiska. Ich hlavným cieľom je ochrana objektu pred poveternostnými účinkami a vytvorenie funkčného priestoru s totožnou alebo adaptovanou funkciou. Medzi profesiami zameranými na ochranu pamiatkových objektov je zastrešenie silnou a kontroverznou témou s objektívnymi pohľadmi a názormi všetkých dotknutých strán. Pri zastrešovaní historických objektov okrem všeobecne platných determinantov absentuje celkový prehľad kritérií určujúcich ich návrh a realizáciu. Jednotlivé kritéria resp. determinanty, ktoré ovplyvňujú proces hľadania a navrhovania zaniknutej strešnej konštrukcie sú v príspevku predstavené.

2. Historické krovy

Charakter zastrešenia ovplyvňovala forma architektúry, klimatické podmienky, tak aj tvary striech rovnako determinovali krovové konštrukcie či už svojím typom, formou, alebo aj veľkosťou.

2.1 Stredovek

Podľa výskumov zameraných na historicko–typologický vývoj stredovekých krovových konštrukcií na území Slovenska môžeme konštatovať sklon striech koncom 13. storočia, ktoré sa od plytkejších sklonov (od 30–45 stupňov) z obdobia nastupujúcej gotiky (raná gotika) zvyšujú. V 14. a predovšetkým v 15. storočí dosahujú najväčší sklon strechy, ktorý sa pohybuje v intervale od 60–65 stupňov, v ojedinelých prípadoch nad 65 stupňov¹. Strechy sakrálnych stavieb sú navrhované a budované ako tradičné sedlové strechy medzi murované štíty alebo sú riešené na západnej strane tretinovými, štvrtinovými valbami - tzv. polvalbami² resp. valbami v celej výške nachádzajúce sa nad záverom svätyne na východnej strane³. Majú prevažne vysoké „štíhle“ strechy, ktoré podporujú ich majestátnosť a dominantnosť [1], [2], [3], [4], [5].



Obr. 1-Prehľad strešných konštrukcií používaných na objektoch v období stredoveku [1].

2.2 Renesancia

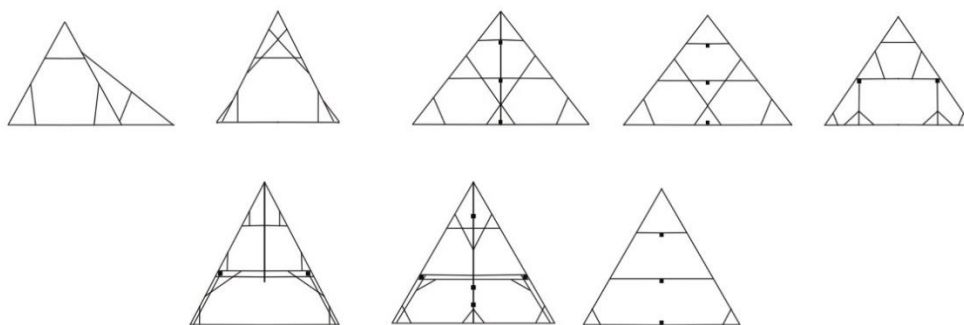
Strešné konštrukcie na týchto stavbách naďalej reagujú na estetické, fortifikačné, architektonické, urbanistické a aj klimatické pomery panujúce v období neskorého stredoveku. Z výskumov⁴ je možné charakterizovať použité typologické druhy krovových konštrukcií v období renesancie na našom území. Naďalej prevládali vysoké valbové alebo sedlové formy zastrešenia, resp. pultové strechy vnútorných nádvorí. Sklony zastrešenia sú v rozmedzí od 40° do 55°. Uplatňujú sa najmä krokrové hambáľkové krovky či už s pozdĺžnym alebo bez pozdĺžneho viazania. Fenoménom objavujúcim sa v tomto období je zmena tvaru zastrešenia veží tzv. centrálnych stavieb z vysokých ihlanovitých, dlátkových alebo stanových, na ozdobnejšie nižšie cibulové, zvonovité alebo aj nízke ihlanovité alebo stanové [6].

¹ u nás jediný zachovaný stredoveký krov so sklonom 68 stupňov je nad Kaplnkou Zápoľských v Spišskej Kapitule.

² napr. strecha nad loďou kláštorného Kostola sv. Petra z Alkantary v Okoličnom

³ napr. strechy nad svätyňami Katedrály sv. Martina v Spišskej Kapitule, Dómu sv. Martina v Bratislave a evanjelického Kostola a. v. v Štítniku

⁴ Hlavnými zdrojmi pre určenie konštrukčných schém sú [2], [3], [4], [5]

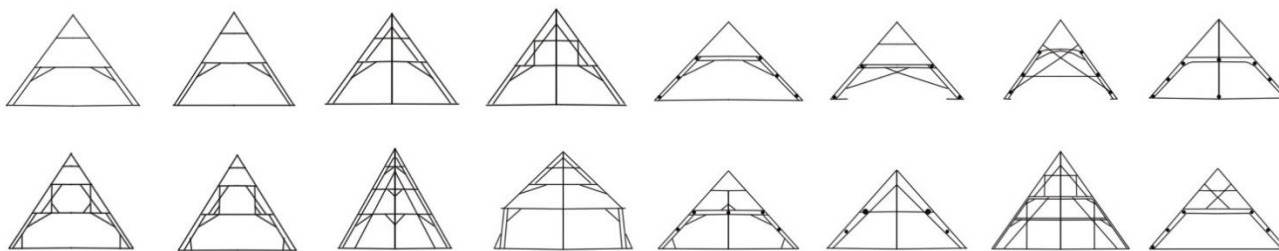


Obr. 2-Prehľad strešných konštrukcií používaných na objektoch v období renesancie [6].

2.3 Barok

Strechy vznikajúce v počiatkoch baroka preberali strmé sklony predchádzajúcich období. Zväčša totiž vznikali na starších stavbách, takže rešpektovali sklony už jestvujúcich, poväčšinou gotických štítov. No aj v prípade novostavieb vznikajúce konštrukcie ešte rešpektovali zažitú sklony v rozmedzí 50°–60°. Napriek tomu v priebehu 18. storočia nastalo postupné znižovanie sklonu, jednak z dôvodu zníženia záťaže vetrom (rovnako ako v prípade renesančných krovov), nezanedbateľným dôvodom bola snaha o zmenšenie objemu strechy kvôli materiálovej, a tým i finančnej úspore. Vyľahčenie konštrukcie a zníženie výšky krovu za zachovania potrebného sklonu ležatých stolíc viedlo vo Francúzsku v 17. storočí k rozšíreniu nového typu–tzv. manzardovej strechy.

Tak ako je ležatá stolica slohovým znakom baroka z hľadiska konštrukčného, z hľadiska tvarového je jedným z formálnych slohových znakov baroka manzardová strecha, hoci jej vznik bol podmienený konštrukčnými dôvodmi, nie primárnou potrebou vytvorenia využiteľného podkrovného priestoru, ako sa všeobecne predpokladá [7].



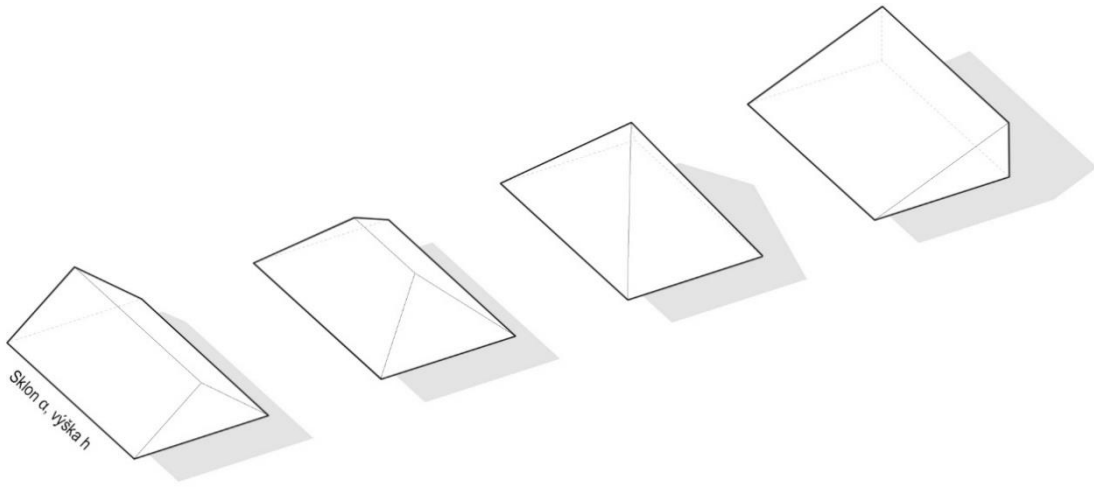
Obr. 3-Prehľad strešných konštrukcií používaných na objektoch v období baroku [7].

2.4 Zadefinovanie archetypov strešných konštrukcií

Na základe zistení a prieskumov môžeme vytvoriť archetypy strešných konštrukcií, ktoré budú zatriedovať, resp. charakterizovať najpoužívanejšie typy historických strešných konštrukcií. Z predošlých kapitol môžeme tvrdiť, že medzi najpoužívanejšie tvary strešných konštrukcií patria:

- sedlová strecha,
- valbová strecha,
- stanová strecha,
- pultová strecha.

V neskorších fázach sa začali vyskytovať aj manzardové strechy, ktoré sme do archetypálneho výberu nezahrnuli z dôvodu ich neskorého výskytu na našom území. Jednotlivé tvary striech vieme definovať na základe ich sklonu a výšky strešnej konštrukcie.



Obr. 4-Archetypy strešných konštrukcií (zľava): sedlová strecha, valbová strecha, stanová (ihlanová) strecha, pultová strecha, (autor)

Všetky vstupy vzhľadom na pôvodné strešné konštrukcie môžeme zadefinovať do determinantov strešných konštrukcií zobrazených v tabuľke nižšie.

Tab. 1- Charakteristické znaky druhov strešných konštrukcií (autor)

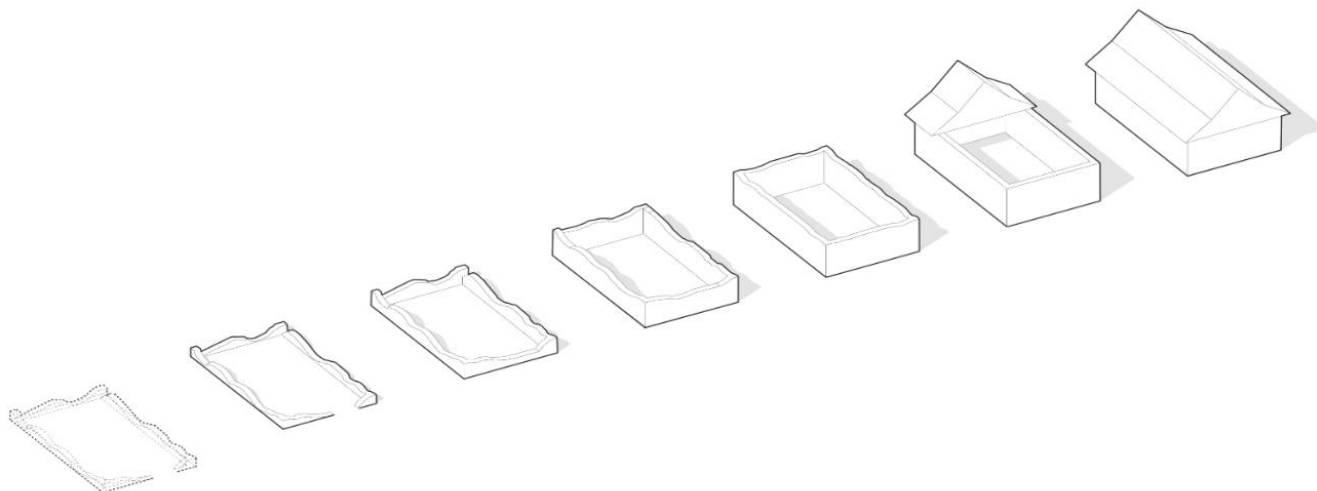
Strešná konštrukcia																															
Tvar																															
Sedlová strecha					Valbová strecha					Stanová strecha					Pultová strecha																
Sklon		Výška			Rozpon		Konštrukcia			Sklon		Výška			Rozpon		Konštrukcia														
		Malý rozpon	Stredný rozpon	Veľký rozpon	Stojatá stolica	Ležatá stolica	Hambálok			Malý rozpon	Stredný rozpon	Veľký rozpon	Stojatá stolica	Ležatá stolica	Hambálok			Malý rozpon	Stredný rozpon	Veľký rozpon	Stojatá stolica	Ležatá stolica	Iné			Malý rozpon	Stredný rozpon	Veľký rozpon	Stojatá stolica	Ležatá stolica	Iné

3. Pamiatková starostlivosť

3.1 Miera zachovania historických objektov

Ako objektívny parameter spoločne definujúci všetky ruiny bez ohľadu na ich stavebný vývoj, typológiu, prípadne iných odlišujúcich parametrov je používaný pojem „miera zachovania ruiny“. Pojem vyjadrujúci pomer zachovanej originálnej substancie objektu k jeho pôvodnému objemu. Mieru zachovania pôvodného objektu možno odstupňovať – zachovaný originál, ruina zachovaná s

fragmentom strešnej konštrukcie, ruina zachovaná po korunu muriva, ruina zachovaná s múrmi s dostatočnou výškou pre vytvorenie funkčného priestoru, ruina zachovaná s nízkymi múrmi, ruina zachovaná len v päte muriva alebo ruina zachovaná pod súčasnou niveletou terénu [8], [9].



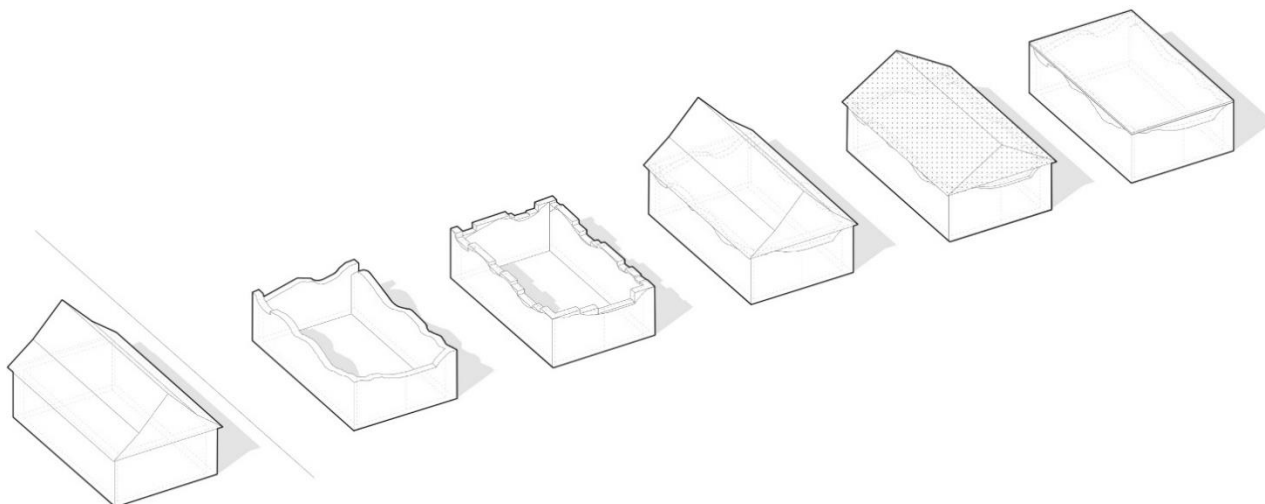
Obr. 5-Miera zachovania historických objektov (zľava): pod niveletou súčasného terénu, zachované v päte muriva, zachované nízke múry, zachovanie s múrmi s dostatočnou výškou pre vytvorenie funkčného priestoru, ruina zachovaná po korunu muriva, zachovaný s fragmentom strešnej konštrukcie, zachovaný originál (autor)

3.2 Vol'ba metódy pamiatkovej obnovy

Metódy pamiatkovej obnovy možno rozdeliť na rámcové metódy, ktoré vytvárajú základnú koncepciu obnovy a čiastkové metódy obnovy. Rámcová metódy obnovy predstavuje súhrn všetkých prístupov a čiastkových metód pamiatkovej obnovy, ktoré sú na objekte alebo súbore uplatnené dôsledne podľa vopred definovaných kritérií. Môže byť synteticko-rekonštrukčná a analyticko-modernistická [10].

Synteticko-rekonštrukčná rámcová metóda obnovy uprednostňuje historickú hodnotu pamiatky, kedy predmetom záujmu je pôvodná podoba pamiatky a dôležité zachovanie integrity jej umeleckého prejavu. Pri nových zásahoch využíva zväčša rekonštrukčné a reštaurátorské čiastkové metódy, prípadne náznakovú rekonštrukciu. Nové zásahy sú významovo a štylisticky podriadené pôvodnému charakteru objektu. V krajných prípadoch sa v záujme potlačenia kontrastu medzi pôvodnou a novou konštrukciou povrchy nových prvkov umelo patinujú.

Analyticko-modernistická rámcová metóda obnovy preferuje historickú hodnotu pamiatky ako materiálu a interpretuje jednotlivé vývojové fázy pamiatky rovnocenne, patina, kazy a iné prejavy deštrukcie sú prísne konzervované. Konštrukcie novej architektúry sú uvažované ako ďalšia kultúrna vrstva vývoja pamiatky a sú jasne interpretovateľné. Táto rámcová metóda obnovy vo väčšej miere využíva čiastkovú metódu náznakovej rekonštrukcie a novotvaru.



Obr. 6-Čiastkové metódy obnovy (zľava) zachovaný originál, konzervácia narušeného originálu, architektonizovaná ruina narušeného originálu, slohová rekonštrukcia strechy narušeného originálu, náznaková rekonštrukcia strechy narušeného originálu, novotvar strechy narušeného originálu (autor)

3.3 Determinanty pamiatkovej starostlivosti

Jednotlivé parametre vstupujúce do oblasti pamiatkovej starostlivosti v konečnom dôsledku ovplyvňujúce náš prístup k riešenému objektu môžeme zadeliť do nasledujúcej tabuľky.

Tab. 2-determinanty ovplyvňujúce pamiatkovú obnovu (autor)

Pamiatková starostlivosť																				
Typ ruiny					Metóda obnovy				Urbanizmus			Materiál		Vnútrotný priestor						
Pod niveletou terénu	V päte muriva	S nízkymi múrmi	S múrmi s dostatočnou výškou	Po korunu muriva	S fragmentom strešnej konštrukcie	Zachovaný originál	Konzervácia	Architektonizovaná ruina	Slohová rekonštrukcia	Náznaková rekonštrukcia	Novotvar	Sídlo (zástavba)	Zasadené v prírodnom prostredí	Pohl'adová exponovanosť	Autenticita materiálu		Otvorený	Pol-otvorený	Uzavretý	
															Pôvodný	Podobný				Iný

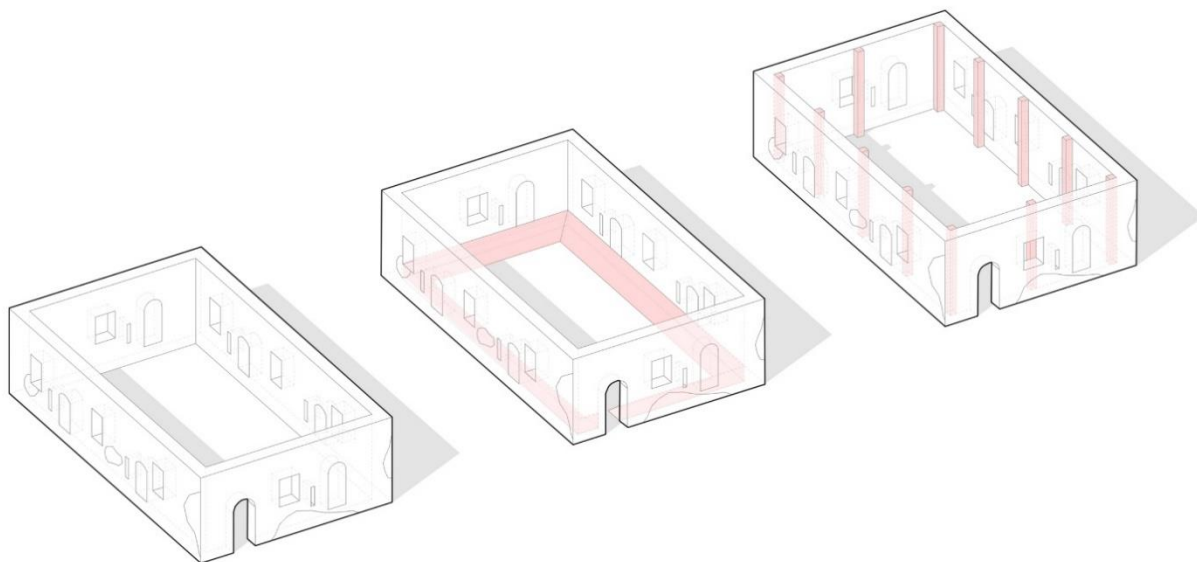
4. Miera nosnosti a celistvosti

Činitele podieľajúce sa na degradácii originálnej substancie možno deliť podľa pôvodu na prírodné a antropogénne. K prírodným deštruktívnym činiteľom možno priradiť atmosferické činitele a iné. Podľa pôsobenia možno činitele deštrukcie zadeliť na náhle a postupné.

K porušeniu originálneho muriva dochádza pri prekročení jeho pevnosti v dôsledku preťaženia alebo zhoršenia kvality (najčastejšie spôsobené poveternosnými vplyvmi). K zhoršeniu mechanických vlastností muriva dochádza najčastejšie pri jeho degradácii pôsobením vonkajších činiteľov. Najväčšiu škodu spôsobuje vlhkosť – intenzívne dažde, hnané dažde, zmeny v hladinách vôd (nadzemných či podzemných), zmena obsahu látok vo vode alebo koncentrácia agresívnych látok vo vode. Pri murive, ktoré je chránené voči vlhkosti môže degradácia nastávať veternou eróziou spojenou s tepelným namáhaním konštrukcie (mrazom alebo slnečným žiarením). Neposledným činiteľom sú vetrom hnané sedimenty ako piesok či spráš alebo vetrom prepravované soli. Medzi ďalšie patrí vegetácia, ktorej koreňová sústava chemicky reaguje s vápnom aj niektorými druhmi spojív. Vegetácia rastúca v tesnej blízkosti môže murivo narušovať mechanicky, koreňovou sústavou, ktorá vytvára tlak na blízke štruktúry [4], [11].

Do celkovej miery celistvosti môže vplývať aj samotný historický stavebný vývoj a jednotlivé etapy, ktorými sa objekt vyvíjal. Spomína sa hlavne v prípade vývojových etáp kedy boli do objektu vytvárané nové penetrácie (dverné či okenné otvory), ktoré priamo vplývajú na celistvosť originálnej substancie. Na celistvosť objektu vplýva aj stav pôvodných vnútorných nosných konštrukcií, či sa zachovali, ak sa zachovali v akej miere alebo sa nezachovali a neplnia teda len svoju funkciu ale taktiež stuženie objektu v priečnom alebo horizontálnom smere môže byť narušené. Jednotlivé parametre miery zachovania objektu a činiteľov pôsobiacich počas života objektu na jeho mieru celistvosti nám priamo vplývajú na mieru nosnosti zachovanej substancie objektu. Mieru nosnosti po zovšeobecni môžeme zdeliť do troch možností:

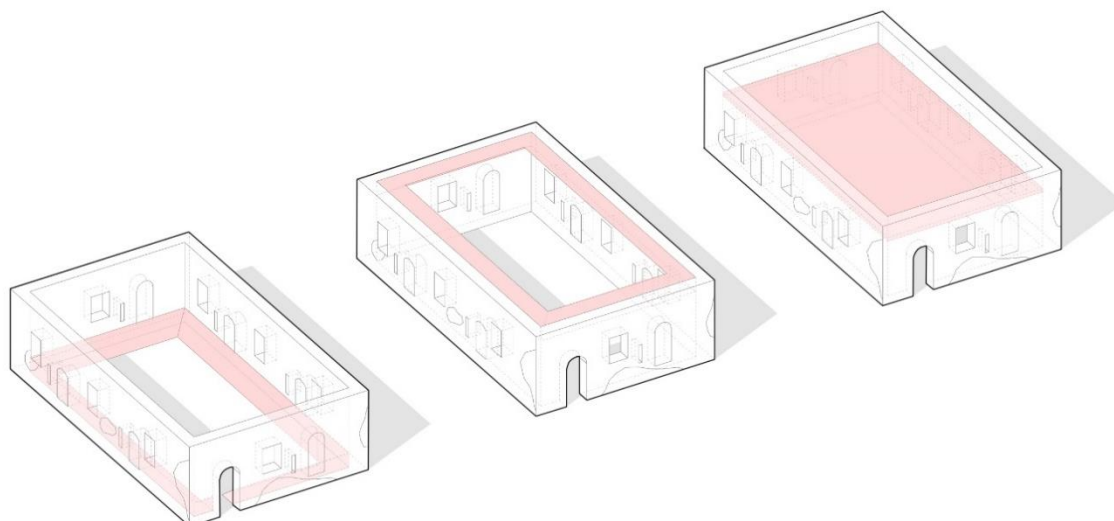
- nosné,
- čiastočne nosné / nosné za určitej podpory a
- nenosné.



Obr. 7-Miera nosnosti pôvodného nosného obvodového muriva (zľava): nosné, nosné za určitej podpory, nenosné-nutnosť vytvoriť samonosnú konštrukciu (autor)

Pri čiastočne nosnom murive, resp. murivo nosné za určitej podpory, môžeme rozdeliť do ďalších troch kategórií podľa spôsobu podpory :

- podpora pri päte muriva,
- podpora pri korune muriva,
- plošná podpora, plošné stuženie.



Obr. 8-Možnosti podopretia / zastabilizovania čiastočne nosného pôvodného muriva (zľava): pri päte, pri korune muriva, plošná-horizontálna (autor)

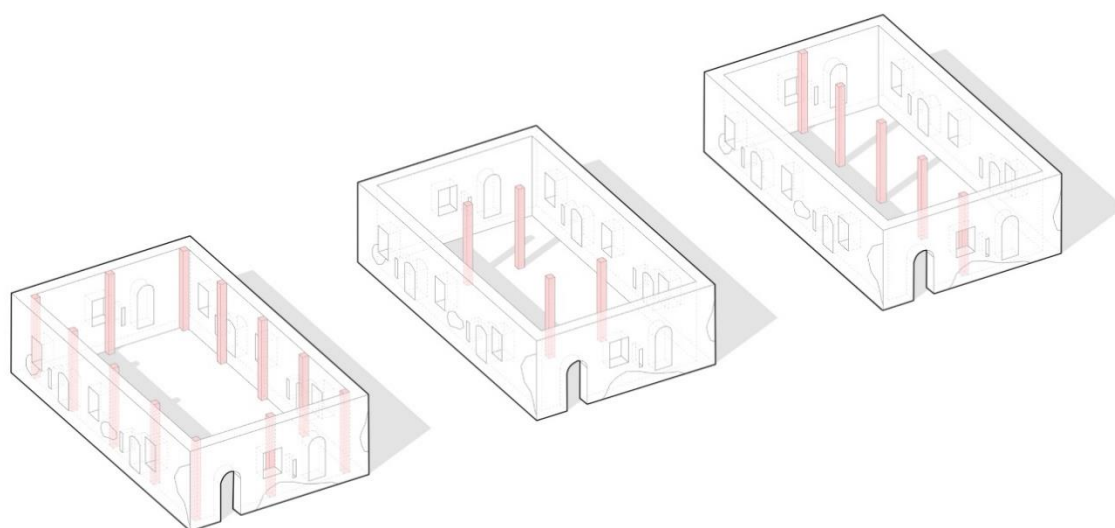
Nenosné murivo, absolútne nevhodné na položenie novej konštrukcie. V tomto prípade by v návrhu bolo nutné navrhovať samonosnú konštrukciu, ktorá by novú strešnú konštrukciu niesla.

Táto samonosná konštrukcia pracuje s niekoľkými typmi:

- bodové prvky,
- plošné prvky

a možnosťami umiestnenia v rámci riešeného priestoru:

- po obvode,
- v priestore,
- v línii.



Obr. 9-Možnosti umiestnenia samonosnej konštrukcie pri nenosnom obvodovom murive (zľava): po obvode, v priestore, v línii, (autor)

4.1 Determinanty statiky

Determinanty ovplyvňujúce statiku môžeme zadeliť do nasledujúcej tabuľky.

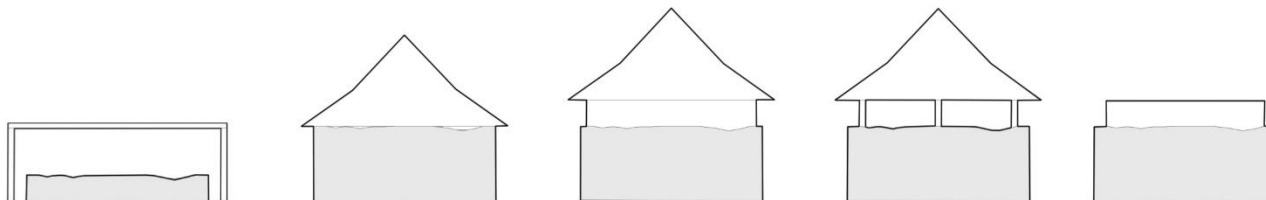
Tab. 3-determinanty ovplyvňujúce statiku pôvodného muriva (autor)

Statika																		
Miera zachovania						Miera nosnosti						Miera celistvosti						
Pod niveletou súčasného terénu	V päte pôvodného muriva	S nízkymi múrmi	S múrmi s dostatočnou výškou	Po korunu muriva	S fragmentom strešnej konštrukcie	Zachovaný originál	Nosné	Nosné za určitej podpory			Nenosné - nutnosť vytvoriť samonosnú konštrukciu			Otvory	Stav muriva		Stav vnútorných nosných múrov	
								Pri korune muriva	Pri päte muriva	plošné / horizontálne	Po obvode	V priestore	V línií		Nevplýva na nosnosť	Nutná konsolidácia	Nosné	Nenosné

5. Možné spôsoby nového zastrešenia historických objektov

Základná typológia zastrešenia ruín sa delí podľa ich polohy voči ruine, ktorá rozhoduje o prezentácii pamiatkových hodnôt ruiny, miere ochrany ruiny, jej ďalšieho zaťaženia a o funkcii ruiny v novovytvorenom priestore. Typológiu zastrešenia ruín možno rozdeliť do troch kategórií:

- krycie konštrukcie nad ruinami, alebo ich celými areálmi,
- ochranné konštrukcie so strešnými konštrukciami položené priamo na ruine,
- ochranné konštrukcie so strešnými konštrukciami s určitým dištancovaním od pôvodnej substance,
- ochranné konštrukcie so strešnými konštrukciami vložené do ruiny, tzv. kontajnery [8], [12], [13].



Obr. 10-Typológia zastrešenia ruín (zľava): 1 - krycia stavba, 2 - ochranná konštrukcia položená priamo na murive, 3 a 4 – ochranná konštrukcia s určitým dištancovaním od pôvodnej substance, 5 – ochranná konštrukcia tvorená tzv. kontajnerom [8]

Na architektonický návrh krycích stavieb, ktoré obkračujú a pokrývajú ruinu bez priameho kontaktu, výrazne vplýva urbanistický kontext, nakoľko pokrývané ruiny sú vo väčšine prípadov minimálne zachované a pôvodný historický kontext zanikol spolu s časťou ich pôvodnej substancie. Ruiny sa nachádzajú v rôznej nivelete vzhľadom k okolitému terénu a preberajú funkciu historického dokumentu a exponátu. Novostavby nad nimi majú funkciu priamo súvisiacu s touto skutočnosťou, prípadne sa ruina stáva súčasťou širšej expozície, alebo funkcia krycej stavby nesúvisí s exponátom ruín vôbec a stavba ruinu neprezentuje.

Ochranná konštrukcia položená priamo na ruine okrem priradenia funkcie ruine obnovuje jej pôvodnú nosnosť a ruina sa stáva riadnym a živým členom konštrukčného systému. Kontext okolitého prostredia týchto konštrukcií hrá menej významnú rolu v riešeníach zastrešení, nakoľko ten je striktné historický a nadiktovaný ruinou, na ktorej je zastrešenie položené. Architektonické riešenie ochrannej konštrukcie je často postavené na tektonických charakteristikách zaniknutého pôvodného zastrešenia. Väčšina nových konštrukcií je z ľahkých konštrukčných materiálov a je evidentná tendencia k ich návratnosti. Strešná konštrukcia je na ruine položená bezprostredne, alebo cez dištančný článok rôzneho konštrukčného riešenia a vzťahu k rozvoľnenej siluete koruny murív ruiny.

Ochranné konštrukcie vložené do ruiny, tzv. kontajnery, chránia ruinu v obmedzenej miere zlepšením ich stability. Ich urbanistický kontext je vymedzený samotnou ruinou podobne ako v predošlom type zastrešení. Ruina preberá iba funkciu exteriérového exponátu. Kontajner môže objem, ktorým ruina prirodzene disponuje, rešpektovať, alebo ho presahovať. Aj napriek samonosnosti vlozenej architektúry táto môže dbať na pôvodný historický kontext ruiny a môže ho obnovovať, alebo naznačovať [14].

Parametre zastrešenia ruín alebo historických objektov, ktoré ovplyvňujú návrh môžeme zdeliť do následnej tabuľky.

Tab. 4-Determinanty ovplyvňujúce návrh zastrešenia ruín, historických alebo pamiatkových objektov (autor)

Determinanty zastrešenia												
Príroda		Urbanizmus			Architektúra			Ochrana pamiatkových hodnôt		Spoločnosť		
Klimatický a krajinný kontext	Exponovanosť voči atmosférickým vplyvom	Charakter prostredia	Charakter zástavby	Pohľadová exponovanosť	Geometria	Konštrukčné parametre	Prevádzkové požiadavky	Urbanizmus	Dielo	Materiál	Kultúrny kontext	Legislatívny rámec

6. Diskusia a záver

Slovenské historické a pamiatkové objekty sú momentálne stále vo fáze individuálneho prístupu pri ich obnove, rekonštrukcií a prezentácií. Chýbajú koncepcnejšie riešenia prístupu k ich obnove a prezentácií. Vznikajú rôzne metodické situácie kedy je zastrešovanie neprípustné aj v prípade

dochovaných a zrejmych informácií o pôvodnom type, druhu či spôsobe zastrešenia. Prevláda konzervačný prúd, ktorý možné prístupy doplnenia náznaku či kópie pôvodnej konštrukcie obmedzuje či priam zakazuje. Zastrešenie historických a pamiatkových objektov je dnes aktuálnou témou, ktoré sa už nachádzajú za fázou záchrany a hľadajú vo všetkých aspektoch správny systém či koncepciu svojej prevádzky. Môžeme konštatovať, že zastrešenia patria ku konštrukciám o ktorých pôvodnom stave sa správne informácie dochovávajú zriedkavo. Z uvedeného dôvodu je požiadavka na ich obnovu diskutabilná a v prípade, že sa pristúpi ku ich obnove, treba jasne definovať rámcovú metódu pamiatkovej obnovy, ktorá podľa situácie exaktne definuje spôsob obnovy a prístup ku návrhu.

7. Literatúra

- [1] SUCHÝ, Ľuboš. *Historicko–typologický vývoj stredovekých krovových konštrukcií na území Slovenska*. Bratislava, 2015. Dizertačná práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta architektúry. Vedoucí práce Prof. Ing. arch. Pavel Gregor, PhD.
- [2] KRUŠINSKÝ, SUCHÝ, KORENKOVÁ, ĎURIAN, ZACHAROVÁ a GRUŇOVÁ. *Historické krovky v regióne Liptova I*. 1. vydanie. Žilina: KNM, 2011. ISBN 978-80-970171-8-7.
- [3] KRUŠINSKÝ, ĎURIAN, KORENKOVÁ, SUCHÝ a GRUŇOVÁ. Dokumentovanie a výskum historických krovov na území Slovenska. In: *Zborník z Bratislavského sympózia STRECHY 2014*. Bratislava, 2014, s. 142-147. ISBN 978-80-89728-01-5.
- [4] VINAŘ, J. *Historické krovky II - průzkumy a opravy*. 1. vydanie. Grada, 2005, 132 s.
- [5] KRUSINSKY, Peter, Lubor SUCHÝ, Zuzana GRUŇOVÁ a Karol ĎURIAN. *Historické krovky sakrálnych stavieb Turca*. 1. vydanie. Žilina: Miroslav Gibala, KNM, 2008. ISBN 978-80-965547-9-7.
- [6] ĎURIAN, Karol. *Historicko–typologický vývoj renesančných krovových konštrukcií na území Slovenska*. Bratislava, 2015. Dizertačná práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta architektúry. Vedoucí práce Prof. Ing. arch. Pavel Gregor, PhD.
- [7] ZACHAROVÁ, Daniela. *Historicko–typologický vývoj barokových krovových konštrukcií na území Slovenska*. Bratislava, 2016. Dizertačná práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta architektúry. Vedoucí práce Prof. Ing. arch. Pavel Gregor, PhD.
- [8] CHOVANCOVÁ, Lýdia. *Krycie konštrukcie torz architektúry: Ochranné konštrukcie a krycie stavby torz architektúry*. Bratislava, 2017. Dizertačná práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta architektúry.
- [9] GREGOROVÁ, Jana, Lýdia CHOVANCOVÁ, Zuzana ONDREJKOVÁ a Alexandra ŠKRINÁROVÁ. *Obnova torz architektúry ako špecializovaná architektonická disciplína*. *Archaeologia historica* [online]. 2015, (1), 7-39 [cit. 2022-07-03]. ISSN 0231-5823. Dostupné z: doi:10.5817/AH2015-1-1
- [10] GREGOROVÁ, Jana. *Prezertácia architektonického dedičstva*. 1. vydanie. Bratislava: STU, 2003, 140 s. ISBN ISBN 9788022718370.
- [11] MAKÝŠ, Oto a Vladimír KOHÚT. *Pasportizácia ruín*. 1. vydanie. Bratislava: Renesans, 2018. ISBN 80-89983-07-0.
- [12] POLIAK, Martin. *Východiská architektonickej tvorby v kontexte zastrešenia ruín* [online]. In: . [cit. 2022-10-10]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/architektura-staveb/22495-zastrezenie-ruin-v-architektonickych-kontextoch?fbclid=IwAR2olxT-pifOdRQQ8fkTN3EAs-qWSaPc2cxtVVXrrznRKz0VacrJbpTA-To>

- [13] VOJTEKOVÁ, Eva, *Jana GREGOROVÁ, Beáta POLOMOVÁ a Karolína SÁSIKOVÁ*. Monument restoration - A controlled task does not limit your creativity. *World Transactions on Engineering and Technology Education*. 2018, , 269-274 s.
- [14] GREGOROVÁ, Jana, Lýdia CHOVANCKOVÁ, Zuzana ONDREJKOVÁ a Alexandra ŠKRINÁROVÁ. OBNOVA TORZ ARCHITEKTÚRY AKO ŠPECIALIZOVANÁ ARCHITEKTONICKÁ DISCIPLÍNA. *Archaeologia historica*. 2015, **40**(12), 32. Dostupné z: doi:10.5817/AH2015-1-1

Mário Chlaň¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: štvrtý.

PRINCÍP FUNGOVANIA DYNAMICKEJ ČASTI AUTONÓMNEJ OKENNEJ KONŠTRUKCIE

FUNCTIONING PRINCIPLE OF THE DYNAMIC PART OF THE AUTONOMOUS WINDOW CONSTRUCTION

Abstract

The subject of my dissertation is the development of an autonomous window structure capable of independently reacting to the facilities of the environment in real time. Currently, buildings consume a significant part of global energy consumption. Buildings that would be properly operated in the future could achieve significant energy savings. The window structure is a highly loaded and complex building element with many requirements for its functionality. By automating the use of this structure, we can contribute to increasing the energy efficiency of the building. The article describes the functioning of the dynamic part of the window controlled by a programmable Arduino² board with the help of sensors and a stepper motor. It also describes the decision-making hierarchy setting for data from three variable values of measured quantities.

Kľúčové slová / Key Words

Autonómne okenné konštrukcie, riadenie súčastí budov, senzory, Arduino

1. Úvod

V mojej dizertačnej práci sa zaoberám vývojom autonómnej okennej konštrukcie schopnej samostatne reagovať na vlastnosti prostredia v reálnom čase. Automatizovaním otvárania okennej konštrukcie rozhodnutiami na základe aktuálnych údajov a údajov z predpovede najbližších dní môžeme prispieť k zlepšeniu kvality vnútorného prostredia budovy. Na okne sú merané veličiny vplývajúce na kvalitu vnútorného prostredia. Na týchto veličinách sa dá demonštrovať ovládanie dynamickej časti okennej konštrukcie pri zmene ich aktuálnych hodnôt. Za kvalitné sa považuje prostredie, v ktorom je minimálne 80% užívateľov spokojných s tepelnou pohodou budovy [1]. Článok popisuje fungovanie dynamickej časti okna ovládanej programovateľnou doskou Arduino za pomoci senzorov a krokového motora. Popisuje aj nastavenie hierarchie rozhodovania pri údajoch z troch premenných hodnôt meraných veličín.

2. Prototyp dynamickej časti autonómnej okennej konštrukcie

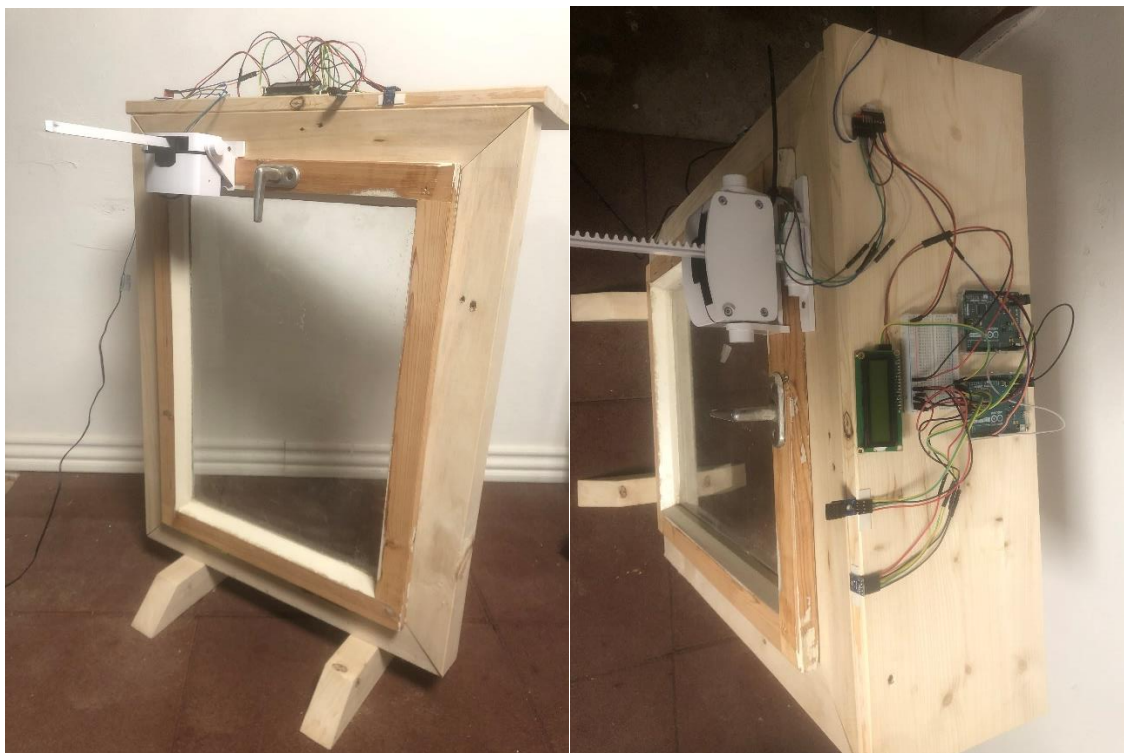
Testovací prototyp sa skladá z drevenej okennej konštrukcie s výklopným spôsobom otvárania. V hornej časti okna sa nachádza plocha osadená senzormi a ostatným hardvérom³ potrebným pre

¹ Ing. Mário Chlaň, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05, Bratislava, tel.: (+421) 910 985 066, e-mail: mario.chlan@stuba.sk

² Arduino - programovateľná doska, jednoduchý mikropočítač

³ Hardvér – hmotné doplnky počítača

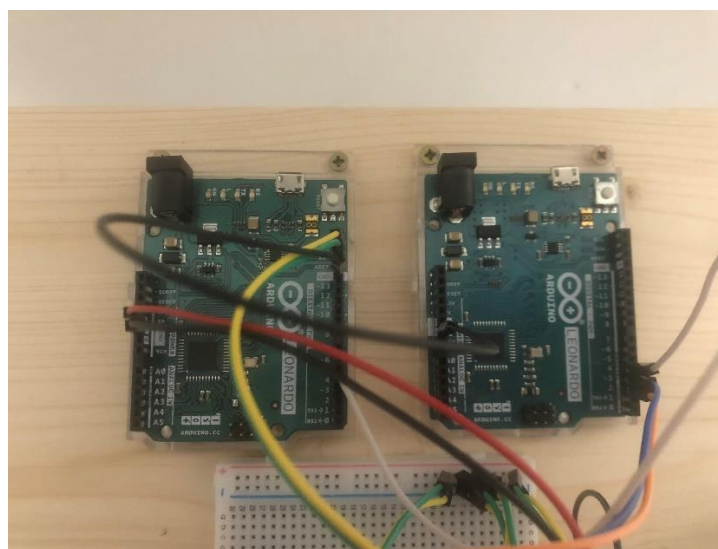
správne fungovanie. Systém je napájaný cez laboratórny zdroj elektrickej energie. Celkové zapojenie a skladbu prvotného zariadenia je možné vidieť na obrázku 1.



Obr.1 Okenná konštrukcia osadená senzormi a ostatným hardvérom [foto autor]

3. Jednotlivé súčasti ovládania a hardvéru

Základom osadeného hardvéru je dvojica programovateľných dosiek Arduino, kde jedna riadi prácu senzorov a druhá ovláda riadiacu jednotku krokového motora a samotný pohyb motora. Ich zapojenie zobrazuje obrázok 2.

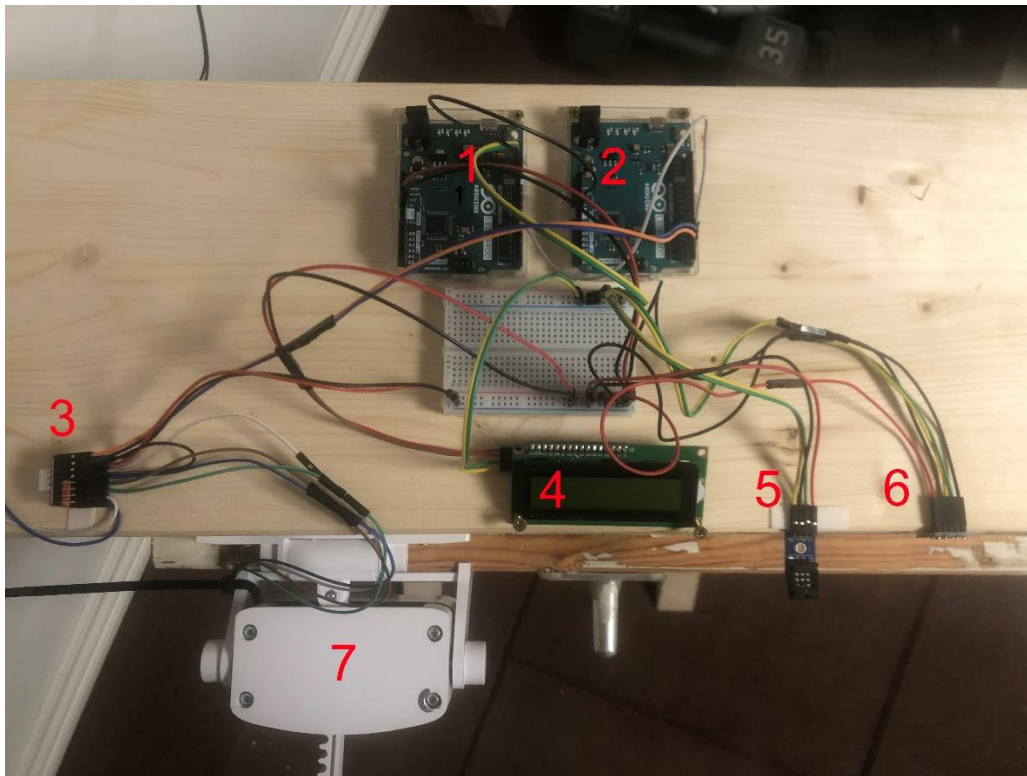


Obr.2 Osadenie mikropočítača a ich zapojenie [foto autor]

Ďalej je panel osadený nasledovným hardvérom:

- Teplomér a vlhkomér DHT12 AM2320
Tento hardvér je vstupný modul pre Arduino. Obsahuje senzor AM2320, ktorý komunikuje po zbernici I2C čo ho robí presnejším oproti ostatným dostupným senzorom. Rozsah merania teploty je -40 až +80 °C s presnosťou na 0,5 °C. Meračí rozsah vlhkosti je v rozsahu 0-99,9% relatívnej vlhkosti s presnosťou na 2% relatívnej vlhkosti.
- Senzor intenzity svetla BH 1750
Modul má zabudovaný luxmeter, teda nie je potrebné prepočítavať prijaté údaje. Pracovné napätie: 3V, Interface:I2C, Rozpätie: 1 ~ 65 535 lx
- Jednoduchý displej pre rýchle zobrazenie meraných údajov na fyzickú kontrolu.
- Riadiaca jednotka krokového motora EMU 1578 ktorá zabezpečuje správny pohyb a počet krokov motora
- Krokový motor osadený na posuvnom hrebeni – mechanizme otvárania okennej konštrukcie.

Osadenie hardvéru je popísané na obrázku 3



Obr.3 Osadenie hardvéru
1,2- Arduino, 3-riadiaca jednotka, 4-displej, 5,,6-senzory
7-krokový motor s hrebeňom [foto autor]

4. Matematické vyjadrenie ovládania konštrukcie, hierarchia rozhodovania

Vstupom pre riadiacu slučku sú hodnoty veličín namerané senzormi (napr.: vlhkosť, teplota, intenzita osvetlenia, CO₂). V ďalšom kroku sa tieto hodnoty porovnávajú s ideálnymi hodnotami veličín, ktoré užívateľ nastaví podľa daných preferencií vnútorného prostredia. Veľkosť rozdielu

medzi ideálnymi a reálnymi hodnotami určí, do akej miery sa okno otvorí. Konkrétne je tento akčný zásah riadený premennou *otvorenie*, ktorá v sebe kombinuje rozdiely všetkých riadiacich veličín. Jej hodnota sa bude pohybovať v určitých medziach, na základe jej veľkosti sa okno otvorí naplno alebo len do istej miery. Keďže každá veličina je meraná v iných jednotkách, ktorých bežné hodnoty sa môžu meniť aj rádovo, je potrebné rovnicu znormovať pomocou koeficientov *a, b, c*. Zároveň je týmito koeficientami možné meniť váhu jednotlivých veličín, ktorou zasahujú do výslednej akcie.

$$\begin{aligned} \text{teplota}_{real} &= \text{teplota nameraná senzorom} \\ \text{svetlo}_{real} &= \text{intenzita osvetlenia namerané senzorom} \\ \text{vlhkost}_{real} &= \text{vlhkosť nameraná senzorom} \\ CO2_{real} &= \text{hodnota koncentrácie CO2 nameraná senzorom} \end{aligned}$$

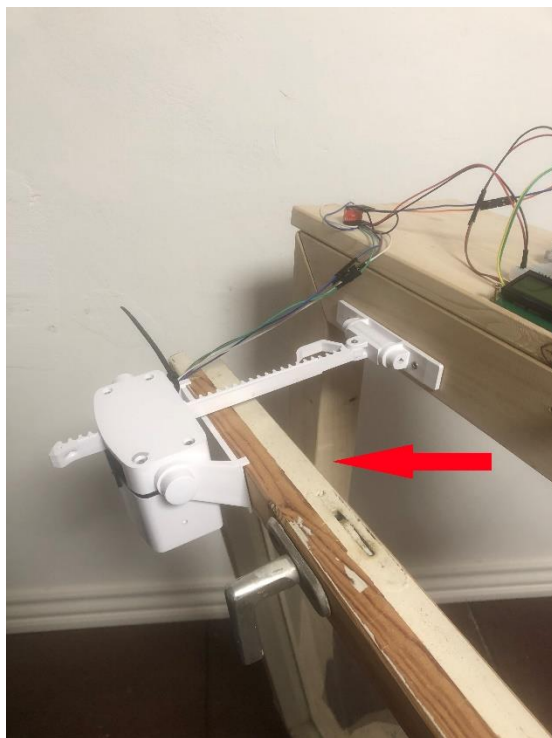
$$\begin{aligned} \text{teplota}_{ideal} - \text{teplota}_{real} &= \text{teplota} \\ \text{svetlo}_{ideal} - \text{svetlo}_{real} &= \text{svetlo} \\ \text{vlhkost}_{ideal} - \text{vlhkost}_{real} &= \text{vlhkost} \\ CO2_{ideal} - CO2_{real} &= CO2 \end{aligned}$$

$$a. \text{teplota} + b. \text{vlkost} + c. CO2 = \text{otvorenie}$$

Princíp ovládania sa najjednoduchšie demonštruje na senzore intenzity osvetlenia. Zasvietením na senzor LED svetlom (Obr.4) narušíme medzné hodnoty. To má za následok nové meranie, pri ktorom mikropočítač vyhodnotí spustenie otvárania okna (Obr.5). Senzor intenzity osvetlenia by v budúcnosti ovládal konštrukciu vplyvajúcu na prestup svetla cez okno – napríklad vonkajšie okenné žalúzie. V tejto chvíli ale slúži na ukážku fungovania ovládania dynamickej časti okennej konštrukcie.

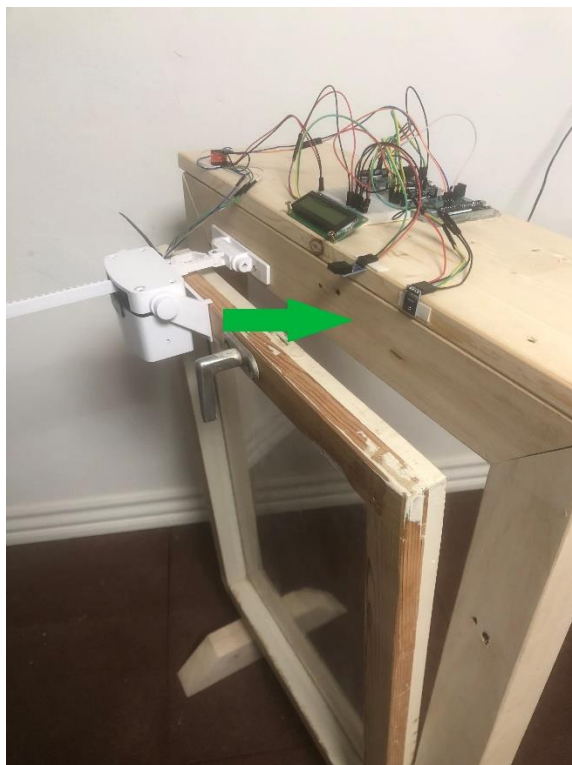


Obr.4 Narušenie medzných hodnôt LED svetlom [foto autor]



Obr.5 Spustenie otvárania okennej konštrukcie [foto autor]

Po vypnutí LED svetla sa merané hodnoty veličín vrátia do požadovaných hodnôt. Prebehne nové meranie a mikropočítač na ich základe rozhodne, že sa okenná konštrukcia začne zatvárať (Obr.6). Úplne zatvorenie je nastavené počtom otáčok motora. Obdobným spôsobom sa dá nastaviť aj dĺžka samotného otvorenia sklopného krídla.



Obr.6 Zatvorenie okennej konštrukcie [foto autor]

5. Alternatívne nastavenie ovládania a nasledujúce čiastkové ciele

Pri testovaní funkčnosti ovládania dynamickej časti okennej konštrukcie sa predpokladá potreba úpravy nastavení pri rozhodovaní mikropočítača na základe údajov z merania [2]. Samotný vstup pre riadiacu slučku môže byť doplnený o novú veličinu, prípadne sa veličina odoberie. Testované a upravované bude aj samotné usporiadanie veličín, kde sa nevyklučuje uprednostnenie jednej z veličín nad ostatné – zmena základného matematického vzorca. Po určení postupov sa plánuje prístup k ďalším čiastkovým cieľom – prepojenie dynamického ovládania s BIM prostredím a informáciami o počasí v reálnom čase.

6. Záver

Okenná konštrukcia pri pravidelnom vetraní výrazne ovplyvňuje kvalitu vnútorného prostredia budov. Vývoj inteligentných okenných konštrukcií a najmä zasklení v posledných rokoch napreduje. Existuje veľmi veľké množstvo článkov a vedeckých štúdií o inteligentných okenných konštrukciách. Častokrát sa ale stretávame z faktom že tieto inteligentné typy zasklení sú súčasnosti veľmi ekonomicky nákladné - z dôvodu potreby vývoja nových náročných technológií [3].

Cieľom mojej práce je vyvinutie autonómnej okennej konštrukcie ktorá priaznivo ovplyvní zlepšovanie kvality vnútorného životného prostredia a nepriamo aj zdravie človeka. Konštrukcia bude ovládaná podľa popisu z predchádzajúcich strán. Podnety pre zmenu stavu okennej konštrukcie budú v pravidelných intervaloch odčítané zo sústavy senzorov. Okenná konštrukcia by bola využívaná najmä v súkromnom sektore.

Literatúra

1. D. PETRÁŠ a kolektív
Vykurovanie rodinných a bytových domov, vyšlo vo vydavateľstve JAGA v roku 2005 , 75s (2017), s. 45 - 55
2. RUIYAN CAI
Princíp a použitie Arduina, Elektrón. Des. Angl. , 16 (047) (2012), s.12-14
3. L. SZÖNYI
Informačné modelovanie budov v procese rozhodovania o dodatočnom vybavení plášťa verejných budov - prípadová štúdia
Polytech. Civil Eng. , 54 (2) (2010) , s. 143 – 154

*Tomáš Josai*¹

Študijný program: D-TKPS4, ročník: 4.

ANALÝZA VPLYVU VÝŠKY PREKÁŽKY NA DENNÚ OSVETLENOSŤ V MODELI POD UMELOU OBLOHOU

ANALYSIS OF EFFECT OF OBSTACLE HEIGHT ON DAYLIGHT IN MODEL UNDER ARTIFICIAL SKY

Abstract

Daylighting in a room is influenced by several external and internal factors. The amount of daylight in the workplace changes significantly not only during the year but also during the day and hour. In the territory of the Slovak Republic, there are strict requirements for the minimum values of daylight factors in buildings, which have their own justification. This article points out the impact of newly constructed dense houses development in cities on and its impact on lighting conditions in existing buildings in its vicinity. At the same time, it also points to the influence of the physical-optical properties of the surfaces in the critical room and the opposite facade on the daylight.

Kľúčové slová

denná osvetlenosť, experimentálne modelové merania, umelá obloha, činiteľ dennej osvetlenosti, vplyv fasády na dennú osvetlenosť

1. Úvod

Denné svetlo predstavuje viditeľnú časť spektra slnečného žiarenia, ktorá významne prispieva k tvorbe zdravého a obývateľného vnútorného prostredia v budovách^{[5][8]}. Denné svetlo zosúladzuje biorytmy človeka, vplýva na kvalitu imunitného systému ľudského organizmu a na činnosť vnútorných orgánov. Zohráva významnú úlohu na pracoviskách, kde znižuje únavu a neskršuje index podania farieb a tak prispieva k zlepšeniu produktivity práce a k znižovaniu tvorby chýb vo výrobe. Denne svetlo umožňuje najkvalitnejšie vnímanie priestoru vo vzťahu k fyzikálnej realite. Má tiež ekonomický prínos, keď v miestnostiach s dobre osvetlených denným svetlom umožňuje šetriť na prevádzkových nákladoch na umelé osvetlenie^{[4][12]}.

V súčasnej dobe, keď väčšina administratívnych pracovníkov, študentov a detí sa zdržiava viac ako 90 % svojho času v budovách^[14], je potreba čoraz dôraznejšie dbať na kvalitu a množstvo denného svetla na pracoviskách. Svetlo neovplyvňuje iba priamy fyziologický stav človeka, ale má vplyv aj na psychologické aspekty, ako sú nálada, bdelosť a depresie^{[1][13]}. Súčasne trendy architektúry umožňujú developerom v mestách čoraz hustejšiu a vyššiu zástavbu, ktorá má vplyv na tienenie všetkých existujúcich budov v okolí. Kritické sú z hľadiska denného svetla najmä najnižšie podlažia nie len obytných budov, ale najmä administratívy a rôzne iné polyfunkčné prevádzky.

2. Metodika merania dennej osvetlenosti v modeli pod umelou oblohou

Experimentálna analýza vplyvu výšky prekážky na dennú osvetlenosť, resp. na činitele horizontálnej a vertikálnej osvetlenosti v modeli bola vykonaná na zmenšenine testovacej miestnosti, reprezentujúcej kancelársky priestor. Ako zdroj svetla pre experiment bola zvolená umelá obloha na

¹ Tomáš Josai, Ing., STU, SvF, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Ústave stavebníctva a architektúry Slovenskej akadémie vied v Bratislave. Aby sa vylúčil vplyv orientácie modelu na svetové strany, resp. vplyv polohy umelého slnka, boli merania uskutočnené pod rovnomerne zamračenou oblohou s konštantným jasom. Zároveň rovnomerne zamračená obloha definuje štatisticky najviac sa vyskytujúci typ oblohy s pomerne nízkymi hodnotami globálnej osvetlenosti [9]. Pred samotným experimentom predchádzali merania rôznych vstupov do simulácie, ako spektrálna ožiarenosť umelej oblohy, jej chromatickosť a osvetlenosť, merania činiteľov priepustnosti a odrazivosti jednotlivých povrchov použitých na modeli.

Hodnoty horizontálnej a vertikálnej osvetlenosti boli namerané pre referenčný čierny model a pre model s neutrálnymi sivými povrchmi. Výška snímačov pri horizontálnej polohe zodpovedala v mierke hodnote 0,85 m, čomu zodpovedá výška pracovného stola a výška snímačov pri vertikálnej polohe, orientovanej smerom k oknu, zodpovedala v mierke hodnote 1,20 m, čomu zodpovedá pohľad sediaceho človeka na stoličke [2][16]. Hodnoty boli zaznamenávané v 3 bodoch, a to 1 m od okna, 1 m od zadnej steny a v strede miestnosti. Porovnávaciu hodnotu globálnej osvetlenosti kupoly zaznamenával snímač umiestnený nad modelom, na základe ktorej sa počítali činitele dennej osvetlenosti D podľa nasledujúceho vzťahu:

$$D = \frac{E_{v,i}}{E_{v,h,artificial\ sky}} \times 100[\%] \quad (1)$$

kde $E_{v,i}$ je denná osvetlenosť v určitom bode [lx],
 $E_{v,h,artificial\ sky}$ - oblohová horizontálna osvetlenosť umelej oblohy (typ 5) [lx].

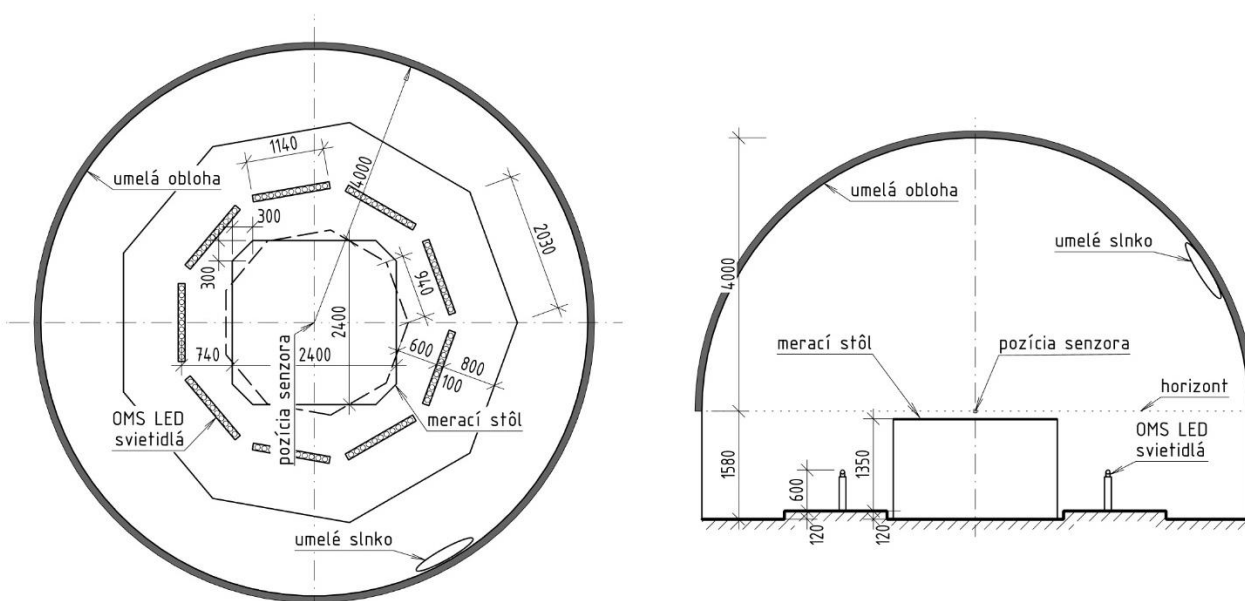
Nadstaviteľná prekážka v modeli reprezentuje vplyv výšky protiľahlej fasády na osvetlenosť spodnej miestnosti v modeli. Tieniaci uhol výšky prekážky reprezentuje hustotu zastavanosti urbanistického priestoru v mestách, ktorý bol zvolený od 11° do 60°. Tieniaci uhol eliminuje oblohovú zložku žiarenia, na základe čoho je predpoklad, že veľký tieniaci uhol protiľahlej fasády vytvára nevhodné vizuálne podmienky v budovách. Vplyv svetlosti povrchov v miestnosti, ale aj svetlosti povrchov protiľahlej fasády, môžu však význame ovplyvniť úroveň osvetlenosti v posudzovanej miestnosti [3]. Hodnoty činiteľov odrazivosti interiérových povrchov boli stanovené na základe odporúčania normy STN EN 17037 časť B.3 Výpočtové metódy (strop $\rho_v = 0,7$ až $0,9$; vnútorné steny $\rho_v = 0,5$ až $0,8$; vonkajšie steny $\rho_v = 0,2$ až $0,4$; podlaha $\rho_v = 0,2$ až $0,4$ a vonkajší terén $\rho_v = 0,2$).

Na hodnotenie výsledkov v prípade kancelárskych prác a zrakových činností bol použitý minimálny činiteľ horizontálnej dennej osvetlenosti $D_{h,min} = 1,5$ % podľa vyhlášky MZ SR č. 541/2007. Pre hodnotenie činiteľa vertikálnej osvetlenosti bola v rámci experimentu navrhnutá hodnota $D_{v,min} = 1,2$ %, čomu približne zodpovedá úroveň 200 lx dosiahnutých na vertikálnej rovine v oku pozorovateľa podľa WELL Building Institute.

3. Opis meracích prístrojov a zariadení

Merania osvetlenosti boli zrealizované pod umelou oblohou v areáli Slovenskej akadémie vied v priestoroch Ústavu stavebníctva a architektúry. Umelá obloha hemisférického typu bola zrekonštruovaná v roku 2017. Zrenovoval sa náter vnútorného povrchu hemisféry a vymenili sa žiarovkové svetelné zdroje za nové LED svietidlá. V súčasnosti je vnútorný povrch kupoly bielej farby a je spektrálne nezávislý v rozsahu 380 nm 780 nm [6].

Umelá obloha sa skladá z oceľo-betónovej kupoly s priemerom 8 m, LED svietidiel umiestnených na pódiu podlahy, meracieho stola umiestneného v strede kupoly a umelej oblohy zloženej z parabolického zrkadla s priemerom 1,2 m, halogenidovej výbojky a LED pásikov osadených po obvode zrkadla simulujúceho slnečnú korónu.



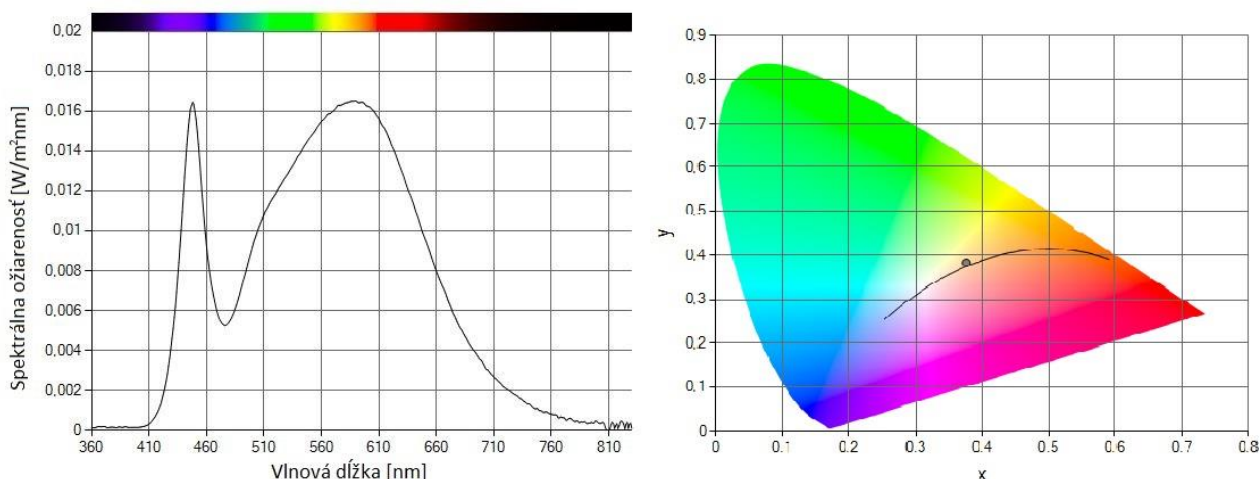
Obrázok 1: Pôdorys a rez umelej oblohy Slovenskej akadémie vied v Bratislave

Ako zdroj svetla pre experimentálne merania bola použitá rovnomerne zamračená obloha s konštantným jasom. Jej vlastnosti a podané svetelné spektrum boli namerané pomocou spektrofotometra MSC-15 (Gigahertz-Optik) v rozsahu od 360 -830 nm. Dosiagnuté hodnoty meraných veličín sú uvedené v tabuľke 1. Grafické znázornenie spektrálneho rozloženia svetla a pozícia horizontálnych OMS LED svietidiel v diagrame chromatickosti CIE sú znázornené na obrázku 2.

Tabuľka 1: Charakteristické vlastnosti OMS LED svietidiel nameraných 30.6.2021

Veličina	Označenie	Dosiagnutá hodnota
Náhradná teplota chromatickosti	CCT	4145,9 K
Súradnice v chromatickom diagrame podľa CIE	x	0,3765
	y	0,3824
Tristimulárne hodnoty	X	1,458
	Y	1,481
	Z	0,9336
Index podania farieb	R_a	83,132
Osvetlenosť	E_v	1011 lx
Dominantná vlnová dĺžka	λ_d	576,5 nm

Na meranie dennej osvetlenosti v modeli boli použité sériovo zapojené luxmetre do prístroja na meranie osvetlenosti Konica-Minolta T-10. Jednotlivé snímače boli skaliborvané ku hodnote snímača č. 1, ktorý bol stanovený ako referenčný. Kalibrácia sa vykonala na horizontálne uložennej doske a to pri nízkych a aj vysokých hodnotách fotickej osvetlenosti E_v . Na základe piatich nameraných hodnôt sa stanovila kalibračná konštanta pre každý snímač zvlášť, na základe ktorej sa následne korigovali hodnoty 3 snímačov vo vzťahu k referenčnému snímaču. Referenčný luxmeter zaznamenával údaje horizontálnej oblohovej osvetlenosti. Bol umiestnený na stojane v takej výške, aby sa nachádzal vždy nad meniacim sa modelom.



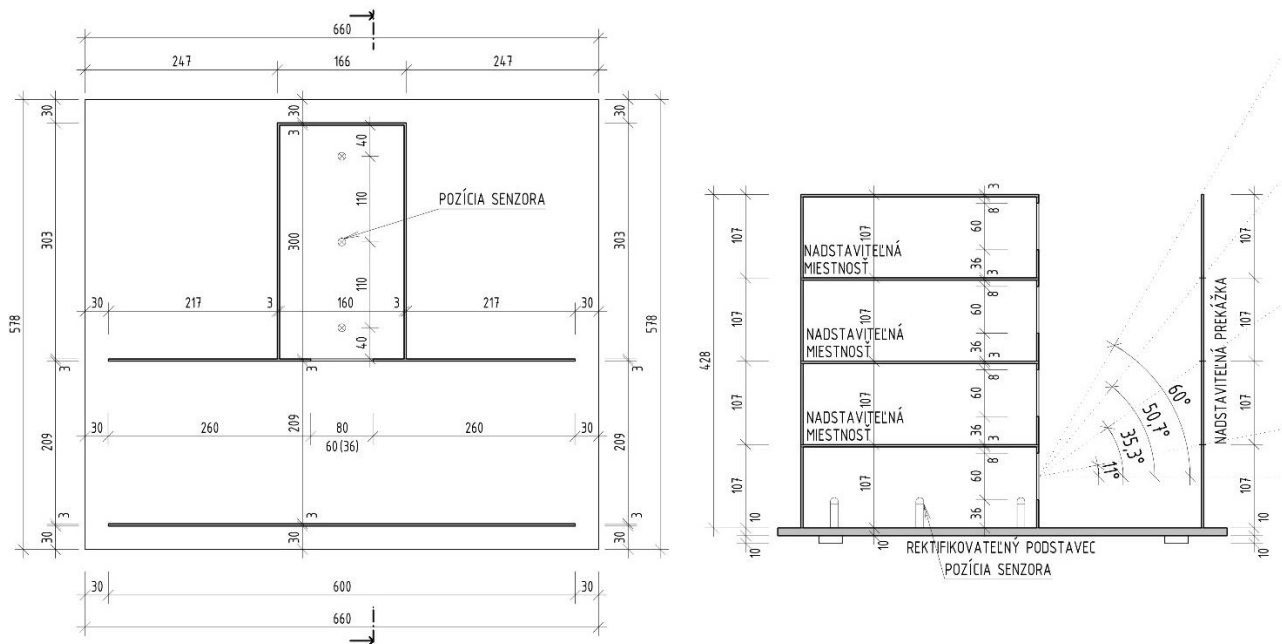
Obrázok 2: Spektrálne rozloženia svetla a pozícia horizontálnych OMS LED svietidiel v diagrame chromatickosti CIE



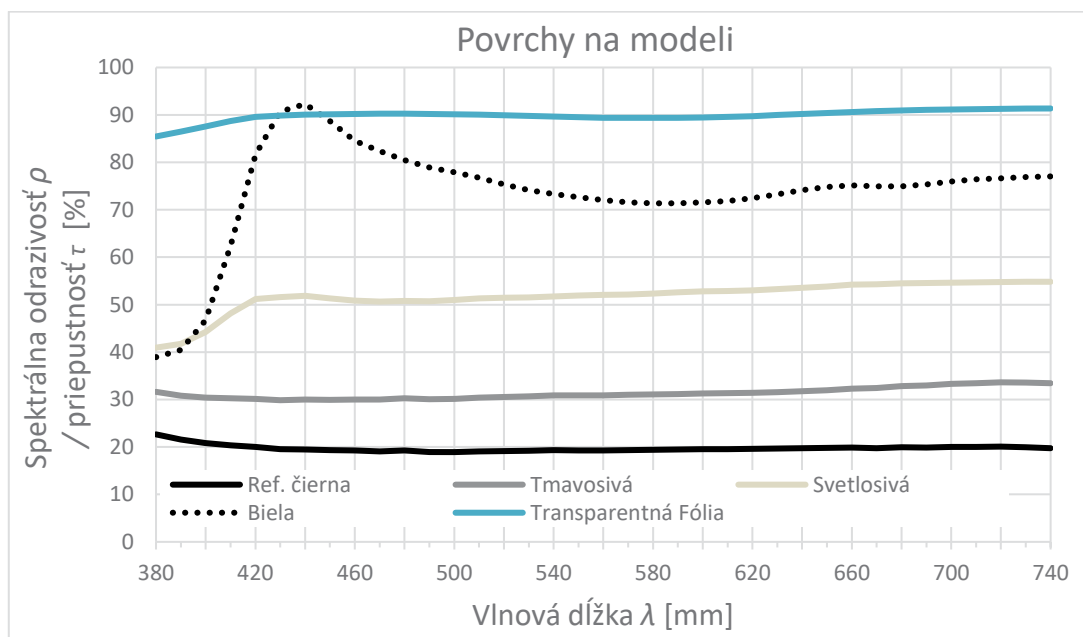
Obrázok 3: Merač osvetlenia Konica Minolta T-10 a použité luxmetre pri meraniach v modeli

4. Opis meracieho modelu

Merací model reprezentuje hlbokú miestnosť približne v pomere dĺžky strán 1:2 o rozmeroch 4 m x 7,5 m nachádzajúcu sa v mestskej zástavbe v mierke 1:25. Model umožňuje meranie horizontálnej a vertikálnej dennej osvetlenosti pod umelou oblohou v 3 bodoch v kritickej spodnej miestnosti z pohľadu denného osvetlenia. Jeho rozmery sú navrhnuté tak, aby nebolo možné nasvecovať model zo spodu umelým horizontálnym osvetlením. Samotný model je rozobratelný, s tým že na 1. nadzemné podlažie je možné nastaviť ďalšie 3 nadzemné podlažia, oproti meracej miestnosti je možné nastaviť 4 prekážky. Merací model bol vyhotovený z modelárskych dosiek z tvrdenej peny s čiernym povrchom s odrazivosťou 20 %. Povrchy na modeli sú vytvorené tvrdými papiermi v odtieňoch neutrálnej sivej farby s odrazivosťou cca 31 % pre podlahy a terén, 51 % pre steny a fasádu a 72 % pre stropy. Zasklenie okenného otvoru tvorí transparentná farebne neutrálna fólia s priepustnosťou cca 90 %, ktorá simuluje jednoduché zasklenie hr. 4 mm. Pomer okna k stene bol stanovený na hodnotu 0,28. Model v základnej čiernej farbe bol stanovený ako referenčný, ku ktorému sa porovnával model s neutrálnymi sivými povrchmi. Prekážka umožňuje meniť uhly tienenia spodnej miestnosti a to buď 11°, 35,5°, 50,7° alebo 60° od horizontu.



Obrázok 4: Pôdorys a rez meracieho modelu reprezentujúci miestnosť v mierke 1:25



Obrázok 5: Spektrálne priebehy odrazivosti papierov a priepustnosť fólie, ktoré boli použité na modeli

Tabuľka 2: Vážené hodnoty odrazivosti ρ_v a priepustnosti τ_v povrchov v modeli

Typ materiálu	Farba	Priradenie v modeli	Odrazivosť ρ_v [%]	Priepustnosť τ_v [%]
Doska z tvrdennej peny	ref. čierna	model	20,00	-
Papier	tmavosivá	podlahy, terén	31,42	-
Papier	svetlosivá	steny, fasáda	51,20	-
Papier	biela	stropy	71,95	-
Fólia	transparentná	zasklenie	-	89,56

Merania spektrálnych vlastností použitých povrchov na modeli boli uskutočnené pomocou spektrofotometra Konica Minolta CM-5, ktorý zaznamenával jednotlivé údaje v rozsahu vlnovej dĺžky od 360 nm po 740 nm, s krokom po 10 nm. Spektrálne priebehy odrazivosti ρ_v a priepustnosti τ_v jednotlivých povrchov modelu sú graficky znázornené na obrázku 5. Vážené hodnoty týchto veličín sa nachádzajú v tabuľke č. 2.

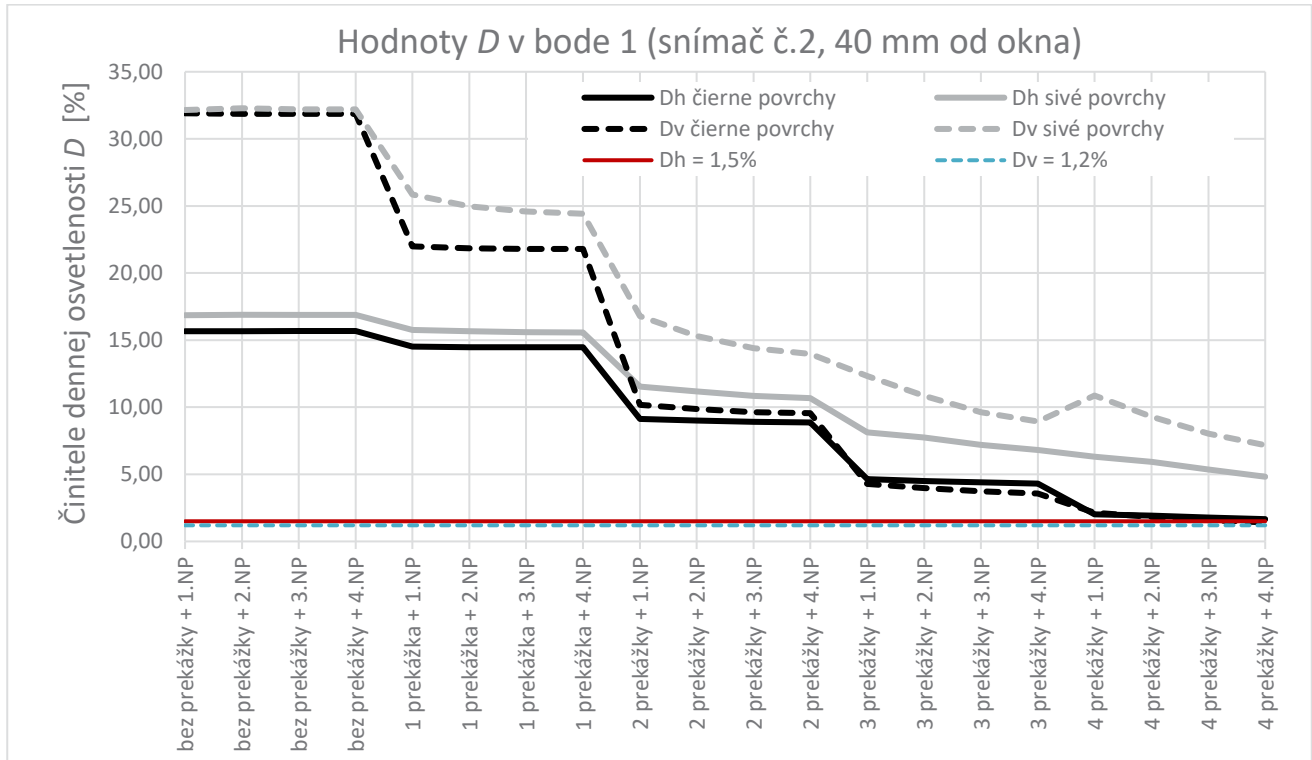
5. Namerané výsledky a ich hodnotenie

Celkovo boli namerané 4 zostavy výsledkov a to 2 pre horizontálnu osvetlenosť a 2 pre vertikálnu osvetlenosť. Osvetlenosť sa merala pri referenčnom čiernom a pri neutrálnom modeli so sivými povrchmi. Referenčný čierny model mal minimalizovať odrazy od povrchov a mal zohľadňovať iba geometriu modelovej miestnosti, prekážky a ulice. Pri meraniach sa súčasne sledoval vplyv tieniacej prekážky a vplyv ulice, resp. vplyv podlažnosti. Meracia zostava začínala modelovou miestnosťou netienenou žiadnou prekážkou, tzv. voľný horizont, pričom sa postupne zvyšovala podlažnosť modelu. Následne sa pre model umiestnila 1 tieniaca prekážka a opäť sa postupne zvyšovala podlažnosť. Tento proces sa opakoval až po 4 tieniace prekážky.

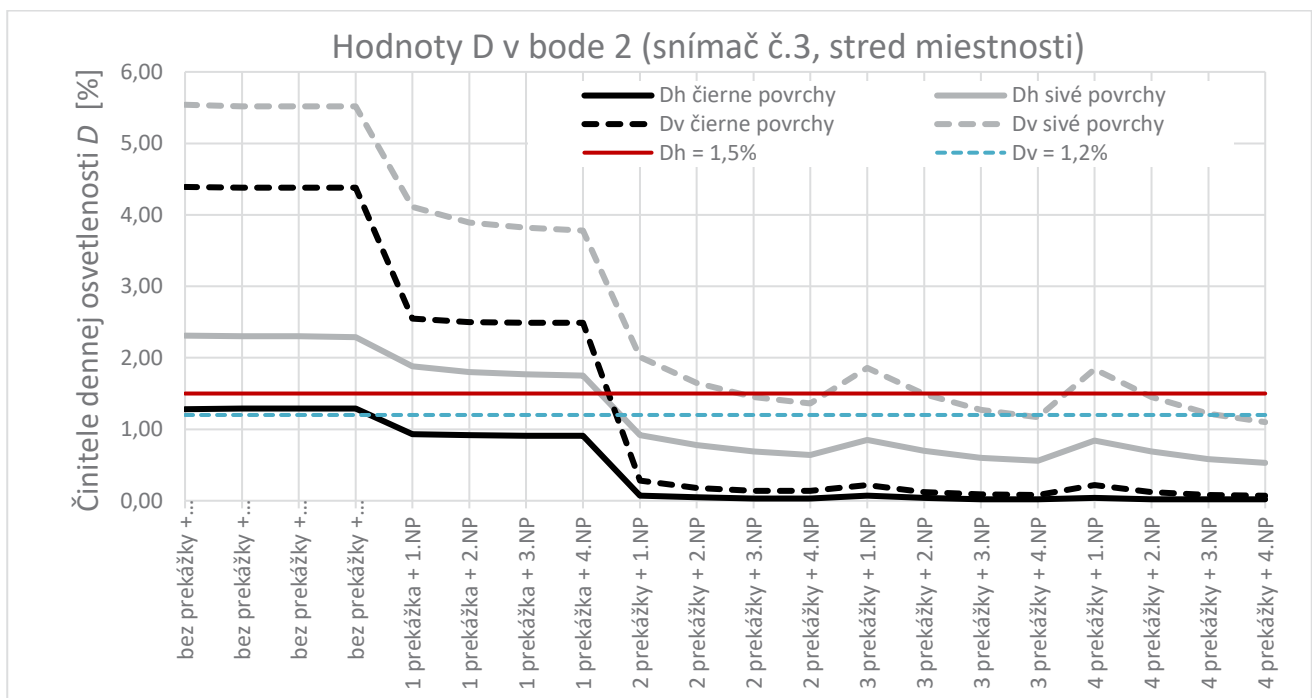


Obrázok 6: Meraná zostava modelovej miestnosti s prekážkou

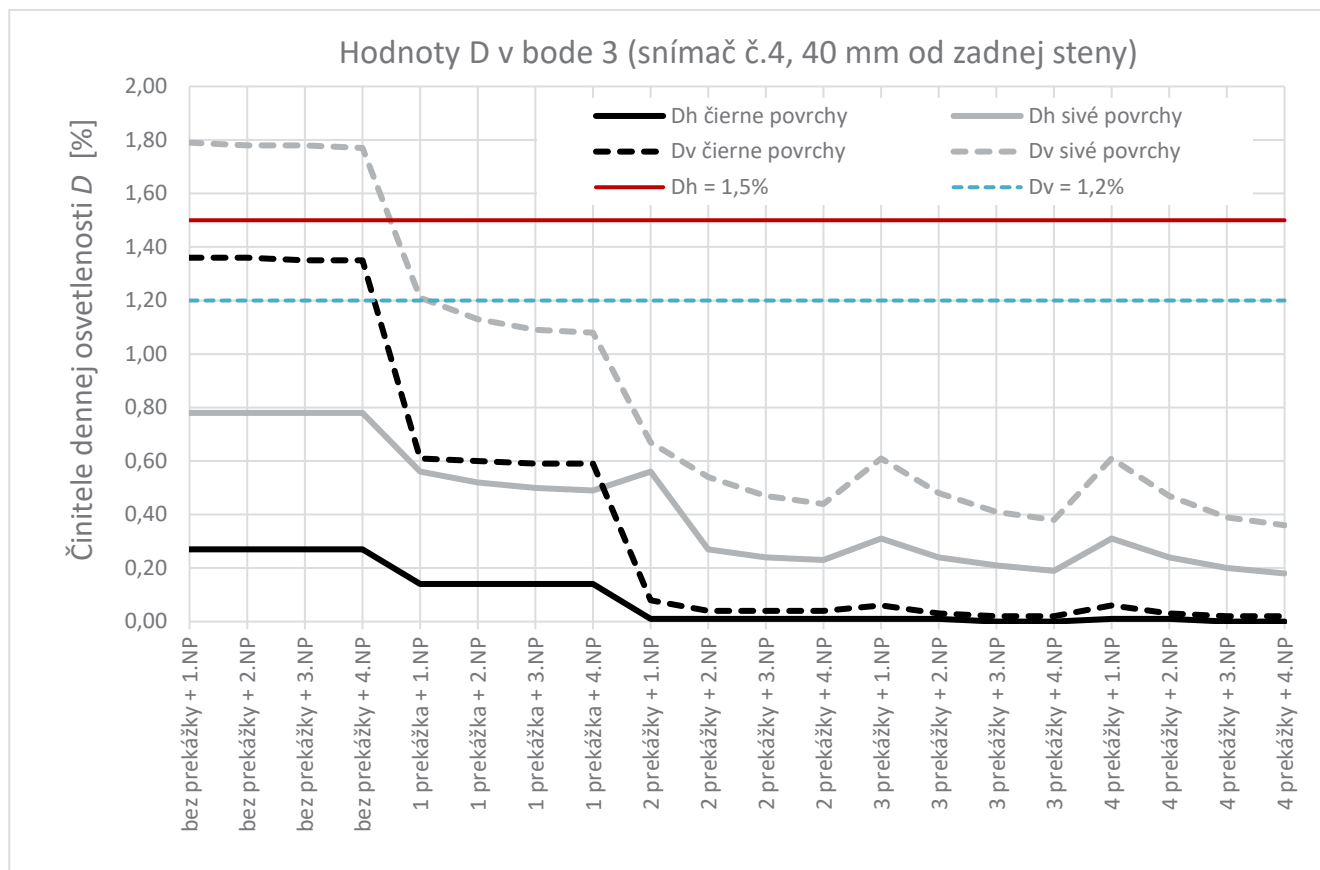
Výsledky osvetlenosti v luxoch, namerané v 3 konkrétnych bodoch, boli po prepočítaní kalibračnou krivkou použité na výpočet činiteľov horizontálnej a vertikálnej osvetlenosti. Z vypočítaných hodnôt boli vytvorené grafy závislosti činiteľov osvetlenosti od výšky prekážky a od podlažnosti modelu zvlášť pre jednotlivé body. V grafoch sa nachádza konštanta, ktorá reprezentuje minimálny horizontálny a vertikálny činiteľ vyhovujúci pre prípad kancelárskych prác a zrakových činností.



Obrázok 7: Vývoj činiteľov dennej osvetlenosti jednej meranej zostavy v bode 1



Obrázok 8: Vývoj činiteľov dennej osvetlenosti jednej meranej zostavy v bode 2



Obrázok 9: Vývoj činiteľov dennej osvetlenosti jednej meranej zostavy v bode 3

6. Analýza výsledkov

Vo všeobecnosti platí, že činiteľ dennej osvetlenosti s hĺbkou miestnosti klesá^{[10][11][15]}, čo jasne dokazuje rozsah nameraných hodnôt v jednotlivých bodoch. Najväčší nameraný rozsah je v bode 1 pri okne, kde naň výrazne vplyva viditeľný priestorový uhol oblohy. V prípade bodu 1 prekážka spôsobuje výrazný absolútny pokles hodnôt činiteľov horizontálnej a vertikálnej osvetlenosti, pričom podlažnosť spôsobuje pokles činiteľov až pri viacerých prekážkach. V prípade bodu 2 a 3 prekážka s tieniacim uhlom nad 35° (tzn. 2 prekážky) nezohráva žiadnu významnú úlohu pri poklese činiteľov, pretože práve v tých bodoch sa začína prejavovať vplyv odrazivosti okolitých povrchov. Svetlá prekážka odrazí väčšie množstvo svetla do miestnosti ako tmavá. Samotné hodnoty činiteľov horizontálnej a vertikálnej osvetlenosti sa výrazne líšia, pretože závisia od smeru pohľadu^{[7][11]}, zatiaľ čo vertikálne hodnoty majú tendenciu prudšie klesať, hodnoty horizontálne zaznamenávajú prudší pokles až pri 2 prekážkach. Svetlosť okolitých povrchov zvyšuje činitele v porovnaní s tmavými povrchmi najmä v zadnej časti miestnosti, kde oblohová zložka nemá výrazný dosah.

Pri hodnotení činiteľov na základe stanovenej metodiky tohto článku, je možné skonštatovať známy fakt, že bod nachádzajúci sa v blízkosti okna vyhovovať minimálnym požiadavkám na dennú osvetlenosť pre všetky namerané prípady. V prípade bodu 2 (stred miestnosti) vertikálne činitele D_h nevyhovujú od umiestnenia 2. prekážky, čo sa týka prípadov bez prekážky a s jednou prekážkou, tzn. malým tieniacim uhlom do 11° - horizontálne činitele vyhovujú iba pri svetlých sivých povrchoch. V bode 3 nevyhovuje žiadny horizontálny činiteľ, avšak svetlosť povrchov spôsobuje, že v miestnosti nie je absolútna tma. Čo sa týka vertikálnych činiteľov D_v v závislosti od svetlosti povrchov s vyššou odrazivosťou v porovnaní s čiernymi povrchmi sa výraznejší pokles prejavuje od 2. prekážky, kde oko pozorovateľa začína vnímať svetlosť protiľahlej fasády. Vertikálne činitele v čiernom modeli v bodoch 2 a 3 v prípade 2 prekážok alebo v horšom, klesajú na skoro nulové úrovne horizontálnych

činiteľov. V prípade svetlých povrchov sa v bode 2 od 2. prekážky výrazne prejavuje aj vplyv podlažnosti nad meranou miestnosťou, kde sa preukazuje vplyv „ulice“ na dennú osvetlenosť v miestnosti. Platí, čím vyššia a svetlejšia podlažnosť, tým výraznejší pokles činiteľov nastáva. Svetlosť povrchov v hĺbke priestoru spôsobuje, že pri voľnom horizonte vyhovuje z hľadiska kritéria vertikálnej dennej osvetlenosti aj bod 3, ktorý inak nevyhovuje pre žiadne iné varianty.

7. Záver

V závere možno skonštatovať, že svetlosť povrchov jednoznačne zvyšuje kvantitu denného svetla v miestnosti, a preto sa neodporúča používať matné tmavé povrchy v hlbokých priestoroch, slúžiacich nie len a prácu, ale aj obytných, či školských a zdravotníckych priestoroch. Normou požadované hodnoty činiteľov dennej osvetlenosti možno doceliť aj zvyšovaním odrazivosti okolitých povrchov, ktoré vplývajú na meranú miestnosť. Ďalším preukázateľným faktom je, že už hustota zástavby s tieniacim uhlom nad 35° výrazne znižuje osvetlenosť priestorov spodných podlaží. Tieniacy uhol nad 60° prakticky znemožňuje prísun denného svetla po hĺbke miestnosti kde už v strede hlbkej miestnosti hodnoty činiteľov sú nevyhovujúce.

Vzhľadom k výrazným rozdielom medzi horizontálnou a vertikálnou osvetlenosťou by bolo vhodné zaviesť zákonné predpisy a to nie len pre minimálne požadované hodnoty činiteľov vertikálnej osvetlenosti, ale aj pre maximálne hodnoty činiteľov, hlavne v prípade pozorovateľa sediaceho v blízkosti okna. Zároveň pri hodnotení vertikálnych činiteľov, by mal byť jasne stanovený smer pohľadu pozorovateľa, napr. pri práci v kancelárii smerom umiestnenia pracovných stolov, v obytných miestnostiach smerom k výhľadu z okna.

Podakovanie

Tento príspevok podporili výskumné projekty APVV-18-0174 a VEGA 1/0042/21.

Literatúra

- [1] BROWN, M.J. - JACOBS, D.E.: Residential Light and Risk for Depression and Falls: Results from the LARES Study of Eight European Cities. 2011. s. 131–140.
- [2] CIE S 026/E:2018 CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light 2018.
- [3] DARULA, S.: Normovanie požiadaviek na denné osvetlenie a insoláciu interiérov v CEN*). Světlo, 2015, s. 35-41.
- [4] DARULA, S. – GAŠPAROVSKÝ, D.: Denné osvetlenie v budovách: posúdenie podľa STN 73 0580 a STN EN 15193. Projekt – Stavba. 2008. s. 27–29.
- [5] FLIMEL, M.: Daylight ensuring predictive buildings design. Przegląd Elektrotechniczny, 2008, 84, č. 8, s. 26–28.
- [6] HANULIAK, P., HARTMAN, P., DARULA, S., HOBLIKOVÁ, R.: Spektrálny odraz svetla “Fotometrického náteru” (spectral light reflectance “Photometric Coating”). Kurz osvetlovací techniky XXXI, Loučná nad Desnou. Ostrava . 2014. s. 78–81.
- [7] HARTMAN, P., MAŇKOVÁ, L., HANULIAK, P., HRAŠKA, J.: Variation in internal space surface colors and its possible effect on human biological responses in daylight conditions. Energy Procedia. 2015. s. 717–722.
- [8] JOKL, M. – KOČÍ, J.: Výstavba jako faktor tvorby životního prostředí. Praha, SNTL, 1986.
- [9] KITTNER R. New artificial overcast and clear sky with artificial sun for daylight research. Kurz osvetlovací techniky XXXII, Loučná nad Desnou. Ostrava. 2016. s. 45-48.

- [10] MARDALJEVIC, J. et al.: Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability? 2012.
- [11] POTOČNIK, J. - KOŠIR, M.: Influence of geometrical and optical building parameters on the circadian daylighting of an office. Journal of Building Engineering. 2021.
- [12] ŠUMPICH, J., NOVÁK, T., CARBOL, Z., SOKANSKÝ, K.: Software calculation tool for light savings in the buildings compared with real measured data. Proc. of the 14th Int. Scientific Conf. Electric Power engineering. 2013. s. 677-680.
- [13] TERMAN, B.M. - TERMAN, J.S.: Light Therapy for Seasonal and Nonseasonal Depression: Efficacy, Protocol, Safety and Side Effects. 2005. s. 8.
- [14] WAHL, S. et al.: The inner clock - Blue light sets the human rhythm. Journal of Biophotonics. 2019. s. 1–14.
- [15] ZAZZINI, P. et al.: Experimental analysis of the performance of light shelves in different geometrical configurations through the scale model approach. Journal of Daylighting. 2020. s. 37-56.
- [16] STN EN 17037 (73 0581). Denné svetlo v budovách. (EN 17037: 2018)

Martina Kalivodová

Študijný program: D_TKPS, 2. ročník

ADAPTÁCIA FORIEM VERNAKULÁRNEJ ARCHITEKTÚRY - PASÍVNE STRATÉGIE PRE TEPELNÝ KOMFORT: MEDZIPRIESTOR

ADAPTATION OF VERNACULAR FORMS OF ARCHITECTURE - PASSIVE THERMAL COMFORT STRATEGIES: BUFFER ZONES

Abstract

The paper points to the problem of the imbalance between the regulation of buildings in terms of energy efficiency and the lack of regulation that would support the preservation of the cultural values of architecture. It proposes to examine and assess architecture through the prism of the synthesis of climatic, cultural and landscape aspects of architecture and urbanism with the aim of ensuring further development of cities in the sense of cultural and sustainable continuity, and within these limits also examines the phenomenon of buffer spaces. The buffer space in architecture and urbanism is assessed first from a physical and technical point of view, from the point of view of energy balance and thermal comfort, and then from a cultural and historical point of view. In the end, attention is drawn to the complexity of buffer spaces that become part of vernacular architecture in the form of additions and adaptations.

Keywords

passive strategies; thermal comfort; buffer zone; adaptation; vernacular architecture

Abstrakt

Príspevok poukazuje na problém nerovnováhy medzi regulovaním stavieb z hľadiska energetickej efektivity a chýbajúcej regulácie, ktorá by podporovala zachovanie kultúrnych hodnôt architektúry. Navrhuje architektúru skúmať a posudzovať cez prizmu syntézy klimatických, kultúrnych a krajinných aspektov architektúry a urbanizmu s cieľom zabezpečenia ďalšieho rozvoja miest v zmysle kultúrnej a udržateľnej kontinuity a v týchto medziach skúma aj fenomén medzipriestoru. Medzipriestor v architektúre a urbanizme posudzuje najprv z hľadiska fyzikálno technického, z hľadiska energetickej bilancie a tepelnej pohody a následne z hľadiska kultúrno historického. V závere upriamuje pozornosť na komplexnosť problematiky medzipriestorov ktoré sa stávajú súčasťou vernakulárnej architektúry vo forme dostavby, adaptácie.

Kľúčové slová

pasívne stratégie; tepelný komfort; medzipriestor; adaptácia; vernakulárna architektúra

1. Úvod

Súčasná požiadavka na udržateľnosť a energetickú efektívnosť budov kladú prísne nároky na novostavby aj na existujúce budovy. Požiadavky na kultúrnu udržateľnosť však žiadne predpisy nevyžadujú. Počas posledných rokov pribudli iniciatívy, ktoré kultúrnu udržateľnosť hlásajú, podporujú, dokonca ponúkajú riešenia jej implementácie. Ide napríklad o Nový Európsky Bauhaus, Davoskú deklaráciu a pod.

Z hľadiska kultúrnej udržateľnosti novostavby reagujú na svoje okolie, kontext a vstupujú do územia vhodným novým, uceleným objektom. Existujúca stavba, ktorá prechádza adaptáciou, dostavbou alebo transformáciou, predstavuje komplexnejšiu úlohu. Reaguje na kontext a reaguje aj na seba, existujúcu stavbu. Jej materialitu, konštrukciu, pôvodné a budúce využitie a pod. Adaptácia existujúcich stavieb preto často krát dopadne ako nepodarený zlepenec. Pôvodná vrstva toho čo tu bolo, dostane nový obal, resp. prístavbu, absolútne podmienenú energetickým požiadavkám. Kultúrna udržateľnosť a nádej pre kultúrnu kontinuitu takto zaniká.

Špecifickú kategóriu existujúcich stavieb predstavuje vernakulárna architektúra, ktorá nie je vždy pamiatkovo chránená, no je nositeľkou kultúrnych hodnôt. Zásahy do takejto architektúry s cieľom zvýšiť jej energetickú efektívnosť bez odborného usmernenia z hľadiska kultúrnej udržateľnosti, dehonestujú jej kultúrne hodnoty. Preto je nevyhnutné do existujúceho prostredia vstupovať cez prizmu syntézy klimatických, kultúrnych a krajinných aspektov architektúry a urbanizmu s cieľom zabezpečenia ďalšieho rozvoja miest v zmysle kultúrnej a udržateľnej kontinuity a v týchto medziach je skúmaný aj fenomén medzipriestoru.

2. Koncept medzipriestoru

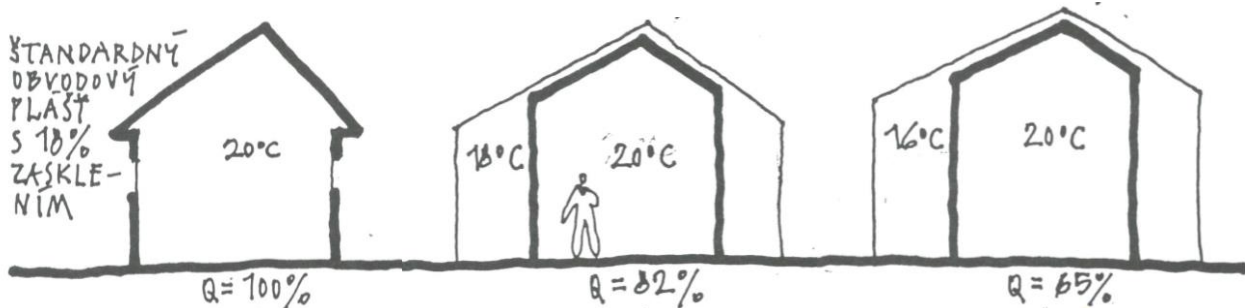
2.1 Fyzikálno technický medzipriestor

“Fyzické rozhranie medzi vonkajším prostredím (exteriérom) a vnútorným priestorom (interiérom) je tradične vytvárané obalovou konštrukciou s určitými charakteristikami a fyzikálno-technickými vlastnosťami.” [1, s. 86]

Úlohou obalovej konštrukcie je aj zabrániť vniknutiu nepriaznivých vplyvov (zápach, hluk, zima a pod.) z vonkajšieho prostredia do vnútorného a naopak zabrániť úniku energie z vnútorného prostredia von.

Nahradením takejto bariéry vzduchovou medzerou vzniká kvalitatívne rozdielne rozhranie, ktoré môžeme nazvať *nárazový priestor*. Vo väčšine prípadov nárazový priestor obalovej konštrukcie tvorí dvojica konštrukcií - dve zasklené steny alebo zasklená stena a masívna stena z interiéru. Rozdelením pôvodne celistvej konštrukcie sa rozdeľuje aj ich účel. Funkciu fyzickej bariéry plní konštrukcia (sklo, masív,..) a funkciu fyzikálnych vlastností obvodovej konštrukcie z veľkej časti preberá vzduchová medzera. Medzi konštrukcie patrí dvojité steny, rekuperačná stena, Trombeho stena a i.

Ak vzduchovú medzeru nárazového priestoru rozšírime na priestor, v ktorom bude možný pobyt človeka, vzniká *medzipriestor*. “Medzipriestor - kategória architektonického priestoru na rozhraní medzi interiérom a exteriérom, ktorý sa vyznačuje špecifickými fyzikálnymi a výrazovými vlastnosťami.” [1, s. 86]



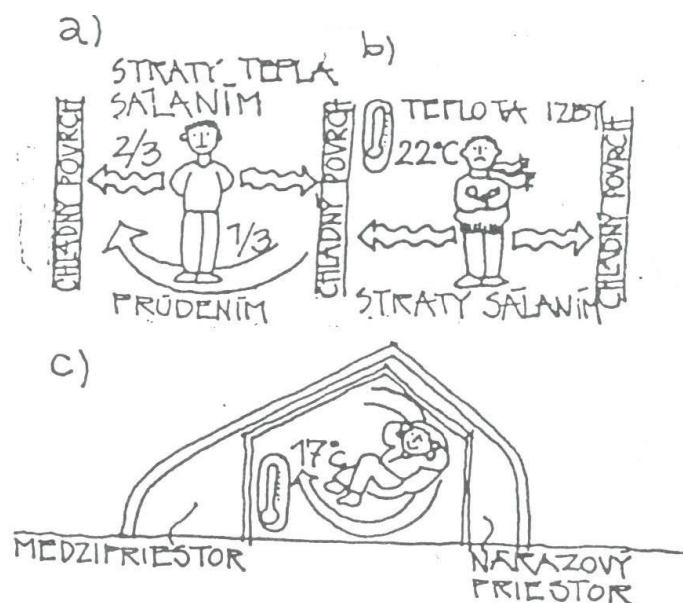
obr. č. 1.: Medzipriestor - porovnanie energetickej bilancie štandardného domu a použitia koncepcie medzipriestoru [1, s. 89]

2.2 Medzipriestor v architektúre

Medzipriestor v architektúre môžeme považovať za priestorovo neurčitý. Predstavuje rozhranie medzi exteriérom a interiérom, niekedy čiastočne otvorené (átrium, pavlač, lodžia, ...), niekedy uzavreté (skleník, zimná záhrada, pasáž ...). Ponúka efektívne využívať dodanú energiu, spomalením prechodu tepla z vnútorného priestoru do vonkajšieho, čím obmedzuje tepelné straty. Vnútorný priestor je súčasne chránený pred negatívnymi vonkajšími vplyvmi akými sú vplyvy, slnka, dažďa, vetra, chladu znečistenia ovzdušia a i.. Medzipriestor je však na vonkajšie prostredie väčšinou napojené opticky. Na rozdiel od nárazových priestorov umožňuje pobyt človeka a tak rozširuje pobytovú plochu objektu. Medzipriestor jednoznačne predstavuje špecifický fenomén v architektúre.

“Dve tretiny ($\frac{2}{3}$) z celkového množstva tepla odvedeného z povrchu tela sú odvádzané sálaním a jedna tretina ($\frac{1}{3}$) prúdením, t.j. pocit pohody ovplyvňuje viac teplota okolitých povrchov ako teplota vnútorného ovzdušia.” [1, s. 88]

Koncept medzipriestoru tak vychádza aj z princípu vnímania *tepelnej pohody*. Prostredníctvom medzipriestoru sa zvýši vnútorná teplota povrchov, v dôsledku čoho sa limituje problém ochladzovania vplyvom sárania. Takýto jav dovoľuje znížiť vnútornú teplotu prostredia, čo pozitívne ovplyvňuje celkovú energetickú bilanciu. “V širšom ponímaní sa môže jednať o vytvorenie pásma s nižšou energetickou náročnosťou, ktoré chráni ťažiskové miesta spotreby energie v budove pred stratami únikom do okolie.” [1, s. 92]



obr. č. 2.: Medzipriestor - tepelná pohoda [1, s. 88]

Vzhľadom na požiadavky na tepelnú pohodu a účel využitia, medzipriestory môžeme podľa J. Keppla rozdeliť na úžitkový, komunikačný, resp. zhromažďovací a obytný.

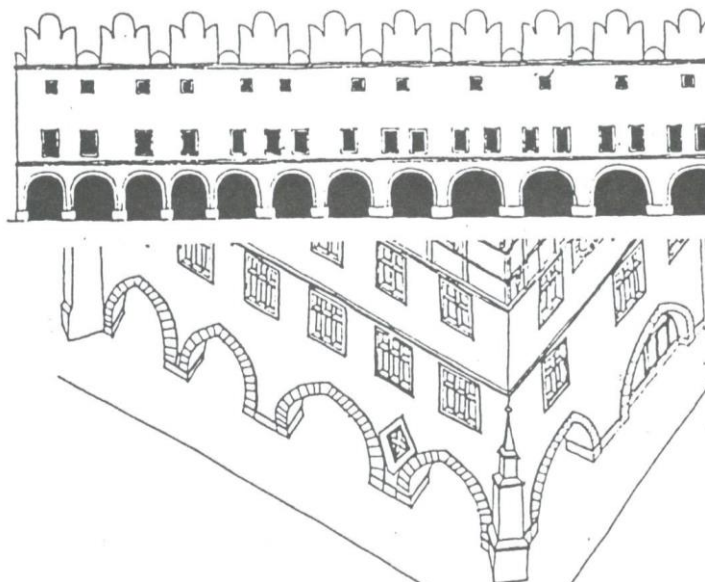
Účel ďalej determinuje úroveň uzavretia medzipriestoru a jeho polohu vzhľadom na objekt, kedy môže byť súčasťou priečelia, priestorov budovy alebo makro-štruktúrou. Uzavreté medzipriestory plnohodnotne využívajú koncepciu kontrolovanej tepelnej pohody spomínanej vyššie. Otvorené medzipriestory na rozdiel od uzavretých neposkytujú kontrolovanú tepelnú pohodu a výrazne nezabraňujú úniku tepla z interiéru. Poskytujú však ochranu pred poveternostnými vplyvmi a obmedzujú vplyvy vonkajšieho prostredia na vnútorné.

“Medzipriestory priečelia priamo ovplyvňujú energetickú bilanciu tesne súvisiacich priestorov a sprostredkovane i energetickú bilanciu celej budovy. Otvorené medzipriestory pôsobia ako jednosmerný energetický medzipriestor, uzatvorené ako dvojsmerný energetický medzipriestor.” [1, s. 92]

2.3 Medzipriestor v urbanizme

Ak hovoríme o medzipriestore v urbanizme má množstvo rovín. Ulica ako základná funkčná jednotka mesta je svojím spôsobom medzipriestor vymedzený dvoma radmi budov. Ak ulica spĺňa určité parametre, určitú šírku, orientáciu, stáva sa pobytovou pre ľudí a zároveň tlmí vonkajšie vplyvy na budovy ktoré ju vymedzujú. Medzipriestor ulíc sa vlieva do priestorov námestí. Námestie narozdiel od lineárnej ulice ma centrálny zhromažďovací charakter no stále sa dá považovať za medzipriestor. Funguje obdobne ako átrium.

Patria sem aj pasáže, prístrešky, zásteny, kolonády a i.. Arkády a podluby predstavujú jednoznačne jeden z najsilnejších prvkov. Arkáda je súčasťou urbánneho priestoru ak je situovaná na prízemí. V tomto prípade sa stáva rozhraním medzi architektúrou a urbanizmom. Arkády a podluby, ktoré sú v niektorých prameňoch definované ako rovnaký prvok, poskytujú ochranu pred dažďom, vetrom, slnkom a poskytujú chránený prechod z ulice do budovy.

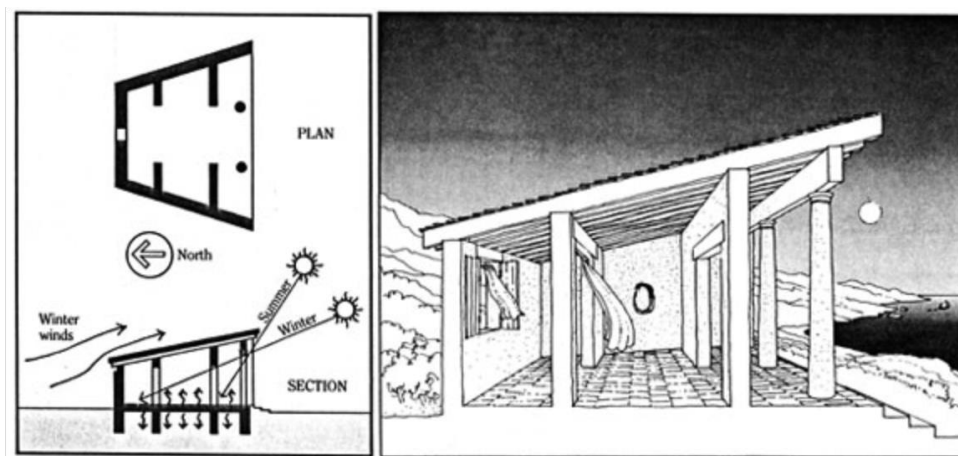


obr. č. 3.: Podluby - ako sieť chránených komunikácií [1, s. 104]

3. Historická aplikácia konceptu medzipriestoru

Aký je optimálny tvar domu, ktorý zostane vyhriaty v zime a chladný v lete bez toho aby sa musel spoliehať na externé zdroje energie? Pred 2 500 rokmi sa touto otázkou začal zaoberať grécky

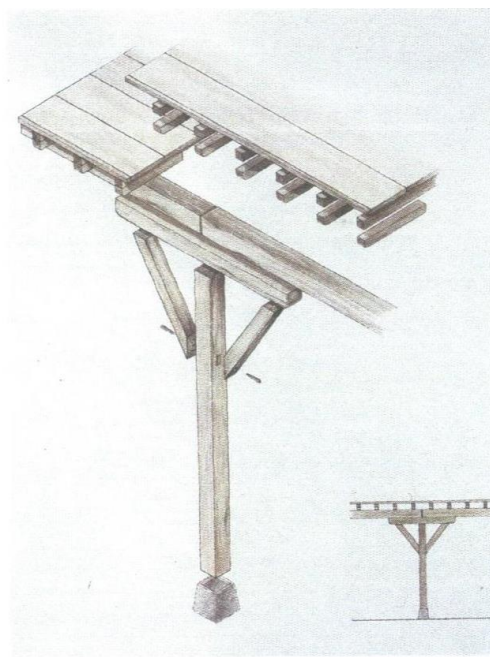
filozof Sokrates. Sokrates priniesol riešenie vo forme domu v tvare trapézoidu, ktorého dlhá strana bola vystavená slnku. Vykonzolovaná strecha na juhu fasády zabraňuje vniku letného slnka do vnútorných priestorov, zatiaľ čo dovoľí vstúpiť nižším zimným slnečným lúčom. Strecha je pultová a zvažuje sa smerom na sever aby predstavovala menšiu prekážku pre zimný vietor.



obr. č. 6.: Sokratov dom - schéma [6]

Využívanie medzipriestorov teda nie je nič nové. Aplikáciu môžeme sledovať od antiky až po súčasnosť. Tak ako Sokratov dom aj ďalšie medzipriestory ako átrium, peristyl, portikus, stoa, loggia, balkón, podluby, kolonády a i., vznikali ako reakcia na klimatické, technické a ekonomické podmienky. Reagovali však aj na hodnoty estetické, sociálne a kultúrne. Odrazilo sa to na materiálom a konštrukčnom prevedení.

Robert Leggero vo svojom príspevku, *Mikroklimatické modely v stredovekých mestách, severného Talianska*, spomína rôzne príklady adaptácie stavieb v rozmedzí pasívnych klimatických stratégií. Medzi nimi spomína aj stredoveké medzipriestory ako arkády, kolonády alebo podluby, pri ktorých zdôrazňuje, že vlastnosti a využitie ovplyvňoval okrem klímy aj sociálny a politický život. [2]



obr. č. 7.: Drevená arkáda v Palazzo Grassi, via Marsala Bologna. Štruktúrally detail "portici" [2]

V stredovekej Bologni stáli arkády a kolonády na verejných pozemkoch a slúžili ako miesto pre prácu remeselníkov, trhovníkov no primárne slúžili ako vyzdvihnuté chodníky nad blato a kryté pred dažďom, vetrom, slnkom. V 13. storočí sa mestá rozhodli kolonády regulovať a mohli sa stavať už iba na súkromných pozemkoch. Rozmery a konštrukcia boli odvodené od potrieb doby. Výška musela byť taká aby sa pod strechu zmestil jazdec na koni (equitare - 2,66 m). Po regulácii museli zostať kolonády prechodné a tak sa z nich stala pešia sieť krytých chodníkov. S nových režimom, prišiel chamtivejší vojvodca a začal za kolonády vyberať vysoké poplatky. Jeho nástupca prišiel zase s novou vídinou “urobiť mesto krásnym”. V jeho vidine, kolonády krásne neboli a tak dal za veľké náklady všetky zbúrať a s nimi aj celú kultúrnu vrstvu mesta. [2]

V Slovenskej architektúre medzi najvýraznejších predstaviteľov medzipriestoru patrí gánok, žudro, podstrešie, zimná záhrada, skleník a i.

4. Súčasná aplikácia konceptu medzipriestoru na Slovensku

V súčasnej architektonickej tvorbe sa koncept medzipriestorov objavuje stále častejšie. Ukázkovým dielom je Villa G v Bratislave od architektov P. Paňák a M. Kusý. Villa G je inšpirovaná gánokovým domom no interpretáciou sa autori približujú skôr talianskej loggii.

“Architektonickým prvkom domu, nadväzujúcim na tradície, je gánok. Gánok je možné chápať, ako otvorený energetický medzipriestor s výnimočnými vlastnosťami. Slúži ako závetrie pre vstup, účinne a pritom jednoducho chráni fasádu pred slnkom v lete, v zime, keď je slnko na nízkom horizonte mu umožňuje fasádu ohrievať. Toto jednoduché riešenie architekti aplikovali do novej formy na súčasný tvaroslovný prvok. Dispozícia umožňuje kvalitné bývanie, veľkosťou miestností, napojením na exteriér, čistotou vzájomných prevádzkových vzťahov.

Architektonický koncept Vily G spĺňa kritériá inteligentnej budovy. Osadením do prostredia lomu, orientáciou na svetové strany rešpektuje zásady klimatického dizajnu. Inšpirácia gánkom reflektuje kultúrne tradície ľudovej architektúry.” [4, s.117]



obr. č. 7.: Villa G, Bratislava SR - P. Paňák, M. Kusý, 2002 [7]

5. Adaptácia: potenciál medzipriestorov v dimenziách vernakulárnej architektúry v SR

Úzke portfólio úspešných adaptácií vernakulárnej architektúry obohatila napríklad súťaž, ktorá bola vypísaná tohto roku, 14. apríla 2022: “Súťaž návrhov na riešenie obnovy rodinných domov pre Plán obnovy a odolnosti SR - typ ŠTVOREC, KOČKA, ORAVA”. Ústredným motívom výherných návrhov sa stáva medzipriestor.

Víťazný návrh pre typ ŠTVOREC, od ateliéru DOXA, kde porota pozitívne hodnotí prídanie jediného priestoru k existujúcej stavbe a tou je nevykurovaná zimná záhrada, ktorá zlepší komfort bývania v dome aj bez navýšenia energií.



obr. č. 8.: Víťazný návrh pre adaptáciu RD typu ŠTVOREC - DOXA [8]

Víťazný návrh pre typ “ORAVA”, od autorov: Ing. arch. Tomáš Gelien; Ing. arch. Juraj Mišík; Ing. arch. Ludmila Haluzíková, využíva v návrhu rovnako koncept medzipriestoru a oravský motív gánku. Porota komentuje návrh: “Návrh vyznieva poeticky, koncepčne a autorsky dotiahnutý. Navrhovaná zimná záhrada má pridanú hodnotu – predlžuje obdobie možného pobytu v exteriéri v chladných oblastiach Oravy. Návrh estetizuje pôvodné prvky domu. ...” [8]



obr. č. 9.: Víťazný návrh pre adaptáciu RD typu ORAVA - Ing. arch. Tomáš Gelien; Ing. arch. Juraj Mišík; Ing. arch. Ludmila Haluzíková [8]

Vítazný návrh pre typ “KOCKA”, od autorov ER atelier, Ing. arch. Ing. Ema Ruhigová, PhD.; Ing. arch. Ing. Roman Ruhig, PhD., do tretice využíva pri adaptácii rodinného domu koncept medzipriestoru. Zimná záhrada je tu aplikovaná ako vstupný priestor, ktorý funguje ako tepelný nárazový medzipriestor.



obr. č. 10.: Vítazný návrh pre adaptáciu RD typu KOCKA - ER atelier, Ing. arch. Ing. Ema Ruhigová, PhD.; Ing. arch. Ing. Roman Ruhig, PhD. [8]

6. Záver

Z hľadiska energetickej efektivity budov majú medzipriestory jednoznačne významné využitie ako v novostavbách tak pri adaptáciách vernakulárnej architektúry, ak nie väčšie. Počiatky medzipriestorov siahajú až do antiky a interpretujú sa dodnes. Citelnú zmenu paradigmy, ktorá znovu upriamuje pozornosť ku kultúrnym hodnotám, treba využiť a zabezpečiť pri návrhu medzipriestorov, vyvážený prístup z hľadiska energetickej efektivity ako aj zabezpečiť kontinuitu kultúrnych hodnôt ktoré nesie.

Úspešná súťaž, priniesla katalóg rôznych možností adaptácie a dostavby medzipriestorov ako ideálne riešenie pre zlepšenie energetickej efektívnosti vernakulárnych stavieb. Návrhy pracujú s medzipriestormi ako s nositeľmi kultúrnych hodnôt, ako gánok alebo zimná záhrada. Je však dôležité pokračovať v analyzovaní vhodnosti aplikácie cez pohľad klimatický aj kultúrny a poskytnúť tak riešenia pre verejnosť viazané na územie, jeho kontext a kultúrne hodnoty.

Literatúra

- [1] KEPPL, J.: *Ekologicky viazaná tvorba: Kontexty architektúry a ekológie*. Bratislava : STU v Bratislave, 2001, 184 s. ISBN 80-227-1532-8.
- [2] LEGGERO, R.: *Citizens and climate: Microclimatic Patterns in Medieval Cities (Northern Italy)*, In: *The Urban Microclimate as Artifact: Towards an Architectural Theory of Thermal Diversity*, Berlin, Boston: Birkhäuser, 2018, s. 44-63
<https://doi.org/10.1515/9783035615159>
- [3] MENCL, V.: *Lidová architektura v Československu*, Praha: Československá akademie vied, 1980, 632 s. ISBN: 2106179
- [4] PUŠKÁR, B.: *Scenáre architektonického konceptu inteligentnej budovy*. Habilitačná práca, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta architektury, 2018.
- [5] ROESLER, S., KOBÍ, M.: *The Urban Microclimate as Artifact: Towards an Architectural Theory of Thermal Diversity*, Berlin, Boston: Birkhäuser, 2018, 198 s.
<https://doi.org/10.1515/9783035615159>
- [6] <https://naturalbuildingblog.com/sun-tempered-architecture-socrates-house/>
navštívené: 28.9.2022
- [7] <https://bkps.sk/Vila-G-Bratislava>
navštívené: 28.9.2022
- [8] <https://www.archinfo.sk/sutaze/slovenske/vysledky-sutazi-navrhov-na-riesenie-obnovy-rodinnych-domov-pre-plan-obnovy-a-odolnosti-sr.html>
navštívené: 28.9.2022

Kristína Kaniková¹

Študijný program: Teória konštrukcií pozemných stavieb, 4. ročník

PREHĽAD MERACÍCH ZARIADENÍ POUŽITÝCH NA KVANTIFIKÁCIU DVOJITÝCH TRANSPARENTNÝCH FASÁD A PRÍPRAVA NA MERANIE

OVERVIEW OF MEASURING EQUIPMENT USED FOR QUANTIFICATION OF DOUBLE-SKIN TRANSPARENT FACADES AND PREPARATION FOR MEASUREMENT

Abstract

This article provides an overview of the measuring devices used in the measurement of the double-skin transparent facades and one non-transparent facade from abroad, and in the third part a detailed description and location of the measuring equipment used to prepare the measurement of a double-skin transparent facade under real climate conditions in the STU Central Laboratories at Technická 5 in Bratislava in the Twin- rooms.

Kľúčové slová

dvojité transparentné fasády, meracie zariadenia, meranie

1. Úvod

Udržateľnosť je synonymom pre obraz budúceho sveta, ktorého cieľom je uviesť človeka, prírodu a technológiu do trvalo stabilnej rovnováhy [1] environmentálne, sociálne a ekonomicky. Cieľom EÚ je do roku 2030 znížiť emisie skleníkových plynov aspoň o 55 % v porovnaní s rokom 1990 [2], preto je dôležité, aby novovybudované stavby boli nie je počas výstavby ale aj počas prevádzky v prvom rade energeticky účinné.

S vývojom moderných klimaticky adaptívnych transparentných fasád schopných dynamicky reagovať na klimatické parametre vonkajšej klímy a tým optimalizovať energetické toky ich konštrukciou s cieľom výrazne znížiť tepelnú záťaž v letnom období, tepelné straty v zimnom období pre maximalizáciu dostupných obnoviteľných zdrojov energie vystupuje do popredia potreba overovania ich parametrov a energetickej efektívnosti v závislosti od podmienok vonkajšej klímy [1].

Experimentálnym meraním môžeme nielen overiť numerický model, ale aj získať niektoré parametre, ako je teplota a distribúcia prúdenia vzduchu pri hodnotení tepelného výkonu dvojitej transparentnej fasády. Okrem veľkého počtu inštalovaných senzorov aj množstvo vyzbieraných údajov vyžaduje veľké pamäťové úložisko na počítači alebo na externom disku na dlhodobé meranie s malým časovým intervalom [3].

2. Literárny prehľad meracích zariadení, druhov meraní na dvojitých transparentných fasádach a použitých meracích prístrojov

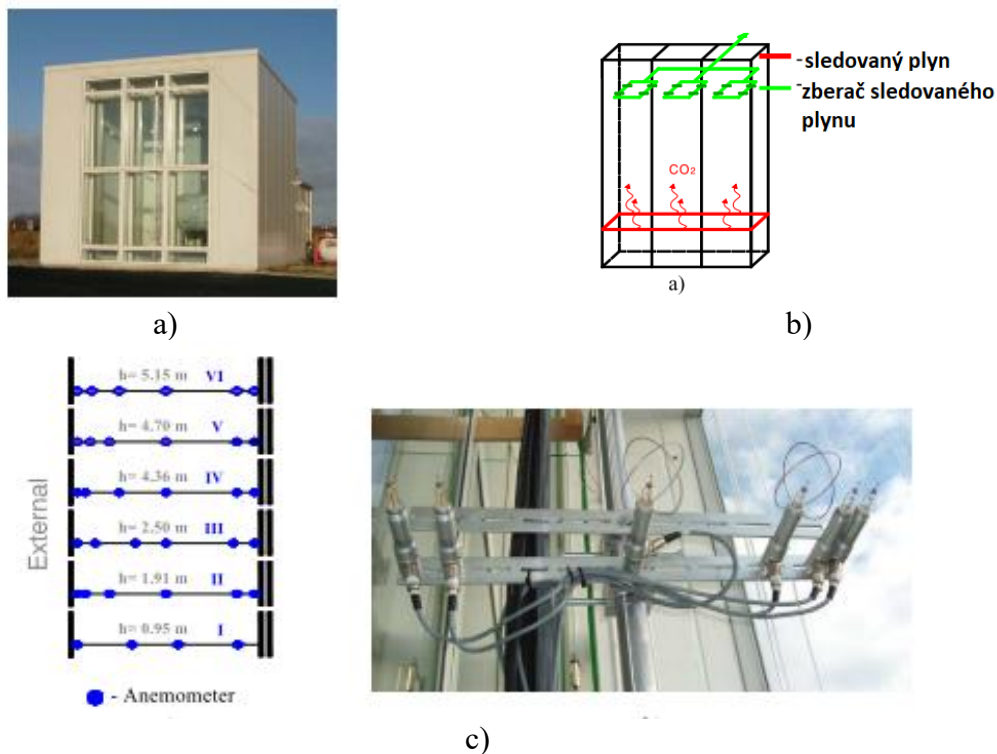
Existujú rôzne metódy na kvantifikáciu celkového aerodynamického odporu (Z) dvojitej transparentnej fasády s úzkym štrbinovým medzipriestorom:

- numerickým výpočtom,

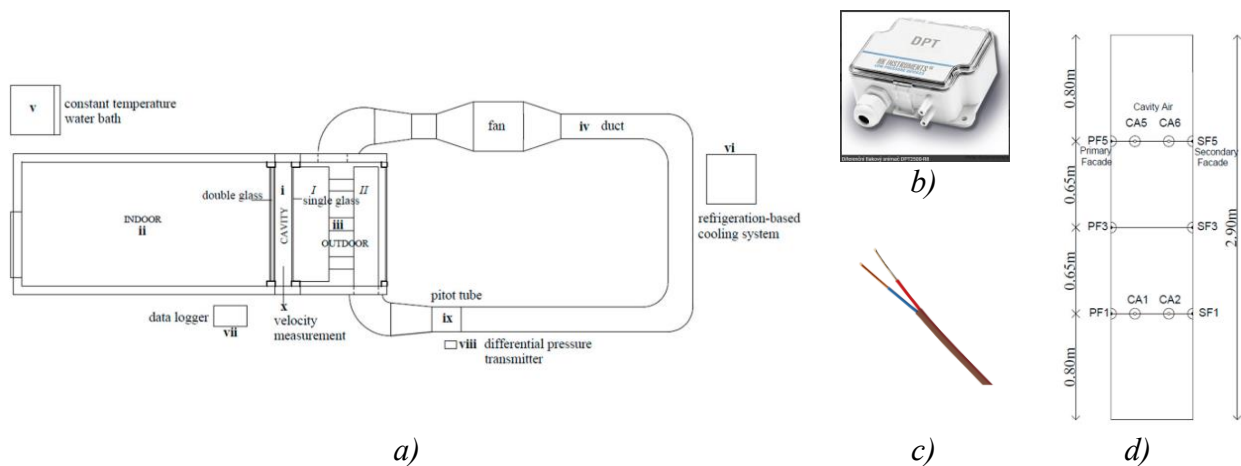
¹ Ing. Kristína Kaniková, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

- pomocou výpočtovej dynamiky tekutín (CFD)
- experimentom v experimentálnych zariadení v podmienkach reálnej klímy.

Heiselberg a kol. [4] v experimentálnom zariadení „The Cube“ (Obr. 1a) v podmienkach reálnej klímy merali prúdenie vzduchu v medzipriestore dvomi metódami: metódou sledovania plynu (Obr. 1b) a metódou rýchlostného profilu (frekvencia 10 Hz, v časovom intervale 10 min) (Obr. 1c). Inan a kol. [5] v experimentálnom zariadení (Obr. 2a) merali prúdenie vzduchu v potrubí pomocou diferenčného tlakového snímača (DPT 2500-R8) (Obr. 2b), povrchovú teplotu vnútorného a vonkajšieho zasklenia a teplotu v medzipriestore pomocou termočlánkov typu T (Obr. 2c). Termočlánky typu T kalibroval pomocou sondy PT 100 pripojenej k multimetru HP 3458 (Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA).

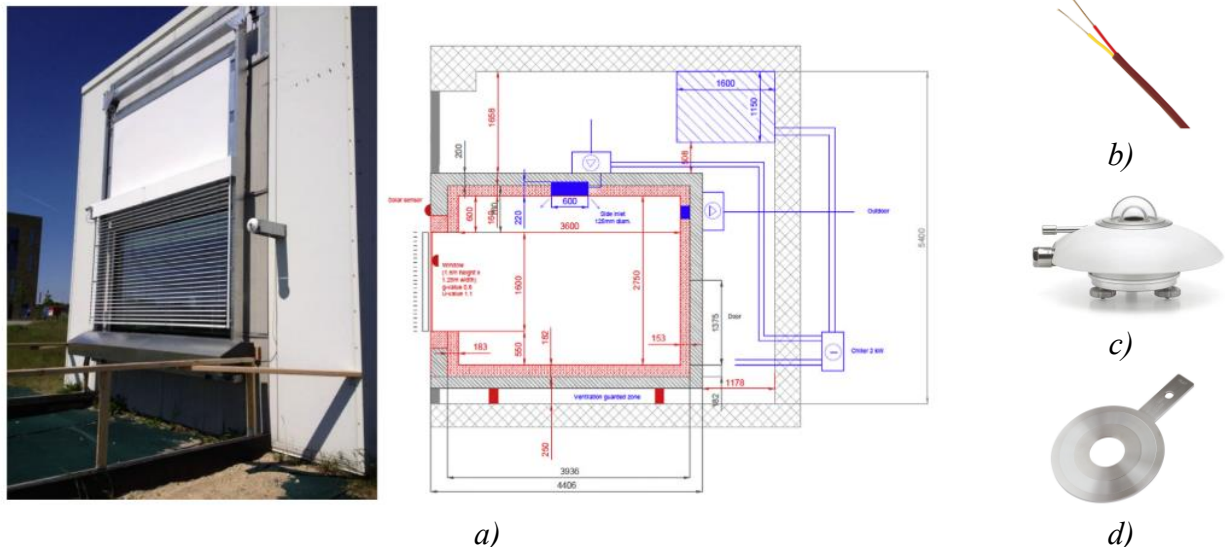


Obr. 1 a) Experimentálne zariadenie „The Cube“, b) metóda sledovania plynu, c) metóda rýchlostného profilu [4]

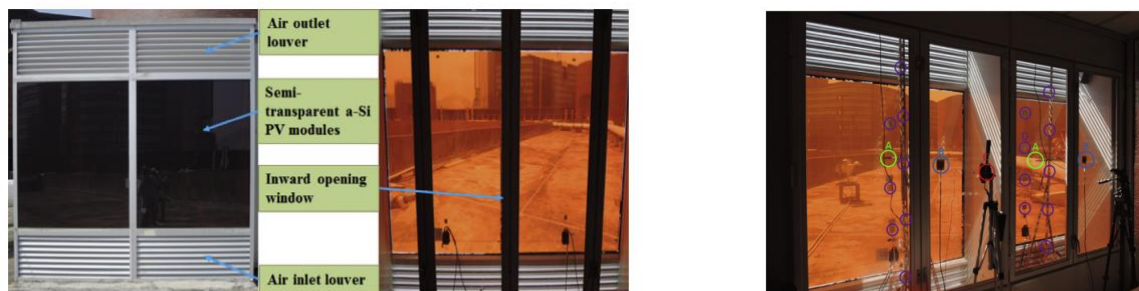


Obr. 2 a) schéma experimentálneho zariadenia [5], b) diferenčný tlakový snímač (DPT 2500-R8)[6], c) termočlánok typu T [7], d) rez s označením a umiestnením termočlánkov v medzipriestore DTF [5]

Liu a kol. [8] uskutočnil tiež experiment v experimentálnom zariadení „The Cube“ (Obr. 3a). Merali teplotu vzduchu v testovacej miestnosti pomocou piatich termočlánkov typu K (Obr. 3b), ktoré boli chránené mechanicky odvetrávaným strieborným štítom; slnečné žiarenie pomocou troch pyranometrov (Obr. 3c), jeden na horizontálnej rovine (globálne slnečné žiarenie) a dvoch na vertikálnej rovine - na vonkajšej fasáde a vo vnútri miestnosti; a prietoku vzduchu medzipriestorom pomocou škrtiacej clony (Obr. 3d). Dáta zaznamenávali v časovom intervale 10 minút.

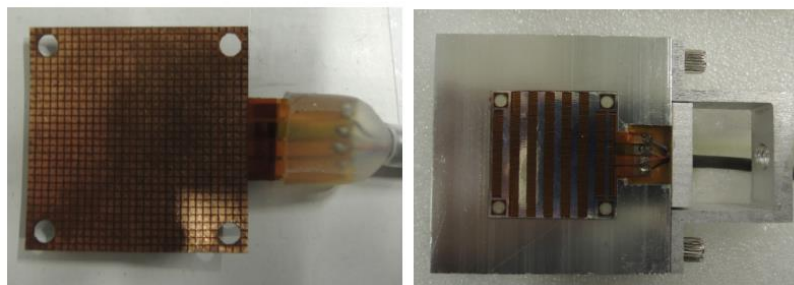


Obr. 3 a) experimentálne zariadenie „The Cube“ a rez zariadením b) termočlánok typu K [9], c) pyranometer [10], d) škrtiaca clona [11]



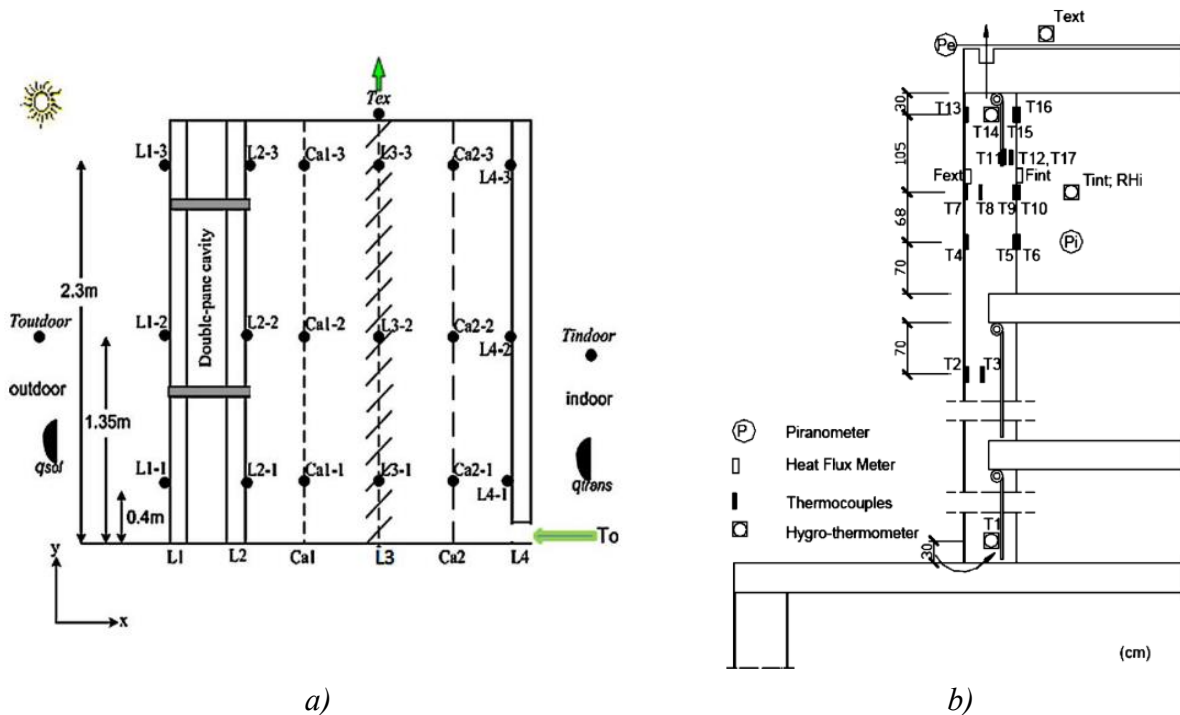
a) (vľavo) pohľad z exteriéru, (vpravo) pohľad z interiéru

b)



c)

Obr. 4 a) fotovoltická vetraná DTF [12], b) umiestnenie snímačov na testovacom zariadení (zelený – anemometer, modrý – snímač na meranie konvekčného tepelného toku, červený – snímač na meranie sálavého tepla, fialový – termočlánky, c) snímače na meranie konvekčného (vľavo) a sálavého (vpravo) tepelného toku [12]

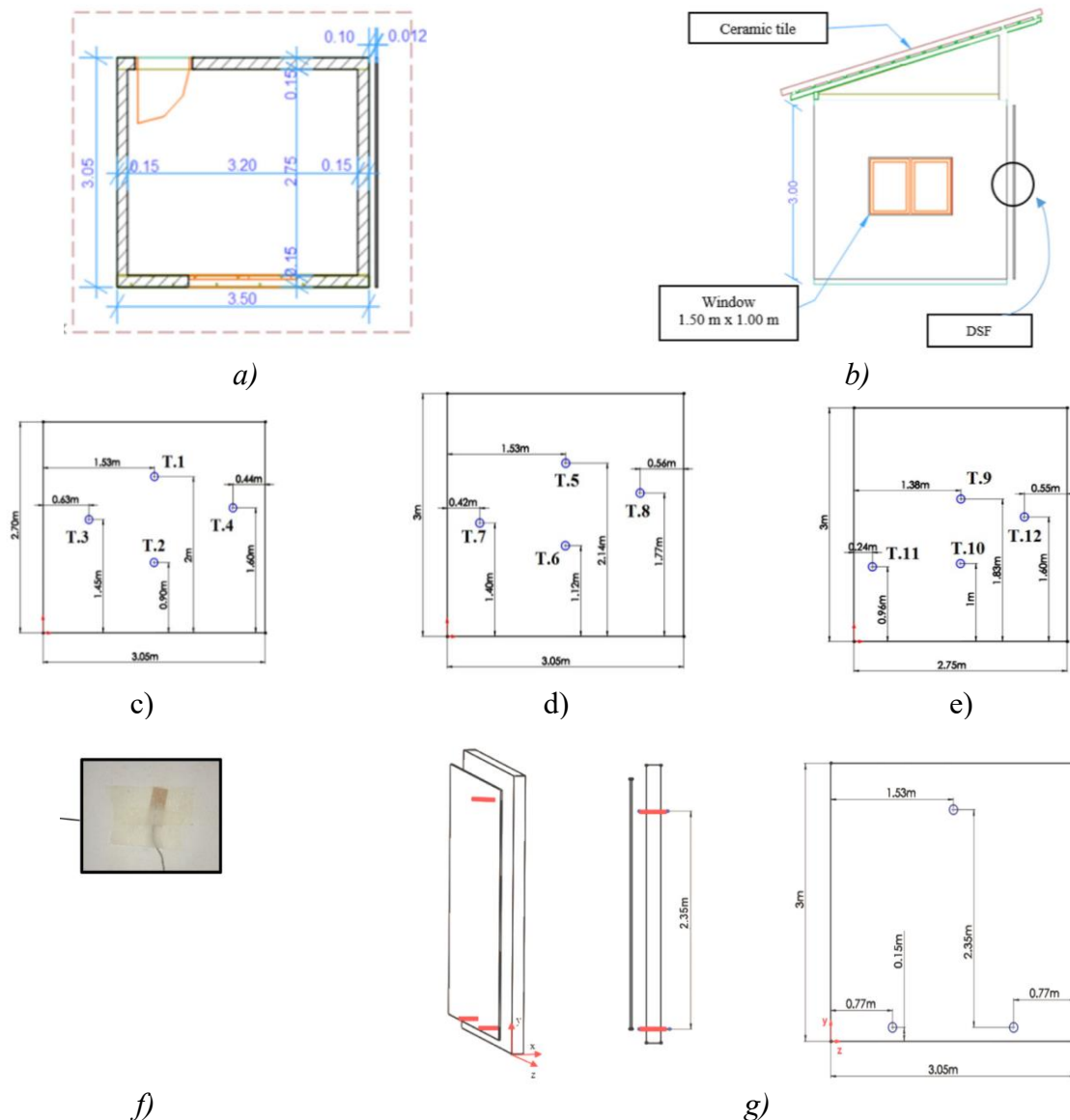


Obr. 5 a) Rozloženie meracích zariadení v medzipriestore DTF (L_x - povrchové teploty; Ca_x - rýchlosť prúdenia vzduchu v medzipriestore pred a za žalúziou; T_0 - teplota na vstupe do medzipriestoru, T_{ex} - teplota na výstupe z medzipriestoru; q_{trans} - množstvo transformovaného slnečného žiarenia nameraná pyranometrom; q_{sol} - množstvo slnečného žiarenia nameraná pyranometrom; $T_{outdoor}$ a T_{indoor} - teploty vzduchu v exteriéri a v interiéri) [13]
b) rozloženie meracích prístrojov na kancelárskej budove [14]

Peng a kol. [12] uskutočnili merania na vetranej fotovoltaickej dvojitej transparentnej fasáde. Pomocou dvoch pyranometrov (EKO instruments - MS-802) inštalovaných na sledovač slnka merali intenzitu slnečného žiarenia. Teploty zaznamenávali pomocou termočlánkov typu T a snímačov kovekčného (Captec Enterprise (HS-30)) a sálavého (Captec Enterprise (RS-30)) tepelného toku. Prúdenie vzduchu merali pomocou anemometrov typu Testo 435, a zaznamenávali aj klimatické parametre pomocou meteorologickej stanice (Thies Clima), ktoré meralo a zaznamenávalo rýchlosť a smer vetra, teplotu a vlhkosť vzduchu, horizontálne globálne a difúzne slnečné žiarenie. Všetky dáta zaznamenávali v časovom intervale 1 minúta.

V skúšobnej bunke Jiru a kol. [13] merali spotrebu energie, teplotu vzduchu v interiéri, tepelné toky cez fasádu, rozloženie teplôt v medzipriestore a na povrchoch fasád, pomocou termočlánkov a intenzitu slnečného žiarenia pomocou pyranometra. Haase a kol. [14] realizovali meranie na existujúcej kancelárskej budove. Pri meraní použili pyranometer, termočlánky, vlhkomer a merač tepelného toku.

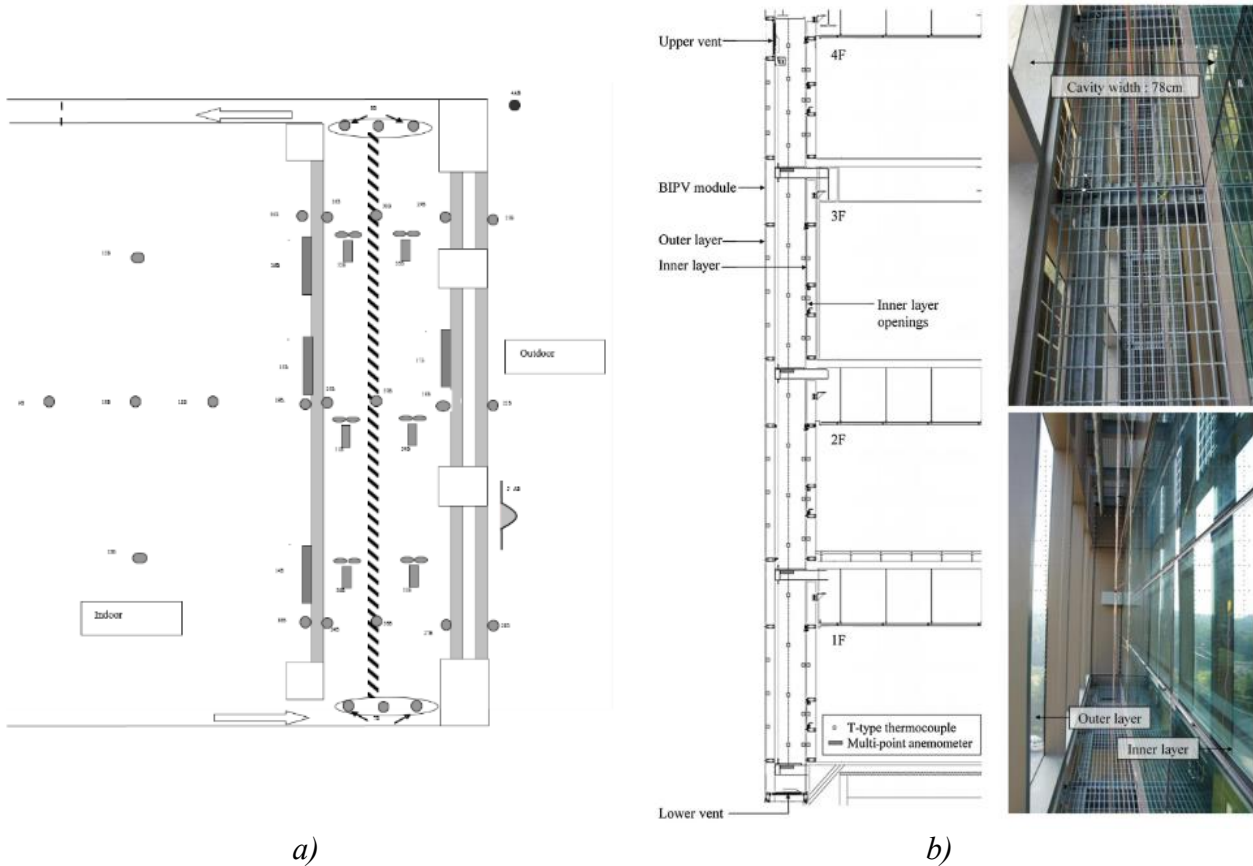
Souza a kol. [15] realizovali merania v testovacej bunke s dvojitou netransparentnou fasádou (Obr. 6 a, b). Merali vonkajšiu teplotu pomocou meteorologickej stanice, na meranie povrchových teplôt použili termočlánky typu K (Obr. 6 c, d, e, f). Údaje zaznamenávali v 5 min intervaloch a na meranie prúdenia vzduchu v medzipriestore použili anemometre (ITAN-800) (Obr. 6g).



Obr. 6 a) Pôdorys testovacej bunky b) pohľad na testovacou bunku s dvojitou netransparentnou fasádou; c) rozmiestnenie termočlánkov na vnútornej strane netransparentnej fasády; d) rozmiestnenie termočlánkov na vonkajšej strane testovacej bunky; e) rozmiestnenie termočlánkov na vnútornej strane testovacej bunky; f) upevnenie termočlánkov; g) rozmiestnenie anemometrov [15]

Dama a kol. [16] realizovali merania v experimentálnom zariadení TWINS. Pomocou termočlánkov merali teplotu vo vstupnom a vo výstupnom otvore na fasáde v troch výškach, taktiež povrchové teploty na zasklení a žalúzií, prestup tepla na zasklení a prúdenie vzduchu v medzipriestore pomocou objemového prietokomeru.

Joe a kol. [17] realizovali merania na existujúcej budove, merali teplotu vzduchu a povrchové teploty na zasklení, pomocou termočlánkov typu T. Rýchlosť prúdenia vzduchu v medzipriestore merali anemometrom. Dáta z meraní zaznamenávali v 10 min intervaloch. Pomocou meteorologickej stanice umiestnenej na streche budovy merali teplotu vonkajšieho vzduchu, relatívnu vlhkosť, rýchlosť a smer vetra, globálne a difúzne slnečné žiarenie.



a)

b)

Obr. 7 a) Meracie body v experimentálnom zariadení TWINS [16]; b) meracie body na existujúcej budove [17]

Tab. 1 Literárny prehľad druhov meraní a použitých meracích prístrojov

Autor a experimentálne zariadenie	Prúdenie vzduchu		Teplota vzduchu v medzipriestore			Intenzita slnečného žiarenia ¹	Meteorologická stanica ²
			na povrchu	tep. tok konvekciou	tep. tok sálaním		
Heiselberg a kol.	metóda sledovania plynu	zberač sledovaného plynu					
The Cube	metóda rýchlostného profilu	anemometer					
Ďnan a kol. experimentálne zariadenie	diferenčný tlakový snímač		termočlánok typu T				
Liu a kol. The Cube	škrtiacia clona		termočlánok typu K			pyranometer	
Peng a kol.	Anemometer		termočlánok typu T	Captec Enterprise - HS-30	Captec Enterprise - RS-30	pyranometer	Thies Clima
reálna budova	Testo 435					EKO instruments MS-802	
Jiru a kol. skúšobná bunka			termočlánok			pyranometer	

Pokračovanie Tab. 1 Literárny prehľad druhov meraní a použitých meracích prístrojov

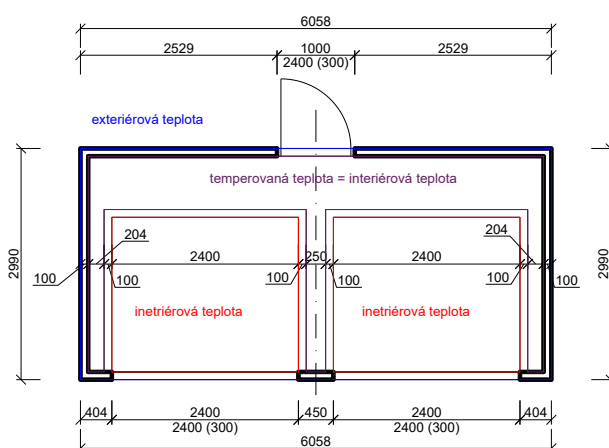
Autor a experimentálne zariadenie	Prúdenie vzduchu	Teplota vzduchu v medzipriestore			Intenzita slnečného žiarenia ¹	Meteorologická stanica ²
		na povrchu	tep. tok konvekciou	tep. tok sálaním		
Haase a kol. kancelárska budova		termočlánok	merač tepelného toku		pyranometer	
Souza a kol. testovacia bunka	anemometer ITAN-800	termočlánok typu K				
Dama a kol. TWINS	objemový prietokomer	termočlánky	merač tepelného toku			
Joe a kol. existujúca budova	anemometer	termočlánok typu T				meteorologická stanica

¹ globálne a difúzne slnečné žiarenie (horizontálna a vertikálna poloha)

² teplotu a vlhkosť vzduchu; smer a rýchlosť vetra; horizontálne globálne a difúzne slnečné žiarenie

3. Pavilónový experiment DTF v TWIN-rooms-och

Experimentálne zariadenie Twin-rooms je situované na pozemku Centrálnych laboratórií STU na Technickej 5 v Bratislave. Začiatok merania je naplánovaný na mesiac október. Experimentálna testovacia bunka pozostávajú z mobilného kontajnera kancelárskeho typu s vonkajšími rozmermi 6058 × 2990 × 4200 mm, ktorý je umiestnený na betónových základoch. Predná strana kontajnera s rozmermi 6058 × 4200 mm orientovaná na juh má dva vyrezané otvory s rozmermi 2400 × 3400 mm, do ktorých bol osadený testovací prvok jednoduchej a dvojitej fasády. Priamo za otvormi vytvára deliaca konštrukcia ľahkej drevenej priečky dve miestnosti (twin-rooms) s rozmermi 2400 × 2000 × 3400 mm tepelne izolované od vnútorného priestoru kontajnera (Obr. 8).

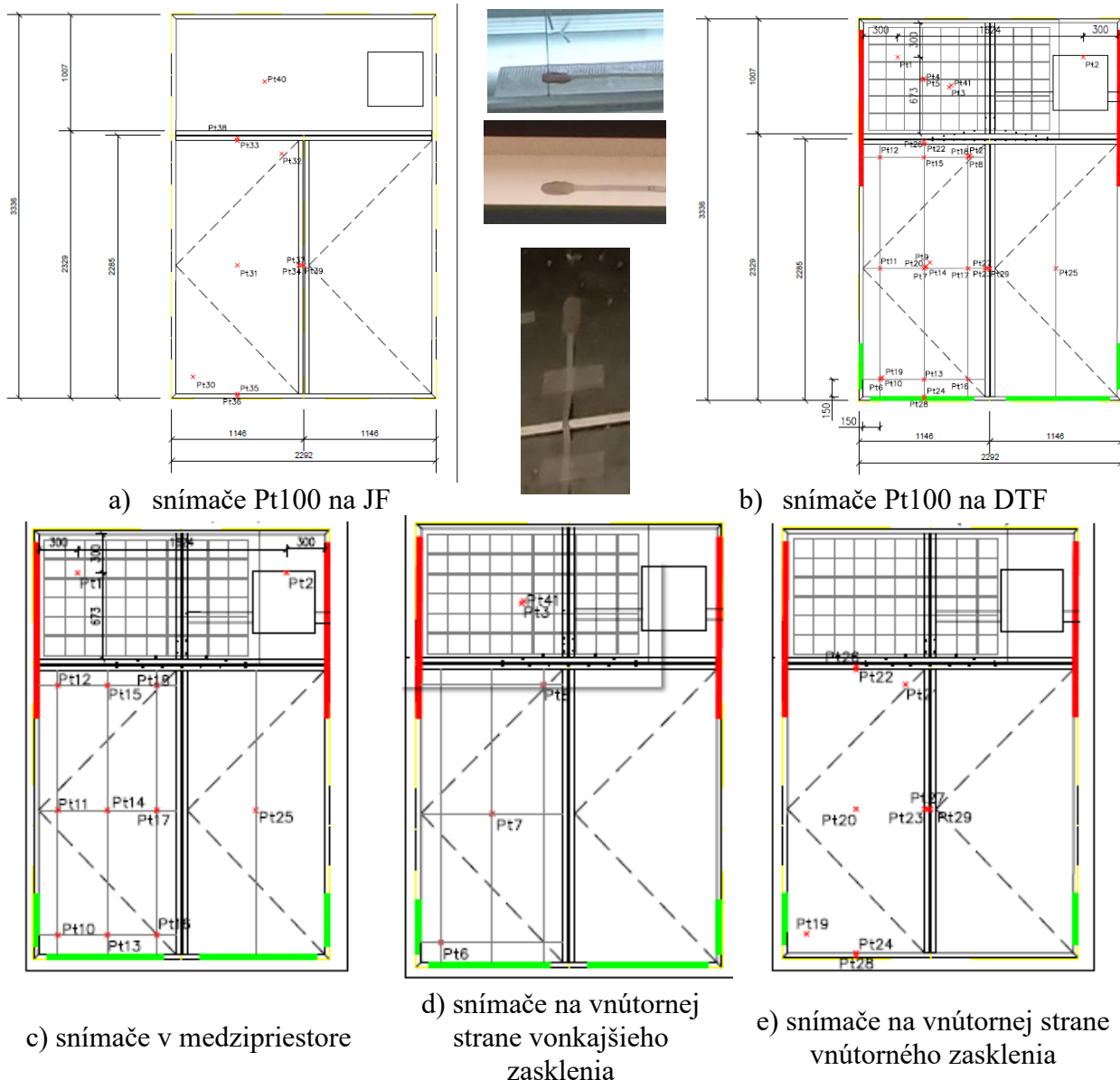


Obr. 8 Pôdorys experimentálneho zariadenia TWIN-rooms

Vonkajšie klimatické podmienky budú merané pomocou meteorologickej stanice umiestnenej na streche kontajnera. Meteorologická stanica bude priebežne merať teplotu a vlhkosť vonkajšieho vzduchu, rýchlosť a smer vetra, intenzitu slnečného žiarenia na vertikálnej a horizontálnej rovine a množstvo zrážok. Pre vyhodnotenie lokálnych tepelnotechnických parametrov meraných konštrukcií

bude potrebné merať lokálne tepelné toky pomocou meračov tepelných tokov (TD), povrchové teploty na vonkajšej a vnútornej strane konštrukcie snímačmi Pt100 (PT), rýchlosti prúdenia pozdĺž meraných štruktúr pomocou anemometrov (AN), intenzita slnečného žiarenia na zvislom povrchu obvodového plášťa pomocou pyranometrov (PYR) a pomocou guľového teplomera (GT) teplotu v miestnosti (room).

Všetky vyššie uvedené fyzikálne veličiny budú priebežne merané a ukladané pomocou meracej ústredne. Zároveň budú archivované pomocou PC a budú vzdialene dostupné z akéhokoľvek miesta cez internet.

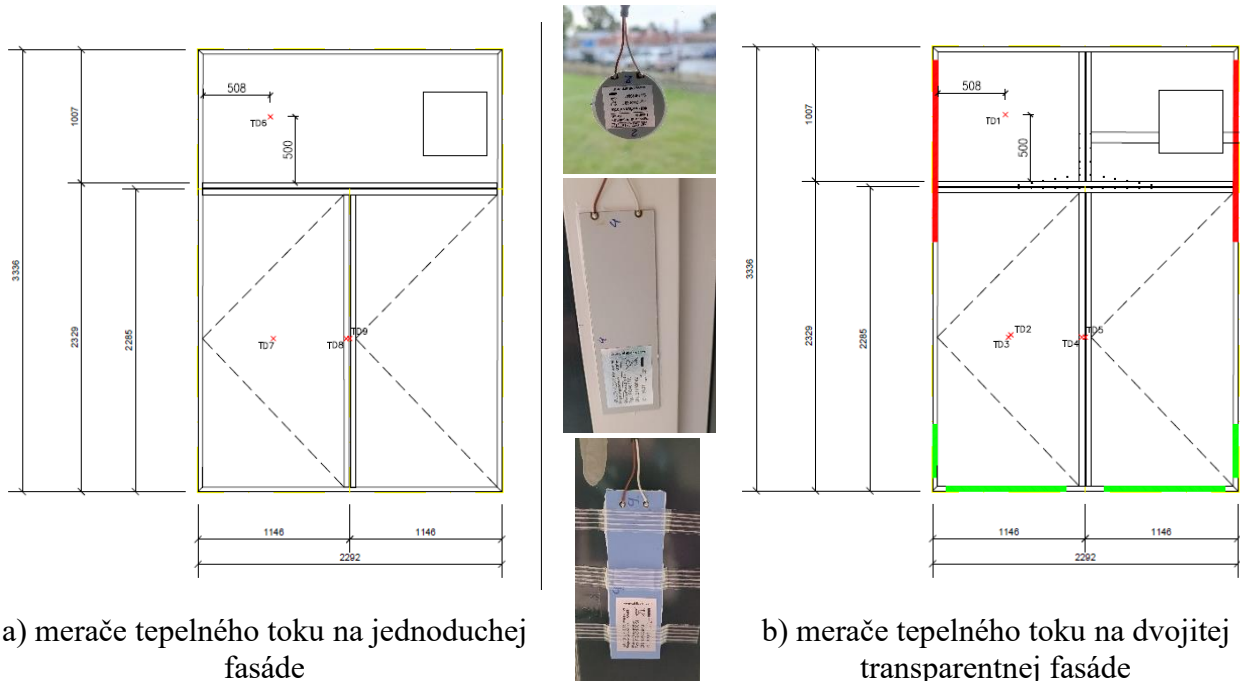


Obr. 9 Schematické zobrazenie snímačov Pt100 na jednoduchéj a dvojitej transparentnej fasáde

Na Obr. 9 je znázornené rozmiestnenie snímačov Pt100 (PT) na jednoduchéj (JF) a dvojitej transparentnej fasáde (DTF). RTD snímače Pt100 slúžia na meranie teploty v medzipriestore (PT1, PT2, PT10-PT18, PT25), sú chránené strieborným štítom pred priamym slnečným žiarením a na meranie teploty na povrchu prvkov (zasklenie, parapet, krídlo, rám, stĺpik, žalúzia), chránené tmelom.

Obr. 10 zobrazuje rozmiestnenie meračov tepelného toku na fasádach, ktoré slúžia na meranie lokálnych tepelných tokov cez konštrukciu. Merače tepelného toku s označením TD1-3, 6, 7 sú typu FQA020C, kruhového priemeru 33 mm a hrúbky 1,5 mm na meranie tepelného toku v rozmedzí od

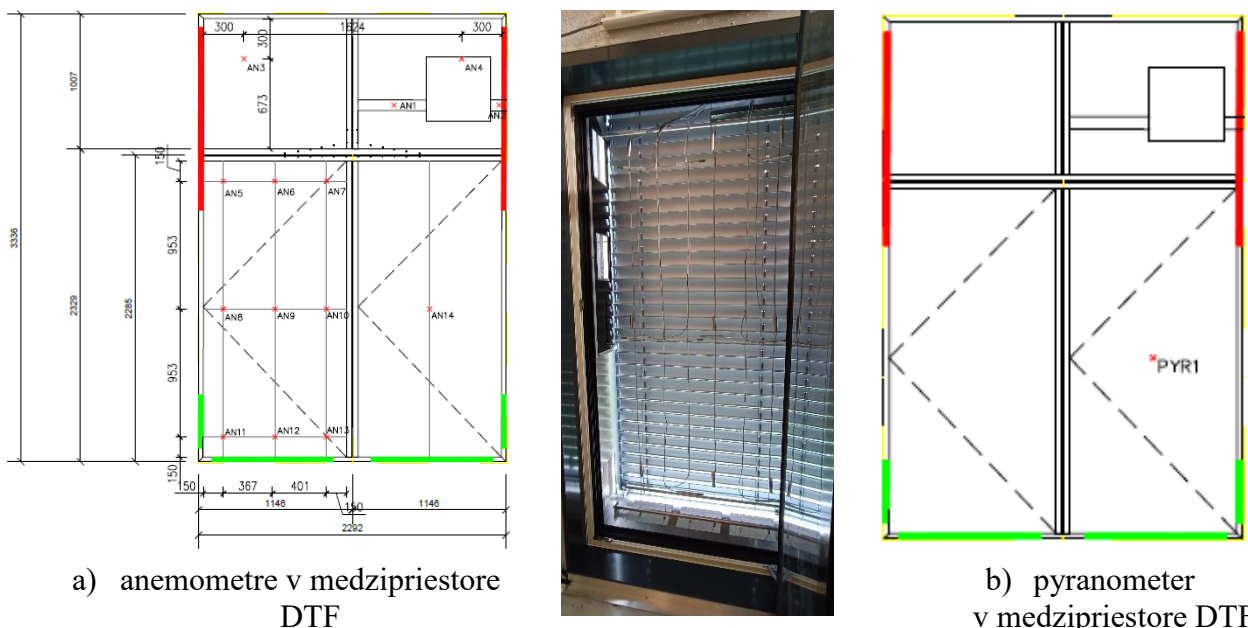
- 40 až 80 °C s kalibračnou hodnotou $< 150 \text{ W/m}^2 \approx \text{mV}$. Merače tepelného toku s označením TD4, 5, 8 typu FQA017C s rozmerom doštičky $100 \times 30 \text{ mm}$ a hrúbky 1,5 mm na meranie tepelného toku v rozmedzí od - 40 až 80 °C s kalibračnou hodnotou $< 50 \text{ W/m}^2 \approx \text{mV}$. A s označením tepelnej doštičky TD9 typu FQA017CSI na báze silikónu, s rozmerom doštičky $100 \times 30 \text{ mm}$ a hrúbky 3 mm na meranie tepelného toku v rozmedzí od - 40 až 80 °C s kalibračnou hodnotou $< 50 \text{ W/m}^2 \approx \text{mV}$.



a) merače tepelného toku na jednoduchéj fasáde

b) merače tepelného toku na dvojitej transparentnej fasáde

Obr. 10 Schematické zobrazenie meračov tepelného toku na jednoduchéj a dvojitej transparentnej fasáde z interiéru (z medzpriestoru)



a) anemometre v medzpriestore DTF

b) pyranometer v medzpriestore DTF

Obr. 11 Schematické zobrazenie anemometrov a pyranometra v medzpriestore dvojitej transparentnej fasády

Na Obr. 11a je rozmiestnenie anemometrov v medzpriestore. Anemometre s označením AN3-AN14 sú typu EE576, optimalizované na meranie nízkej rýchlosti vzduchu (laminárne

prúdenie). Pracuje na princípe anemometra s horúcim drôtom s presnosťou $\pm 0,05 \text{ m/s} + 2 \%$ z nameranej hodnoty pri rýchlosti prúdenia 0,2 až 1 m/s a pri rýchlosti 0,2 až 2 m/s $\pm 0,08 \text{ m/s} + 4 \%$ z nameranej hodnoty. V potrubí do rekuperačnej jednotky inštalovaný anemometer typu EE671 s označením AN1 a z rekuperačnej jednotky s označením AN2 tiež typu EE671. Aj tento typ pracuje na princípe anemometra s horúcim drôtom s presnosťou $\pm 0,2 \text{ m/s} + 3 \%$ z nameranej hodnoty pri rýchlosti prúdenia 0,5 až 5 m/s, pri rýchlosti 1 až 10 m/s $\pm 0,3 \text{ m/s} + 4 \%$ z nameranej hodnoty, pri rýchlosti 1 až 15 m/s $\pm 0,35 \text{ m/s} + 5 \%$ z nameranej hodnoty, pri rýchlosti 1 až 20 m/s $\pm 0,4 \text{ m/s} + 6 \%$ z nameranej hodnoty.

Obr. 11b zobrazuje umiestnenie pyranometra PYR1 typu Kipp&Zonen CMP 6 v medzipriestore. Ďalšie dva pyranometre s označením PYR2 a PYR3 tiež typu Kipp&Zonen CMP 6, ktoré nie sú zobrazené na Obr. 11b sú umiestnené po jednom v každej miestnosti (rooms) na stojane spolu s guľovým teplomerom. Pyranometer CMP6 s citlivosťou od 5 do 20 $\mu\text{V/W/m}^2$, s maximálnou intenzitou slnečného žiarenia 2000 W/m^2 , spektrálnym rozsahom medzi 270 a 3000 nm. Veľkosť odchýlky pri 200 W/m^2 je menej ako 10 W/m^2 , pri zmene teploty o 5 K/h je menej ako 4 W/m^2 , na nule je menej ako 10 W/m^2 s možnosťou merania v rozmedzí od - 40 až 80 °C.

Guľový teplomer s označením GT1-2 od výrobcu Testo s priemerom 150 mm slúži na meranie sálavého tepla v bunke (rooms) v rozmedzí od 0 do 120 °C na meranie teploty využíva termočlánky typu K.

Tab. 2 Výpis meracích prístrojov použitých pri meraní

Testovacie zariadenie	Druh meranie	Ozn.	Merací prístroj	Počet	Typ meracieho prístroja
Twin rooms	teplota vzduchu v medzipriestore	PT	snímač Pt100	12 ks	CRZ-2005-100-A-1-Ni
	povrchová teplota prvku	PT	snímač Pt100	30 ks	CRZ-2005-100-A-1-Ni
	teplota v rekuperačnej jednotke	-	snímač Pt100	8 ks	CRZ-2005-100-A-1-Ni
	sálavá teplota vzduchu v bunke (room)	GT	guľový teplomer	2 ks	Testo - 0602 0743
	lokálne tepelné toky na konštrukcii	TD	merače tepelného toku	9 ks	FQA017C, FQA020C, FQA017CSI
	rýchlosť prúdenia vzduchu	AN	anemometer	2 ks	EE671
		AN	anemometer	12 ks	EE576
	intenzita slnečného žiarenie	PYR	pyranometer	3 ks	Kipp&Zonen CMP 6
	rekuperačná jednotka			2 ks	Lunos Nexxt
teplota a vlhkosť vonkajšieho vzduchu, rýchlosť a smer vetra, intenzitu slnečného žiarenia na vertikálnej a horizontálnej rovine, množstvo zrážok	-	meteorologická stanica	1 ks	AMS 111	

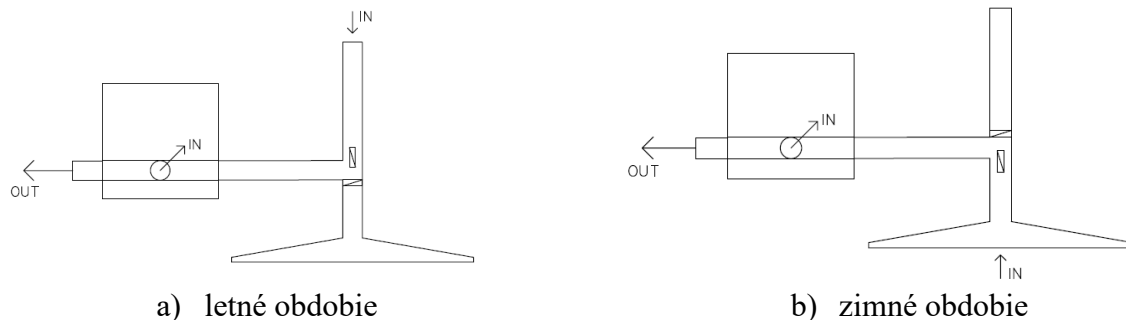
4. Režimy merania DTF

Teplota v medzipriestore sa v priebehu roka mení. Na teplotu v medzipriestore vplyva najmä intenzita slnečného žiarenia a vietor. V letom období najideálnejší stav je, keď celkový aerodynamický odpor prúdenia vzduchu v medzipriestore je nižší ako sila konvektívneho vztlatku vzduchu, čiže prípad, keď nastáva pohyb vzduchu v medzipriestore. Tento pohyb vzduchu spôsobí zníženie teploty, ktorá sa zvyšuje vplyvom transformácie krátkovlnného slnečného žiarenia na dlhovlnné tepelné žiarenie pri dopade na netransparentný povrch (žalúzia, okenné krídlo, rám, konštrukcia fasády...). V zimnom období najideálnejší stav je, keď teplota vzduchu v medzipriestore je vyššia ako teplota vonkajšieho vzduchu. Tento teplejší vzduch z medzipriestoru vieme využiť na zvýšenie účinnosti rekuperačnej jednotky Lunos v zimnom období.

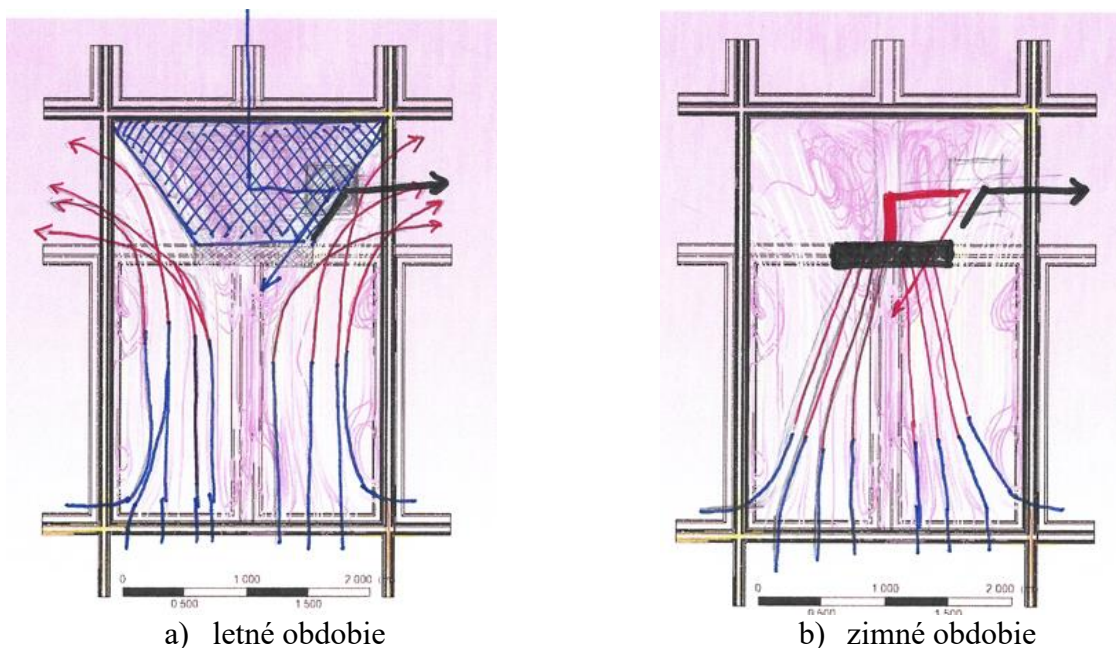
Rekuperačná jednotka Lunos Ne^{xx}t bude pracovať v 2 režimoch, v letnom a zimnom. V letnom režime bude vzduch do rek. jednotky privádzaný z horného otvoru dvojitej transparentnej fasády (Obr. 12a a Obr. 13a). Vzduch vstupuje do medzipriestoru v dolnej časti fasády 6-timi privádzacími

otvormi. Vplyvom vonkajších faktorov slnečného žiarenia a vetra a vnútorným faktorom vztľaku vzduchu v medzipriestore stúpa nahor a vystupuje krajnými odvodnými otvormi z medzipriestoru fasády von do exteriéru. Na výkon rekuperačnej jednotky v letnom období sa bude privádzať vzduch z vonkajšieho prostredia z vrchnej časti dvojitej transparentnej fasády. Tento vzduch je chladnejší ako vzduch, ktorý vystupuje z medzipriestoru fasády.

V zimnom režime bude vzduch privádzaný z medzipriestoru dvojitej transparentnej fasády cez lievik do rekuperačnej jednotky (Obr. 12b a Obr. 13b). Teplota vzduchu v medzipriestore vplyvom transformácie slnečného žiarenia bude vyššia ako teplota vonkajšieho vzduchu, to spôsobí zvýšenie účinnosti rekuperačnej jednotky.



Obr. 12 Schematické zobrazenie prívodu vzduchu do rekuperačnej jednotky a) v letnom období v zimnom období



Obr. 13 Schematické zobrazenie prúdenia vzduchu do rekuperačnej jednotky a) v letnom období v zimnom období

5. Záver

Cieľom práce bolo porovnať použitie typov meracích prístrojov z našej experimentálnej bunky TWIN-rooms s už realizovanými experimentmi zo zahraničia. Zistila som, že je veľký výber v meracích prístrojoch akými môžeme merať dôležité vlastnosti dvojitéch transparentných fasád. V priebehu pár týždňov môžeme spustiť merania a zistiť, či naše predpoklady a výpočty

v simuláciách sa zhodujú s realitou. Keďže simulácie boli statické, rozdiely so skutočnou nejaké určite budú, verím, však, že minimálne.

6. PodĎakovanie

Tento projekt je financovaný Ministerstvom školstva, vedy výskumu a športu pod projektmi VEGA 1/0113/19 „Klimaticky adaptívne fasády pre udržateľnú architektúru a ich potenciál v lokalite strednej Európy“ a APVV-21-0144 "Vývoj a experimentálne overenie klimaticky adaptívnej transparentnej fasády s viacstupňovým využívaním obnoviteľných zdrojov energie pre nízkoenergetické sálavé systémy" .

Použitá literatúra

- [1] BIELEK, Boris, Daniel SZABO, Josip KLEM, Kristina KANIKOVA a Alzbeta DANKOVA. Twin Rooms – New Experimental Test Cells for Testing Advanced Facade Elements. V: *CESB22*. 2022.
- [2] *Energy efficiency directive* [online]. [cit. 2022-10-04]. Dostupné na: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
- [3] WANG, Yanjin, Youming CHEN a Cong LI. Airflow modeling based on zonal method for natural ventilated double skin façade with Venetian blinds. *Energy and Buildings* [online]. 2019, **191**, 211–223. ISSN 03787788. Dostupné na: doi:10.1016/j.enbuild.2019.03.025
- [4] HEISELBERG, P, O ; KALYANOVA a R L JENSEN. Measurement and Modelling of Air Flow Rate in a Naturally Ventilated Double Skin Facade. 2008.
- [5] İNAN, Tuğba, Tahsin BAŞARAN a Aytunç EREK. Experimental and Numerical Investigation of Forced Convection in a Double Skin Façade. *Energies* [online]. 2017, **10**(9), 1364 [cit. 2021-02-05]. ISSN 1996-1073. Dostupné na: doi:10.3390/en10091364
- [6] *ERGATE* [online]. Dostupné na: <https://www.ergate.cz/mereni-a-regulace/diferencni-snimace-tlaku/diferencni-tlakovy-snimac-dpt2500-r8-7654.html>
- [7] *JAKAR Electronics* [online]. Dostupné na: <https://www.jakar.cz/en/p/t-type-thermocouple-duplex-wire>
- [8] LIU, Mingzhe, Kim Bjarne WITTCHEN a Per Kvols HEISELBERG. Verification of a simplified method for intelligent glazed façade design under different control strategies in a full-scale façade test facility – Preliminary results of a south facing single zone experiment for a limited summer period. *Building and Environment* [online]. 2014, **82**, 400–407. ISSN 0360-1323. Dostupné na: doi:10.1016/J.BUILDENV.2014.09.009
- [9] *JAKAR Electronics* [online]. no date. Dostupné na: <https://www.jakar.cz/en/p/k-type-thermocouple-duplex-wire>
- [10] *ArchiExpo* [online]. no date. Dostupné na: <https://www.archiexpo.com/prod/meteocontrol/product-151597-1729736.html>
- [11] *WIKA* [online]. no date. Dostupné na: https://www.wika.com/en-en/flc_ac_flc_fl_flc_op.WIKA

- [12] PENG, Jinqing, Lin LU, Hongxing YANG a Tao MA. Comparative study of the thermal and power performances of a semi-transparent photovoltaic façade under different ventilation modes. *Applied Energy* [online]. 2015, **138**, 572–583. ISSN 03062619. Dostupné na: doi:10.1016/j.apenergy.2014.10.003
- [13] JIRU, Teshome Edae, Yong X. TAOB a Fariborz HAGHIGHAT. Airflow and heat transfer in double skin facades. *Energy and Buildings* [online]. 2011, **43**(10), 2760–2766. ISSN 03787788. Dostupné na: doi:10.1016/j.enbuild.2011.06.038
- [14] HAASE, M., F. MARQUES DA SILVA a A. AMATO. Simulation of ventilated facades in hot and humid climates. *Energy and Buildings* [online]. 2009, **41**(4), 361–373. ISSN 03787788. Dostupné na: doi:10.1016/j.enbuild.2008.11.008
- [15] C. O. SOUZA, L., H. A. SOUZA a E. F. RODRIGUES. Experimental and numerical analysis of a naturally ventilated double-skin façade. *Energy and Buildings* [online]. 2018, **165**, 328–339. ISSN 03787788. Dostupné na: doi:10.1016/j.enbuild.2018.01.048
- [16] DAMA, Alessandro a Angeli DIEGO. Modelling mechanically ventilated double skin facades with integrated shading device. V: *14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings*. B.m.: International Building Performance Simulation Association, 2015, s. 883–890.
- [17] JOE, Jaewan, Wonjun CHOI, Hansol KWON a Jung Ho HUH. Load characteristics and operation strategies of building integrated with multi-story double skin facade. *Energy and Buildings* [online]. 2013, **60**, 185–198. ISSN 03787788. Dostupné na: doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.015

Matúš Krajčík¹

Študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 4.

MERANIE INTERIÉROVEJ KONCENTRÁCIE RADÓNU V MIESTNOSTI VYUŽÍVAJÚCEJ VETRANIE SO SPÄTNÝM ZÍSKAVANÍM TEPLA

MEASUREMENT OF INDOOR RADON CONCENTRATION IN A ROOM USING VENTILATION WITH HEAT RECOVERY

Abstract

The low level of ventilation caused by increasing the tightness of the outer shell during building renovations can lead to a deterioration of indoor air quality. It can also affect an increase of the indoor radon concentration. One of the solutions of this issue is the usage of mechanical ventilation with heat recovery. The paper deals with the measurement of radon concentration in a room that uses a local ventilation device with heat recovery. The measurement takes place on the ground floor of the administrative building that has undergone a complete renovation of the outer shell. The aim of the paper is to evaluate the effect of ventilation with heat recovery on decreasing indoor radon concentration.

Kľúčové slová

mechanické vetranie, koncentrácia radónu, úspora energie

1. Úvod

V čase energetickej krízy a vysokých cien energie sú ľudia nútení zaoberať sa opatreniami na znižovanie spotreby energie v budovách. Prostriedky na zabezpečenie týchto opatrení je možné v súčasnosti získať aj z Plánu obnovy a odolnosti schváleného Európskou komisiou. Časť z týchto prostriedkov je určená práve na zlepšenie energetickej hospodárnosti rodinných domov a obnovu verejných historických a pamiatkovo chránených budov. Investície sú určené aj na obnovu obvodového plášťa budov, výmenu okien alebo zabezpečenie efektívnejšieho zdroja tepla [1]. Pri týchto riešeniach je dôležité myslieť aj na potrebu dostatočného vetrania, nakoľko opatrenia na úsporu energie zvyčajne znižujú tepelné straty cez obvodový plášť budovy a následne znižujú rýchlosť výmeny vzduchu [2]. Účelom vetrania je odstraňovanie kontaminantov, vytvorenie dobrej kvality vnútorného vzduchu a zníženie rizika zdravotných problémov zavedením a cirkuláciou čerstvého vzduchu v celej budove.

Medzi zdraviu ohrozujúce látky hromadiace sa vo vnútornom prostredí budov patrí aj radón. V exteriéri sa radón mieša s atmosférickým vzduchom, ale vo vnútorných uzavretých priestoroch dochádza k jeho hromadeniu a nárastu škodlivých koncentrácií [3]. Medzi najvýznamnejšie zdroje radónu v interiéri patrí podlažie, podzemná voda a stavebné materiály. So svojimi produktmi sa radón dostáva inhaláciou do dýchacieho traktu, pričom následne môže dochádzať k vzniku nádorových ochorení. Podľa Svetovej zdravotníckej organizácie je po fajčení druhou najčastejšou príčinou vzniku zhubných nádorov pľúc [4].

Nutnosť zaoberať sa kvalitou vnútorného vzduchu pri zvyšovaní energetickej efektívnosti budov bola potvrdená vo francúzskej štúdií [5]. Tá preukázala výrazný vplyv obnovy a modernizácií budov

¹ Matúš Krajčík, Ing., Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

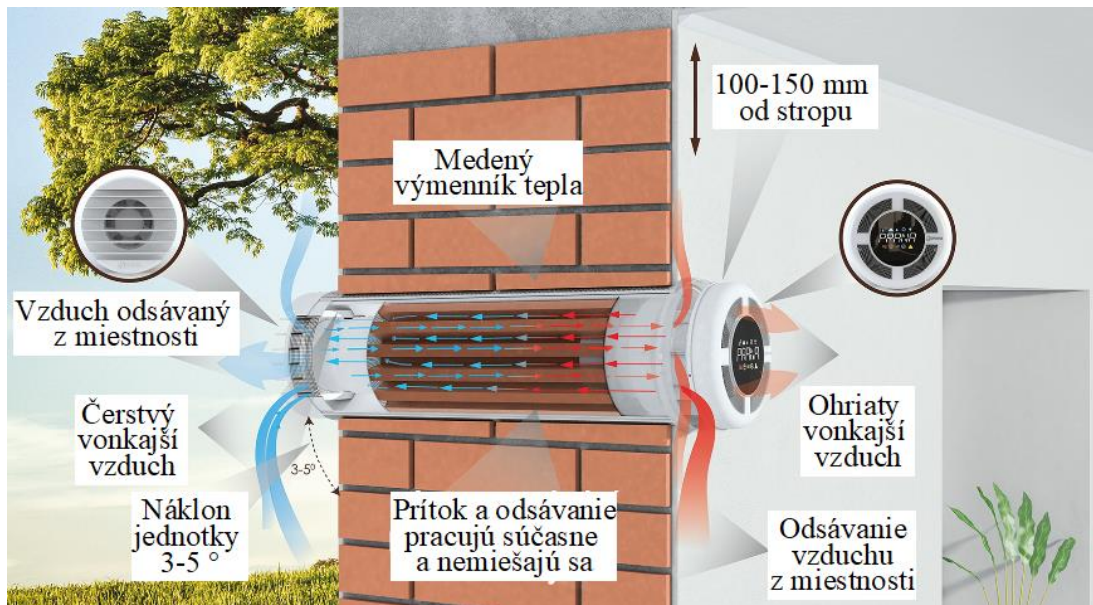
na nárast interiérových koncentrácií radónu. Štúdia zo Spojeného kráľovstva [6] skúmala dôsledky zníženia vetrania budov zvýšením vzduchotesnosti obvodového plášťa, pričom preukázala možnosť zvýšenia koncentrácie radónu o viac ako 56%.

Dosiahnuť požadovanú výmenu vzduchu a zároveň znižovať energetické straty je možné prostredníctvom vetrania so spätným získavaním tepla. V súčasnosti sa na trhu nachádza množstvo centrálnych aj decentrálnych rekuperačných jednotiek, ktoré je možné pre tento účel použiť. Príspevok sa venuje meraniu interiérovej koncentrácie radónu v miestnosti, ktorá na vetranie používa lokálnu rekuperačnú jednotku.

2. Metodika a zariadenia

Meraná miestnosť sa nachádza na prízemí administratívnej budovy v Banskej Bystrici. Konštrukcia budovy je tvorená z pórobetónových panelov a pred pár rokmi prešla kompletnou obnovou obvodového plášťa. Tá zahŕňala zateplenie strechy, fasády aj výmenu okien.

Na vetranie meranej miestnosti sa používa lokálna rekuperačná jednotka Prana 150 Premium. Táto jednotka je určená pre vetranie menších priestorov do 60 m² podlahovej plochy, pričom dokáže zabezpečiť výmenu vzduchu o objeme približne 100 m³/h. Teplý odpadový vzduch odvádzaný z interiéru, prenáša teplo v medenom výmenníku do privádzaného vzduchu z exteriéru, pričom nedochádza k zmiešavaniu odvádzaného a privádzaného vzduchu. Výrobca udáva účinnosť zariadenia z pohľadu úspory energie až 95 % [7]. Princíp fungovania rekuperačnej jednotky je znázornený na obrázku 1.



Obrázok 1: Princíp fungovania rekuperačnej jednotky Prana 150 Premium [7].

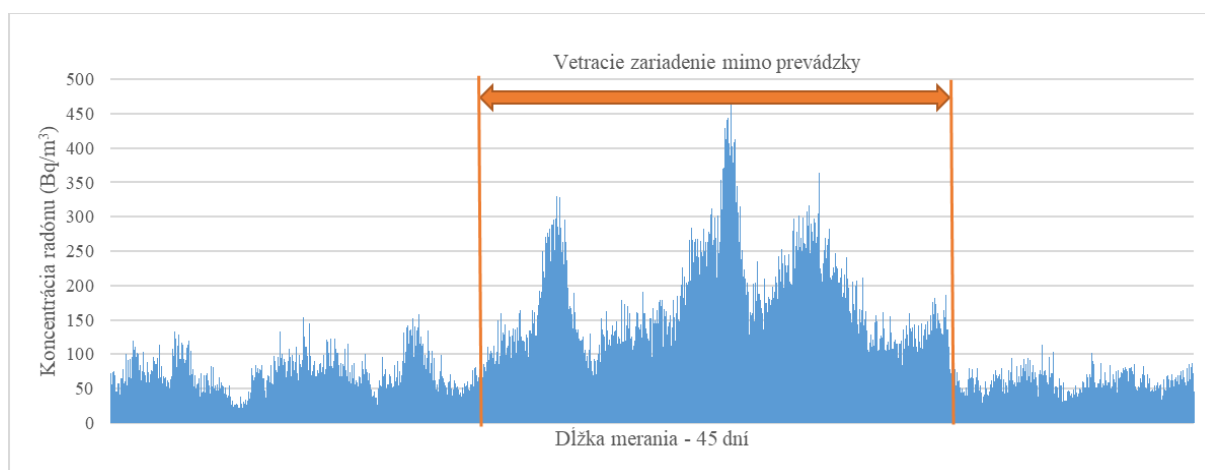
Na meranie koncentrácie radónu bol použitý radónový monitor Alphagard, ktorý umožňuje kontinuálne meranie radónu a súčasne aj meranie vybraných klimatických parametrov ako teplota, tlak a vlhkosť vzduchu. Tento prístroj pracuje na princípe ionizačnej komory [8]. Pracovný priestor so zbernou centrálnou anódou je plnený pracovnou náplňou – vzduchom. Skúmaný vzduch prechádza do ionizačnej komory cez filter, ktorý prepustí len molekuly radónu ²²²Rn, t.j. bez produktov jeho premeny. Filter navyše zabraňuje kontaminácii prachovými časticami. Pri premene radónu sa uvoľňujú alfa častice, ktoré ionizujú plyn. Vzniknuté kladné a záporné ióny sa zachytávajú na elektródach komory. Veľkosť vzniknutého elektrického náboja je úmerná objemovej aktivite radónu.



Obrázok 2: Radónový monitor Alphagard [9].

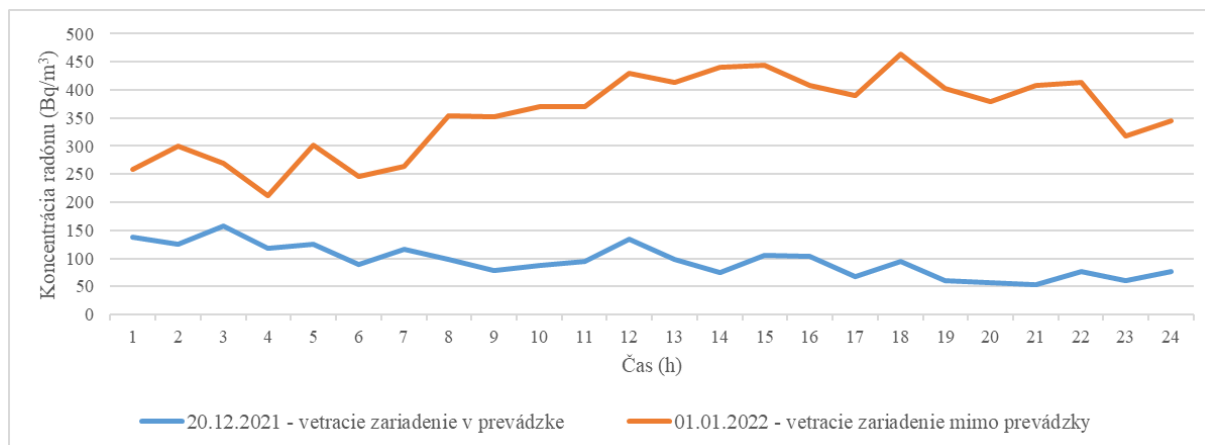
3. Výsledky

Meranie prebiehalo v dňoch 07.12.2021 do 20.01.2022 (45 dní). V dňoch od 22.12.2022 do 10.01.2022 (20 dní) bolo vetracie zariadenie s rekuperáciou tepla mimo prevádzky, v ostatných dňoch fungovalo v bežnom režime. Vývoj koncentrácie radónu v meranej miestnosti je zachytený v grafe 1. Z nameraných hodnôt je možné vydedukovať, že v čase vypnutého vetracieho zariadenia sa hodnoty interiérovej koncentrácie radónu výrazne zvýšili.



Graf 1: Priebeh nameraných hodnôt interiérovej koncentrácie počas celej dĺžky merania [autor].

V tomto intervale bola počas šiestich dní prekročená hodnota 300 Bq/m^3 , pričom najvyššia nameraná hodnota bola 463 Bq/m^3 . Počas prevádzky vetracieho zariadenia bola najvyššia nameraná hodnota interiérovej koncentrácie radónu 158 Bq/m^3 . To predstavuje takmer trojnásobný nárast koncentrácie pri vypnutí vetracieho zariadenia. Porovnanie týchto dvoch dní s najvyššou koncentráciou pre oba prípady vetrania je možné vidieť v grafe 2.



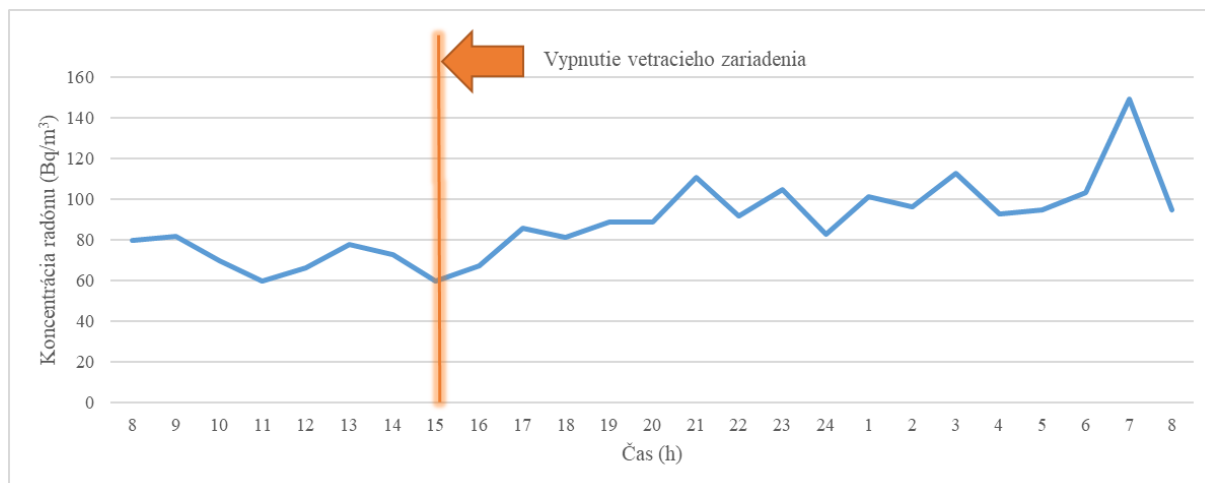
Graf 2: Priebek interiérovej koncentrácie radónu v dňoch kedy koncentrácia dosiahla najvyššie hodnoty [autor].

Podobný nárast bol zaznamenaný aj pri ostatných parametroch uvedených v tabuľke 1. Nárast teda nebol zaznamenaný len pri maximálnych hodnotách, ale aj pri ostatných. Medián nameraných hodnôt koncentrácie vzrástol po vypnutí vetrania o 178 %. Pri priemere bol nameraný nárast o 190 % a tretí kvartil nameraných hodnôt vzrástol až o 202 %. Medián bol o niečo nižší ako priemer, čo naznačuje prítomnosť niektorých extrémnych hodnôt. Pri vyhodnocovaní týchto hodnôt sa nebrali do úvahy hodnoty koncentrácie radónu v dňoch, kedy dochádzalo k zmene prevádzky vetrania (vypnutie/zapnutie vetracieho systému), nakoľko by tieto hodnoty mohli skresľovať hodnoty počas bežných dní.

Tabuľka 1: Namerané hodnoty koncentrácie radónu [autor].

Namerané hodnoty	Koncentrácia radónu (Bq/m ³) Vetracia jednotka v prevádzke	Koncentrácia radónu (Bq/m ³) Vetracia jednotka mimo prevádzky
1. kvartil (25 %)	34	91
medián	45	125
priemer	49	142
3. kvartil (75 %)	60	181
maximum	158	463

Priebek interiérovej koncentrácie radónu počas dňa, kedy nastalo vypnutie vetracieho zariadenia, je možné vidieť v grafe 3. Počas prevádzky sa hodnota koncentrácie pohybovala v intervale 60-80 Bq/m³, následne po vypnutí vetracieho zariadenia začala koncentrácia radónu narastať. Do 6 hodín sa dostala na hodnotu 100 Bq/m³ a do 16 hodín už na hodnotu 150 Bq/m³. V grafe 4 možno vidieť opačný prípad priebehu koncentrácie radónu pri opätovnom zapnutí vetracieho zariadenia. K zníženiu koncentrácie radónu na hodnotu 50 Bq/m³, čo predstavuje priemerné namerané hodnoty, prišlo po 14 hodinách prevádzky vetracieho zariadenia.



Graf 3: Priebeh koncentrácie radónu po vypnutí vetracieho zariadenia [autor].



Graf 4: Priebeh koncentrácie radónu po zapnutí vetracieho zariadenia [autor].

3. Diskusia

Výsledky týchto meraní potvrdzujú poznatky zo zahraničných štúdií [10], [11]. Mechanické vetranie so spätným získavaním tepla pomáha výrazne znižovať interiérové koncentrácie radónu a zároveň prispievať k úspore energie. Koncentrácie namerané v čase mimo prevádzky vetracieho zariadenia boli vo viacerých analyzovaných parametroch prekročené takmer trojnásobne. Treba však brať do úvahy fakt, že hodnoty koncentrácie radónu sú veľmi premenlivé a často sa aj v priebehu hodín výrazne menili.

Na hodnoty koncentrácie radónu má výrazný vplyv aj spôsob užívania budovy. V čase vypnutého vetracieho zariadenia bol pravdepodobne výskyt užívateľov v meranej miestnosti zriedkavejší oproti dňom, keď vetranie bolo v prevádzke. Jednalo sa totiž o dni vianočných sviatkov. To mohlo mať za následok taktiež zvýšenie interiérovej koncentrácie radónu.

Ďalším faktorom, ktorý mohol ovplyvniť hodnoty koncentrácie radónu sú vonkajšie poveternostné podmienky a priepustnosť podlážia. Podľa informácií z iných meraní uskutočnených v tejto lokalite sa v čase daždivých dní zvyšujú hodnoty koncentrácie radónu v interiéri.

4. Záver

Z výsledkov merania aj vzhľadom na fakty, ktoré mohli ovplyvňovať výsledné hodnoty koncentrácie radónu v interiéri, možno konštatovať, že vetranie s rekuperáciou tepla sa osvedčilo ako vhodné protiradónové opatrenie pri súčasnom šetrení energie a pozitívnom vplyve na hodnoty CO₂ a vlhkosti v interiéri. Je dôležité podotknúť, že pri nesprávnom spôsobe vetrania, by mohol byť jeho efekt na znižovanie koncentrácie radónu znížený alebo aj opačný. Mechanické vetranie ako protiradónové opatrenie je vhodné kombinovať aj s iným pasívnym protiradónovým opatrením (napr. radónové izolácie alebo odvetranie podlažia), nakoľko pri poruche vetracieho zariadenia, môžu hodnoty rýchlo stúpať nad normou stanovené limity.

Pod'akovanie

Tento príspevok bol spracovaný v spolupráci s Regionálnym úradom verejného zdravotníctva v Banskej Bystrici.

Literatúra

[1] PLÁN OBNOVY SLOVENSKEJ REPUBLIKY, 2021, *Kompletný plán obnovy*, Dostupné z: <https://www.planobnovy.sk/kompletny-plan-obnovy/>

[2] POMPURI, L., CAPUTO, P., VALSANGIACOMO, C. Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions, In: *Sustainable Cities and Society*, Volume 42, 2018, p. 100-106, ISSN 2210-6707.

[3] JIRÁNEK, M., HONZÍKOVÁ, M. Protiradonové izolace. Radon stavební souvislosti I. Praha: ČVUT 2017, s. 5-26 ISBN 978-80-01-05023-1.

[4] HAJO, Z., SHANNOUN, F., WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective, Ženeva: WHO Press 2009, p.100, ISBN 978 92 41547673.

[5] COLLIGNAN, B., PONNER, E., MANDIN, C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics, In: *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, p. 124-130, ISSN 0265-931X.

[6] MILNER, J., SHRUBSOLE, C., DAS, P., JONES, B., RIDLEY, I., CHALABI, Z. et al. Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study, Londyn 2014.

[7] PRANA 150 PREMIUM, Dostupné z: <https://www.pranacz.cz/prana-150-premium/>

[8] BUJNOVÁ, A. Porovnanie výsledkov kontinuálnych meraní 222Rn, Študentská vedecká konferencia 2007. Bratislava: 2007, s. 9,

[9] ALPHAGUARD - RADON MONITOR, Dostupné z: <https://www.bertin-instruments.com/product/radon-professional-monitoring/radon-alphaguard/>

[10] AKBARI, K., ÖMAN, R. Radon Mitigation using Heat Recovery Ventilation system in a Swedish Detached House. WSEAS Transactions on Environment and Development (2012), vol. 8, p. 73-82. E-ISSN: 2224-3496.

[11] BURGHELE, B.D., et al, Comprehensive survey on radon mitigation and indoor air quality in energy efficient buildings from Romania, Science of The Total Environment, Volume 751, Bukurešť 2020, p. 1-9 ISSN 0048-9697

Silvia Križanová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: štvrtý

DYNAMICKÉ ZASKLENIA S MIKROTIENIDLAMI

DYNAMIC GLAZING WITH MICROSHUTTERS

Abstract

The building envelope has a strategic position in the environmental and energy performance of buildings with a direct impact on the quality of internal comfort. The requirement to balance different needs in terms of energy and lighting leads to the use of new generation products. In the current progress of heat-insulating glazing, it is necessary to supplement these glazing with features to allow optimization of amount of light and heat fluxes, which will improve the conditions of the internal environment and significantly affects the energy consumption of the building. Dynamic glazing systems use intelligent materials, they are also called intelligent or smart glazings. These highly innovative glazing systems use the application of special technologies such as nanomaterials or smart materials. Glazings with microshutters are considered active dynamic glazing and can be controlled remotely based on user requests.

Kľúčové slová / Key Words

dynamické zasklenie; aktívne dynamické zasklenie; zasklenie s mikrotienidlami; mikrotienidlá;

1. Úvod

Budovy sú komplexné systémy, ktoré vykazujú veľkú spotrebu primárnej energie a generovanie množstva rôznych druhov odpadu a znečistenia. V súčasnom vývoji klimatických podmienok budovy zaznamenávajú značné tepelné zisky cez transparentné časti obvodového plášťa. Budovy a jej užívateľov môžeme pred prehrievaním vnútornej klímy chrániť viacerými opatreniami. Vždy je dôležitý správny koncept pri návrhu objektu, ktorý zohľadňuje celoročný režim fungovania budovy vzhľadom na klimatické podmienky. Transparentné konštrukcie sú prvkom obvodového plášťa, ktorý môže v značnej miere prispievať k zvyšovaniu teploty vnútornej klímy v teplých a horúcich ročných obdobiach. Transparentné prvky obalového plášťa sú preto jedným z zásadných fragmentov účinnej solárnej ochrany budov.

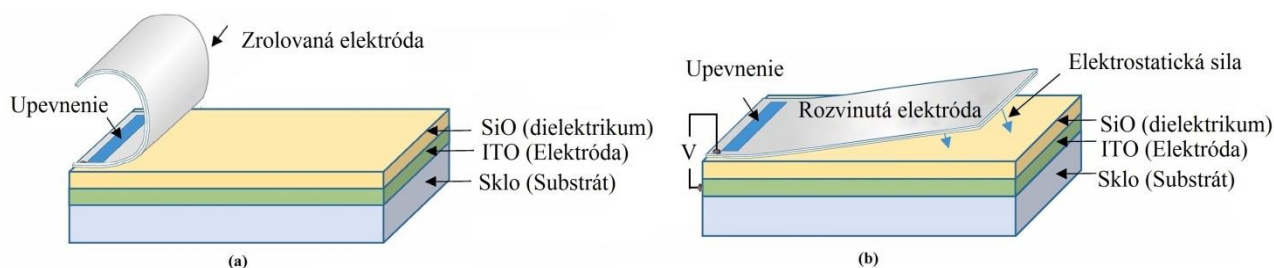
Typ použitého tieniaceho opatrenia má vplyv na dostatok denného svetla, tepelné pohodlie a úroveň vizuálneho komfortu. Slnecná ochrana by nemala značne znižovať hodnotu denného osvetlenia interiéru budovy, ale má zabrániť vzniku nadmerného oslnenia užívateľov v priestore a nadmerným tepelným ziskom. Zasklenie s mikrotienidlami je typom aktívneho dynamického zasklenia založeného na technológii mikroelektromechanického systému. Vo všeobecnosti zasklenie s mikrotienidlami pozostáva z mnohých pohyblivých mikrozrkadiel, ktoré sú miniaturizované do rozmerov, ktoré nemožno jednotlivito identifikovať voľným okom. Každé jednotlivé mikrozrkadlo funguje ako mikrotienidlo. Súbor mikrozrkadiel pracuje súčasne na modulácii priepustnosti a odrazu svetla pomocou elektrostatického ovládania za rôznych podmienok elektrického predpätia [1].

¹ Silvia, Križanová, Ing. Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave Radlinského 11, 810 05, Bratislava. e-mail: silvia.krizanova@stuba.sk

2. Princíp prevádzky zasklenia s mikrotienidlami

Systém mikrotienidiel je miniaturizovaný súbor mnohých jednotlivých mikrozakdiel umožňujúci moduláciu a riadenie priepustnosti jednotlivých zložiek slnečného žiarenia. Vďaka mikrórovej veľkosti sú uzávery menej náchylné na nežiaduce zotrvačné sily a gravitáciu ako štruktúry makro veľkosti, čo vedie k dlhej prevádzkovej životnosti s dobrou mechanickou stabilitou.

Typické mikrotienidlo pozostáva z dvoch hlavných komponentov, ktorými sú tuhá priehľadná elektróda (ITO) aplikovaná na substráte a flexibilná zrkadlová elektróda v bimorfnej štruktúre vytvorenej z dvoch aktívnych vrstiev s rôznou tepelnou rozťažnosťou. Bez použitia elektrického napätia je jeden koniec flexibilnej zrkadlovej elektródy pripevnený k dielektriku, zatiaľ čo druhý koniec zostáva v zrolovanom stave, obr. 1a). Po aplikácii elektrického napätia medzi zrkadlovú elektródu a priehľadnú elektródu ITO sa flexibilná zrkadlová elektróda rozvinie, obr. 1b). Zvinutie ohybnej zrkadlovej elektródy otvorí otvor, ktorý umožní dosiahnutie číreho stavu. Rozvinutím zrkadlovej elektródy sa otvor uzavrie, čo umožňuje dosiahnutie tmavého reflexného stavu [1].

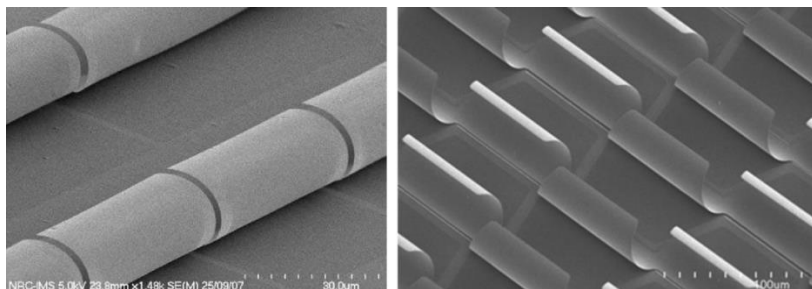


Obrázok 1: Schematické zobrazenie princípu prevádzky zasklenia s mikrotienidlami [1].

Zasklenie je možné diaľkovo ovládať na základe požiadaviek používateľov. Mikrotienidlá môžu mať rôzne tvary a boli skúmané viacerými inštitúciami pre rôzne aplikácie. Typy mikrotienidiel opísané v tomto článku sú určené na použitie pri riadení priepustnosti svetla pomocou mikrotienidiel založených na princípoch zvinuteľných elektród a mikroelektromechanických systémov (MEMS) [2].

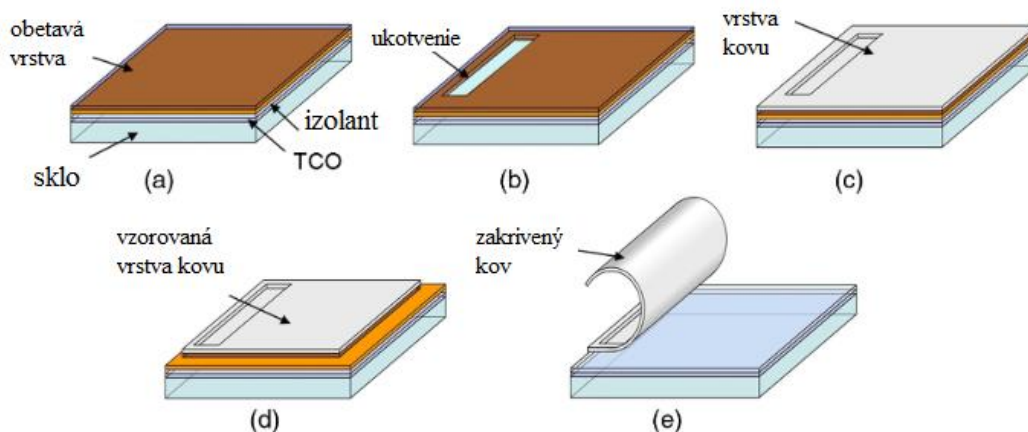
3. Mikroelektromechanické systémy mikrotienidiel MEMS (Microelectromechanical System Microshutters)

MEMS sa často nazývajú aj mikrosystémová technológia, v súčasnosti sú používané v rôznych typoch produktov.



Obrázok 2: Skenovací elektrónový mikroskopický (SEM) obraz poľa trapézových mikrožalúzií vyrobených v NRC [2], [3]. Mikrožalúzie sú mikrotienidlá vyvinuté kanadskou Národnou radou pre výskum (NRC).

Väčšina zariadení MEMS sa vyrába, prípadne je postavená na kremíkových (Si) substrátoch, s určitou výnimkou na sklenených substrátoch. MEMS majú zvyčajne mobilnú časť, ktorá je aktivovaná buď externými silami (tlak, pohyb a pod.), alebo vnútornými silami. Mikrospínače majú mobilnú elektródovú reguláciu. Posledná nanosená vrstva (vrstvy) sa po vyleptaní povrchovej alebo uvoľňovacej vrstvy stane voľne stojaca alebo mobilná. Pri pôsobení napätia medzi spodnou a hornou elektródou sa horné elektródy rozvinú nadol na povrch, čím blokujú priepustnosť svetla.



Obrázok 3: Typická výrobná schéma pre mikrotienidlá [2]:

- a) sklený substrát potiahnutý TCO, b) vzorovanie a leptanie uvoľňujúcej vrstvy, c) nanášanie hornej elektródy, d) vzorovanie geometrie mikrotienidiel leptaním hornej elektródy, e) uvoľnenie mikrotienidiel odstránením uvoľňujúcej vrstvy.

Spodná elektróda je zvyčajne priehľadný vodivý oxid TCO, ako je napríklad oxid indiu a cínu ITO, oxid ciničitý SnO_2 , oxid zinočnatý ZnO , alebo vodivé vrstvy na báze striebra Ag. Tieto vrstvy čiastočne znižujú priepustnosť viditeľného svetla, niektoré z nich môžu tiež významne znížiť priepustnosť blízkeho infračerveného žiarenia. Izolačná alebo dielektrická vrstva (vrstvy) sú väčšinou z oxidu kremičitého SiO_2 (bežné dielektrikum pre mikroelektroniku), prípadne sa používa oxid hlinitý Al_2O_3 a polyméry. Uvoľňujúca vrstva sa potom uloží na dielektrikum. Akonáhle je uvoľňujúca vrstva odleptaná, horná elektróda sa stane voľne stojacou a mobilnou. Výber materiálov je tiež rozhodujúci pre všeobecnú spoľahlivosť zariadenia, napríklad stabilitu v chemickom prostredí (vlhkosť, kyslík), teplotné cykly, vystavenie UV žiareniu, pre dlhodobú spoľahlivosť a pod. V tomto kontexte sa tvrdé anorganické materiály s vysokou teplotou topenia často uprednostňujú pred menej stabilnými materiálmi. Niektoré technológie dynamického zasklenia, ktoré sú citlivé na UV žiarenie obsahujú v skladbe UV blokujúce vrstvy [4].

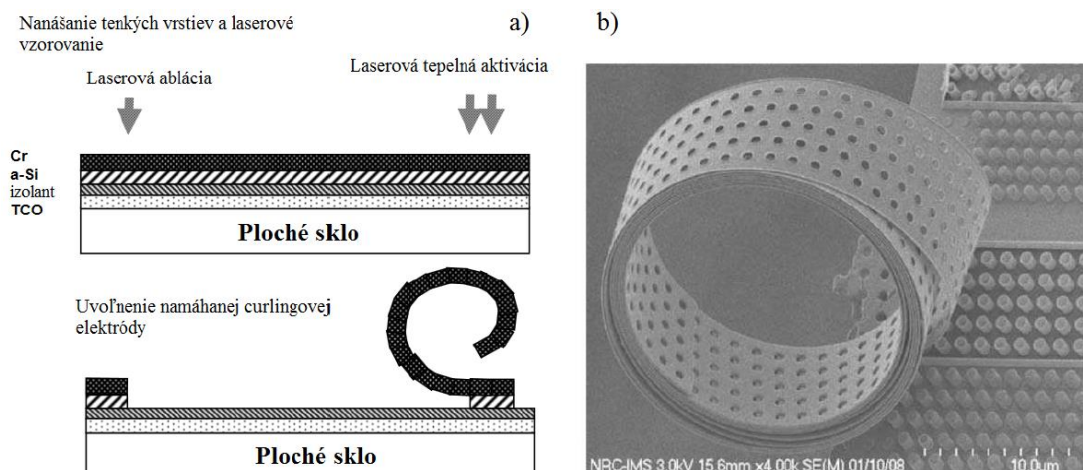
3.1 NVMG (New Visual Media Group, United States)

Jedným z úspešných príkladov MEMS je výsledok spoločnosti New Visual Media Group, ktorá vyvinula mikrotienidlá založené na zmrštitel'ných polymérových fóliách [1], presnejšie na zmrštitel'nej polymérnej laminácii pomocou valcov [4]. Veľkosť je rádovo v milimetroch. Zariadenia pracujú na základe elektrostatických síl odvíjajúcich sa od mobilnej elektródy, rovnakej ako u bežných mikrotienidiel. Sú jediným komerčne dostupným riešením pre aplikáciu na veľkých plochách. Horná elektróda je založená na zmrštitel'nom polyméri (hrúbka 1 až 5 μm). Po zvinutí do zvitkov s viacerými závitmi je ich priemer okolo 1 až 5 mm alebo väčší. Dielektrikum na báze polyméru je hrubé 4 až 10 μm . Prevádzkové napätie sa zvyčajne pohybuje medzi 100 a 500 V [4].

3.2 NRC (National Research Council Canada)

Mikrotienidlá od NRC (National Research Council Canada) sa nazývajú mikrožalúzie. Mikrožalúzie sú zvinuté elektródy aktivované napätím, majú veľkosť niekoľko mikrometrov, pre oko sú neviditeľné. Sú na materiálnej báze rôznych TCO. Požadovaný gradient napätia v hornej elektróde sa získa pomocou magnetronového rozprašovania. Dielektrikum je optimalizované pre zlepšenie spoľahlivosti. Tenká povrchová vrstva kremíka Si hrubá 40 nm a tenká horná elektróda umožňujú mikrožalúziám pracovať pri relatívne nízkom napätí. Prevádzkové napätie sa pohybuje v rozpätí 30 – 50 V. Ich výrobná schéma je pomerne jednoduchá, nákladovo efektívna. Mikrožalúzie vykazujú uzavretý stav až 99,9 %.

Po vizuálnej stránke sa prejavuje slabý odtieň súvisiaci s vrstvou TCO, môže byť veľmi minimálny. Okrem toho je možné vzhľad v otvorenom a zatvorenom stave prispôbiť podľa voľby používateľa. Zahmlenie alebo rozptyl je minimálny. Maximálna hodnota transmitancie viditeľného svetla je približne 65 % a infračerveného žiarenia približne 60 %. Mikrožalúzie nie sú nepriehľadné, sú reflexné. Mikrožalúzie sú vyrobené z anorganických materiálov s vysokou teplotou tavenia, preto sú veľmi odolné voči zmenám teploty. V súčasnosti prebiehajú ďalšie práce zamerané na vylepšenie systému [4], [5].

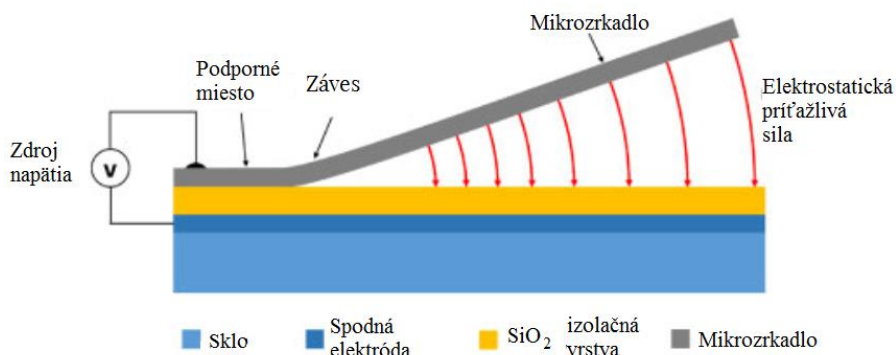


Obrázok 4: Zobrazenie: a) schematické zobrazenie princípu prevádzky zasklenia s mikrotienidlami, b) SEM obraz namáchaných vrstiev chrómu [5].

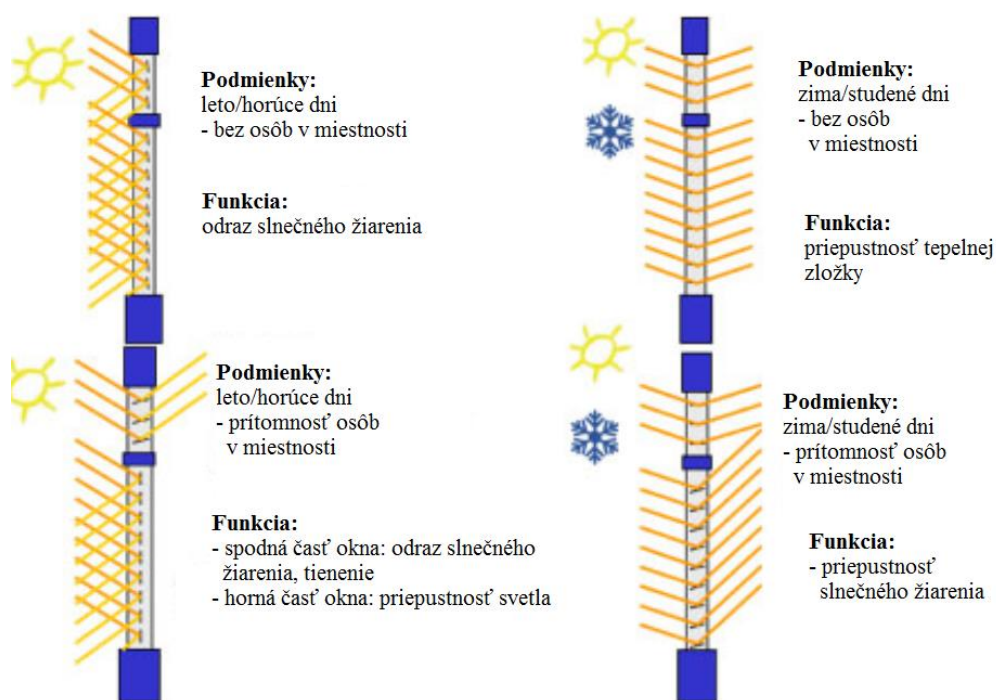
3.3 Univerzita Kassel

Univerzita Kassel v Nemecku vyvíja optické zrkadlá MEMS pre reguláciu denného svetla. Sú to mikrotienidlá s ohybnými závesmi a plochým mikrozrkadlom, obr. 8 b). Systém je založený na mikrozrkadlových poliach MEMS [6]. Mikrozrkadlá sú ovládané elektrostatickým napätím 40 – 100 V [2]. Rozmerovo sú zmenšené tak, aby ich nebolo možné identifikovať voľným okom vo vzdialenosti nad 20 cm od zasklenia. Napriek použitiu mechanicky mobilných častí patria medzi výhody systému dlhá životnosť a nižšia spotreba energie ako pri väčšine aktívnych dynamických systémov. Svetlo nie je absorbované, ale odráža sa od povrchu, nemení sa spektrum slnečného žiarenia. Podľa potreby sa zrkadlá nakláňajú pod rôznymi uhlami pomocou elektrostatickej premeny. Mikrozrkadlá majú veľkosť menej ako 0,1 mm². 1 m² sa skladá z až 12 000 000 zrkadiel. Správajú sa podobne ako mechanické žalúzie, ktorých lamely sa dajú elektricky otvárať a zatvárať. Vďaka inteligentnému riadiacemu systému založenému na senzoch je možné reagovať na takmer všetky podmienky osvetlenia. Dve elektródy (zrkadlová a priehľadná spodná elektróda) sú predpäté. Zmenou predpätia (elektrostatické ovládanie) vytvára elektrostatický príťažlivý moment a elastický protimoment závesu inú rovnováhu momentov, ktorá vedie k inému uhlu ovládania. V závislosti

na elektrostatickom aktivačnom napätí medzi hliníkovými Al zrkadlami a priehľadnou elektródou na podklade (vyrobeného z ITO, oxidu zinočnatého ZnO alebo 5 nm silnou vrstvou striebra Ag obsiahnutou v povlakoch s nízkou emisivitou) je možné dosiahnuť rôzne uhly zrkadiel vyvážením elektrostatickej príťažlivosti a elastickeho odpudzovania [6].



Obrázok 5: Princíp fungovania systému, rez zrkadlom [6].



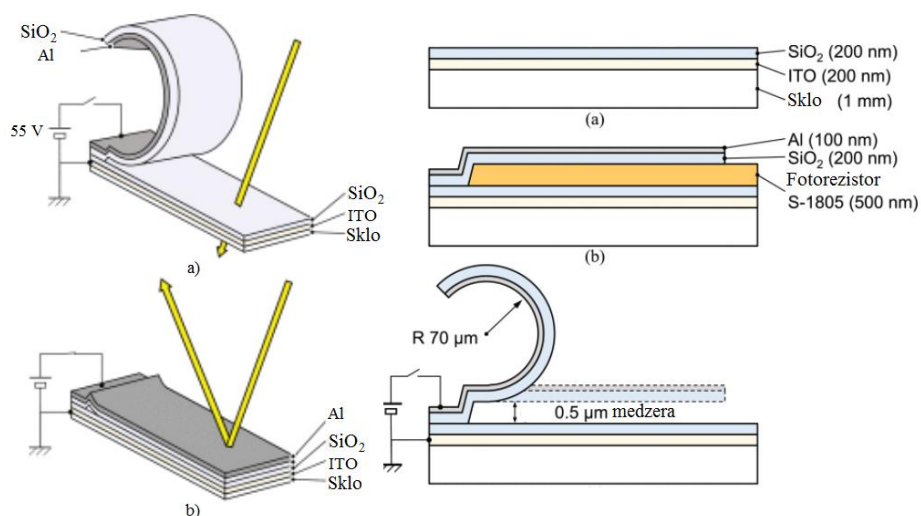
Obrázok 6: Letná a zimná prevádzka, miestnosť bez a za prítomnosti užívateľa [6].

3.4 Univerzita v Tokiu

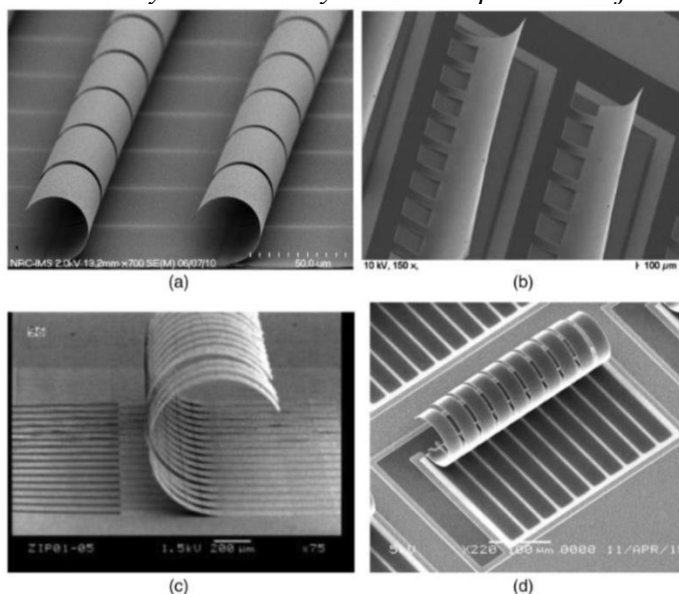
Na univerzite v Tokiu [7] vyvinuli elektrostaticky rekonfigurovateľné zvinovacie pole mikrotienidla. Systém je navrhnutý ako nastaviteľné tienidlo na riadenie prichádzajúceho slnečného žiarenia cez okná. Systém je elektrostaticky uzavretý pri 55 V a uvoľnený pri 38 V. Mechanická clona sa pohybuje v rozmedzí 0% – 55%. Optická priepustnosť je riadená medzi 36% v zatvorenom stave a 53% v otvorenom stave.

Zariadenie je vyrobené na sklenenom podklade kvôli optickej priehľadnosti. Po aplikácii napätia medzi nosným hliníkom a podkladovou priehľadnou elektródou ITO, je listová clona vťahovaná a

sploštená na podklad, nastáva uzavretie optickej clony. Zariadenie pozostáva zo skleného substrátu s vrstvami ITO, oxidu kremičitého a hliníkovej fólie. SEM fotografia zariadenia je zobrazená na obr. 8 d). Elektromechanická odozva bola nameraná v hodnote 3 ms [8].



Obrázok 7: Štruktúra zariadenia [7]: a) elektróda na elektrostatickú prevádzku je vyrobená z oxidu india a cínu (ITO) rozprašovaného na sklenenom substráte, povrch je izolovaný oxidom kremičitým. b) fotorezistor sa používa ako uvoľňujúca vrstva na uvoľnenie uzávierky. Po uvoľnení sa list uzávierky z dôvodu zvyškového napätia zroluje.



Obrázok 8: SEM fotografie zasklení s MEMS [4]: a) NRC, b) Univerzita Kassel c) INO (Institut National d'Optique, Canada), systém nie je zameraný pre aplikáciu na veľké plochy, d) Univerzita Tokio

4. Záver

Hlavným obmedzením pri komercializácii zasklenia s mikrotienidlami (mikrožalúziami) sú vysoké náklady vyplývajúce z procesov výroby mikrovzorovania. Väčšina z nich využíva drahé mikroelektronické výrobné procesy, ako je litografia s nanotlačou, plazmové leptanie, odparovanie elektronickým lúčom a magnetronové naprašovanie. Ku väčšej miere komercializácie mikrotienidiel

vo veľkoplošných okenných paneloch je nevyhnutné hľadať alternatívne nízkonákladové výrobné procesy. Inštalácia systému regulácie slnečného žiarenia v budovách je sľubným prístupom k zníženiu spotreby energie [1].

V posledných rokoch bolo vyvinutých niekoľko systémov založených na rôznych materiálových bázach. MEMS sú obzvlášť sľubné z dôvodu svojej účinnosti, jednoduchosti dizajnu, rýchlosti spínania, prevádzky bez zafarbenia či nízkej spotreby energie. Nevýhody MEMS sú napríklad náklady na výrobu veľkých plôch, vizuálne rušenie spojené s prípadným problémom dlhodobej spoľahlivosti, kedy sa mikrotienidlá po veľkom počte cyklov nedokážu zrolovať a sú viditeľné ako nepriehľadné čiarky. Konvenčné riešenia statickej regulácie slnečného žiarenia neumožňujú optimalizáciu solárnych ziskov a denného osvetlenia. Dynamické zasklenia, ako popísané zasklenia s mikrotienidlami, umožňujú reguláciu a moduláciu optických vlastností zasklenia a ponúkajú tieniace riešenia s priamou kontrolou nad vplyvom solárnych ziskov.

Literatúra

[1] TONG S.W, Goh, W.P., HUANG X., JIANG CH.: A review of transparent-reflective switchable glass technologies for building facades. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, vol. 152, 111615. [cit. 9.10.2022].

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111615>

[2] LAMONTAGNE, B., FONG, N.R., SONG, IN,-H., MA, P., BARRIOS, P., POITRAS, D. *Review of micro-shutters for switchable glass*. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS [online]. 2019, vol 18 (4), 040901. [cit. 25.4.2021].

Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/336348842_Review_of_micro-shutters_for_switchable_glass#pfa

[3] LAMONTAGNE, B., BARRIOS, P., PY, CH., SUWAS, N. *The next generation of switchable glass: the micro-blinds*. NRC Publication Archive [online]. 2009, vol 18, 040901. [cit. 26.4.2021].

Dostupné z: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=6c7d2744-b6af-47fd-9a51-9b5c6a2f48ad>

[4] NUNES. D., a kol. *Metal Oxide Nanostructures. Synthesis, Properties and Applications*. Elsevier. [online]. 2019. s. 103-147. [cit. 15.4.2021]. ISBN 978-0-12-811512-1.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01647-9>

[5] GRANQVIST, C., G. *Introduction*, in: GRANQVIST, C., G. *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*. Elsevier Science. Amsterdam. 1995. s. 1-15. ISBN 978-0-444-89930-9.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89930-9.X5000-4>

[6] MORI, K., MISAWA, K., IHIDA, S., TAKAHASHI, T., FUJITA, H., TOSHIYOSHI, H. A MEMS Electrostatic Roll-up Window Shade Array for House Energy. In Japanese Journal of Applied Physics [online]. 2018, vol. 57, 08PA07. [cit. 26.4.2021].

Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.57.08PA07/pdf>

[7] HILLMER, H., AL-QARGHOLI, B., KHAN, M., M., WORAPATTRAKUL, N., WILKE, H., WOITD, C., TATZEL, A. Optical MEMS-based micromirror arrays for active light steering in smart Windows. In IEEE Photonics Technology Letters [online]. 2016, vol 28, s. 593-596. [cit. 27.4.2021].

Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7377047>

[8] GRANQVIST, C. 16 - Fenestration for reducing building cooling needs: an introduction to spectral selectivity, thermochromics, and electrochromics. In: PACHECO-TORGAL, F., a kol. *Nanotechnology in Eco – efficient Construction. Materials, Design, Properties and Applications*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Elsevier. [online]. 2015. s. 441-471. [cit. 11.4.2021]. ISBN 978-1-78242-380-5.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00016-9>

Simona Michalisková¹

Študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 3.

VYHODNOTENIE MIERY ÚČINNOSTI TECHNOLOGIE PREVETRÁVANÝCH PODLÁH

EVALUATION OF THE EFFICIENCY RATE OF VENTILATED FLOOR TECHNOLOGY

Abstract

All buildings and construction structures degrade over time due to age, but also due to insufficient or no maintenance, which results in their loss of service life. Inconveniences caused by moisture do not only occur in historic buildings and objects with a lack of functional waterproofing, but increasingly also in new buildings. Moisture then results not only in the degradation of the building envelope, but also in the increase of heat losses. The technology of floor ventilation, in particular its efficiency, is underestimated and usually used as an ancillary in combination with another method. The paper deals with the degree of effectiveness of remediation technology fighting rising moisture and the subsequent destruction of individual structural elements.

Kľúčové slová / Key Words

sanácia, odvetrávací systém, vzduchová dutina, vlhkosť, protivlhkostná analýza

1. Úvod

Všetky stavby a stavebné konštrukcie postupom času degradujú vekom, ale taktiež aj vplyvom nedostatočnej alebo žiadnej údržby, čo má za následok ich úplnú alebo čiastočnú stratu životnosti. To, že sa s problematikou vlhkosti ľudstvo stretáva od nepamäti svedčí aj architekt Vituvius [1], ktorý opisuje boj proti vlhkosti.

Nepríjemnosti, zapríčinené vlhkosťou, nastávajú nielen pri historických stavbách a objektoch s chýbajúcou funkčnou hydroizoláciou, ale objavujú sa aj novostavby, ktorých návrhy boli v tomto smere podcenené, čo zapríčinilo celý rad porúch. Vlhkosť má potom za následok nielen rozpad muriva a stavebných materiálov, ale aj zvyšovanie tepelných strát. Taktiež javy sprevádzajúce vlhkosť, ako napríklad plesne, spóry, spôsobujú rôzne respiračné ochorenia osobám, ktoré tieto priestory dlhodobo užívajú [2].

V tomto prípade je nutné pristúpiť k obnove konštrukcií aplikáciou rôznych technológií a metód. Novodobé technológie sú často založené na starších princípoch, ktoré nám v kombinácii s modernými technológiami a materiálmi umožňujú dosiahnuť pozitívne výsledky. Tie potom majú za následok zastavenie vlhnutia konštrukcií, a tiež odstránenie solí nachádzajúcich sa na povrchu konštrukcií.

¹ Simona Michalisková, Ing., Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Preto je potrebné zamerať sa na účinnosť metódy, ktorej realizácia nenaruša integritu objektov a je nutné stanoviť, či daná technológia bude schopná účinne bojovať proti vlhkosti v stavebnej konštrukcii.

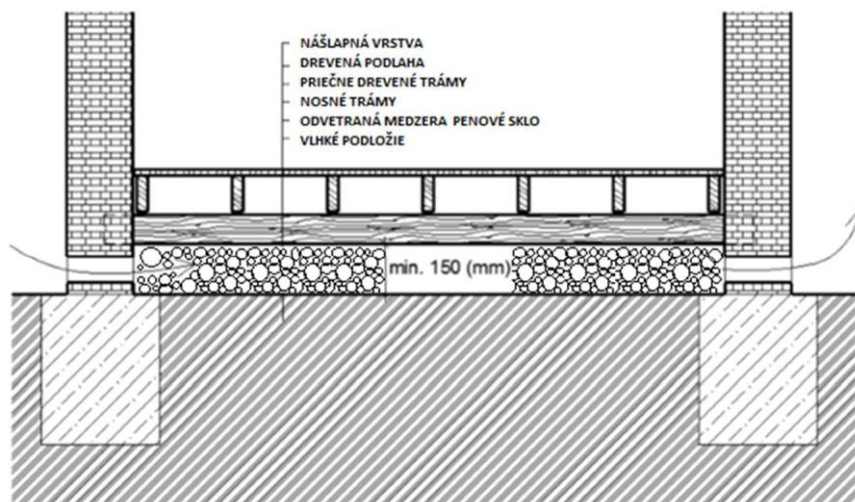
2. Princíp fungovania a prehľad doterajších poznatkov o skúmanej metóde

Metóda prevetrávaných podláh, bola používaná už v staroveku, je nenáročná na realizáciu, a taktiež výrazne nenaruša konštrukciu objektu. Stala sa obľúbenou na Krajskom pamiatkovom úrade, nakoľko nedochádza k porušeniu stien, ktoré sú zdobené vzácnyimi maľbami a podobne. Taktiež je vhodná z hľadiska statiky keďže nedochádza k radikálnemu zásahu do konštrukcie, prípadným otrasom počas jej realizácie.

Pointa prúdenia vzduchu spočíva v správnom umiestnení prevetrávanej vrstvy medzi plochu zeminy a vnútornú časť podlahy. Ideálnym stavom je, ak vzduch prúdi malou rýchlosťou tak, aby boli minimálne straty unikajúceho tepla z odvádzajúcich otvorov. Pre odvod vlhkosti z konštrukcie je postačujúce už veľmi pomalé prúdenie vzduchu. Vzduchová dutina tak umožní odvieť vlhkosť ešte skôr, ako začne kondenzovať [3].

Hnacím pohonom zaisťujúcim presun vlhkosti z konštrukcie je pohyb vzduchu vyvolaný teplotným gradientom, teda teplotným rozdielom medzi vzduchovými časticami vetranej vrstvy a okolitou atmosférou. Na častice vzduchu pôsobia archimedové vztlačové sily, ktoré so stúpajúcou teplotou nadobúdajú nižšiu hustotu, na čo sa začnú samovoľne pohybovať smerom hore. Povrchy v prevetrávanej vrstve majú rozdielnu teplotu ako vzduch v tejto vrstve. Ohrevom od podlahy (predovšetkým v zimnom období a nočných hodinách) je znížená hustota vzduchu v medzere, ten je potom redší a stúpa k vyššie položeným výstupným otvorom. Počas tohto deja je stúpajúci vzduch nahrádzaný rovnakým množstvom chladnejšieho vzduchu, ktorý je nasávaný nižšie položeným vstupným otvorom [4] [5]. Pokiaľ správne dodržíme návrh a umiestnime výstupné otvory v dostatočnom prevýšení nad vstupné otvory, prúdenie bude zaistené vplyvom kladného prebytku tepla voči okolitému vzduchu. Pri určitých typoch stavieb (historické stavby, pamiatkové objekty) nie je vždy možné zabezpečiť dostatočné prevýšenie otvorov a je potrebné zabezpečiť ďalšie opatrenia, či mechanizmy podporujúce prúdenie vzduchu [6]. Vhodným riešením tak môže byť napríklad umiestnenie otvorov podľa prevládajúceho vetra. Privádzacie otvory sa osadia na náveternú stranu. Keď jednu stranu označíme za privádzajúcu a druhú za odvádzajúcu, výsledný tlakový rozdiel v medzere spôsobený vetrom, bude rozdiel tlakov medzi privádzajúcou a odvádzajúcou stranou. Tento tlak tak vyvolá prúdenie v medzere. Proti prúdu vzduchu naopak pôsobia odporové sily. Tieto tlakové straty môžu byť vyvolané trením na povrchu prevetrávanej vrstvy, či lokálnymi odpormi. Tými sú rôzne prekážky ako mriežky na vstupných a výstupných otvoroch. Poslednou možnosťou ako s istotou dosiahnuť prúdenia vzduchu je nútené vetranie. Nútené vetranie je zaistené pomocou ventilátora, ktorý je využívaný v prípadoch, kedy by prúdenie vzduchu prirodzenou cestou nefungovalo. Celý systém je však potom závislý na dodávke elektrickej energie. V prípade, kedy je potrebná maximálna účinnosť (vysušenie spodnej stavby po povodni), môže byť využitý ohrievač vzduchu, avšak cena nákladov na realizáciu je samozrejme vyššia [7].

Prevetrávaná vrstva bude vyplnená sklopenovým granulátom. Jedná sa o progresívny spôsob využitia prevetrávanej vrstvy, pri ktorom vieme dosiahnuť lepšie tepelnoizolačné vlastnosti podlahy. Technológia taktiež napomáha k eliminácii tepelných mostov, tepelným stratám cez podlahu a zníženiu nákladov na prevádzku budovy.



Obrázok 1: Znáznornenie prúdenia vzduchu vo vetranej vrstve.

Nakoľko je v súčasnej dobe veľmi dôležité pracovať s recyklovateľnými materiálmi, ktoré majú vhodné tepelnoizolačné vlastnosti, bolo ako výplňový materiál vybrané penové sklo, ktoré je 100 % recyklovaný výrobok zo starého skla. Samotný materiál je taktiež bezo zvyšku recyklovateľný. Hodnota tepelnej vodivosti λ sa pohybuje okolo 0,040 – 0,080 [W/m.K], v závislosti od zhutnenia materiálu. Hmotnosť voľne sypaného sklopenového granulátu je 150-170 kg/m³, taktiež je odolné voči zmrazovaniu a následnému rozmrazovaniu a patrí do triedy požiarnej odolnosti A1. Praktické merania ukazujú, že ani chemické zloženie a vlastnosti materiálu sa časom nemenia. Štruktúra uzavretých pórov znemožňuje prenikaniu vody do materiálu [8].

3. Výsledky doterajšieho výskumu

Metodika výskumu spočívala v analýze nameraných hodnôt, ktoré sú realizované in situ na objekte na juhu Slovenska. Treba dodať, že merania stále prebiehajú a príspevok bude vychádzať z doteraz nameraných výsledkov a je predpoklad, že finálny výstup sa môže čiastočne zmeniť, avšak neočakáva sa výrazná zmena.

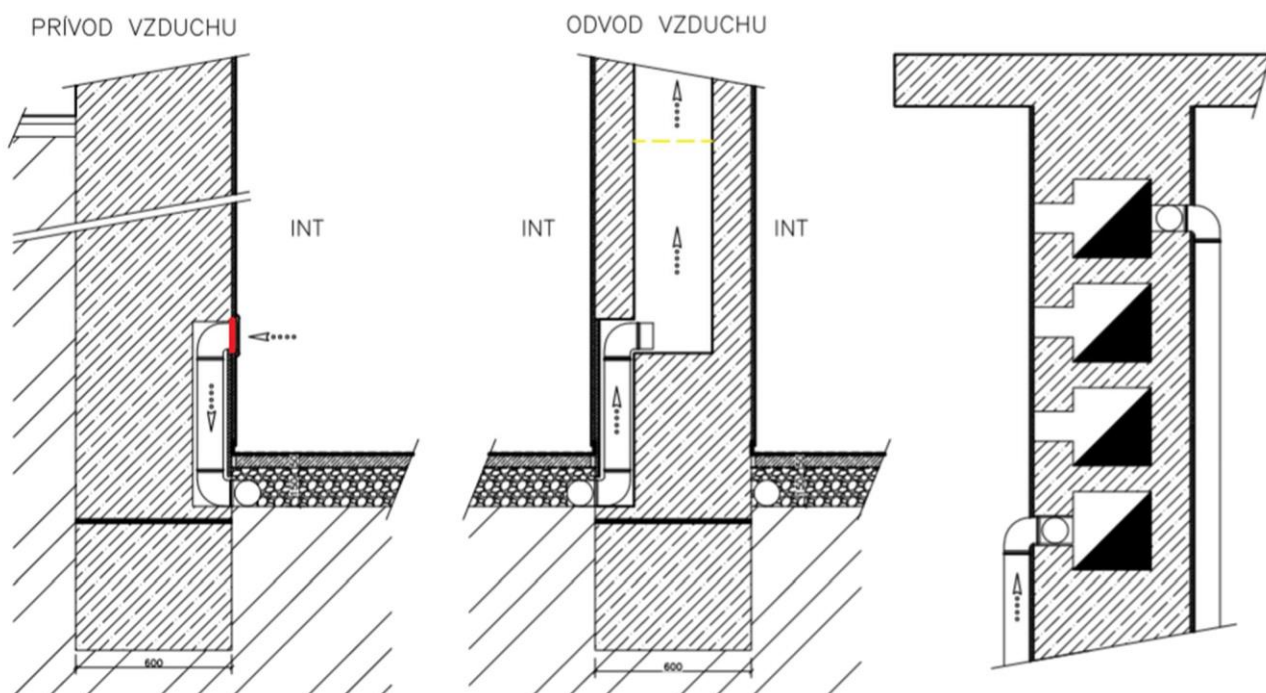
Meranie prebiehalo na objekte bytového domu Okániková 2 v Bratislave. Jedná sa o samostatne stojaci objekt, založený vo svahu na betónových pásoch. Objekt bol postavený v roku 1935 a má 4.NP a 1.PP. Obvodové murivo tvorí plná pálená tehla hr. 450 mm. Suterénne murivo má pôvodnú horizontálnu hydroizoláciu z asfaltovej mazaniny hr. cca 10 mm.

Prvá obhliadka objektu prebehla dňa 29.10.2021. Pri obhliadke sa pristúpilo k niekoľkým posudzovacím meraniam na náhodne vybraných miestach suterénneho muriva, ktoré preukázali povrchovú vlhkosť konštrukcie v rozmedzí od 8,0 % až do 12,0 % hm, čo je veľmi vysoká vlhkosť. Ako hodnotiaci štandard bola zvolená česká norma ČSN P 73 0610 [9], ktorá delí vlhkosť do 5 stupňov (Tab.1).

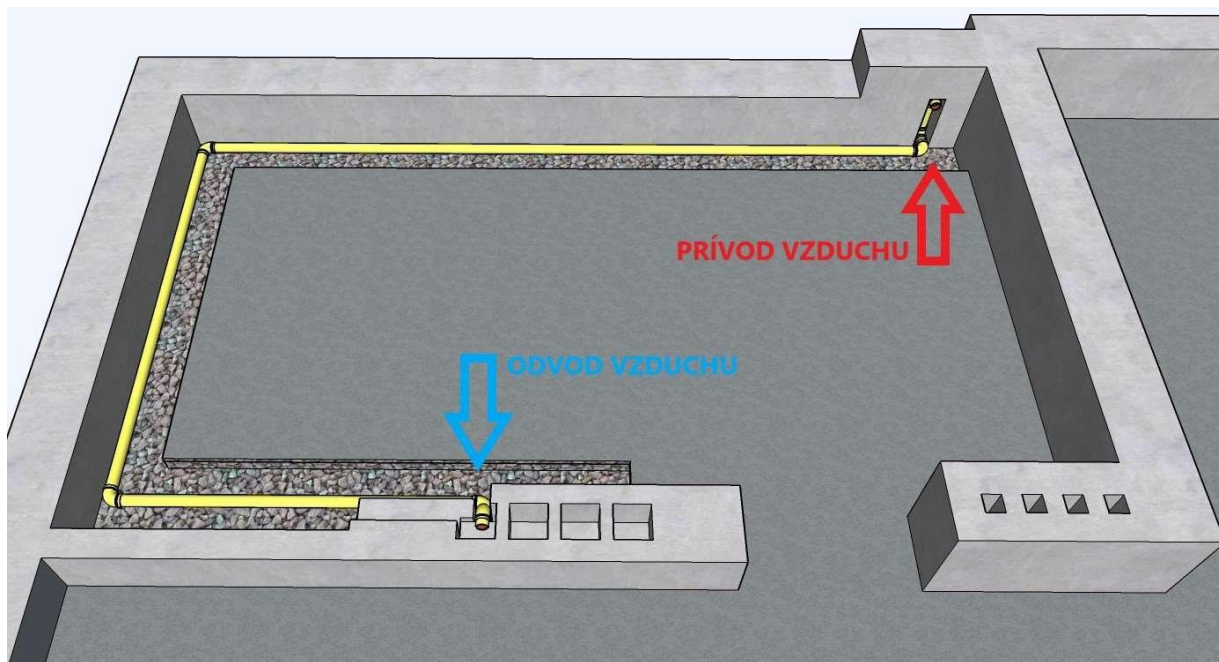
Tabulka 1: Stupne zavlhnutia konštrukcií, ČSN P 73 0610.

	Stupeň zavlhnutia	Vlhkosť muriva w v % hmonosti
1	veľmi nízka vlhkosť	$w < 3$
2	nízka vlhkosť	$3 < w < 5$
3	zvýšená vlhkosť	$5 < w < 7,5$
4	vysoká vlhkosť	$7,5 < w < 10$
5	veľmi vysoká vlhkosť	$w > 10$

V tomto období bola taktiež ukončená realizácia sanačných prác počas ktorých boli vyhotovené nové sanačné omietky. Za účelom odvetrania podláh boli vo vnútornej časti obvodového muriva umiestnené drenážne hadice s priemerom 100 mm, pričom jeden koniec hadice bude napojený na nasávací otvor umiestnený v drážke muriva cez tvarovky PVC. Nasávací otvor veľkosti 150x150 mm je umiestnený 200 mm nad úrovňou podlahy a prekrytý mriežkou proti hmyzu. Druhý koniec drenážnej hadice je zaústený do komínového prieduchu a slúži na odvádzanie nasávaného o vzduchu z priestoru pod podlahou. V objekte sú realizované dva takéto samostatné odvetrávacie okruhy. Podlahový priestor je vyplnený granulátom z penového skla v hrúbke 150 mm. Následne bola položená mPVC fólia hrúbky 0,5 mm, povrch sa zalial vyrovnávacím betónom a bola položená hydroizolácia z asfaltových pásov.



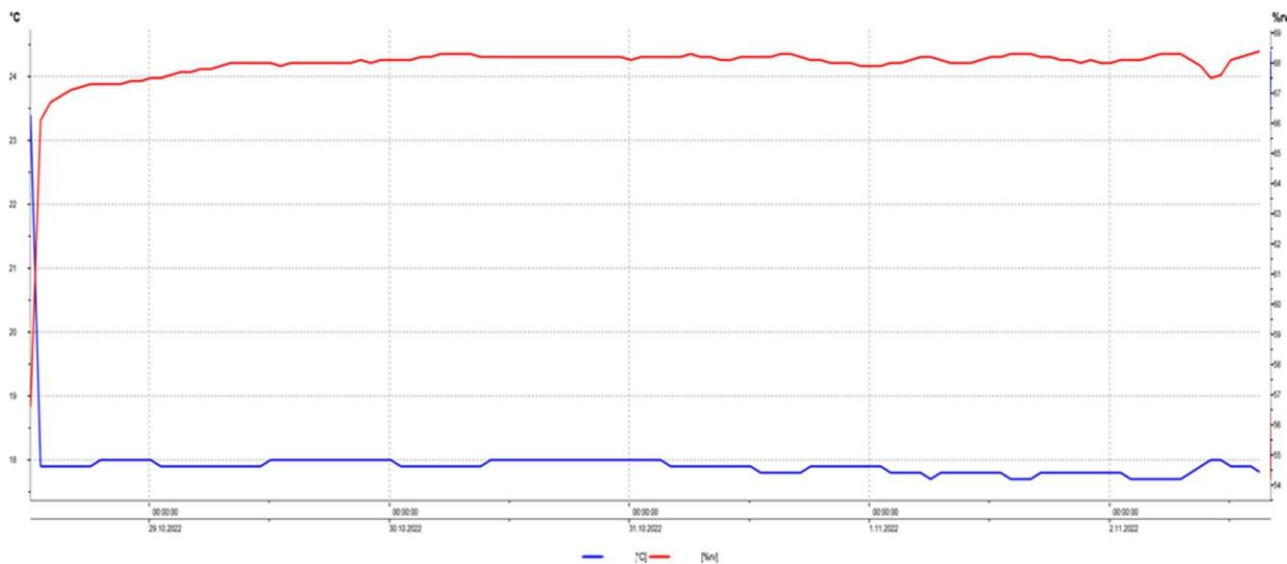
Obrázok 2: Detaily napojenia drenážneho potrubia, kde červená a žltá čiara zobrazujú úroveň merania.



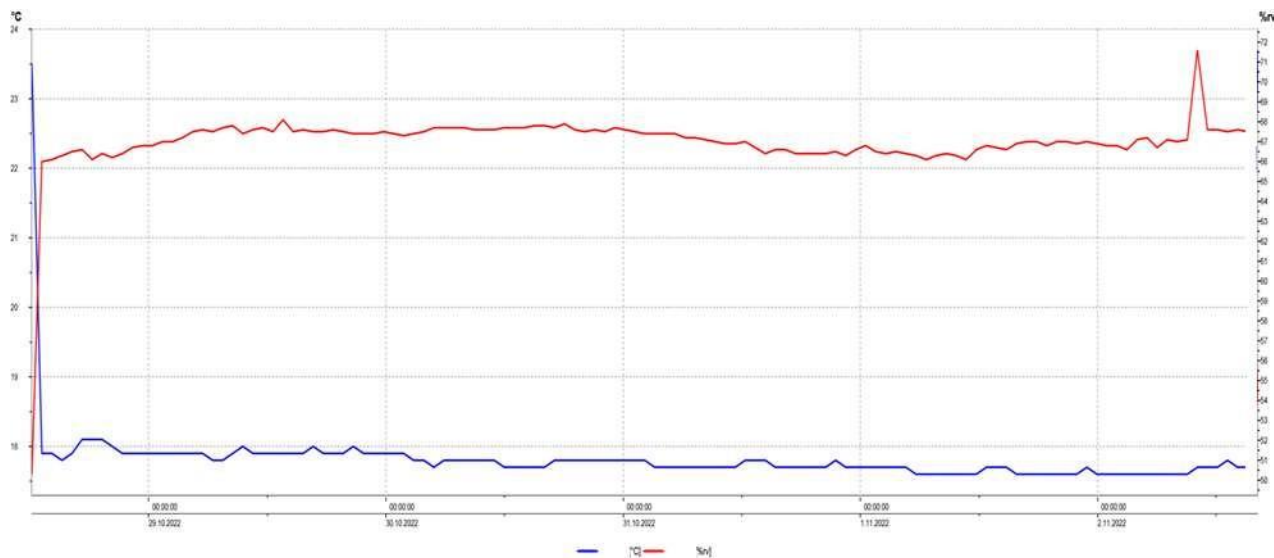
Obrázok 3: Sanovaný priestor s vyznačením prívodu a odvodu vzduchu. Odvod vzduchu vyústený do existujúceho komína.

Prvé merania prebiehali v dátumoch od 28.10.2022 do 02.11.2022, pričom boli merače teploty a vlhkosti (TESTO 174-H) osadené v odvádzacom otvore vo výške 1,2 m (Obrázok 2) a nasávacom otvore. Namerané hodnoty počas merania sú uvedené v Tabuľke 2.

Záznamy z merania na Obrázku 4 a 5 znázorňujú teploty vzduchu a priebeh relatívnej vlhkosti, z čoho vyplýva stále prítomná vlhkosť v potrubí.



Obrázok 4: Priebeh relatívnej vlhkosti a teploty vzduchu v období od 28.10.2022 do 02.11.2022 na vstupnom otvore.



Obrázok 5: Priebeh relatívnej vlhkosti a teploty vzduchu v období od 28.10.2022 do 02.11.2022 na výstupnom otvore.

Tabuľka 2: Záznamy vybraných meraní relatívnej vlhkosti a teploty vzduchu.

Dátum	Vstupný otvor		Výstupný otvor	
	°C	% rv	°C	% rv
28.10.'22	17,9	66,1	17,9	66,0
29.10.'22	18,0	67,9	17,9	68,1
30.10.'22	18,0	68,2	17,7	67,7
31.10.'22	17,8	68,2	17,8	66,7
01.11.'22	17,8	68,2	17,7	66,8
02.11.'22	17,9	68,2	17,8	67,5

4. Záver

Nakoľko sa jedná o čerstvú rekonštrukciu, vnútorná relatívna vlhkosť preukazuje vyššie hodnoty spôsobené technologickým vysychaním mokrych procesov. Z analýzy doterajších výsledkov možno konštatovať, že namerané hodnoty uvedené v grafe a tabuľke nepreukazujú účinnosť skúmanej technológie prevetrávanej podlahy, avšak je potrebné zrealizovať dlhodobý výskum, ktorý potvrdí alebo vyvráti účinnosť systému slúžiaceho na odvlhčenie objektu. Z tohto dôvodu sú naplánované pravidelné prieskumné merania vlhkosti na povrchu konštrukcie, ale taktiež aj osadenie sond pre monitoring vlhkosti v konštrukcii. Merania budú prebiehať aj d'alsích objektoch, pri ktorých bola taktiež aplikovaná technológia prevetrávaných podláh. Napomôže to k ujasneniu záveru, či danú technológiu môžeme považovať za funkčnú, účinnú a dokáže zabezpečiť predĺženie životnosti stavebných objektov.

Príspevok môže napomôcť k rozšíreniu poznatkov o technológii prevetrávaných podláh a jej účinnosť skúmanej na konkrétnom objekte.

Pod'akovanie

Predložený príspevok a výskum bol podporený výskumným projektom VEGA č.01/0229/21 - Stavebno fyzikálna podstata budovy s takmer nulovou potrebou energie v kontexte environmentálnych aspektov.

Literatúra

- [1.] M. P. VITRUVIUS, Deset knih o architektuře, Preložil Otoupalík, A., Praha: Svoboda, 1979.
- [2.] H. R. KENWOOD, Dampness in and about houses. Public Health, 5 (1892), 247-250.
- [3.] BOMBERG, M.; TRECHSEL R. Moisture Control in Buildings: The Key Factor in Mold Prevention. 2nd Edition. Baltimore, U.S.A.: ASTM International, 2009. 2nd. ISBN 978-0-8031-7004-9.
- [4.] Moisture Analysis and Condensation Control: in Building Envelopes. 1. vyd. Philadelphia, PA: ASTM in the U.S.A., 2001, s. 221. 1. ISBN 0-80312089-3.
- [5.] STANĚK, K. Stavební fyzika 2: Větraná dutina. In: Fakulta stavební, ČVUT v Praze: Katedra konstrukcí pozemních staveb [online]. 02/2012. Praha: ČVUT v Praze, 2012 [cit. 2014-06-17]. Dostupné z: <http://kps.fsv.cvut.cz/>.
- [6.] ČSN EN 1991-1-4(73 0035), Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem.
- [7.] BALÍK, M. et al. Odvlhčování staveb. Vyd. 1. Praha: Grada Publishing, a.s.
- [8.] <http://www.azflex.sk/category/penove-sklo/strkove-penove-sklo>
- [9.] ČSN P 73 0610: Hydroizolace staveb, Sanace vlhkého zdiva, Základní ustanovení.

Eva Mišovychová¹

Študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 4.

POROVNANIE TEPLoty VNÚTORNÉHO VZDUCHU A KONCENTRÁCIE OXIDU UHOĽNATÉHO V PODZEMNOM PARKOVISKU SO VZDUCHOVOU CLONOU A BEZ NEJ

COMPARISON OF INDOOR AIR TEMPERATURE AND CONCENTRATION OF CARBON MONOXIDE IN UNDERGROUND PARKING LOT WITH AND WITHOUT AIR CURTAIN

Abstract

Ventilation systems ensure an increase indoor air quality in underground parking lots and the removal of unwanted pollutants from car exhausts. Numerical analysis was applied to the dispersion of the concentration of carbon monoxide (CO) and the distribution of indoor air temperatures in a closed 2-story underground parking lot in an administrative building in Bratislava. Slightly negative pressure mechanical ventilation system with jet fans are used to for better dispersion of the fresh air. In order to perform the numerical calculation, a three-dimensional model was created for the Computational fluid dynamics (CFD) simulation of underground parking floors in FloVENT 2021.2 software. The aim of this article is to find out the differences in the temperature regime and CO concentrations in underground parking lots when air curtains are used at the entrance to the parking lot and without them. The air curtains creates a barrier between the external and internal environment of the underground parking lot. The detected difference in the average indoor air temperature on the 1st underground floor is 2.26 K. The difference in average CO concentration is 0.8 ppm.

Kľúčové slová

podzemné parkovisko, koncentrácia oxidu uhoľnatého, teplota vnútorného vzduchu

1. Úvod

Vystavenie sa vysokým hladinám škodlivých látok z emisií automobilov spôsobuje zdravotné ťažkosti, ako sú respiračné a srdcové choroby, až smrť [2]. Hlavným zdrojom škodlivín je oxid uhoľnatý (CO) a preto sa koncentrácia CO používa na overenie návrhu vetrania parkovísk [3–6].

Používanie CFD (ang. Computational Fluid Dynamics – výpočtová dynamika tekutín) ako nástroja na predpovedanie kvality vnútorného vzduchu na parkoviskách je široko rozšírené a akceptované [7–9]. Validácia takýchto CFD simulácií bola dosiahnutá porovnaním výsledkov simulácie s už publikovanými údajmi z daného parkoviska.

Ho a kol. [10] vykonali štúdiu o stanovení hladiny oxidu uhoľnatého (CO) a tepelnom prostredí v podzemnom parkovisku. Uviedli, že hodinová priemerná teplota koreluje s podielom prevádzkového času motora, okolitou teplotou a vplyvom priemernej teploty predchádzajúcej hodiny na tepelné prostredie.

¹Eva Mišovychová, Ing., Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Khalil a kol. [11] skúmali výkon ventilačného systému podzemného parkoviska pomocou CFD simulácie v ustálenom stave. Podľa štúdie by limity pre koncentráciu CO nemali presiahnuť 50 ppm v normálnych prevádzkových podmienkach a 100 ppm v špičkových extrémnych podmienkach.

Aminian a kol. [12] ukázali, že zvýšenie výmeny vzduchu na zníženie kontaminantov nie je nevyhnutne vhodná metóda. Najlepšou metódou na dosiahnutie kvality vnútorného vzduchu a zníženie spotreby energie je vytvorenie vhodného prúdenia vzduchu v parkovisku.

Ďalšie štúdie [13–17] podobne preukázali, že nastavenie správneho vetracieho systému je nevyhnutné pre kvalitu vnútorného prostredia. Teplotnému režimu sa však doposiaľ v podzemných parkoviskách venovalo málo pozornosti, preto tento príspevok rieši nielen prúdenie vzduchu a koncentrácie CO, ale aj rozloženie teploty vnútorného vzduchu v podzemnom parkovisku. V tomto príspevku sú porovnávané dva výpočty. Výpočet č. 1 zahŕňa vzduchové clony a výpočet č. 2 nezahŕňa vzduchové clony. Pre účely tohto príspevku je použitá statická CFD simulácia.

2. Model

Pre tento príspevok bolo vybrané 2-podlažné podzemné parkovisko v administratívnej budove v Bratislave. Riešené parkovisko je využívané hlavne cez pracovné dni pre zamestnancov budovy, ale aj pre návštevníkov. Model podzemného parkoviska má rozmery 80,5 m × 78,0 m × 10,0 m (š × d × v). Vstup do 1. podzemného podlažia je z exteriéru cez rampu. Na konci rampy pri vstupe do podzemného parkoviska sa nachádza brána, ktorá sa otvára iba v čase prechodu auta. Počet parkovacích miest v 1. podzemnom podlaží je 180 a v 2. podzemnom podlaží je 197. Spolu je to 377 parkovacích miest. Pre účely tohto príspevku je prezentované iba 1. PP, pretože teplota vnútorného vzduchu v 2. PP nemá žiaden vplyv na súčiniteľ prechodu tepla U stropu nad nevykurovaným priestorom, pre ktorý je táto teplota vnútorného vzduchu dôležitá.

Súčinitele prechodu tepla U pre konštrukcie podzemného parkoviska:

- Plochá strecha (nad nevykurovaným priestorom) $U = 0,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- Strop nad nevykurovaným priestorom $U = 0,21 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- Steny priľahlé k zemi $U = 0,42 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

2.1. Vetrание v podzemnom parkovisku

Vetrание hromadných garáží upravuje STN 73 6058: Zmena b – 8/1989 [1], ktorá definuje potrebnú výmenu vetracieho vzduchu pre garáže. Podzemné parkovisko má mechanické vetranie a nie je vykurované. Vetrание je navrhnuté v mierne podtlakovom režime. Distribúcia prírodného a odvodného vzduchu je zabezpečená štvorhranným potrubím z pozinkovaného plechu. Prívod vzduchu je riešený bodovo cez protidažďové žalúzie osadené na stenách strojovne v 1. podzemnom podlaží. Rovnako je vzduch odvádzaný bodovo cez protidažďové žalúzie osadené na stenách strojovni.

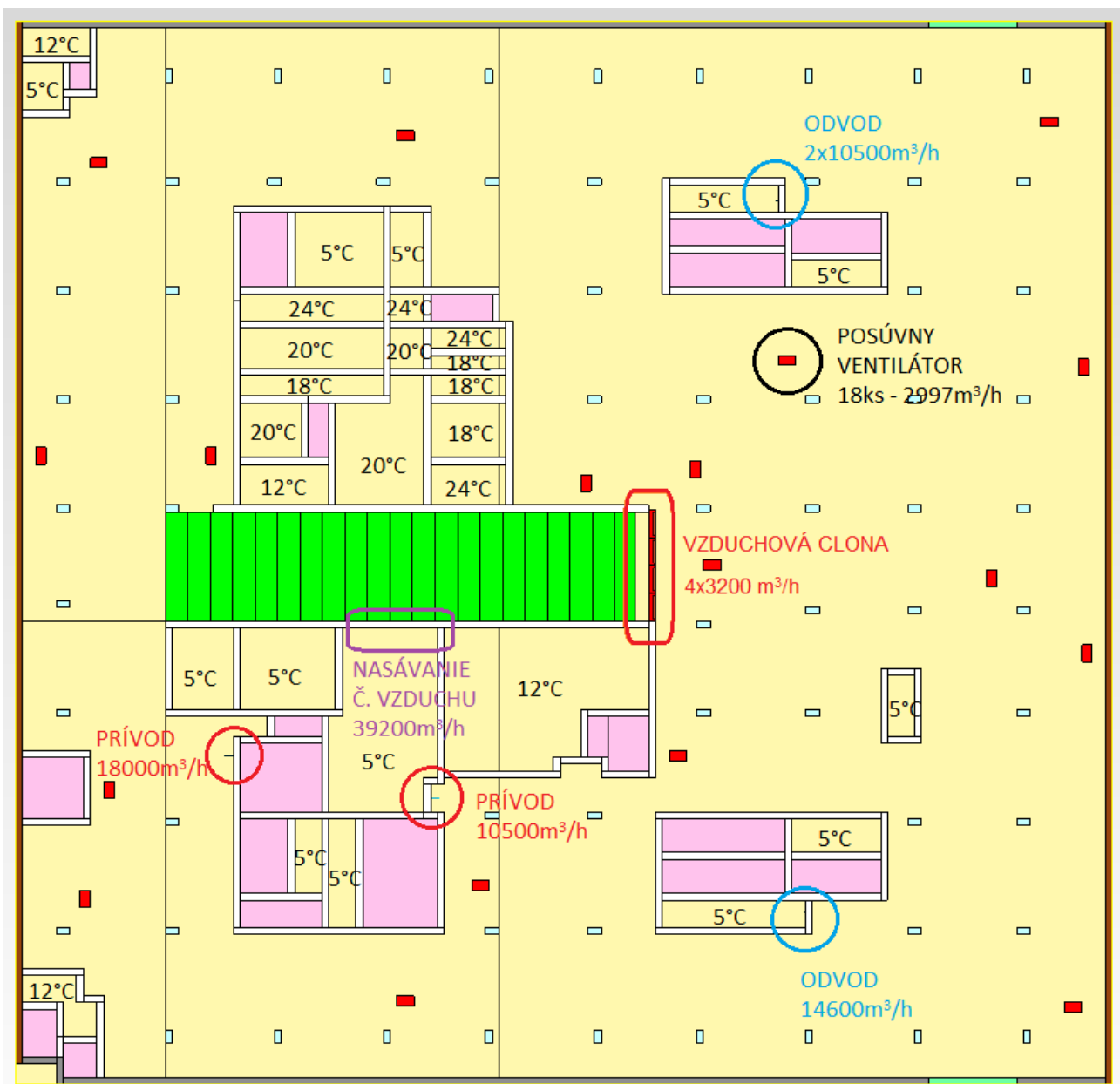
Objemové prietoky vzduchu pre prívod aj odvod sú uvedené v tabuľke 1 a na obrázkoch 1 a 2. Prívod čerstvého vzduchu je zabezpečený 3 protidažďovými mriežkami nad rampou. Objemový prietok týchto mriežok je spolu 39 200 m³/h.

Tabuľka 1: Objemový prietok vzduchu pre prívod a odvod.

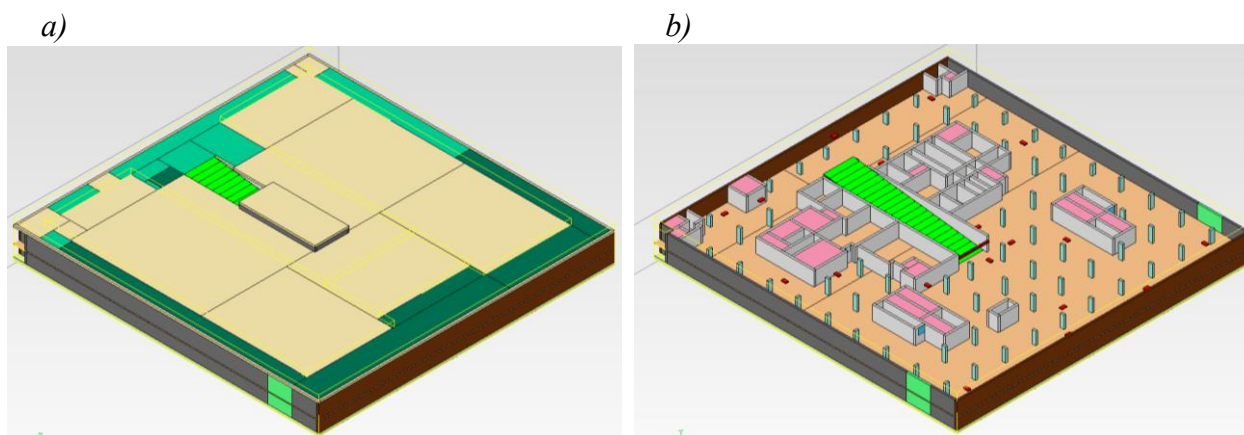
Podzemné podlažie	Prívod (m ³ /h)	Prívod SPOLU (m ³ /h)	Odvod (m ³ /h)	Odvod SPOLU (m ³ /h)
1. PP	vertikálne mriežky 18 000, 10 500	28 500	vertikálne mriežky 10 500, 10 500, 14 600	35 600

Pohyb objemu vzduchu je riešený pomocou posuvných prúdových ventilátorov Systemair IV 50 - 4/8. Pomocou posuvných ventilátorov dochádza k rovnomernému prevetraníu. Ventilátory sú umiestňované pod stropom a sú rozložené po celej ploche podlažia. Ich výšková úroveň v 1. PP je rôzna, kvôli premenlivej spodnej hrane stropu. Na obrázku 1 nie sú znázornené šikmé pôdorysné smerovania niektorých ventilátorov z dôvodu modelovania v 2 osiach. Ventilátorom je priradené skutočné smerovanie v nastaveniach softvéru.

Pri vjazde do podzemného parkoviska sa nachádzajú 4 vzduchové clony Systemair Frico PA 3520E16, každá s objemovým prietokom 3200 m³/h a maximálnym výkonom 16,2 kW. Rozmery clony sú 2,039 m × 0,525 m × 0,270 m (d × š × v). Clony fúkajú vzduch smerom dole s teplotou 12,5 °C a tým vytvárajú bariéru medzi vonkajším a vnútorným prostredím. Umiestnené sú horizontálne pod stropom s hornou hranou 2,500 m nad podlahou. Clony nezaistujú temperovanie priestoru. Tieto clony sú zahrnuté vo výpočte č. 1. V prípade výpočtu č. 2 sú clony vynechané.



Obrázok 1: Pôdorys 1. PP s vyznačenými prvkami mechanického vetrania a projektovanými teplotami vnútorného vzduchu vo vykurovaných priestoroch.



Obrázok 2: 3D model podzemného parkoviska a) celkový model, b) 1. podzemné podlažie.

3. CFD simulácia

Na výpočet bol použitý výpočtový program FloVENT 2021.1. FloVENT simuluje 3D prúdenie vzduchu, prenos tepla a rozptyl kontaminácie vo vnútornom aj vonkajšom prostredí. Využíva model turbulencie K-epsilon (k-ε), ktorý je najbežnejším modelom používaným vo výpočtovej dynamike tekutín (CFD) na simuláciu priemerných prietokových charakteristík pre podmienky turbulentného prúdenia. Ide o dvojrovnícový model, ktorý poskytuje všeobecný popis turbulencie pomocou dvoch transportných rovníc (parciálne diferenciálne rovnice).

3.1 Okrajové podmienky – emisie oxidu uhoľnatého CO

V podzemných parkoviskách sa vyskytujú škodliviny produkované autami. Vetrание podzemných parkovísk je potrebné pre odstránenie oxidu uhoľnatého a iných škodlivých látok, ktoré majú nepriaznivý vplyv na ľudský organizmus a vytvárajú skleníkový efekt. Celková produkcia emisií CO z výfukových plynov áut, ktorá bola vypočítaná projektantom vzduchotechniky, je uvedená v tabuľke 2. Na prepočet celkovej produkcie emisií CO je použitý vzorec (1). Koncentrácia privádzaného vzduchu je 10 ppm.

Tabuľka 2: Emisie CO v podzemnom parkovisku.

Podzemné podlažie	Emisie CO (m ³ /h)	Emisie CO (kg/s)
1.PP	2,3056	0,000742916
2.PP	0,6807	0,000219337

$$q'_{CO} = \frac{q_{CO-P}}{3600} \quad (1)$$

kde

q_{CO} je celková produkcia CO (m³/h),

ρ je objemová hmotnosť oxidu uhoľnatého 1,16 kg/m³,

q'_{CO} je celková produkcia CO (kg/s).

3.2 Okrajové podmienky – tepelné zisky

Výpočtová teplota vonkajšieho vzduchu je -11 °C pre Bratislavu. Teplota vnútorného vzduchu v 1. nadzemnom podlaží, ktoré sa nachádza nad väčšou časťou podzemného parkoviska, je 20 °C.

Teplota zeminy pod podlahou v 2.PP sa uvažovala 7 °C a teplota zeminy pri stenách 5 °C. Tieto teploty zeminy boli stanovené pomocou ročnej dynamickej simulácie podzemného priestoru a zeminy. Pre zjednodušenie výpočtu boli vybrané priemerné hodnoty povrchových teplôt pri stene a podlahe. Ak by mala byť modelovaná skutočná situácia, teplota zeminy by sa s hĺbkou zväčšovala približne do 10 °C. Çuhac a kol. [18] vykonali meranie teploty zeminy v rôznych hĺbkach raz za mesiac počas roka v meste Vaasa vo Fínsku. Hodnoty pre 30.1.2015 sú v tabuľke 3. Keďže posudzované podzemné parkovisko má základovú škáru v hĺbke 7,9 m, uvažovaná priemerná teplota zeminy 7 °C pod podlahou a 5°C pri stenách je porovnateľná s hodnotami z uvedenej štúdie.

Tabuľka 3: Hodnoty teploty zeminy v rôznych hĺbkach pre deň 30.1.2015 [18]

Deň 30.1.2015	h = 0,5 m	h = 1 m	h = 1,5 m	h = 3 m	h = 5 m	h = 10 m
Teplota zeminy (°C)	0	2,5	4,5	6	6,5	8

Vnútorne tepelné zisky tvoria vykurované technické priestory ako rozvodne, strojovne, vzduchotechniky, šatne, WC, sprchy a podobne. Priestory ako schodiská, chodby, výťahové šachty a sklady nie sú vykurované a v modeli sú definované ako priestory, v ktorých nastáva prenos tepla. Rozmiestnenie týchto priestorov s vykurovacími teplotami vnútorného vzduchu sú na obrázku 1.

Významné tepelné zisky tvoria zaparkované, ale aj pohybujúce sa vozidlá. Vypnutý motor práve zaparkovaného auta chladne niekoľko desiatok minút. V normách a v odbornej literatúre však nie je spracovaný komplexný výpočet teploty motora v rôznych časoch po jeho vypnutí. V tomto príspevku boli tieto zisky vynechané, pretože to bude predmetom ďalšieho výskumu.

Buday a Janák [19] vykonali štúdiu tepelných ziskov z osobného automobilu v letnom období meraním povrchových teplôt z karosérie, motora a podvozku. Meranie bolo vykonané termografickou kamerou pri okolitej teplote 23 °C a 35 °C. Následne bol vyhotovený 3D model automobilu v programe FloVENT. Namerané povrchové teploty boli zadané do programu. Bola spustená CFD simulácia teploty vnútorného priestoru a prúdenia vzduchu okolo auta v garáži. Výsledky preukázali, že tepelný zisk z jedného automobilu je 2,3 – 3,6 kW. Autori uviedli, že tepelné zisky klesajú exponenciálne, pričom po 1 hodine klesnú na približne polovicu.

Faraj a kol. [20] vo svojej štúdií navrhujú koncept rekuperácie tepla zo vzduchu pod zaparkovaným automobilom. Meranie bolo vykonané v podzemnom parkovisku pod univerzitou v Bejrúte. Autori uvádzajú dve výhody tohto konceptu: (1) ochladzovanie prostredia okolo automobilu a pod kapotou, (2) využitie prebytočného tepla na ohrev/predohrev vody. V mieste pod motorom zaparkovaného vozidla bol do podlahy umiestnený ventilátor, výmenník tepla a termočlánky. Po zapnutí ventilátora bol odsávaný vzduch spod dvoch automobilov s rôznymi typmi motora (6-valcový a 4-valcový). Teplota nasávaného vzduchu dosahovala po hodine 40 °C až 54 °C. Následne teplota začala klesať. Rekuperovaný výkon tepla dosiahol 500 kW.

Pre účely zistenia celkového teplotného režimu v podzemnom parkovisku v zimnom období je potrebné vykonať taktiež termografické meranie povrchových teplôt automobilu. Zaparkovaný automobil by mal byť v priestrannej garáži s minimalizovaným vplyvom iných áut. Na základe termografie, CFD simulácie a počtu vjazdov a výjazdov do podzemného parkoviska by sa určili celkové tepelné zisky od áut. Tento postup určovania tepelných ziskov je vhodné overiť inou metódou, v ktorej by sa merali povrchové teploty okolitých konštrukcií (podlahy, stien a stropu) a vnútorná teplota vzduchu v uzavretej jednomiestnej garáži. Následne by sa v simulačnom programe postupne zadávali hodnoty tepelných ziskov od auta tak, aby sa hodnoty teploty vnútorného vzduchu a povrchové teploty z merania rovnali tým zo simulácie.

4. Výsledky a diskusia

Pre účely splnenia cieľa tohto príspevku sú simulované: teploty vnútorného vzduchu, rýchlosti prúdenia vzduchu a koncentrácie CO. Úroveň roviny výsledkov dokumentovaných na obrázkoch 3 až 5 je 1,500 m nad podlahou jednotlivých podlaží.

Vzduchové clony vytvárajú výraznú bariéru medzi vonkajším a vnútorným prostredím podzemného parkoviska. Zreteľný rozdiel vo výsledkoch s a bez clôn sa dá pozorovať najmä v pozdĺžnych rezoch cez rampu na obrázkoch 6 – 11. Vo výpočte č. 1 (s clonou) sa minimalizuje premiešavanie chladnejšieho vonkajšieho vzduchu s teplejším vnútorným vzduchom. Zabraňuje sa premiešaniu čerstvého vzduchu (s koncentráciou 10 ppm) s vnútorným vzduchom. Vo výpočte č. 1 (s clonami) sa vyskytujú o čosi vyššie koncentrácie CO ako vo výpočte č. 2 (bez clôn). V tabuľke 4 sú uvedené výsledky priemerných hodnôt koncentrácií CO a teploty vnútorného vzduchu pre 1.PP.

Tabuľka 4: Výsledky priemerných hodnôt koncentrácií CO a vnútornej teploty vzduchu v 1.PP.

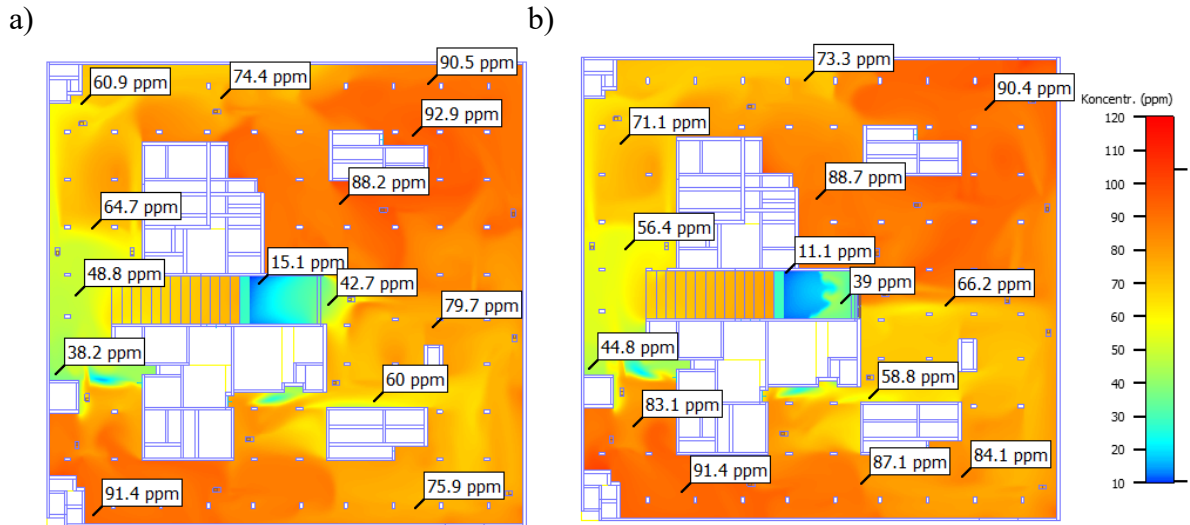
Oblasť v 1.PP	Priemerná koncentrácia CO (ppm) s clonou	Priemerná koncentrácia CO (ppm) bez clony	Priemerná teplota vnútorného vzduchu (°C) s clonou	Priemerná teplota vnútorného vzduchu (°C) bez clony
Celá park. zóna	78,2	77,5	-2,76	-5,02
Zóna 1 (za rampou)	71,5	69,3	-4,38	-5,71
Zóna 2	87	87,6	-2,23	-4,24
Zóna 3 (vjazd)	76,8	76,9	-2,08	-5,09
Zóna 4	78,8	77,4	-2,25	-5,13

Priemerná hodnota koncentrácie CO v 1.PP je 78,2 ppm pre výpočet č. 1 s clonou a priemerná hodnota koncentrácie CO v 1. PP je 77,5 ppm pre výpočet č. 2 bez clony. Rozdiel medzi hodnotami je približne 0,8 ppm, ktorý sa dá považovať za zanedbateľný. Lokálne sa však vyskytujú oblasti s prekročenými hodnotami koncentrácie CO. Maximálna hodnota koncentrácie CO pre výpočet č. 1 s clonou je 109 ppm a pre výpočet č. 2 bez clony je to 108 ppm. Rozdiel 1 ppm je taktiež zanedbateľný. Mechanické vetranie v oboch výpočtoch zabezpečuje splnenie požiadavky normy STN 73 6058, Zmena b – 8/1989 [1], na maximálnu prípustnú hodnotu koncentrácie CO 87 ppm v priemernej hodnote koncentrácie CO v 1. podzemnom podlaží.

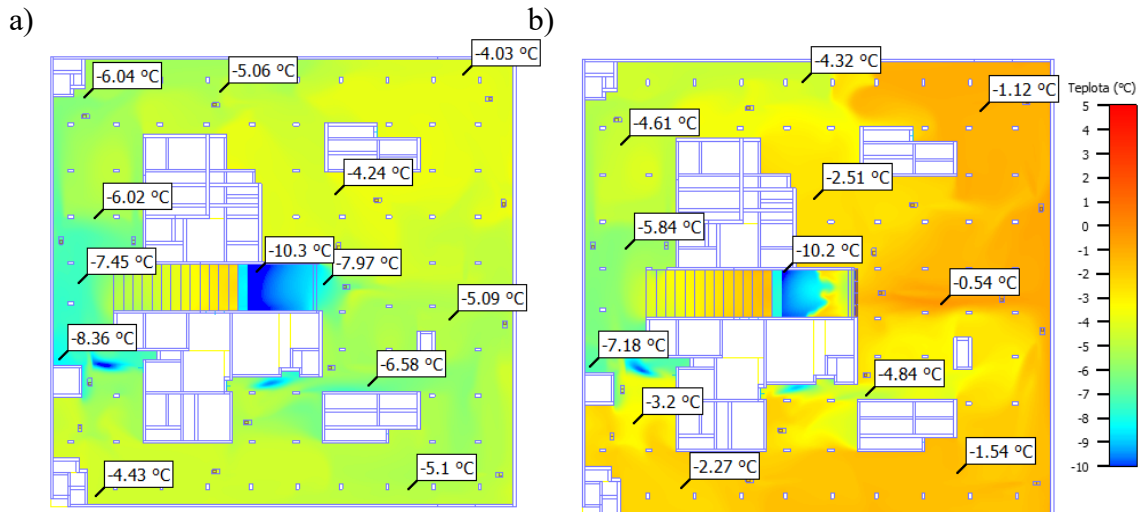
Priemerná hodnota teploty vnútorného vzduchu v 1. PP vo výpočte č. 1 s clonou je -2,76 °C a priemerná hodnota teploty vnútorného vzduchu v 1. PP vo výpočte č. 2 bez clony je -5,02 °C. Rozdiel teplôt vnútorného vzduchu v 1. PP medzi dvomi výpočtami je 2,26 K. Lokálne sa však vyskytujú aj nižšie hodnoty teploty vnútorného vzduchu v 1. PP a to v kúte pri prívode čerstvého vzduchu s hodnotou približne okolo -7,18 °C vo výpočte č. 1 s clonou. Nízke teploty vzduchu pri prívode čerstvého vzduchu sa s hodnotou -8,36 °C vyskytujú v tom istom kúte v 1.PP vo výpočte č. 2 bez clony. Rozdiel je 1,18 K.

Hodnoty teploty vnútorného vzduchu sú dôležité pri výpočte súčiniteľa prechodu tepla konštrukcie U a teda aj pri navrhovaní hrúbok tepelných izolácií stropných konštrukcií nad nevykurovaným priestorom. Požiadavky na U sú rozdelené podľa rozdielu teploty vnútorného vzduchu po 5 K. Rozdiel priemerných teplôt vnútorného vzduchu 2,26 K v 1.PP teda môže a nemusí mať vplyv pri posúdení stropu nad nevykurovaným priestorom na hodnoty U .

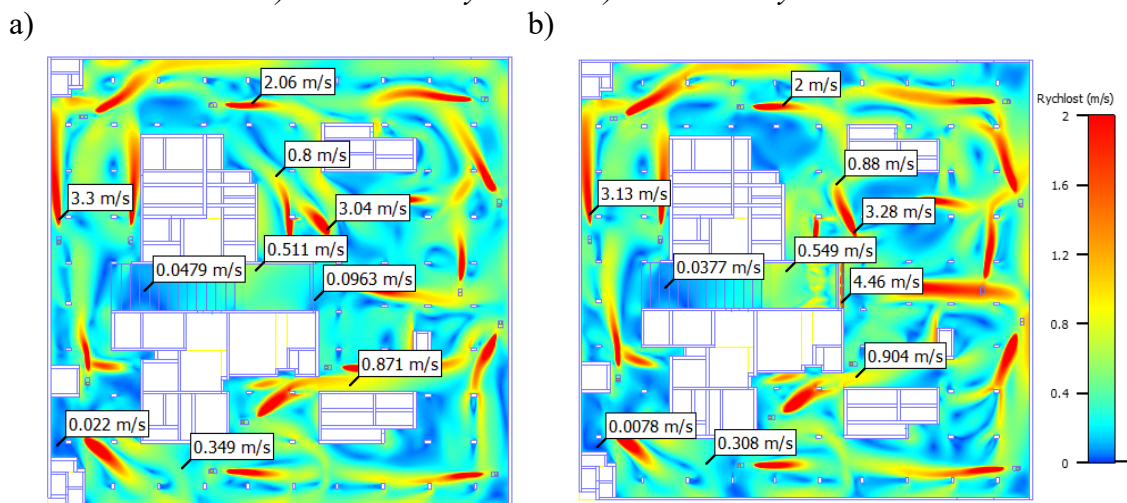
Prúdenie vzduchu naprieč priestorom parkoviska v obidvoch výpočtoch zabezpečuje 18 kusov prúdových ventilátorov v 1.PP. Na obrázku 11 je zreteľné ako sa pri vzduchových clonách vytvára bariéra a vírenie vzduchu medzi clonou a rampou.



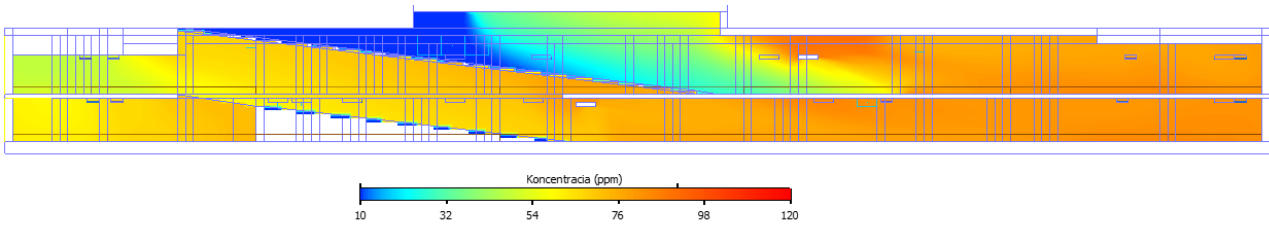
Obrázok 3: Koncentrácie CO v 1.PP,
a) bez vzduchových clôn, b) so vzduchovými clonami.



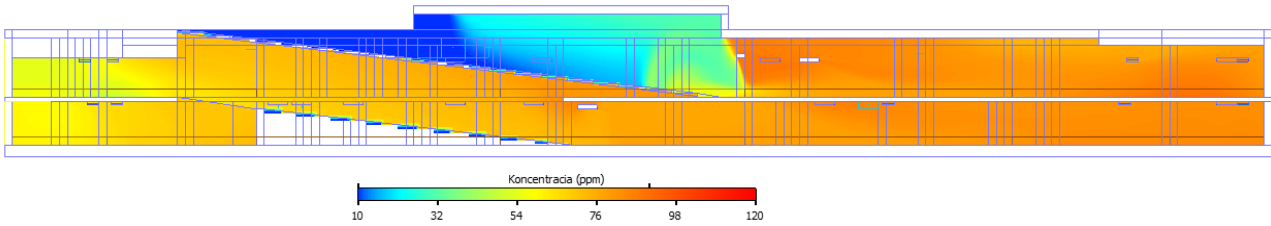
Obrázok 4: Teplota vnútorného vzduchu v 1.PP,
a) bez vzduchových clôn b) so vzduchovými clonami.



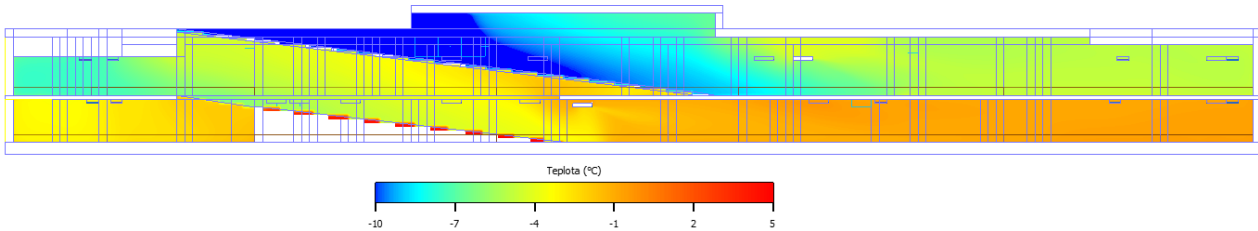
Obrázok 5: Rýchlosť prúdenia vzduchu v 1.PP,
a) bez vzduchových clôn, b) so vzduchovými clonami.



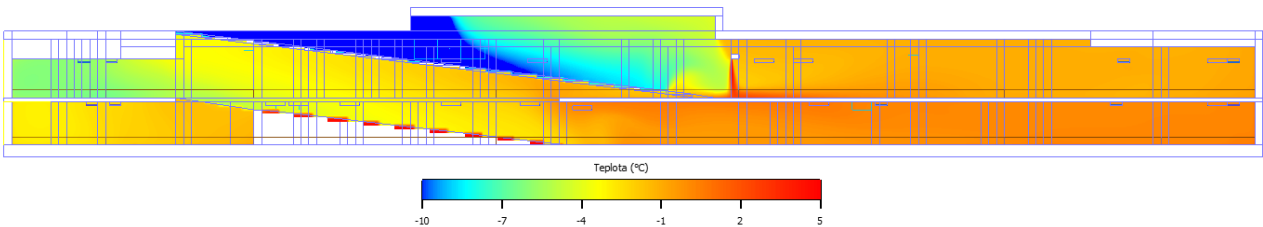
Obrázok 6: Rez rampami - koncentrácia, bez vzduchových clôn.



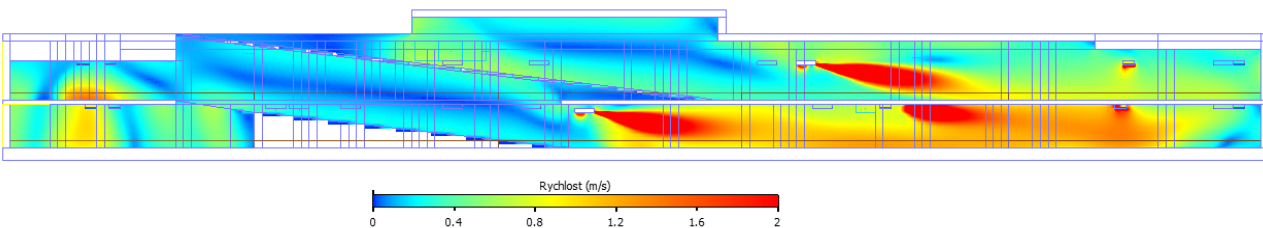
Obrázok 7: Rez rampami – koncentrácia, so vzduchovými clonami.



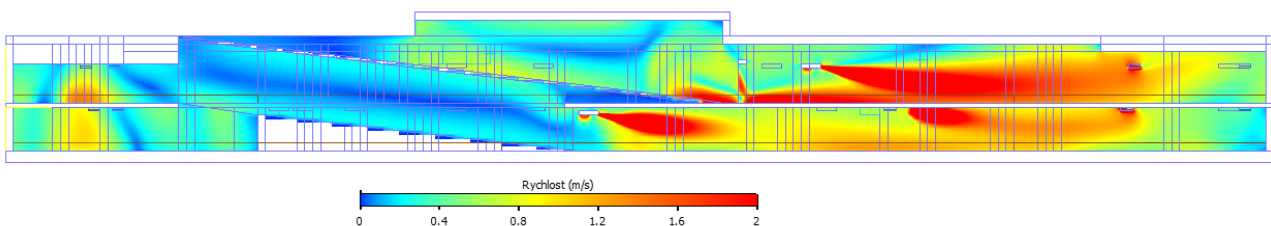
Obrázok 8: Rez rampami - teplota vnútorného vzduchu, bez vzduchových clôn.



Obrázok 9: Rez rampami - teplota vnútorného vzduchu, so vzduchovými clonami.



Obrázok 10: Rez rampami - rýchlosť prúdenia vzduchu, bez vzduchových clôn.



Obrázok 11: Rez rampami – rýchlosť prúdenia vzduchu, so vzduchovými clonami.

6. Záver

Výsledky CFD simulácie ukazujú rozdiel medzi dvomi výpočtovými modelmi v hodnotách teplôt vnútorného vzduchu a koncentráciách CO. Vzduchová clona vytvára výraznú bariéru medzi vonkajším a vnútorným prostredím podzemného parkoviska. Vo výpočte č. 1 (s clonou) sa minimalizuje zmiešavanie chladnejšieho vonkajšieho vzduchu s teplejším vnútorným vzduchom. Bolo zistené nasledovné:

- Aktuálny stav a chod mechanického vetrania zabezpečuje splnenie požiadavky normy STN 73 6058, Zmena b – 8/1989 [1] na maximálnu prípustnú hodnotu koncentrácie CO 87 ppm. Priemerná hodnota koncentrácie CO v 1.PP je 78,2 ppm pre výpočet č. 1 s clonou a priemerná hodnota koncentrácie CO v 1.PP je 77,5 ppm pre výpočet č. 2 bez clony. Rozdiel je 0,8 ppm, ktorý sa dá považovať za zanedbateľný. Lokálne sa však vyskytujú oblasti s prekročenými hodnotami koncentrácie CO.
- Rozdiel teploty vnútorného vzduchu medzi dvomi výpočtami je približne 2,26 K. Posudzovaný je len priestor, kde sa nachádzajú parkovacie miesta. Priemerná hodnota teploty vnútorného vzduchu v 1.PP vo výpočte č. 1 s clonou je -2,76 °C a priemerná hodnota teploty vnútorného vzduchu v 1.PP vo výpočte č. 2 bez clony je -5,02 °C. Lokálne sa však vyskytujú oblasti s nižšími hodnotami teploty vnútorného vzduchu.
- V tomto príspevku bol zistený malý rozdiel 0,8 ppm v priemerných koncentráciách CO a taktiež malý rozdiel 2,26 K v teplotách vnútorného vzduchu pri porovnaní výpočtov zo CFD simulácie. Toto zistenie utvrdzuje fakt, že koncentrácie CO aj teploty vnútorného vzduchu v podzemnom parkovisku závisia hlavne od mechanického prívodu vzduchu. Aj keď sa v 1.PP nachádzajú lokálne rozdiely v koncentráciách CO približne 10 ppm, a lokálne rozdiely vnútornej teploty vzduchu približne 3 K na priemerné hodnoty v celom priestore podzemného podlažia, kde sa nachádzajú parkovacie miesta, to nemá výrazný vplyv.

CFD simulácia sa používa na predikciu prúdenia vzduchu a tým overenie efektívnosti vetracieho systému. Tepelné zisky, ako vnútorné vykurované priestory, vzduchové clony, ale aj rôzne teploty okolitej zeminy a teploty motora sa dajú namodelovať a vyhodnotiť pomocou CFD simulácie. Teplotnému režimu sa však doposiaľ v podzemných parkoviskách venovalo málo pozornosti, preto ďalší výskum bude zameraný na rôzne faktory ovplyvňujúce vnútorné prostredie s využitím statickej CFD simulácie, dynamickej energetickej simulácie a nameraných hodnôt in-situ.

PodĎakovanie

Predložený príspevok a výskum bol podporený výskumným projektom VEGA č.01/0229/21 - Stavebno fyzikálna podstata budovy s takmer nulovou potrebou energie v kontexte environmentálnych aspektov.

Building physics fundamentals of a nearly zero energy building related to its environmental aspects.

Literatúra

- [1] STN 73 6058, Zmena b – 8/1989. Hromadné garáže. Základné ustanovenia.
- [2] HODAS, N. et al.: Indoor inhalation intake fractions of fine particulate matter: review of influencing factors. *Indoor Air*, s. 836-856, (2015). <https://doi.org/10.1111/ina.12268>
- [3] EL FADEL, M. et al.: Carbon Monoxide and Volatile Organic Compounds as Indicators of Indoor Air Quality in Underground Parking Facilities. *Indoor and Built Environment*. 2001, Volume 10, s. 70-82. <https://doi.org/10.1177/1420326X0101000203>
- [4] KRARTI, M. et al.: CFD Analysis of Ventilation System Performance for Enclosed Parking Garages. *ASHRAE Transactions*. 2003, s. 21-29.

- [5] MARSHALL, J. D. et al.: Inhalation of motor vehicle emissions: effects of urban population and land area. *Atmospheric Environment*. 2005, s. 283-295.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.059>
- [6] FERNANDES, R. et al.: Indoor Car Parks – CFD Application, *V European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECCOMAS CFD 2010)*, Pereira J.C.F. and Sequeira A., Editor. Lisbon, Portugal, 2010.
- [7] SE-JIN, A. et al.: Study of Securing Required Ventilation Rates and Improving Mechanical Ventilation Systems for Underground Parking Lots. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2016, s. 659-665. <https://doi.org/10.3130/jaabe.15.659>
- [8] PAPAKONSTANTINOU, K. et al.: Air quality in an underground garage: computational and experimental investigation of ventilation effectiveness. *Energy and Buildings*. 2003, s.933-940.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00020-3)
- [9] ESHACK, A. et al.: Monitoring and simulation of mechanically ventilated underground car parks. *Journal of Thermal Engineering*. 2015, s. 295-302.
- [10] HO, J. C. et al.: A field study on determination of carbon monoxide level and thermal environment in an underground car park. *Building and Environment*. 2004, Volume 39, s. 67– 75. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.07.006>
- [11] KHALIL, E. E. et al.: Investigation of Ventilation System Performance of Tahreer Car Park Using CFD. *Journal of Energy and Power Sources*. 2015, s. 81-89.
- [12] AMINIAN, J. et al.: The enhancement of pollutant removal in underground enclosed parking lots by reconsideration of the exhaust vent heights. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, Volume 77, s. 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.005>
- [13] WAKED, R. et al.: Indoor Air Environment of a Shopping Centre Carpark: CFD Ventilation Study. *Universal Journal of Mechanical Engineering*. 2017, s. 113-123.
<https://doi.org/10.13189/ujme.2017.050402>
- [14] MOUSAVI, M. S. et al.: Experimental and Numerical Analysis of CO Concentration Dispersion of Vehicular Exhaust Emissions in Isolated Environment. *Environ Model Assess*. 2017, s. 431–444. <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9546-y>
- [15] SITTISAK, P. et al.: Enhancement of carbon monoxide removal in an underground car park using ventilation system with single and twin jet fans, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020, Volume 97. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103226>
- [16] AL-WAKED, R. et al.: Effects of Cross Level Air Interaction within Multilevel Underground Carparks on Indoor Air Quality. *Fluids*. 2020, Volume 5, s. 177.
<https://doi.org/10.3390/fluids5040177>
- [17] LASHIN, A.: CFD investigation of underground car park ventilation with different ductless jet fan configurations. *Engineering and Scientific Research Jurnal*. Benha: Faculty of Engineering – Benha University, 2012. Volume 17.
- [18] ÇUHAC, C. et al.: Temperature Measurements on a Solar and Low Enthalpy Geothermal Open-Air Asphalt Surface Platform in a Cold Climate Region. *Energies*. 2020, Volume 13, s. 979. <https://doi.org/10.3390/en13040979>
- [19] BUDAY, P. a JANÁK, M.: Termografia automobilu a tepelné zisky od áut. 2018.
- [20] FARAJ, J.: New system of heat recovery from parked vehicles: Experiments and analysis. *Case studies in Thermal Engineering*. 2021. Volume 28.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101573>

Nora Naddourová¹

Študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 4.

OBNOVA MESTSKEJ TRŽNICE V NITRE - OKENNÉ KONŠTRUKCIE

RENOVATION OF THE MARKET HALL IN NITRA - WINDOWS

Abstract

Markets and fairs, meeting places for residents of the immediate and wider surroundings, were an opportunity to establish contacts and exchange information. Due to higher demands on hygiene, market stalls gradually began to emerge at markethalls. It has been more than a hundred years since the first markethalls were established in Slovakia. During the restoration of such historically important buildings, it is important to observe the architectural detail, which is significantly endangered in the approach to restoration nowadays.

Abstrakt

Trhy a jarmoky, miesta stretnutia obyvateľov blízkeho i širšieho okolia, boli príležitosťou na nadväzovanie kontaktov a výmenu informácií. Kvôli vyšším nárokom na hygienu začali postupne na miestach trhov vznikať tržnice. Už je to viac ako sto rokov, odkedy boli na Slovensku zriadené prvé tržnice. Pri obnove takto historicky významných budov je dôležité sledovať architektonický detail, ktorý je pri prístupe k obnove v dnešnej dobe výrazne ohrozený.

Kľúčové slová

trh, tržnica, národná kultúrna pamiatka, obnova, okenné výplne

1. Úvod

Mestskú tržnicu pokladáme za jednu zo základných a súčasne najstarších typológií v rámci architektúry. Rozvoj ale aj samotný vznik nových miest bol výrazným spôsobom ovplyvnený práve obchodom, ktorého vplyv na vývoj miest je evidentný doteraz. Umiestnenie trhov, resp. tržníc v rámci miest bolo obvykle centrické a z hľadiska sortimentu výmeny dochádzalo k postupnej stratifikácii. A práve za účelom zmeny vznikali prvé otvorené, neskôr kryté tržnice. Prvé tržnice, ktoré sa Slovensku vznikali si už zaslúžia obnovu.

2. História trhov a tržníc na Slovensku

Ak chceme hovoriť o histórii tržníc musíme sa najskôr zamerať na dôvody prečo vznikali, a teda na históriu trhov. Trhy ako inštitúcie obchodu vznikli z potreby sústreďovania a pravidelného uskutočňovania tovarovej výmeny na stabilnom mieste. Základný predpoklad ich vzniku a to výmena tovaru, siaha hlboko do minulosti, až do obdobia prvotnopospolnej spoločnosti, pokračuje cez existenciu kmeňového zriadenia, kedy sú známe tzv. medzikmeňové trhy a k jeho intenzifikácii smeruje používaním prostriedkov hodnoty tovaru, ktorou sa stali v rozvinutejších spoločnostiach peniaze. Písomné zmienky o počiatkoch trhov na našom území sú sporné. [1] Konkrétnejšie doklady o trhoch nachádzame až od 9. storočia. Z roku 903 a 904 pochádza Raffelnštetenský colný tarif, v ktorom sa spomínajú kupci, ktorí chodia na trhy Moravanov. Išlo o súčasť diaľkového

¹ Ing. Nora Naddourová, Katedra architektúry, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

obchodu, do ktorého boli moravské trhy zapojené. Máme aj priamy doklad o tom, že hlavný trh Moravanov sa konal v meste Morava. Predpokladá sa, že je to oblasť Valy pri Mikulčiciach. [2] Okrem starších týždenných trhov sa od polovice 14. storočia začali s kráľovským povolením konať aj tzv. výročné trhy (jarmoky), ktoré sa stali veľkým lákadlom nielen pre miestnych, ale aj cudzích obchodníkov. Niektoré jarmoky mohli trvať až 2 týždne a trhovníci idúci na trh a rovnako aj vracajúci sa z neho, boli oslobodení od platenia mýtnych poplatkov. Kupci okrem svojich tovarov prinášali aj najrôznejšie informácie (niekedy aj nepodložené chýry a klebety), ktoré sa prirodzene ďalej šírili v samotnom meste i v jeho okolí. [3]

Priebehom času sa trhy vyvíjali. 18. storočie sa vyznačuje ich extenzívnym rastom v dôsledku prenikania remeselníkov do vidieckych sídel. Ich počet v tomto období nie je zanedbateľný. V roku 1720 má trhové právo 232 lokalít. [4]

To že v 17. až 19. storočí sa trhové práva udeľovali aj dedinám, má význam tak z hľadiska intenzity rozširovania ako aj z pohľadu postavenia jednotlivých sídel, ktoré sa stali určitým ekonomickým a načas aj sociálno- kultúrnym uzlom. [1]

V prvej polovici 20. storočia bolo obchodovanie na trhoch, stále čulé o čom svedčí fakt, že týždenné trhy sa vyskytovali približne v dvesto lokalitách, vytvárajúcich rovnomerne rozloženú sieť miest po celom Slovensku so spádovými úzermi. 20 rokov potom čo na Slovensku vznikla prvá tržnica, vzniká mestská tržnica aj v Nitre.

3. Mestská tržnica v Nitre

Tržnice majú hospodársku, kultúrnospoločenskú a mestotvornú funkciu. Mestská tržnica v Nitre zaberá podstatnú časť urbanistického bloku v centre mesta a jej umiestnenie v objekte bývalých honvédskych kasární sa datuje už k roku 1930. Žiaľ, mestská tržnica v súčasnosti nenapĺňa potreby všetkých obyvateľov a návštevníkov mesta, nedostatočne reflektuje na potreby komunity, neodkazuje na svoju historickú hodnotu, nevytvára priestor pre kultúrne a vzdelávacie aktivity a nedostatočne reaguje na súčasnú a budúcu komerčnú výstavbu a demografické zmeny v susedstve. [5]



Obr.1: Panoramatický pohľad na mestskú tržnicu v Nitre (Zdroj: archív Naddourová)

3.1. História mestskej tržnice v Nitre

Mestské kasárne boli postavené v rokoch 1889 – 1890 pre domáci 60. honvédske batalión (vojenskú jednotu pozostávajúcu z 300-1200 honvédov), na južnom okraji širšieho centra Nitry, v priestore pred zbúranou Tureckou bránou vonkajšieho opevnenia mesta. Projekt stavby sa pripisuje architektovi Jánovi Lykovi (1841 – 1934). Nitriansky rodák Lyka získal diplom v Mníchove, po návrate do Uhorska pôsobil v Pešti. Útlm stavebníctva zapríčinený hospodárskou krízou v roku 1873 ho primäl k tomu, aby sa definitívne vrátil do rodného mesta a v roku 1882 ho mestská rada v Nitre poverila vypracovaním projektovej štúdie. Tento objekt sa stal typovým vzorom pre všetky stavby v celom Uhorsku.

Objekt po roku 1930 začal slúžiť ako mestská tržnica a túto funkciu si zachoval až dodnes. Zmena funkcie kasární na mestskú tržnicu je historicky daná a vychádza z jej polohy - na

Damborského ulici, ktorá vymedzuje jeho západnú časť, sa totiž v minulosti pravidelne konával mestský trh. Zároveň je dôkazom ako sa s meniacimi potrebami spoločnosti postupne pretvárajú i rozmanité priestory, budovy a dokonca aj celé areály. Z technicky strohého objektu tak vznikol živý priestor slúžiaci masám spoločnosti. [5]



Obr.2: Pohľad na mestskú tržnicu v Nitre v roku 1924 (Zdroj: archív Burclová)

3.2. Mestská tržnica verzus nákupné centrum

9. septembra v roku 2009 otvorili v tesnej blízkosti mestskej tržnice obchodné centrum s úžitkovou plochou 78 160 m², budova má výšku 25 metrov a 4 nadzemné podlažia. Kontroverznou je plocha na ktorej obchodné centrum vyrástlo, pretože jeho výstavba súvisela s likvidáciou národnej technickej pamiatky bývalej budovy mlynov z 19. storočia. Tesnú blízkosť tržnice a nákupného centra nemožno označiť za priaznivú. (obr. 3) [6]



Obr.3: Ortofoto mapa na poukázanie vzdialenosti medzi mestskou tržnicou a nákupným centrom (Zdroj: mapy.cz)

3.3. Obnova mestskej tržnice v Nitre

Kultúrna pamiatka kasární slúžiaca ako mestská tržnica sa nachádza v celkom zachovalom technickom stave. „Stanovili sme si ciele v troch oblastiach. Tou prvou je vyzdvihnúť pamiatkovú hodnotu tržnice, ktorá nekonceptnými úpravami v minulosti úplne zanikla. Ďalšími cieľmi je rozšíriť funkcie tržnice – kým doteraz plnila iba predajnú funkciu, my by sme k tomu chceli doplniť aj kultúrnospoločenskú a komunitnú funkciu, vďaka čomu by tržnica bola príjemným a pulzujúcim centrom, kde sa ľudia radi stretávajú a kde môžu stráviť príjemný čas s priateľmi a rodinou,“ povedala o obnove tržnice Monika Reiskupová, odborná referentka pre mestský rozvoj na nitrianskej radnici.



Obr.4: Vizualizácia návrhu riešenia nádvorja Mestskej tržnice v Nitre (Zdroj:[7])

3.4. Obnova okenných výplní

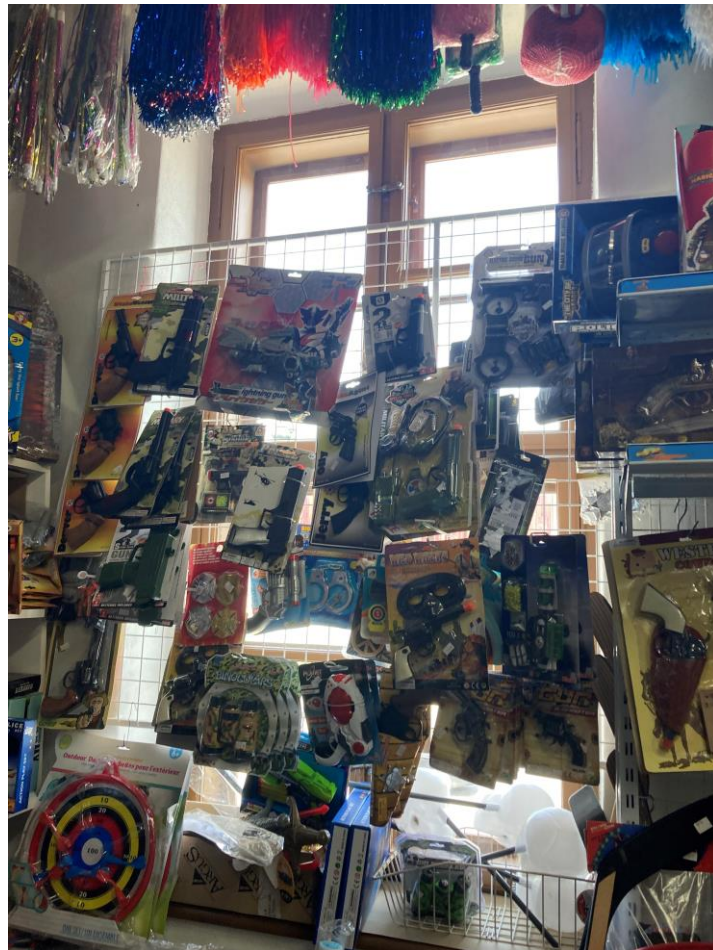
Vonkajšie krídla boli zhruba v 70. rokoch všetky vymenené, ale aj napriek tomu boli vo veľmi zlom stave. Keďže nemali historickú hodnotu ako vnútorné krídla a nebolo možné ich repasovať boli nahradené kópiami. Vo vonkajších krídlach boli použité dvojsklá, čím sa zlepšili tepelnoizolačné hodnoty okenných výplní. Vnútorné krídla sa v čo najväčšej miere repasovali, aj keď pri niektorých bolo potrebné protézovanie vo vysokej miere. Ak bolo pôvodné zasklenie v dobrom stave bez škrabancov, tak sa tiež zachovávalo. Na rekonštruovaných okenných výplniach v celom objekte bola na vonkajšie aj vnútorné krídla použitá lanová farba v hnedom odtieni.



Obr.5: Protéza pôvodného okenného rámu (Zdroj: archív: Reiskupová)

3.4.1. Cena obnovy okenných výplní

Keďže pri obnove mestskej tržnice ide o veľký projekt, mesto komunikuje cenu obnovy s jeho obyvateľmi. Na sociálnych sieťach zverejnilo približnú cenu repliky aj repasovania pôvodných okenných výplní. Cena repliky jedného okna stojí zhruba 2500 eur a cena umelecko-remeselnej obnovy 3100 eur. [7] Dôvodom prečo je cena repasovania vyššia, aj keď sa minie menej materiálu je jasná z obrázka č. 5.



Obr.6: „Prezentácia“ repasovanej pôvodnej vnútornej okennej výplne (Zdroj: archív Naddourová)



Obr.7: Pohľad na kópiu vonkajšej okennej výplne. (Zdroj: archív Naddourová)

4. Záver

Pri obnove okenných výplní mestskej tržnice v Nitre sa tím, ktorý sa na tom podieľa snaží o čo možno najväčšie zachovanie hodnotných pôvodných historických výplní, ako by to malo byť pri každom podobnom prípade. Žiaľ, nie každý vie oceniť historickú hodnotu pôvodného originálu. Jeden z troch prenajímateľov navštívených prevádzok, u ktorého sa repasovali vnútorné pôvodné okenné výplne vyslovil pri obhliadke nespokojnosť, prečo mesto vynakladá čas a hlavne peniaze na repasovanie, keď obyvatel'ov mesta trápia iné problémy. Pri pohľade na „prezentáciu“ pôvodných okenných výplní v tejto prevádzke by sa nám mohlo vyjasniť, prečo sa práve tento prevádzkar postavil voči spôsobu obnovy ľahostajne. (obr. 6) Aj teraz sa potvrdilo aká dôležitá je osвета medzi obyvateľmi, ktorí stále uprednostňujú novodobé výplne pred pôvodnými originálmi. Na záver by som sa chcela poďakovať Ing. Monike Reiskupovej odbornej referentke pre mestský rozvoj a udržateľnú ekonomiku a Ing. arch. Zuzane Kramárovej z KPU Nitra za odpovede na otázky, informácie a prehliadku tržnice.

5. Literatúra

- [1] FALĽANOVÁ, L.: Trhy a jarmoky na Slovensku v minulosti a ich miesto v ľudovej kultúre. In Slovenský národopis / Slovak Ethnology, 1982. vol. 30, no.2, pp. 372-378. 1339-9357.
- [2] RÁBIK, V., LABANC, P., TIBENSKÝ, M.: Vývoj stredovekých miest na Slovensku I., 2013, Filozofická fakulta Trnavskej univerzity v Trnave, ISBN 978-80-8082-640-6
- [3] LUKAČKA, J., ŠTEFÁNIK, M.: Stredoveké mesto ako miesto stretnutí a komunikácie. [1. vyd.]. Bratislava: Typoset Print, 2010. ISBN 978-80-970302-1-6.
- [4] Žudel, J.: Trhové sféry na Slovensku r. 1720. Geograf. Čas., 23, 1973, č.4, s.299-312.
- [5] REISKUPOVÁ, M, ZAUJECOVÁ, T.: Informatívna správa – Revitalizácia Mestskej tržnice na Štefánikovej triede č. 50 v Nitre. In Materiál na rokovanie Mestského zastupiteľstva v Nitre. 2020, číslo materiálu 449/2020
- [6] TREMBOŠOVÁ, M.: Nitra – Town of Retail Center. Geografické štúdie. 2009. 13. 69-79. 10.17846/GS.2009.13.1.69-79. [6] Zákon č. 49/2002 Z. z. Slovenskej republiky. Zákon o ochrane pamiatkového fondu.
- [7] REISKUPOVÁ, M, BALLAY, V.: 3. informatívna správa k obnove Mestskej tržnice v Nitre. In Materiál na rokovanie Mestského zastupiteľstva v Nitre. 2021, číslo materiálu 1029/2021

Martin Poliak¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: štvrtý

ANALÝZA GEOMETRIE STYKU RUINY SO ZASTREŠENÍM

GEOMETRY ANALYSIS OF RUIN-COVERAGE CONTACT

Abstract

Ruin covered by a roof is a product of discussion of group of concerned people and professions. If the ruin is of monumental value, two ambitions of the group become of the most interest – methodically effective monumental presentation and its long-term security. Entropic character of any ruinal context prevent satisfactory answer to each of the issues and invites to continue discussion and research of both theoretical and practical bases. This paper presents a closer look at geometry of ruin coverages, describes their genesis, and speculates possible impact on their effectivity of ruin matter protection. Special attention is paid to critical location of ruin-coverage contact geometry.

Kľúčové slová / Key Words

Zastrešenie ruiny; ochrana ruiny; strešná konštrukcia nad ruinou;

1. Úvod

Zastrešená ruina ako kombinácia chránených pozostatkov objektu v rôznom štádiu deštrukcie a strešnej konštrukcie konkrétneho tvarového a konštrukčno-materiálového prevedenia je produktom diskusie skupiny dotknutých osôb a profesií. Ak je ruina pamiatkovo chránená, najdôležitejšími sa stanú dve ambície danej skupiny – metodicky efektívna pamiatková prezentácia na základe exaktných výsledkoch pamiatkového výskumu a jej trvalé technologické zabezpečenie. Entropický charakter akéhokoľvek ruinálneho kontextu zamedzuje nesporné zodpovedanie oboch problematík, čím pozýva k pokračovaniu diskusie a výskumu rovnako teoretických východísk prezentácie pamiatkových hodnôt a efektívneho technického riešenia ochrany materiálnej podstaty.

Zastrešenie ruiny je považované za najefektívnejší spôsob ochrany jej fyzickej substancie. Príspevok prezentuje bližší pohľad na geometriu zastrešenia, opisuje ich genézu a uvažuje nad možnými dopadmi na efektivitu ochrany ruinálnej matérie pred ďalším rozkladom. Bližšia pozornosť je venovaná kritickej lokalite styku ruiny so strešnou konštrukciou.

2. Geometria zastrešenia ruiny

Geometria zastrešenej ruiny sa odvíja od samotných geometrií ruiny a zastrešenia. Geometria ruiny úzko súvisí s typológiou objektu, z ktorého pôsobením deštruktívnych mechanizmov ruina vznikla, a s mierou zachovania ruiny, ktorá vyjadruje pomer zachovanej pôvodnej substancie ruiny

¹ Ing. Martin Poliak, Katedra architektúry, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

k jej pôvodnému objemu, alebo jeho vedeckej rekonštrukcii v súčasných terénnych konfiguráciách. Geometria zastrešenia ruiny je úzko spätá s informáciou o riešení pôvodného zastrešenia. Práve ona determinuje voľbu metódy obnovy ruiny a riešenia novej strešnej konštrukcie. Pri jej dostupnosti a spoľahlivosti možno ruinu slohovo rekonštruovať do pôvodného stavu, pri jej nespoľahlivosti možno ruinu rekonštruovať len náznakovo a pri jej úplnej absencii nemožno uvažovať s iným doplnkom zastrešenia ako novotvarovým, ktorý svojou artikuláciou nenavádza užívateľa k dezinterpretácii novej konštrukcie.

Geometria zastrešenia ruín taktiež súvisí s ich základnou typológiou, delená podľa ich polohy voči ruine do troch kategórií – (a) krycie konštrukcie nad ruinami, alebo ich celými areálmi, (b) ochranné konštrukcie so strešnými konštrukciami položené priamo na ruine a (c) ochranné konštrukcie so strešnými konštrukciami vložené do ruiny, tzv. kontajnery [1], [2]. Podľa platných definícií strešných konštrukcií a stavieb možno len druhú typológiu považovať za reálne zastrešenie ruiny, oživujúce a zvyšujúce ruinu na funkčný objekt. Príspevok je ďalej zameraný práve na tento typ zastrešenia.

Strešná konštrukcia môže byť na ruine položená (a) priamo, alebo pomocou (b) dištančného článku rôzneho konštrukčného riešenia, či už otvoreného, polouzatvoreného (perforovaného), alebo plnostenného transparentného, alebo nepriehľadného. V oboch prípadoch môžu zastrešenia reagovať na požiadavku novovzniknutého priestoru ťažiť z priestorových kvalít, ktorými ruina za svojho funkčného stavu nedisponovala, ako napr. presvetlenie, vzdušnosť, priestorovosť (Obrázok 1).

Tvaroslovie zastrešenia je výsledkom diferenciacie a kombinácie základných architektonických charakteristík (a) horizontálnej strešnej konštrukcie a (b) vertikálnej konštrukcie dištančného článku, na ktorom je strešná konštrukcia položená. Strešná konštrukcia (a) je definovaná tvarom, sklonom, orientáciou zastrešenia a súborom architektonických detailov, ktorými zastrešenie pôvodne disponovalo, napr. presahom strešnej konštrukcie, vikiermi. Dištančný článok (b) ako prostredník medzi novým zastrešením a pôvodnými konštrukciami ruiny je definovaný výškou rímsy, polohou voči lícu steny ruiny a taktiež súborom architektonických detailov, napr. otvorových, či visutých konštrukcií. Obe konštrukcie možno diferencovať a ďalej kombinovať v ich materiálovom prevedení. Pri návrhu zastrešenia a stupňovaní všetkých charakteristík a ich porovnávaní s pôvodnými črtami ich možno uvažovať buď ako pôvodné, alebo príbuzné, alebo iné (žiadne).

Pre ilustráciu možností návrhu zastrešenia bola vytvorená séria zjednodušených architektonických modelov zastrešenia s vymedzenými determinantmi. Ilustrácie ukazujú možné diferenciacie novotvaru plochej strechy na vybranom reprezentantovi² (Obrázok 2).³ Predmetom stupňovania architektonických charakteristík strešnej konštrukcie je jej presah – (i) pôvodný, (ii) väčší, alebo (iii) žiadny; charakteristík konštrukcie steny výška jej rímsy – (i) pôvodná, (ii) nižšia, ale presahujúca ruinu a umožňujúca výhľad ponad jej korunu, (iii) stotožnená s dochovanou výškou ruiny, ale s možnosťou prekrytia korún jej murív strešnou konštrukciou, (iv) stotožnená s dochovanou výškou ruiny bez možnosti prekrytia jej korún strešnou konštrukciou a (v) minimálna k prekrytiu jedného podlažia, umožňujúca vyhliadku ponad korunu ruiny zo strešnej konštrukcie; a ďalej poloha novej steny voči lícu steny originálu – (i) stotožnená, zalicovaná, (ii) mierne zapustená za líce steny originálu, (iii) stotožnená s rubom muriva originálu, a teda vložená do pôvodného interiéru, a (iv) vložená do interiéru vyjadrená rámovou konštrukciou.⁴

² Veža 10 na juhovýchodnom cípe trnavského mestského opevnenia.

³ Plochá strecha bola zvolená ako prostriedok pre zjednodušenie sledovania a porovnávanie stupňovania spomínaných determinantov, ktoré boli stupňované v významných krokoch. Korelácia s tvaroslovím už obnovených veží trnavského mestského opevnenia nie je úmyselná.

⁴ Ostatné architektonické charakteristiky ako tvar, sklon, či orientácia strechy sú obmedzené voľbou tvaru plochej strechy; charakteristiky materiálovej bázy konštrukcií strechy, steny a dimenzia architektonických prvkov a detailov ako okná, vikiere, arkiere apod. sú v tejto ilustrácii abstrahované.

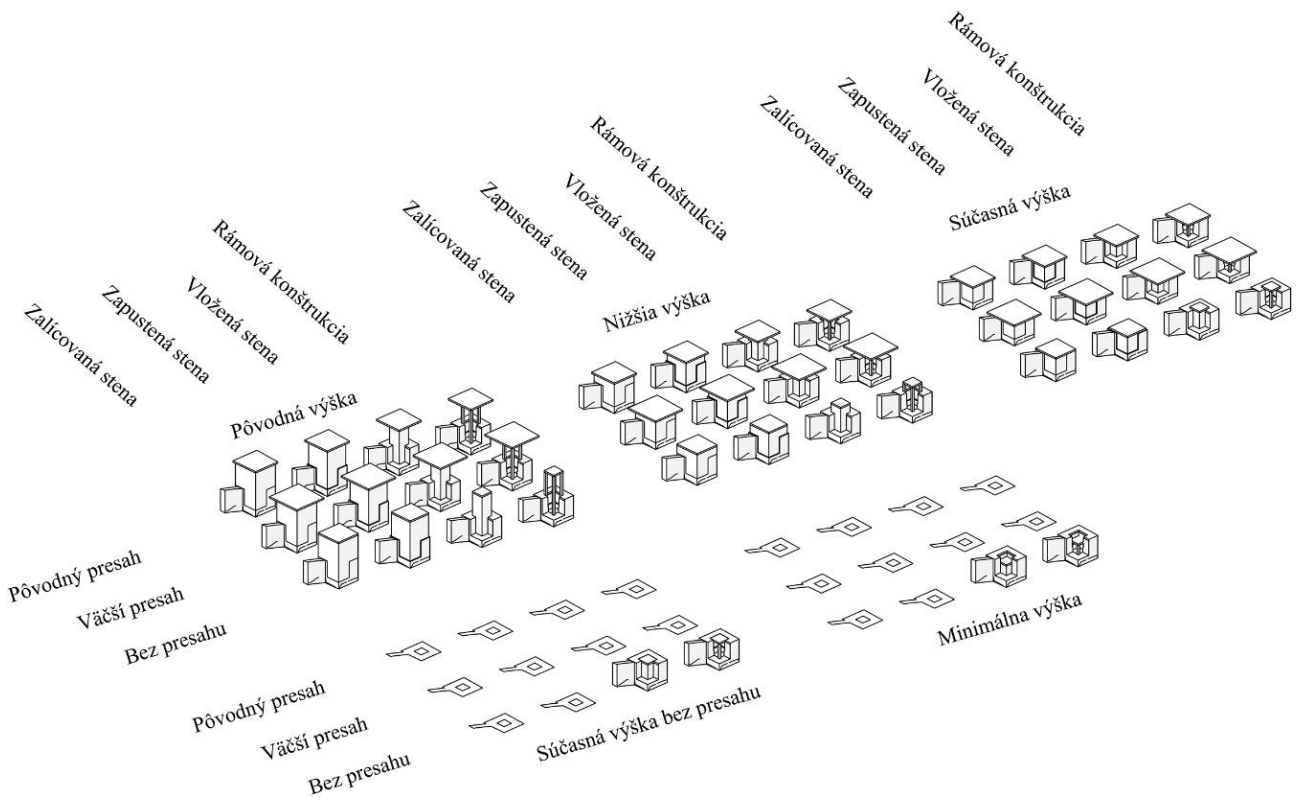


Obrázok 1 – Ochranné konštrukcie položené na ruine priamo (vyššie) [3], [4], alebo cez dištančný článok (nižšie) [5], [6]

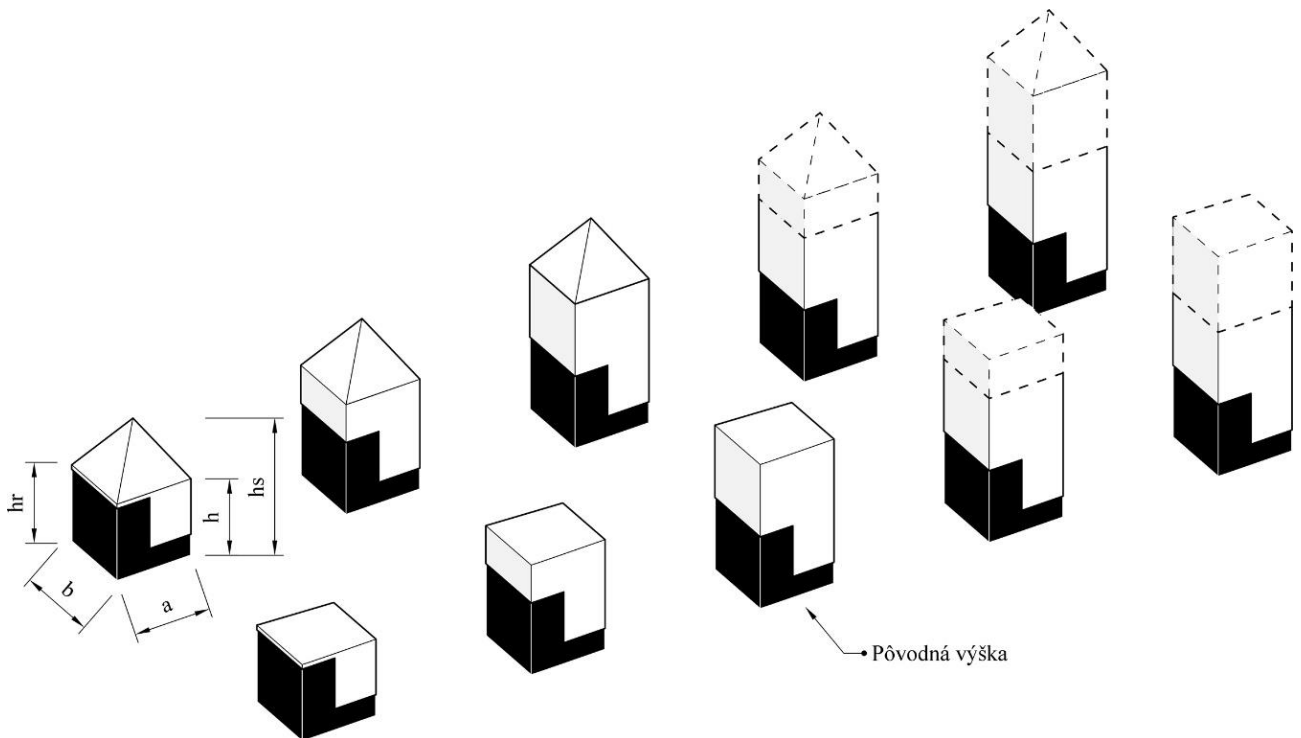
Príspevok ďalej vychádza z predpokladu, že zastrešenie mení geometriu ruiny a s ňou súvisiacu exponovanosť voči pôsobeniu deštruentov v troch základných rovinách (a) zmenou jej proporcií, (b) zmenou jej tvaru a (c) vytváraním sústav architektonických detailov (c-a) v miestach stykov strešnej konštrukcie a konštrukcie steny (dištančného článku), (c-b) v miestach styku konštrukcie steny s pôvodnými konštrukciami ruiny, a (c-c) v miestach styku strešnej konštrukcie priamo s pôvodnými konštrukciami ruiny [7], [8], [9], [10].

3. Proporcía a tvar

Proporcía výsledného objektu je limitovaná rozmermi pôdorysnej základne ruiny. Pri zvolenom reprezentantovi vežového typu je pomer šírky k hĺbke objektu približne rovný hodnote 1. Pri manipulácii proporcie objektu sústredenie leží na zmene výšky výsledného objektu. Tá je ohraničená v minimálnej hodnote zachovanou výškou korún murív ruiny a výškou jedného funkčného podlažia, ktorá reprezentuje minimálnu využiteľnosť výsledného objektu. V maximálnej hodnote je výška výsledného objektu ohraničená pôvodnou výškou objektu v jeho stave pred deštrukciou, ktorá sa metodicky nesmie prekročiť. Medzi týmito dvomi hodnotami je stupňovanie výšky objektu limitované jeho podlažnosťou (Obrázok 3).



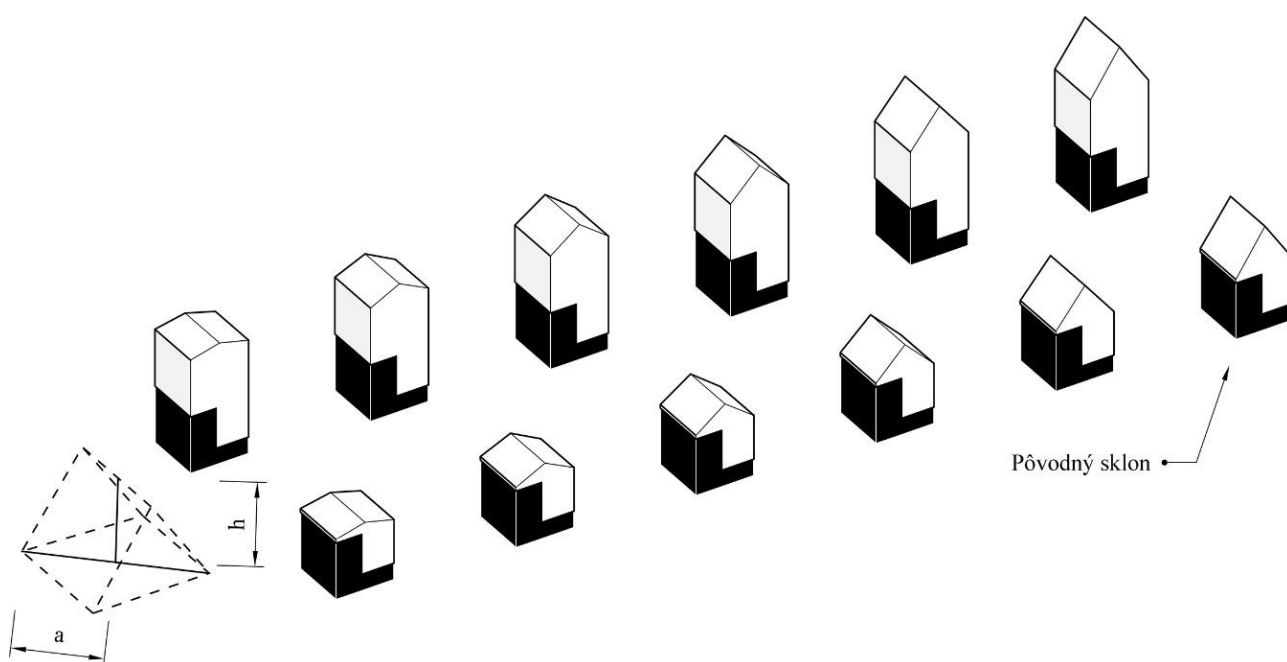
Obrázok 2 – Variácie novotvaru plochej strechy na juhovýchodnej nárožnej veži V10 trnavského mestského opevnenia podľa stanovených determinantov



Obrázok 3 – Ilustrácia stupňovania proporcie zastrešenej ruiny

Zastrešenie tohto typu všeobecne chráni ruinu prekrytím korún murív a uzatvorením interiéru. Manipulácia proporcie objektu za účelom ochrany ruiny v jeho podnoží vychádza z existencie exponovanej oblasti objektu v lokalite jeho strešnej rímasy a z predpokladu účinnosti oddiaľovania tejto lokality od pamiatkovo chránenej autentickej hmoty ruiny. Predpokladá sa tiež existencia limitnej výšky, za ktorou jej úmyselné zväčšovanie nemá na ruinálnu substanciu z tohto hľadiska žiaden dopad.

Tvar zastrešenia vytvára predmet záujmu v rovine sklonu a orientácie zastrešenia (Obrázok 4). Obe charakteristiky je zmysluplné stupňovať na nižšom objekte ako spomínaná limitná výška. Predpokladá sa existencia limitného sklonu strechy, do ktorého stupňovanie sklonu za účelom znižovania exponovanosti ruiny nemá na ruinu žiaden vplyv a ruina so šikmou strechou je podobne exponovaná ako ruina zastrešená so strechou plochou, alebo žiadnou. Zväčšovanie sklonu strechy nad limitnú hodnotu bude pravdepodobne mať na ruinu podobný dopad ako pri manipulácii s proporciou ruiny, a teda jej navyšovaním vertikálnou konštrukciou dištančného článku.

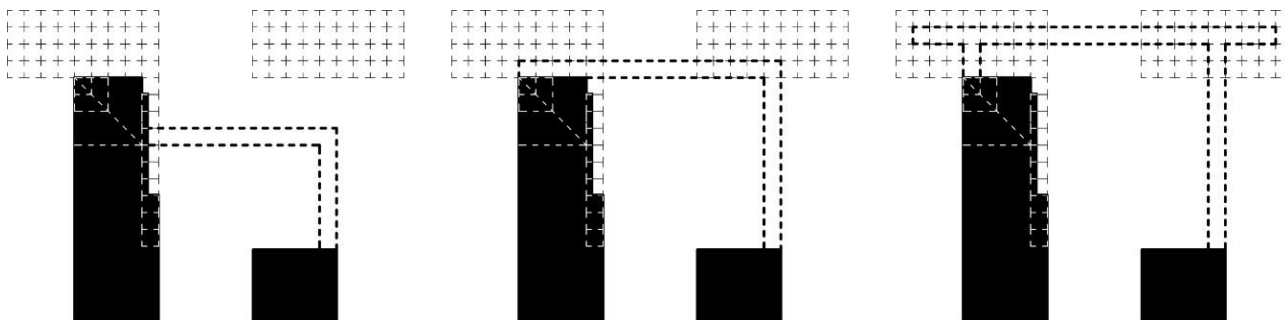


Obrázok 4 – Ilustrácia stupňovania sklonu sedlovej strechy

4. Detail kontaktu

Charakteristické detaily v sledovanej oblasti možno sledovať rôzne podľa výšky osadenia zastrešenia a podľa konštrukčného riešenia dištančného článku, na ktorom je zastrešenie položené. Typickou situáciou je vloženie zastrešenia do pôvodného interiéru ruiny do výškovej úrovne, z ktorej možno zo zastrešenia mať výhľad ponad pôvodné koruny murív ruiny, preberajúce funkciu zábradlia (Obrázok 5). Ďalšou situáciou je stotožnenie výšky osadenia zastrešenia s výškou zachovaných korún murív ruiny, kedy predmetom záujmu sa stáva veľkosť presahu strešnej konštrukcie. Pri zdvihnutí zastrešenia nad pôvodné koruny murív ruiny do záujmu vstupuje konštrukčné riešenie dištančného článku. Jeho výška je limitovaná podlažnosťou vnútorného priestoru pod zastrešením, poloha voči lícu muriva ruiny je stupňovaná s krajnými hodnotami predstavujúcimi mierne zapustenie dištančného článku za líce ruiny a stotožnenie rubu dištančného článku s rubom muriva ruiny. Materiálová dimenzia problematiky je obmedzená na dve riešenia – plné a prázdne, kedy dištančný

článok je riešený ako rámová konštrukcia. V druhom prípade je predmetom záujmu a stupňovania veľkosť presahu zastrešenia.



Obrázok 5 – Ilustrácia variácie konštrukčných detailov kontaktu zastrešenia s ruinou – charakteristický stupňovaný rozmer tvorí štvrtina hrúbky koruny muriva ruiny

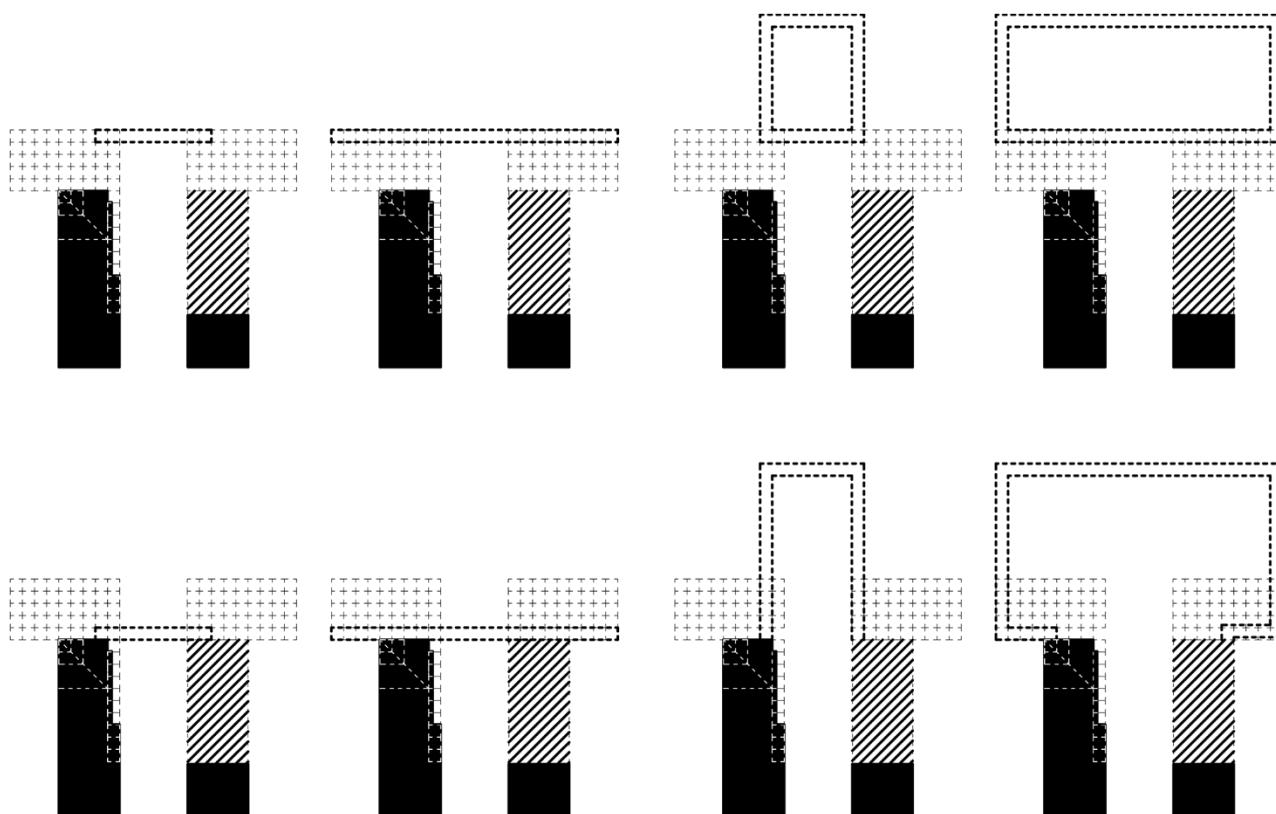
Dve krajné výšky zastrešenej ruiny prichádzajú do pozornosti – prvá čo najviac stotožnená so zachovanou výškou ruiny v snahe minimalizovať zásah do jej autentického stavu; druhá totožná s pôvodnou výškou objektu pred jeho deštrukciou v snahe zrekonštruovať pôvodný objem. V oboch krajných polohách horizontálnej časti zastrešenia možno sledovať dopad stupňovania dvoch archetypálnych vlastností kontaktu zastrešenia s ruinou – zmena polohy líca krajnej časti zastrešenia voči lícu ruiny (či už vo forme strešného presahu, predsadeného, alebo zapusteného líca novej steny) a vertikálne odsadenie celej konštrukcie zastrešenia od koruny murív ruiny (a vytvorenie prázdneho dištančného článku).

Pri stupňovaní presahu strechy pred líce ruinálneho muriva existuje predpoklad hraničnej veľkosti presahu, za ktorou ďalšie zväčšovanie nemá na zmenu exponovanosti ruinálneho materiálu koruny žiaden vplyv. Pri stupňovaní zapúšťania strechy za líce ruinálneho muriva predpokladáme limitnú polohu, za ktorou je materiál koruny muriva ruiny exponovaný rovnako ako nezastrešená ruina. Pri stupňovaní vzdialenosti strešnej konštrukcie (či v nízkej doskovej forme, alebo vysokej objemnej) sa predpokladá existencia limitnej vzdialenosti, za ktorou ďalšie zvyšovanie odstupu nemá na exponovanosť koruny muriva ruiny žiaden vplyv, ruina je exponovaná podobne ako nezastrešená ruina.

5. Diskusia a záver

Úvahy o zmene proporcie a tvaru objektu iba za účelom zefektívnenia ochrany ruiny v jeho podnoží sú problematické pri obnove pamiatkovo chránenej ruiny. V takomto kontexte základy diskusie o hrubom tvarovaní nového objektu spočívajú na výsledkoch pamiatkového výskumu. Rozhodnutie sa opiera o informáciu o výške pôvodného objektu a tvare jeho zastrešenia. Prioritou je zhmotnenie, prípadne reinterpretovanie tejto informácie do účinnej pamiatkovej prezentácie – z hľadiska ochrany materiálu ruiny výsledok efektívny byť nemusí a v.v..

Sloboda architektonickej tvorby je limitovaná a sústredená na tvaroslovie kontaktu nového zastrešenia s autentickým materiálom ruiny. V mierke detailu úvahy o dopade konkrétneho riešenia na mieru ochrany materiálu nájdú svoje miesto v diskusii možno skôr. Otáznou ostáva miera akou dokáže zvýšiť efektívnosť ochrany ruinálneho materiálu zastrešenie alternované iba v detaile a či by daná problematika nemala byť v diskusii o stvárnení zastrešenia ruiny otváraná skôr.



Obrázok 6 – Krajné pozície tvaroslovia kontaktu ruiny so zastrešením – hore maximálne, dole minimálne odsadenie zastrešenia od ruiny; vľavo štvorica doskových zastrešení, vpravo vysokých, objemných; ľavý stĺpec v rámci štvorice prezentuje minimálny presah strechy, pravý maximálny

6. Referencie

- [1] VOJTEKOVÁ, Eva, Jana GREGOROVÁ, Beáta POLOMOVÁ a Karolína SÁSIKOVÁ. Monument restoration - A controlled task does not limit creativity. *World Transactions on Engineering and Technology Education*. 2018, **16**(3), 269-274.
- [2] CHOVANCOVÁ, Lýdia. *Krycie konštrukcie torz architektúry: Ochranné konštrukcie a krycie stavby torz architektúry*. SR, 2016, 190 s. Dizertačná práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta architektúry.
- [3] Astley Castle. In: *Wetherford Watson Mann Architects* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://www.wmarchitects.co.uk/projects/astley>
- [4] Ferran Vizoso. Huge Skylight Church. In: *Divisare* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://divisare.com/projects/233700-ferran-vizoso-jose-hevia-huge-skylight-church>
- [5] Conservation, Restoration and Adaptation of Church “St. Paraskeva“ / Todor Mihaylov, Elitsa Andreeva, Emilia Kaleva, Aleksandra Vadinska. In: *ArchDaily* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: http://www.archdaily.com/573012/conservation-restoration-and-adaptation-of-church-st-paraskeva-te-architects?ad_source=search&ad_medium=search_result_projects

- [6] Monastery of San Juan Cover / BSA. *In: ArchDaily* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: http://www.archdaily.com/783820/cubierta-monasterio-de-san-juan-bsa?ad_source=search&ad_medium=search_result_all
- [7] MOU, Ben, Bao-Jie HE, Dong-Xue ZHAO a Kwok-wing CHAU. Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* [online]. 2017, **11**(1), 293-309 [cit. 2021-07-22]. ISSN 1994-2060. Dostupné z: doi:10.1080/19942060.2017.1281845
- [8] SINGH, Jagbir a Amrit ROY. Effects of roof slope and wind direction on wind pressure distribution on the roof of a square plan pyramidal low-rise building using CFD simulation. *International Journal of Advanced Structural Engineering* [online]. 2019, **11**(2), 231-254 [cit. 2021-07-22]. ISSN 2008-3556. Dostupné z: doi:10.1007/s40091-019-0227-3
- [9] FOUAD, Nourhan, Gamal MAHMOUD a Nasr NASR. Comparative study of international codes wind loads and CFD results for low rise buildings. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2018, **57**(4), **3623-3639** [cit. 2021-07-22]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2017.11.023
- [10] BIELEK, Boris, Michal FRANEK a Milan BIELEK. Aerodynamika a hydrodynamika budov: Fyzikálne problémy účinku vetra a hnaného dažďa na budovy a konštrukcie. SR: *Slovenská technická univerzita* v Bratislave, 2020. ISBN 978-80-227-5051-6.

Robert Provazník¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 3.

ANALÝZA POJMOV A PROCESOV TÝKAJÚCICH SA UHLÍKOVO NEUTRÁLNYCH BUDOV

ANALYSIS OF TERMS AND PROCESSES RELATED TO CARBON NEUTRAL BUILDINGS

Abstract

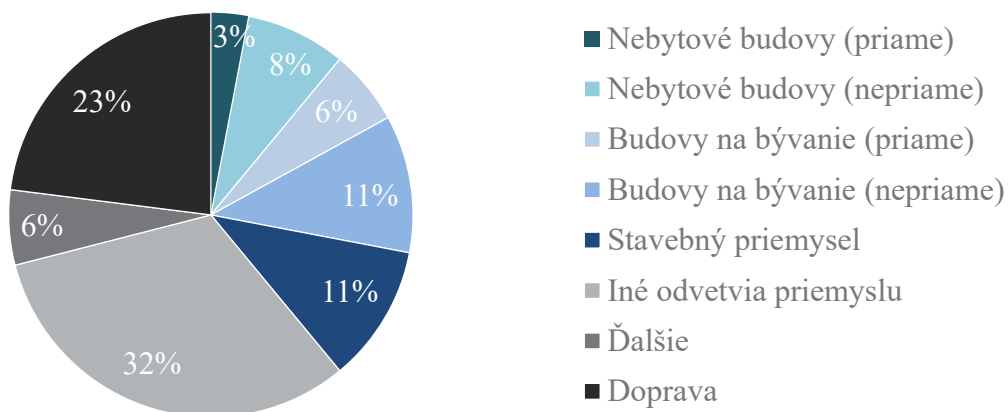
One of the biggest global threats today is climate change, which is also significantly influenced by the construction sector through the production of greenhouse gas emissions. In accordance with the European Green Deal, the goal of the European Union is to achieve carbon neutrality by 2050. For the design, construction and operation of buildings, this means reducing not only operational but also embodied emissions.

Kľúčové slová

emisie skleníkových plynov; uhlíkovo neutrálne budovy; Európsky ekologický dohovor

1. Dopad stavebného sektoru na emisie skleníkových plynov

Stavebníctvo je v súčasnosti jedným z najväčších prispievateľom k emisiám skleníkových plynov [1], ktoré majú za následok klimatickú zmenu. Desiatky rokov sa kládol dôraz najmä na znižovanie potreby prevádzkovej energie, či už sa jednalo o obnovované alebo nové budovy. Opatrenia na zvýšenie energetickej hospodárnosti v praxi znamenajú najmä využívanie vysoko účinných technických zariadení a zväčšovanie množstva tepelnej izolácie. V dôsledku toho nielen narastá relatívny pomer zabudovanej energie, ale aj výdaj zabudovaných emisií budov v dôsledku väčšej spotreby materiálov. V súčasnosti sa tak do pozornosti dostáva aj znižovanie zabudovaných emisií.



Obrázok 1: Globálny podiel sektoru budov a výstavby na hodnoty konečných emisií [2]

¹ Robert Provazník, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

1.1 Európsky ekologický dohovor

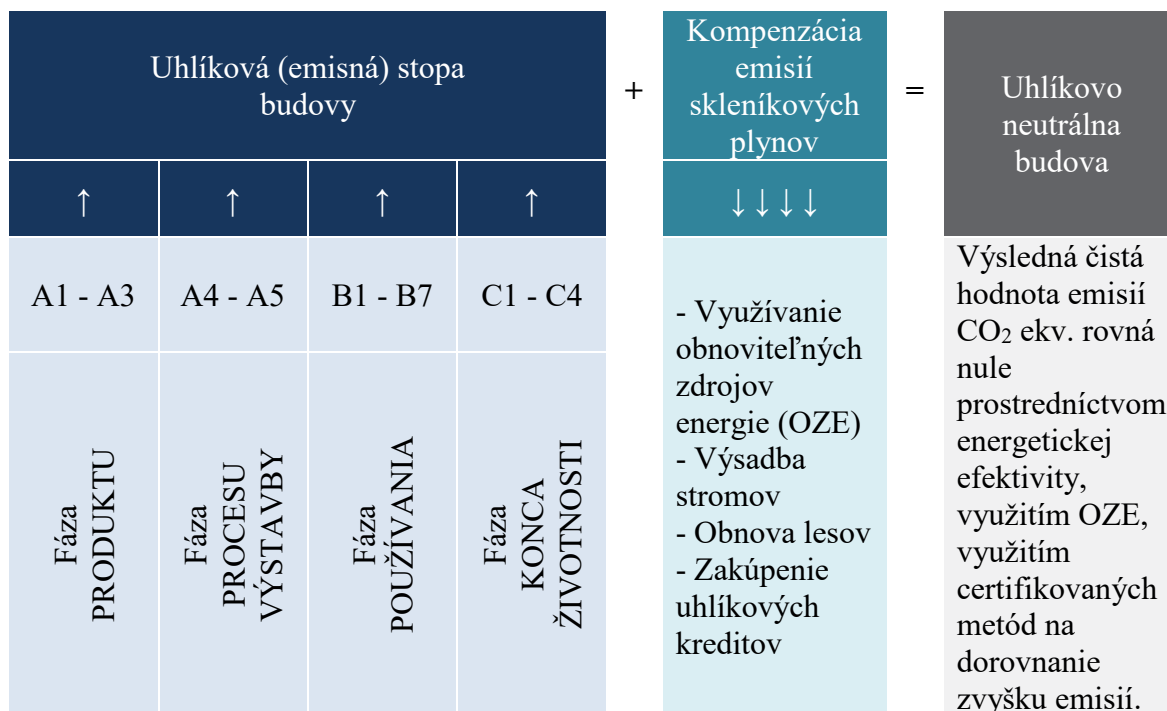
Európska Únia sa 11. decembra 2019 vydaním dokumentu Európsky ekologický dohovor, tzv. Green Deal [3] zaviazala dosiahnuť do roku 2050 uhlíkovú neutralitu s cieľom ochrany planéty, klímy a obyvateľstva. Uhlíková neutralita v praxi znamená, že by sme mali produkovať toľko emisií CO₂ ekv., koľko ho z atmosféry dokážu naviazať tzv. uhlíkové zachytávače. Konkrétne návrhy a opatrenia na dosiahnutie cieľov dohovoru boli prezentované v roku 2021 a vyústili do dokumentu „Fit for 55“. Súčasťou dokumentu je návrh, aby sa od roku 2026 začalo obchodovať s emisiami v sektore budov s hornou maximálnou hranicou, aby sa následne zabezpečil postupný pokles emisií.

2. Definícia a základné pojmy uhlíkovo neutrálnych budov

2.1 Definícia uhlíkovo neutrálnych budov

Vo všeobecnosti sa pojem uhlíková neutralita [4] vzťahuje na dosiahnutie výsledných nulových emisií vyrovnaním vyprodukovaných a absorbovaných emisií CO₂ ekv. v atmosfére v zachytávačoch emisií. Aby sa dosiahlo výsledné nulové množstvo, všetky emisie skleníkových plynov musia byť vyvážené sekvestráciou či pomocou kompenzácie. Príkladom systému kompenzácie je systém obchodovania s emisiami (ETS) Európskej únie [4].

Pojem uhlíkovo neutrálna budova naša či zahraničná legislatíva ani normy nedefinujú a doposiaľ neexistuje jednotná definícia. V dostupnej literatúre je však tento pojem často používaný v rôznych obmieňaných formách [5], [6], [7]. Metodologické prístupy a spôsoby hodnotenia sú rovnako nejasne dané. V zmysle všetkých definícií však môžeme hovoriť o energeticky vysoko efektívnej budove, ktorá na mieste vyrába alebo obstaráva dostatok energie z OZE na pokrytie spotreby energií na ročnú prevádzku budovy (kúrenie, chladenie, vetranie, osvetlenie, atď.) a rovnako počas jej životného cyklu, čím sa kompenzujú zabudované emisie CO₂ ekv. obsiahnuté v konštrukcii budovy.



Obrázok 2: Princíp dosiahnutia uhlíkovo neutrálnej budovy [5]

2.2 Kompenzácia emisií skleníkových plynov (Carbon offsetting)

Kompenzácia emisií CO₂ ekv. je metóda, ktorý umožňuje jednotlivcom a organizáciám kompenzovať emisie skleníkových plynov prihlásením sa do schém, ktoré ich kompenzujú. Kompenzácia však často nezahŕňa odstránenie emisií z atmosféry, na rozdiel od zachytávania alebo odstraňovania emisií CO₂ ekv..

Na trhu je viacero kompenzačných schém. Mnohé z nich sú dobrovoľné a umožňujú kompenzovať časť alebo všetky emisie prostredníctvom rôznych metód. Medzi ne patria zalesňovanie území, ochrana území pred odlesňovaním (tzv. „avoided deforestation“), investície do rozvoja využívania obnoviteľných zdrojov energie, a zachytávanie atmosférických emisií skleníkových plynov. Jednotlivé kompenzačné schémy sa však líšia svojou účinnosťou. Napríklad kompenzácia investovaním do nového systému OZE môže v budúcnosti viesť k zníženiu emisií z fosílnych palív, ale neprispieva k odstraňovaniu už vzniknutých emisií.

2.3 Zachytávanie a odstraňovanie emisií skleníkových plynov (Carbon capture & Carbon removal)

Odstraňovanie emisií CO₂ ekv. zahŕňa aktívne odstraňovanie emisií skleníkových plynov z atmosféry, na rozdiel od ich kompenzácie. Odstránenie sa dosiahne ich zachytávaním, formou prírodných alebo priemyselných procesov.

Najznámejším spôsobom zachytávania prírodným procesom je zalesňovanie a výsadba stromov. Emisie skleníkových plynov sa môžu zachytiť aj v pôde využívaním vhodných techník obhospodarovania pôdy a udržateľného poľnohospodárstva. Priemyselné metódy zachytávania zahŕňajú priame zachytávanie vzduchu (DAC) s extrakciou emisií skleníkových plynov z atmosféry pomocou technológií a strojov. Emisie môžu byť potom buď sekvestrované (viď ďalšia definícia) alebo sa môže použiť ako surovina prostredníctvom procesu známeho ako zachytávanie a využitie emisií skleníkových plynov (CCU). Emisie možno zachytávať aj z fosílnych palív, čím sa bráni veľkej časti plynu dostať sa do atmosféry pri spaľovaní. Zachytávanie pred spaľovaním zahŕňa chemické odstránenie ekvivalentného množstva CO₂ z fosílnych palív ešte pred ich spaľovaním. Zachytávanie po spaľovaní zahŕňa zachytávanie emisií z dymovodov pomocou kvapalného rozpúšťadla alebo iných separačných metód v elektrárnach a priemyselných závodoch, ktoré spaľujú fosílnu palivá. Ani zachytávanie pred spaľovaním, ani zachytávanie po spaľovaní však neznižuje množstvo atmosférických emisií skleníkových plynov.

Zachytávanie emisií bude zohrávať kľúčovú úlohu pri znižovaní objemov atmosférických emisií skleníkových plynov, pretože aj keby sa v súčasnosti zastavilo vytváranie nových emisií, v atmosfére je ich už dosť na to, aby teplota na Zemi rástla ďalších 40 rokov.

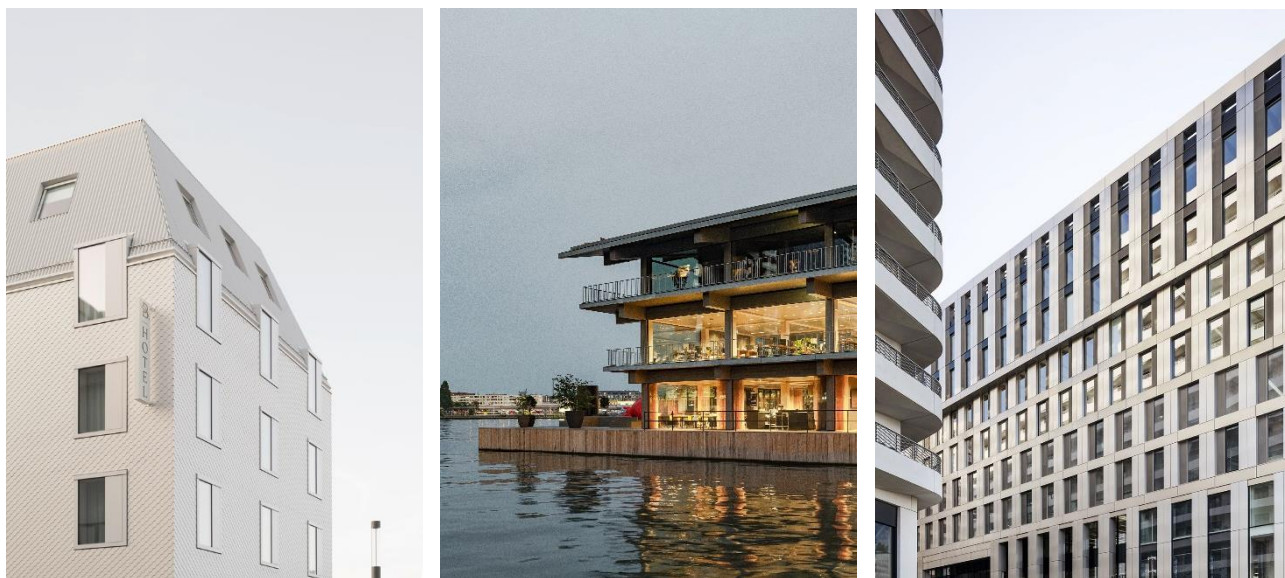
2.4 Sekvestrácia emisií skleníkových plynov (Carbon sequestration)

Sekvestrácia emisií CO₂ sa vzťahuje na dlhodobé ukladanie emisií, ktoré boli zachytené z atmosféry. Proces sa deje prirodzene, napríklad keď stromy a ďalšie formy vegetácie absorbujú oxid uhličitý. Biomasa Zeme obsahuje odhadom 560 miliárd ton emisií CO₂. Oceány a živočíchy v sebe takisto zachytávajú obrovské množstvo známe ako modré emisie.

3. Návrh, výstavba a prevádzka uhlíkovo neutrálnych budov

3.1 Návrh uhlíkovo neutrálnych budov

O principiálnych cieľoch, opatreniach a spôsoboch kompenzácie, hovorí samotná definícia uhlíkovo neutrálnej budovy spomínaná v predchádzajúcich odstavcoch. Navrhnuť takúto stavbu je náročné, ale existujú prvé realizácie, ktoré preukazujú, že to je možné. Ešte náročnejšie je meraním preukázať, že budova sa správa podľa predpokladov. Popredné certifikáty uhlíkovej neutrality preto vydávajú osobitne certifikát neutrality počas návrhovej fázy a počas prevádzky. Budove poskytujú 3 roky na to, aby odhalila chyby a dodatočne preklenula rozdiel v projektovanej a skutočnej potrebe (resp. spotrebe) energie (tzv. „performance gap“) a dosiahla tak požadované parametre.



Obrázok 3: Príklady zrealizovaných uhlíkovo neutrálnych budov; zľava - Hotel Bergamo (Von M); Floating Office Rotterdam (Powerhouse company); Green Office Enjoy (Baumschlager Eberle Architekten) [s povolením autorov budov]

Na dosiahnutie uhlíkovo neutrálnej budovy nestačí zníženie prevádzkových emisií. Úsilie je potrebné vynaložiť aj na zníženie zabudovaných emisií výberom materiálov [5], ktoré dosahujú priaznivé hodnoty z hľadiska environmentálneho dopadu. Podniknutie krokov na zníženie prevádzkových emisií budovy si však zvyčajne vyžaduje zvýšenie zabudovanej emisnej stopy v dôsledku zvýšenej spotreby materiálov, najmä za účelom skvalitnenia teplovýmennej obálky budovy.

Materiály a konštrukčný systém volíme v zmysle súčasnej stavebnej paradigmy s ohľadom na² estetiku, životnosť, cenu, dostupnosť, fyzikálne parametre (akustické, tepelnotechnické, statické...). Pri výbere materiálov udržateľnej budovy (s cieľom dosiahnutia uhlíkovej neutrality) by sa však malo myslieť najmä na² vplyv na životné prostredie (emisie, odpad, okysľovanie), vplyv na kvalitu vnútorného prostredia (tepelná technika, vlhkostný režim), životnosť budovy (údržba, oprava, zmena funkčného využitia), možnosť dekonštrukcie a opätovného využitia materiálov (resp. prvkov).

² poradie neurčuje dôležitosť

V súčasnosti neexistuje komplexný nástroj pre výpočet emisií stavby vo všetkých oblastiach pre efektívny proces návrhu uhlíkovo neutrálnej budovy [8]. Spôsob návrhu je kombináciou viacerých metód, nástrojov a techník znižujúcich jej emisnú stopu [9]:

- Tepelná ochrana budov, nastavenie parametrov obalového plášťa, posúdenie tepelných mostov.
- Vhodný návrh výplni otvorových konštrukcií budovy so splnením požadovaných parametrov, návrh optimálneho typu tienenia.
- Simulácia a optimalizácia denného osvetlenia pomocou simulačných nástrojov.
- Termodynamická simulácia budovy.
- Výpočet emisií CO₂ ekv. vznikajúcich počas prevádzky v rámci posudzovaných navrhovaných variantov.
- Využitie obnoviteľných zdrojov energií (OZE).
- Návrh inteligentných (tzv. „smart“) systémov na monitoring a redukovanie prevádzkovej energetickej spotreby.
- Certifikácia uhlíkovo neutrálnej budovy (vo fáze návrhu).

3.2 Výstavba uhlíkovo neutrálnych budov

Pri realizácii uhlíkovo neutrálnej budovy je rovnako snaha o znižovanie emisných tokov, za účelom zníženia celkovej emisnej stopy stavby. Návrhom prefabrikovanej montovanej konštrukcie je možné urýchliť výstavbu a znížiť zabudované emisie, ktoré by vznikali potrebou veľkého množstva strojov a veľkej spotreby energie pri výstavbe. Navrhnutím budovy s možnosťou rozobratia konštrukcie a opätovného využitia prvkov môže znížiť množstvo zabudovaných emisií až o 88% [10]. Z pohľadu znižovania vplyvu na životné prostredie je výhodou aj menšie množstvo odpadu, ktoré vznikne pri prefabrikácii, v porovnaní s konvenčne používanými spôsobmi výstavby.

Vo fáze výstavby môže výsledné hodnoty energetickej efektivity (a teda prevádzkovej emisnej výdatnosti) výrazne ovplyvniť aj samotná kvalita fázy výstavby [5], či už z hľadiska manažmentu a najmä kvality technického vyhotovenia.

Pri výstavbe a pred uvedením do prevádzky sa využívajú nasledovné nástroje:

- Termovízne snímkovanie na identifikáciu miest s tepelnými stratami, hromadením vlhkosti a lokalizáciu rôznych porúch rozvodov.
- Test vzduchotesnosti (tzv. „Blower door test“) na odhalenie miest a rozsahu netesností v konštrukcii.

3.3 Prevádzka uhlíkovo neutrálnych budov

Pre uhlíkovo neutrálne budovy platí, že budova počas prevádzky vyrobí alebo dodá z OZE také množstvo energie, že na 100% pokryje svoju energetickú potrebu (vykurovanie, chladenie, vetranie, osvetlenie, PC, atď.). Jedna z vecí, ktorú je ťažké predvídať a ovplyvniť návrhom budovy je správanie sa jej užívateľov. Aj od toho závisí vo fáze prevádzky jej výsledná energetická efektívnosť [5].

Vo fáze prevádzky uhlíkovo neutrálnej budovy sa uskutočňuje:

- Dodatočná kompenzácia emisií skleníkových plynov formou spomínaných metód.
- Vyhodnocovanie spotrieb, návrh a realizácia nápravných opatrení.
- Certifikácia uhlíkovo neutrálnej budovy (vo fáze prevádzky).

Záver

Cieľom príspevku bola analýza a zhrnutie pojmov týkajúcich sa uhlíkovo neutrálnych budov a zdôraznenie potreby ďalšieho bádania, ale aj rozširovanie poznania o uvažovaní v zmysle cieľov Európskeho ekologického dohovoru. Po analyzovaní problematiky je možné konštatovať, že problémom je rôznorodosť definícií uhlíkovo neutrálnej budovy, z čoho vyplýva potreba jednoznačného zadefinovania tohto pojmu.

Povedomie o potrebe znižovania emisií budov sa zvyšuje a preto je potrebné uvažovať v intenciách navrhovania uhlíkovo neutrálnych budov. Je ideálne, ak sa v rámci fázy ich návrhu a výstavby podarí dosiahnuť uhlíkovú neutralitu aj bez nasledovnej kompenzácie, prípadne čo najmenej miere kompenzácie. V praxi to znamená najmä voľbu materiálov s nízkou emisnou stopou (ideálne zápornou dosiahnutou pomocou sekvestrácie CO₂), ktorú následne nie je potrebné kompenzovať. Takýmto spôsobom je možné znížiť nie len výsledný emisný výdaj budovy, ale aj šetriť zdroje a za určitých okolností aj náklady na realizáciu takejto budovy.

Literatúra

- [1] LUCON, O. et al.: Buildings. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Spojené Kráľovstvo : Cambridge, USA : New York, 2014. 675 s.
- [2] GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDING AND CONSTRUCTION: *2018 Global Status Report Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. 2018. Čerpané dňa: 16.05.2022. Dostupné online na webovej stránke: www.iea.org
- [3] EURÓPSKA KOMISIA: *Európsky ekologický dohovor*. 2019, 24 s.
- [4] EURÓPSKY PARLAMENT: *What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050?* 2021. Čerpané dňa: 08.06.2022. Dostupné online na webovej stránke: www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/
- [5] CAUSONE, F., TATTI, A. a ALONGI, A.: *From nearly zero energy to carbon-neutral: Case study of a hospitality building*. Švajčiarko : Applied Sciences, 2021.
- [6] LÜTZKENDORF, T., FRISCHKNECHT, R.: (Net-) zero-emission buildings: a typology of terms and definitions. *Build Cities*. 2020.
- [7] SATOLA, D. et al.: *How to define (net) zero greenhouse gas emissions buildings: The results of an international survey as part of IEA EBC annex 72*. 2020.
- [8] LA ROCHE, P.: *Carbon-Neutral Architectural Design. Second edition*. 2016.
- [9] CANADA GREEN BUILDING COUNCIL: *Making the Case for Building to Zero Carbon*. 2019. Čerpané dňa: 19.07.2022. Dostupné online na webovej stránke: www.publications.gc.ca/collections/collection_2014/ec/En81-18-2014-eng.pdf
- [10] MINUNNO R, O'GRADY T, MORRISON GM, GRUNER RL: *Investigating the embodied energy and carbon of buildings: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments*. *Renew Sustain Energy Rev*. 2021.

Zuzana Šišková¹

Študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 2.

SÚČASNÍ MAJITELIA STAVIEB VÍL A RODINNÝCH DOMOV Z MEDZIVOJNOVÉHO OBDOBIA. STOTOŽNENIE/NESTOTOŽNENIE SO STAVBOU

CURRENT OWNERS OF BUILDINGS OF VILLAS AND FAMILY HOMES FROM THE INTERWAR PERIOD. IDENTIFICATION/DISIDENTIFICATION WITH BUILDING

Abstract

The perception of family houses and villas from the interwar period, especially from the point of view of the non-specialist public, points to the fact of a lack of information or interest in this valuable architecture, which is especially evidenced by their current condition. Although many of them are preserved in their original state, they are gradually destroyed by various weather and physical influences. Others underwent modernization or renewal, which resulted in the loss of their material, spatial or material essence. This post introduces us to four family houses and villas in Bratislava, which present different approaches of the owners to their objects and different stages and types of renovation. The partial results of the research indicate that the attitude of the owner towards the method of restoration determines his identification or non-identification with the genius loci of the environment and the object.

Abstrakt

Vnímanie objektov rodinných domov a víl z medzivojnového obdobia najmä z pohľadu neodbornej verejnosti poukazuje na fakt nedostatku informovanosti či záujmu o túto hodnotnú architektúru, o čom svedčí najmä ich aktuálny stav. Množstvo z nich je síce dochovaných v pôvodnom stave, ale postupne sú deštruované pôsobením rôznych poveternostných či fyzikálnych vplyvov. Iné prešli modernizáciou či obnovou, ktorá sa svojimi zásahmi podpísala na strate ich hmotovej, priestorovej či materiálnej podstaty. Tento príspevok nás zoznamuje so štyrmi rodinnými domami a vilami v Bratislave, ktoré prezentujú rôzne prístupy majiteľov k ich objektom a rôzne stupne a druhy obnovy. Čiastkové výsledky výskumu naznačujú, že postoj majiteľa k spôsobu obnovy determinuje jeho stotožnenie či nestotožnenie s geniom loci prostredia a objektu.

Kľúčové slová

Medzivojnová architektúra; budovy na bývanie; stotožnenie či nestotožnenie majiteľov

1. Úvod

Po prvej svetovej vojne a po vzniku prvej Československej republiky vznikla naliehavá potreba zabezpečiť bývanie pre novú hospodársku a administratívnu štruktúru štátu, sústredenú v hlavnom meste slovenskej časti republiky v Bratislave. Táto potreba sa premietla do výstavby nájomných

¹ Ing. arch. Ing. Zuzana Šišková, Katedra architektúry, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

bytových domov pre strednú vrstvu obyvateľstva, do výstavby rodinných domov a víl pre nižších a vyšších riadiacich pracovníkov. Pre slabšie sociálne skupiny fungoval systém štátnych pôžičiek a daňových ul'av na výstavbu nájomných bytových domov s malými bytmi. Výstavba bola prirodzene sústredená nie len v riadiacom centre - Bratislave, ale aj v okresných mestách krajiny. Niektoré objekty rodinných domov, ktoré sú predmetom riešenia tohto príspevku sa zachovali v pôvodnom stave, iné pod tlakom modernizácie a normových požiadaviek postupne stratili svoju hmotovú a materiálovú podstatu.

Vybrané boli štyri referenčné stavby víl a rodinných domov v Bratislave, v západnej časti mesta v lokalite hradný kopec a v severozápadnej časti v lokalite Kramáre. Na týchto stavbách budem prezentovať ich dochovanosť, kvalitu zhotovenia, materialitu a prístup majiteľov k spôsobu obnovy. Pri získavaní podkladov som zvolila terénny a archívny výskum. Informácie som čerpala zo súčasnej vedeckej literatúry ako aj dobovej literatúry.

2. Lokalita hradný kopec

V tejto časti mesta nachádzame strednú a vyššiu spoločenskú vrstvu, čo sa prejavuje na vybranej stavebnej firme, ktorá stavbu realizovala ako aj na kvalite použitých materiálov.

2.1 Vila Dr. Elleka

Táto originálna, expresívna stavba, reprezentuje smer moderny inšpirovanej dynamickými formami a priestormi sa nachádza na ulici Bartoňova 2 v Bratislave. Jej architektúra je bohatá, poskytujúca okrem funkcionalistickej logiky aj priestorové vnemové zážitky na rozdiel od minimalistickej či puristickej sociálnej moderny. Postavená bola v roku 1934 pôvodne pre generálneho riaditeľa Živnobanky Dr. Elleka a jej autormi sú architekt Rudolf Nahodil a staviteľ Emil Brüll [1].

a. Urbanistické začlenenie

Objekt je situovaný v blízkosti Palisád, v okolí Bratislavského hradu, v lokalite plnej domov a víl, ktoré v minulosti patrili spoločenskej smotánke. Mnoho okolitých stavieb zaujme svojím architektonickým riešením. Zástavba na hradnom kopci je po severnej strane zapustená svahom pod ulicou čo vytvára značné výškové rozdiely v území. Vila sa napriek tomu svojou výškou vyníma spomedzi radu zástavby, čím tvorí akúsi uličnú dominantu. Situovanie objektu bolo komponované tak, aby dominoval prostrediu z viacerých pohľadov napr. pohľad z Partizánskej ulice. Objekt dodnes ponúka nádherný výhľad zo strešnej terasy na všetky svetové strany, ktorý za osemdesiat rokov nezatienila žiadna nová zástavba [2].

b. Architektonické a výtvarné riešenie

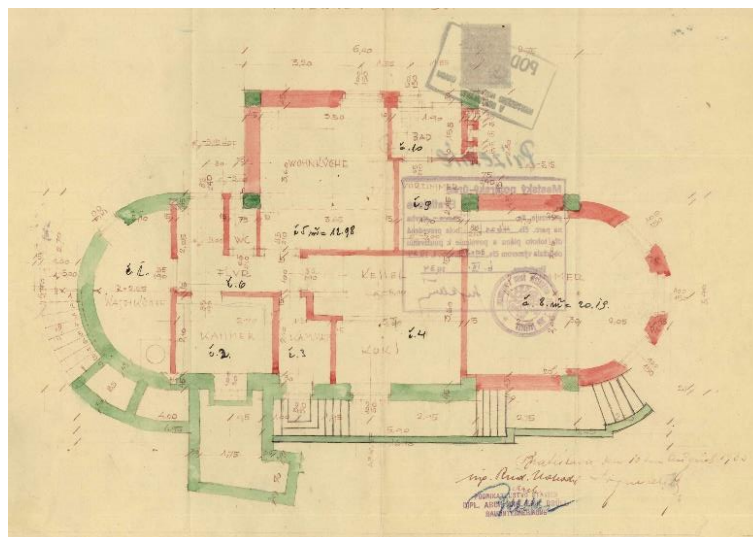
Hmotu domu tvoria dva primárne tvary - valec a hranol, ktoré sa vplyvom dopadu slnečných lúčov a tieňov plasticky menia [2]. Čistá forma funkcionalizmu sa tu prejavuje pri plochej streche, jednoduchej bielej fasáde a jednoduchej tvarovej koncepcii. Oblúková fasáda inšpirovaná parníkom na západnej strane má svoje opodstatnenie pri návrhu interiérového schodiska (obr. 1).



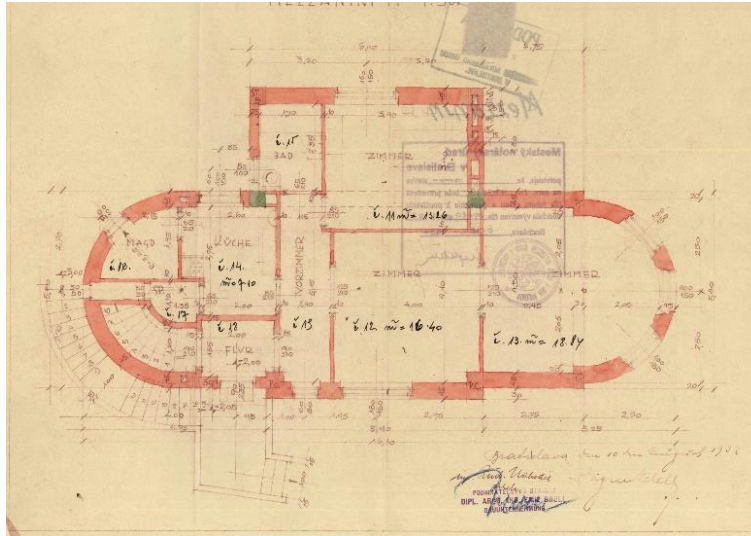
Obr.1: Vila Dr. Elleka - Bartoňova 2 [3]

c. Dispozičné riešenie

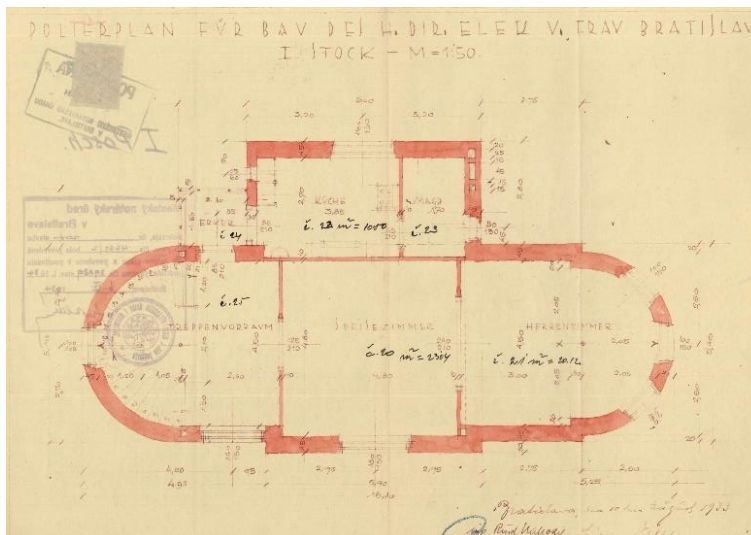
Dispozícia rodinného domu je členená na 4 podlažia. V objekte sa nachádzajú tri bytové jednotky zo vstupom na 1. NP z južnej strany od ulice. Prvý byt sa nachádza na 1. NP. Za vstupnou časťou sa nachádza izba pre slúžku a kúpeľňa orientované na severnú a západnú stranu. Zvyšné izby sú orientované juhovýchodne (obr. 2). Druhý byt sa nachádza na 2. NP. Zo schodiska je prístupný zádverím, ktoré je prepojené s chodbou. Z chodby je prístupná kuchyňa s komorou a miestnosťou pre slúžku zo severnou orientáciou, kúpeľňa orientovaná na východ a tri samostatné izby s orientáciou na juh a východ (obr. 3). Na 3. NP a 4. NP sa nachádza tretí byt. Zo schodiska na 3. NP sú prístupné dve priechodné miestnosti orientované do ulice na juh a západ. Kuchyňa s izbou pre služobníctvo je orientovaná severovýchodne. Na 4. NP sa nachádza kúpeľňa a dve samostatné izby s terasou, ktorá poskytuje južný výhľad na mesto v súčasnosti s dobudovaným skleníkom súčasnými majiteľmi (obr. 4-5).



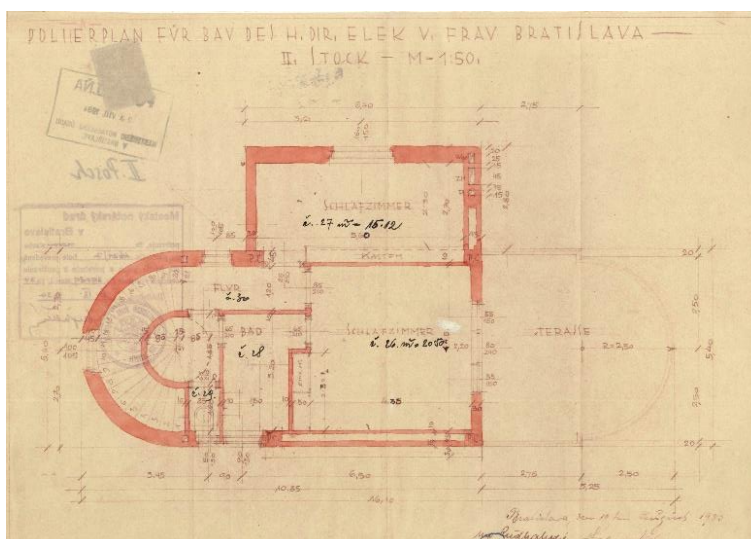
Obr.2: Pôdorys 1. NP - Vila Dr. Elleka - Bartoňova 2 [4]



Obr.3: Pôdorys 2. NP - Vila Dr. Elleka - Bartoňova 2 [4]



Obr.4: Pôdorys 3. NP - Vila Dr. Elleka - Bartoňova 2 [4]



Obr.5: Pôdorys 4. NP - Vila Dr. Elleka - Bartoňova 2 [4]

d. Súčasný stav a funkcia objektu

Zigmund Elek, vlastnil dom veľmi krátko. Pod tlakom protižidovských nálad v roku 1939 dom predal a spolu s manželkou odcestoval do Ameriky. Po 2. svetovej vojne v roku 1945 bola uvalená na majetok národná správa. V povojnovom období sa v dome neurobili žiadne zásadné stavebné zmeny. Súčasný majitelia, pristupovali k obnove domu v základnom princípe s rešpektom k dielu architekta Rudolfa Nahodila a výrazne nenarušili hmotovú skladbu. Na základe archívnej dokumentácie s maximálnym pochopením pôvodných konštrukcií, úpravou povrchov a dispozícií pristúpil k samotnej prestavbe. V prípade dispozičného riešenia domu do výšky je inštalácia výťahu nevyhnutnosťou, najmä ak je bývanie navrhnuté pre všetky vekové skupiny. Prístavba výťahovej šachty zásadne nenarušila hmotovú koncepciu stavby. Konštrukcia zimnej záhrady však nedopadla dobre a nie je s ňou stotožnený ani sám majiteľ. Napriek tomu ide o premyslenú obnovu výnimočného domu, so zachovaním tradície stavebnej kultúry 30. rokov, kedy Československo patrilo medzi svetovú architektonickú elitu [2]. Objekt má zachovanú funkciu aj pôvodný počet bytových jednotiek. Avšak na základe požiadaviek súčasných majiteľov bol interiér prestavaný v ich súčasnom vkuse. Rovnako unáhle pristúpili k obnove exteriéru. Objekt z dôvodu normových požiadaviek zateplili kontaktným zatepľovacím systémom, čím zapríčinili zmenu jeho pôvodných proporcií vo vzťahu k hĺbke osadenia okenných konštrukcií. Plastové okná ktoré boli použité na obnovu taktiež nezodpovedajú výrazu architektúry 30. rokov. Pôvodné nenápadné oplotenie objektu nebolo zachované a bolo nahradené robustným novotvarom, bez kontextu na stavbu a jej okolie (obr. 6).



Obr.6: Vila Dr. Elleka - súčasný stav - Bartoňova 2 [5]

2.2 Vila Dr. Neuschela

Táto nenápadná vila od architektov Franza Wimmera a Endre Szönyiho bola navrhnutá pre doktora Neuschela. Postavená bola v roku 1938 podľa požiadaviek majiteľa, ktoré zneli: jednoduchá dvojpodlažná budova, bez ozdôb, slnečná, s jedným vstupom do objektu [6]. Nachádza sa na ulici Mudroňova 72 v Bratislave a pozostáva z jednej bytovej jednotky určenej pre majiteľa s rodinou. Realizáciu stavby zabezpečoval architekt Szonyi, s kvalitnými remeselnými firmami.

a. Urbanistické začlenenie

Vila pôvodne stála osamelá na vrchole hradného kopca, v nezastavanej časti, obkolesená marhuľovými sadmi [6]. Dnes je obklopená z veľkej časti novodobou zástavbou. V jej bezprostrednej blízkosti sa nachádzajú rodinné domy z polovice 20. stor. s množstvom súčasných nevhodných

zásahov, čo vytvorilo z okolia chaotický a nesúrodý priestor, v ktorom sa tento objekt vyskytol. Avšak vila si stále uchováva svoj intímny charakter a isté odčlenenie od záhrady či svojho okolia.

b. Architektonické a výtvarné riešenie

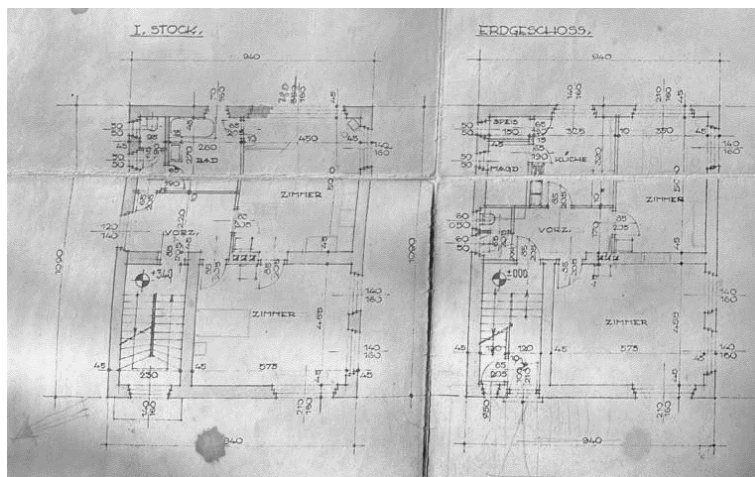
Rodinný dom je samostatne stojacou kockou zastrešenou vysokou stanovou strechou. Všetky štyri fasády sú riešené rovnocenne a izby sú presvetlené rohovými oknami. Objekt nie je členený na reprezentačnú a funkčnú časť. Nad hlavným vstupom sa nachádza funkcionalistické kruhové okno, ktoré odľahčuje inak strohú vstupnú fasádu od ulice. Veľká záhrada nebola prepojená s dennou časťou domu a doposiaľ je riešená ako úžitková. Okná prízemia sú zamrežované horizontálnymi mrežami, čo bola požiadavka investora pre zvýšenie bezpečnosti vzhľadom na súdobú bezpečnostnú situáciu [6] (obr.7).



Obr.7: Vila Dr. Neuschela - Mudroňova 72 [5]

c. Dispozičné riešenie

V dispozícii objektu bolo upustené od reprezentačného prepojenia denných priestorov, je riešená skromnejšie, ale účelne. Na 1.NP sa nachádza obývačka a pracovňa s južnou orientáciou do ulice, kuchyňa s malou izbou pre slúžku orientované na východ a sever do záhrady a samostatné WC. Na 2. NP sa nachádzajú dve samostatné prepojené izby s južnou orientáciou a kúpeľňa prístupná z chodby a z jednej zo spální a samostatné WC (obr. 8). V polozapustenom suteréne sa nachádza garáž prístupná od ulice, kotolňa, sklad a pracovňa. Táto dispozícia je zachovaná dodnes [6].



Obr.8: Pôdorys 1. NP a 2. NP - Vila Dr. Neuschela - Mudroňova 72 [5]

d. Súčasný stav a funkcia objektu

Majiteľom objektu je v súčasnosti dcéra Dr. Neuschela, ktorá sa v objekte narodila a vyrastala v ňom. Technické vybavenie domu rovnako ako vybavenie interiéru je pôvodné a funkčné. Taktiež vybavenie kuchyne, ktoré pozostáva zo sporáka na pevné palivo, keramickej drezovej výlevky a dreveného kredenca, je zachované. Zariadenie obývacej izby navrhol Emil Belluš moderným jednoduchým hranatým nábytkom. Dom a jeho interiér sa zachoval v pôvodnej podobe [6]. Jediným zásahom bola prístavba vikiera na severnej fasáde od záhrady, kvôli presvetleniu podkrovia a jeho pôvodného zámeru vloženia bytu na prenájom, od ktorého neskôr majiteľka upustila. Vďaka osobnému vzťahu, ktorý má majiteľka s objektom sa zachoval vo svojej autentickej podobe bez rušivých či nevhodných zásahov dodnes (obr. 2).

3. Lokalita Kramáre

Oblasť vinohradov, ktorá sa začala zastavovať až neskôr menšími objektami rodinných domov remeselníkov a vinohradníkov. Táto lokalita nebola pre strednú vrstvu atraktívna. Neboli tu zavedené stavebné firmy, objekty boli stavané domácky, rôznymi stavebnými podnikateľmi, čo sa prejavilo aj na kvalite použitých materiálov. Výnimkou v tejto lokalite bola vila Jaroň od Aloisa Balána a Jiřího Grossmanna.

3.1 Bárdošova vila

Funkcionalistický poschodový rodinný dom sa nachádza na ulici Bárdošova 1 v Bratislave. Postavený bol v roku 1934 pre manželov Ľudmilu a Jána Kúnovských. Staviteľom bol Alois Černošák a podľa dochovanej projektovej dokumentácie je možná aj účasť staviteľa a architekta Antona Titla. Objekt bol pôvodne navrhnutý ako samostatne stojaci s funkciou bývania [7].

a. Urbanistické začlenenie

Dom je osadený v hornej časti svahovitého pozemku orientovaného na juh so sklonom približne 14°. Pôvodne sa v tejto lokalite vyskytovala vinohradnícka osada, v ktorej sa postupne začala výstavba samostatne stojacich rodinných domov. V dobe svojho vzniku bol objekt solitérom, vzdialeným od prebiehajúcej výstavby nájomného domu Píšťekovcov na Stromovej ulici. V povojnovom období, kedy stúpol dopyt po výstavbe nájomných bytov, vznikla v bezprostrednom susedstve nežiadúca zástavba. To je dôvod, prečo sa v súčasnosti nachádza dom v pomerne rozsiahlej zástavbe viacpodlažných bytových domov, ktoré narušujú jeho pôvodnú integritu a samostatnosť [8].

b. Architektonické a výtvarné riešenie

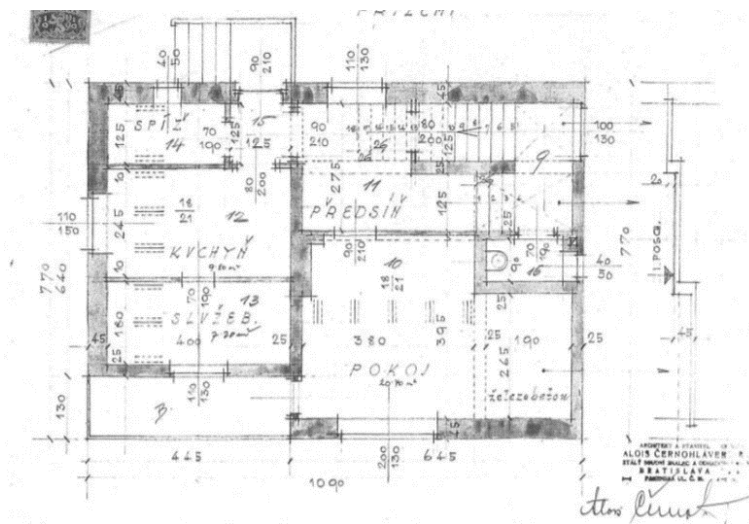
Rodinný dom bol v dobe svojho vzniku pokladaný za moderný a luxusný. Modernosť objektu spočíva v absencii všetkých architektonických príkras. Boli tu použité moderné a účelové materiály danej doby ako napríklad linoleum, hladké dvere, hladké steny a maľby bez vzorov. Objekt prezentuje hlavné znaky architektúry svojej doby a vyznačuje sa modernou plochou strechou, harmonickou skladbou hmôt v tvare hranolov a geometrickou kompozíciou rozloženia okien. Architektonické vyhotovenie fasád bolo veľmi jednoduché. Pôvodná farebnosť objektu je biela fasáda s drevenými oknami rovnakej farby [8]. Objekt bol prepojený s rozsiahlou záhradou, kde sa v prednej časti nachádzal bazén, ako typický prvok funkcionalistickej architektúry (obr. 9).



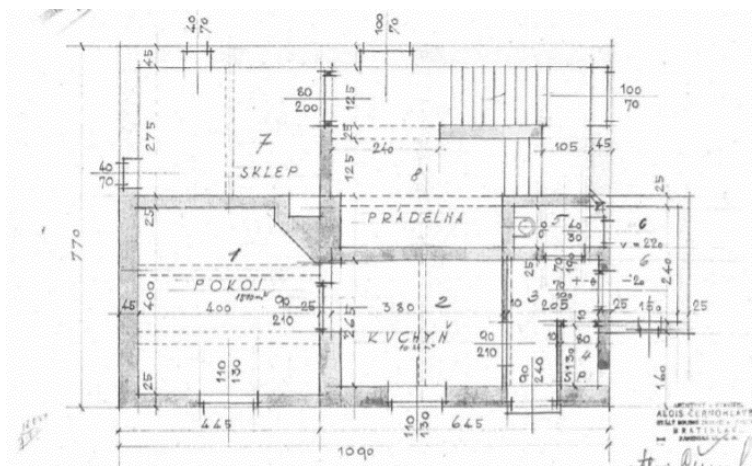
Obr.9: Bárdošova vila - Bárdošova 1 [9]

c. Dispozičné riešenie

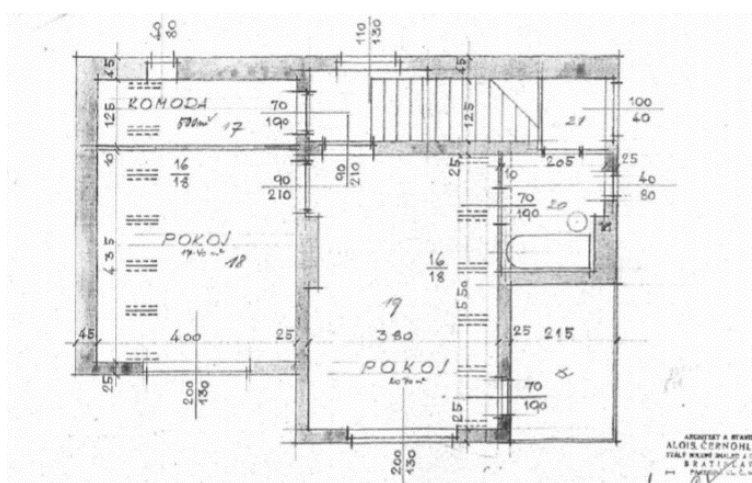
Dispozícia rodinného domu je členená na 3 podlažia. Pôvodne objekt pozostával z dvoch samostatných bytových jednotiek určených pre majiteľov domu a bytu na prenájom. 1. PP bolo delené na dve časti. Samostatný byt určený na prenájom s orientáciou do ulice bol prístupný z exteriéru na východnej strane pozemku. Byt pozostával zo zádveria, hygienického zázemia, kuchyne a samostatnej izby. Vo zvyšnej časti, zapustenej do svahu sa nachádzalo zázemie bytu majiteľa prístupné schodiskom z 1. NP (obr. 10). Na 1. NP a 2. NP sa nachádzal byt majiteľov objektu s hlavným vstupom na 1. NP cez severnú stranu pozemku. Cez predsieň a nasledujúcu chodbu bol prístup na zmiešané schodisko tvaru U vedúce na 2. NP a priame schodisko vedúce do 1.PP. Z chodby bol prístup do kuchyne, ktorá bola prepojená s miestnosťou pre služobníctvo. S chodbou bola prepojená aj obývací miestnosť. Na podlaží sa nachádzalo aj samostatné WC. Na 2. NP sa nachádzal šatník prístupný z chodby, veľké priechodné izby orientované na juhovýchod a kúpeľňa (obr. 11-12).



Obr.10: Pôdorys 1. PP - Bárdošova vila - Bárdošova 1 [7]



Obr.11: Pôdorys 1. NP - Bárdošova vila - Bárdošova 1 [7]



Obr.12: Pôdorys 2. NP - Bárdošova vila - Bárdošova 1 [7]

d. Súčasný stav a funkcia objektu

Súčasný majiteľ zmenil pôvodnú funkciu bývania a na spodné podlažie vložil prevádzku vinárstva, na vrchných podlažiach zanechal byt na prenájom. Z dôvodu teplo technických normových požiadaviek bol objekt zateplený kontaktným zatepl'ovacím systémom a pôvodné okná boli vymenené za plastové bordovej farby, čím sa stratila pôvodná proporcia objektu ako aj materiálová a farebná kompozícia. Zmenou prešlo aj rozloženie a veľkosť otvorov na 1. PP. Avšak i napriek týmto zásahom nemožno samotnú obnovu objektu pokladať za zlú. Najväčšie zásahy sú čitateľné v záhrade. Majiteľ odstránil všetku okolitú zeleň, ktorá vilu izolovala od neuváženej okolitej zástavby výškových bytových domov a odignoroval jej pôvodnú kompozíciu. Odstránený bol aj bazén, ktorý bol neodmysliteľnou súčasťou funkcionalistických záhrad. Do záhrady umiestnil množstvo nevhodne voleného mobiliáru. Necitlivým zásahom prešlo aj oplotenie, ktoré nie je v koncepte s pôvodným oplotením (obr. 13).



Obr.13: Bardošova vila –súčasný stav - Bardošova 1 [5]

3.2 Rodinný dom Marie Devayovej a Margret Graefovej

Na bratislavských Kramároch bolo realizovaných niekoľko rodinných domov so znakmi Heimatstil, s vysokou sedlovou strechou, drevenými okenicami a arkádami, čo bolo odrazom zmenenej politickej situácie po roku 1939 súvisiacej so snahou presadiť nemeckú ideológiu Blut und Boden aj v Slovenskom štáte. Reprezentantom je zachovaný rodinný dom na Uhrovej 7 postavený v roku 1941. Architekt projektu žiaľ nie je známy, no staviteľom bol Alois Macháček s ponemčeným menom Alois Machatschek [7].

a. Urbanistické začlenenie

Objekt je situovaný na nároží ulíc Uhrova a Jelšová. V bezprostrednom okolí stavby sa nachádzala ikonická Jaroňova vila od Aloisa Balána a Jiřího Grossmanna z roku 1930 [10], ktorá bola zbúraná, podobný osud takmer postihol aj samotný rodinný dom Marie Devayovej a Margaret Graefovej. Jaroňova vila mala naznačiť akým smerom sa má uberať zástavba štvrte avšak niekdajší komorný charakter Uhrovej ulice sa v priebehu rokov dramaticky zmenil. Pôvodná zástavba malých, nájomných a rodinných domov začatá v 30. rokoch minulého storočia ustúpila novému konceptu výškových bytových domov zabezpečujúcich v prvom rade ubytovanie pre pracovníkov nemocnice na Kramároch.

b. Architektonické a výtvarné riešenie

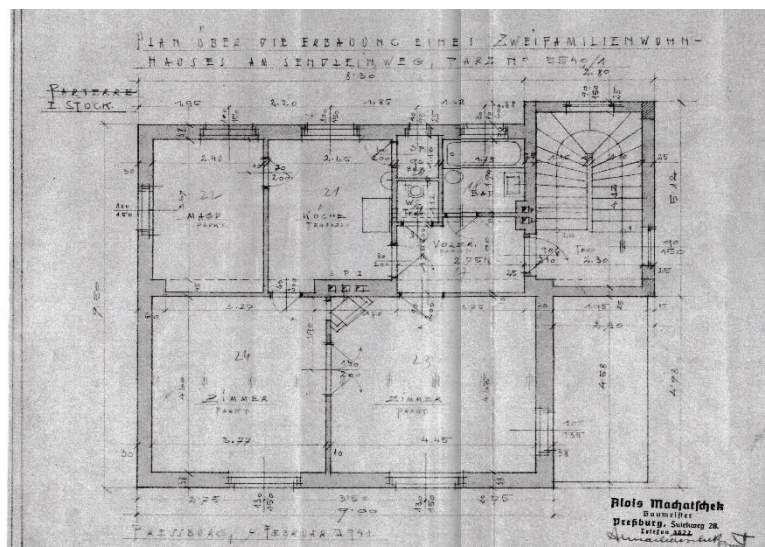
Ideológia nemeckého Blut und Boden je jednoznačne čitateľná na samotnej fasáde. Rodinný dom má jednoduchý pôdorys so stanovou strechou, arkádami a výraznými drevenými okenicami zelenej farby, ktoré tvoria jej dominantu. Na fasáde je viditeľný polozapustený suterén, ktorý tvorí podnož objektu. Na bočnej strane domu sa nachádza loggia, ktorá je podopretá arkádami typickými pre tvaroslovie tohto nemeckého štýlu (obr. 14).



Obr.14: Rodinný dom Marie Devayovej a Margaret Graefovej - Uhrova 7 [5]

c. Dispozičné riešenie

Rodinný dom pozostáva z dvoch samostatných bytových jednotiek situovaných na 1. NP a 2. NP. Dispozície oboch bytov boli v pôvodnom návrhu rovnaké. Zo schodiska prístupná chodba spája všetky miestnosti bytu. V severnej časti sa nachádza kúpeľňa, samostatné WC a špajza. Kuchyňa s miestnosťou pre slúžku s orientáciou sever a západ. Dve samostatné priechodné miestnosti sú orientované na juh a východ. V oboch bytoch bola pôvodne loggia s orientáciou na východ.



Obr.15: Pôdorys - Rodinný dom Marie Devayovej a Margaret Graefovej - Uhrova 7 [9]

d. Súčasný stav a funkcia objektu

V súčasnosti sú majiteľmi domu bratia Švolíkoví, ktorí v objekte aj bývajú. Pri obnove postupujú cestou neinvazívnej obnovy so zachovaním vysokej miery autenticity vrátane množstva pôvodných prvkov. Objekt neprešiel výraznými zásahmi, ktoré by narušili jeho pôvodný návrh. Za najväčší zásah súčasných majiteľov môžeme pokladať zasklenie loggie na 1. NP, čím si jeden z bratov upravil dispozíciu bytu o zimnú záhradu a zväčšil tak pobytový priestor. Okná na objekte, rovnako ako výrazné parapety prešli renováciou a poškodené časti boli vymenené za repliky, opravovaná bola aj strecha, avšak z pôvodných materiálov. Majitelia neuvažujú o zateplovaní objektu, lokálne

poškodené exteriérové omietky plánujú opravovať s použitím pôvodnej technológie a materiality (obr. 14).

4. Záver

Na základe analýzy štyroch vybraných predstaviteľov môžeme konštatovať dva rôzne prístupy k vybraným objektom - intaktný alebo radikálny. V prípadoch Vily Dr. Elleka a Bárdošovej vily je pozorovateľný radikálny prístup majiteľov. Vo zvyšných prípadoch Vily Dr. Neuschela a Rodinnom dome Marie Devayovej a Margaret Graefovej zaznamenávame intaktný prístup. Môžeme teda konštatovať, že vzťah majiteľa k objektu má výrazný vplyv na uchovávanie jeho genia loci.

Majitelia, ktorí pochopili a prijali objekty v celej ich „kráse“, sa snažia o čo najväčšiu mieru zachovania autenticity s minimálnym množstvom zásahov, ktoré by narušali pôvodnú hmotovú, priestorovú či materiálovú koncepciu. Naopak majitelia, ktorí si nevytvorili k architektúre domov vzťah, zvolili radikálne zásahy, čím značne pozmenili ich integritu a samotný výraz. Osobitnou kategóriou je prípad Vily Dr. Elleka, kde si síce majitelia objekt osvojili, ale nad jeho jedinečnosťou zvíťazilo maximalizovanie vlastných nárokov a potrieb, a to i napriek ich odbornému zázemiu. V prípade objektu Bárdošovej vily majiteľ navyše pristúpil k radikálnej zmene funkcie, ktorá sa najviac prejavila formou nevhodných zásahov v záhrade objektu.

Je teda vidieť, že i v prípade ochoty a dostatočných finančných prostriedkov vlastníkov sa pristupuje k obnovám domov z medzivojnového obdobia rôzne, čo naznačuje rozličnú mieru stotožnenia či nestotožnenia majiteľa s kultúrnou identitou svojho majetku. Zásahy na objektoch tak deklarujú, že v týchto prípadoch víťazí pohodlnosť a potreby, či štandardy dneška, nad pokorou a úctou k tejto architektúre. Možno z nevedomosti či neinformovanosti, zdá sa, že proces stotožnenia či nestotožnenia vedie k nevhodnému pochopeniu objektu ako prísne utilitárnej stavby so všetkými z toho vyplývajúcimi negatívnymi dôsledkami.

5. Literatúra

[1] BERKA, T., BAHNA, J. M.: *Vily nad hradom*. Bratislava, 2016. 216 s. ISBN 978-80-81 14-391-5.

[2] BORECKÁ, E.: Biela vila nad mestom. *Interiér magazín*. 2021, s. 82-87.

[3] DULLA, M.: Register architektúry, In [online]. Dostupné na internete: <https://www.register-architektury.sk/objekt/322-vila-dr-elleka>

[4] TARABA, I.: Súkromný archív majiteľa domu. Výkresová dokumentácia Vily Dr. Elleka, Bartoňova 2, Bratislava

[5] ŠIŠKOVÁ, Z.: Súkromný archív fotografií.

[6] BORECKÁ, E.: Tradičná moderna na Slovensku, Architekti Franz Wimmer & Endre Szönyi. Brno, 2018. 65-68 s. ISBN 978-80-7204-987-5

[7] KVASNICOVÁ, M. a kol.: *Ochrana a obnova pamiatok 2 - Architektonicko-historický výskum. Inventarizácia hodnotných prvkov a Návrh pamiatkovej obnovy*. Seminárna práca. Bratislava, 2019

[8] BORECKÁ, E.: Urbanizácia za mestom, medzivojnové bývanie na bratislavských Kramároch. *Architektúra a urbanizmus*. 2020, roč. 3-4, s. 246-248. ISSN 0044-8680.

[9] BORECKÁ, E.: Súkromný archív fotografií.

[10] ŠLACHTA, Š.: Alojz Balán – Juraj Grossmann. *Projekt – revue slovenskej architektúry*. 1982, č. 4-5, s. 88-89.

Martin Zagyi¹

Študijný program: D-TKPS4 teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 4.

POROVNANIE POVRCHOVÝCH TEPLÔT MEDZI JEDNOPLÁŠŤOVOU A VEGETAČNOU STRECHOU

COMPARISON OF SURFACE TEMPERATURES BETWEEN A SINGLE PLATE AND A VEGETATION ROOF

Abstract

The surfaces of roof structures are affected by external and internal influences of the environment. In this article, the temperatures of the internal and external surfaces on a test cell with a vegetated and classic roof are compared using simulation program - DesignBuilder. At the end of the article will be evaluated the differences in surface temperatures between individual roof structures.

Kľúčové slová

Vegetačná strecha, povrchová teplota, experimentálna bunka, simulácia

1. Úvod

Vegetačné strechy napomáhajú k zlepšeniu vnútorného prostredia budov a tiež priaznivo ovplyvňujú svoje okolie, esteticky a environmentálne [1]. Aplikácia vegetačnej strechy má priaznivý vplyv z hľadiska potreby energií na chladenie, pokles povrchovej teploty na strešných konštrukciách, zvýšenie izolačného účinku strešnej konštrukcie v zime o 3 až 10% (podľa lokality, hrúbky vegetačnej vrstvy, vrstvy podkladu, prienik vlhkosti) a dodatočný tepelný odpor R od 0,14 – 0,40 m^2K/W (podľa výšky substrátu) [2 - 5]. Článok obsahuje porovnanie vegetačnej strechy s klasickou jednoplášťovou strechou pomocou simulácie experimentálnej bunky v simulačnom programe DesignBuilder [6].

2. Simulácia experimentálnej bunky

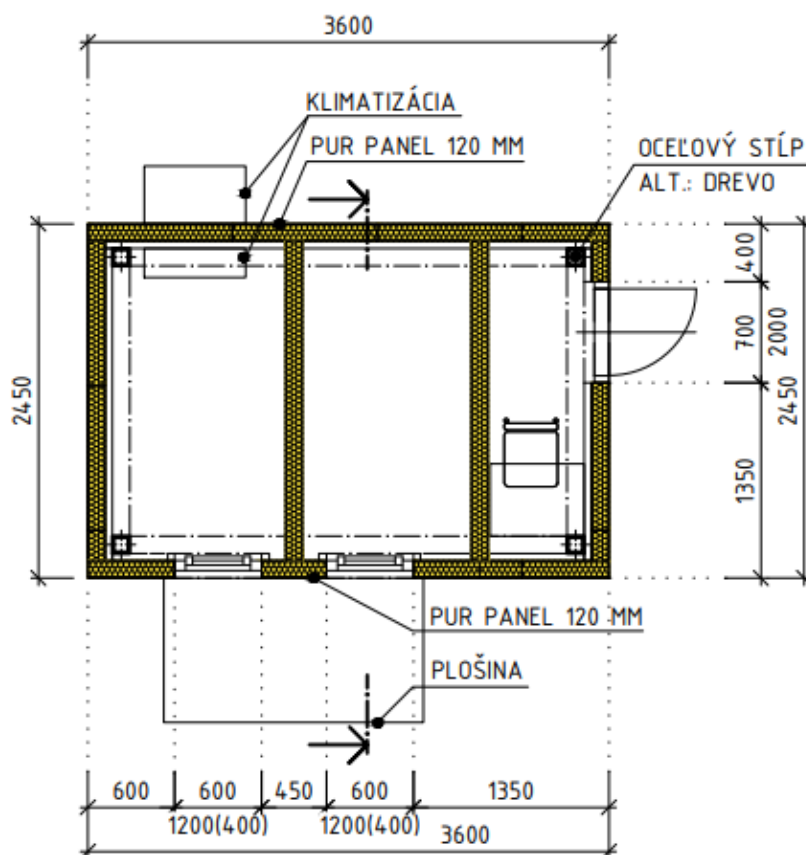
Experimentálna bunka bola navrhnutá v spolupráci s firmou Isover, na ktorej je simulovaná vegetačná a klasická jednoplášťová strecha. Dispozícia bunky je rozdelená na zónu s vegetačnou strechou a s jednoplášťovou strechou. Súčasťou experimentálnej bunky je aj meracia miestnosť (táto miestnosť nie je predmetom simulácie a tvorí iba okrajovú podmienku).

2.1 Konštrukcia experimentálnej bunky

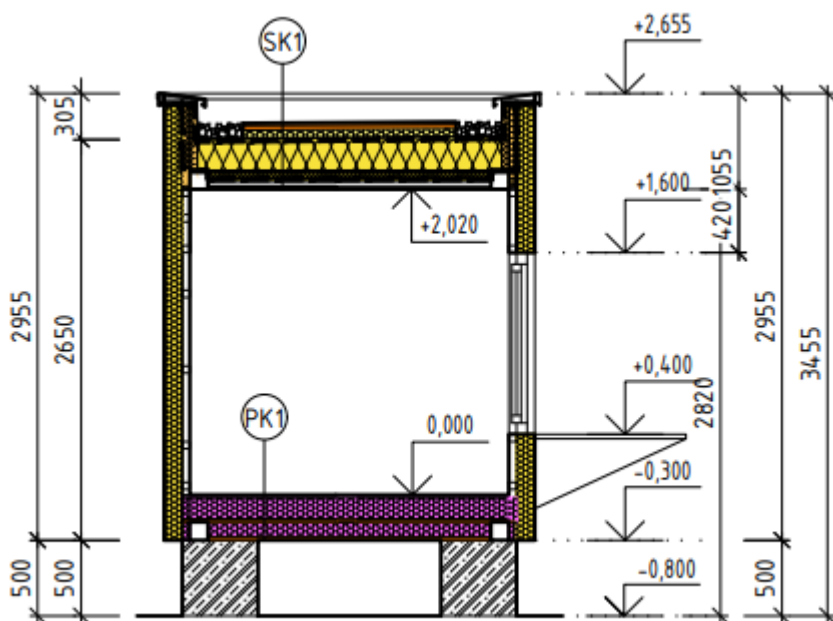
Nosná konštrukcia experimentálnej bunky pozostáva z drevených prvkov, ktoré sú uložené na železobetónových pätkách. Obvodové steny bunky tvoria PUR panely hrubé 120 mm. V PUR paneloch sú osadené okná s hliníkovým rámom a dvojsklom. Podlahovú a strešnú konštrukciu tvoria

¹ Martin Zagyi, Ing. Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

systemové riešenia firmy Isover (presnejšie definované vo výpise skladieb SK1a, SK1b a PK1). Vstupné údaje s hodnotami fyzikálnych veličín sú použité priamo od výrobcu materiálov.



Obr. 1: Pôdorys experimentálnej bunky



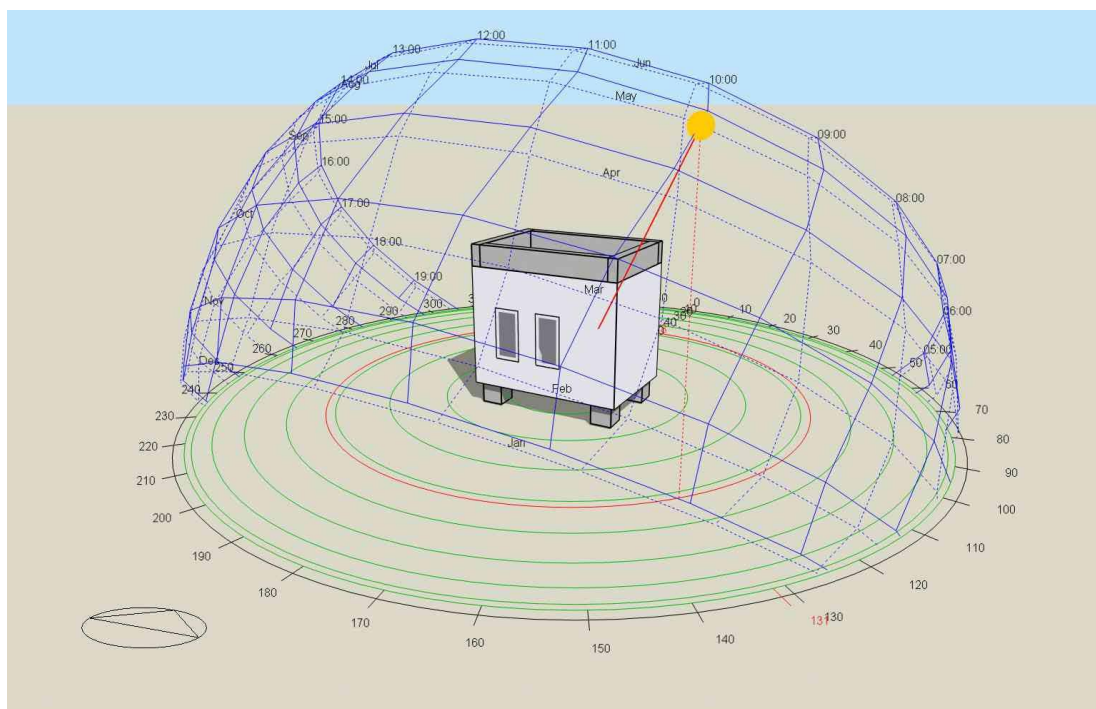
Obr. 2: Rez experimentálnou bunkou v časti s vegetačnou strechou

SK1a: skladba strechy s vegetačnou vrstvou		SK1b: skladba strechy bez vegetačnej vrstvy	
Koberec z rozchodníkov		Strešný systém Fatrafol	
Extenzívny substrát	60 mm	Isover Neofloor 100	140 mm
Isover FLORA	50 mm	OSB doska	22 mm
Drenážna nopová fólia		KVH 60x140, Isover Unirol Profi	140 mm
Geotextília 300 g/m ²		Parozábrana Isover StopVap 90	
Strešný systém Fatrafol		Laťa 50x30, inštalačná dutina	30 mm
Isover Neofloor 100	140 mm	RigiStabil	15 mm
OSB doska	22 mm		
KVH 60x140, Isover Unirol Profi	140 mm		
Parozábrana Isover StopVap 90			
Laťa 50x30, inštalačná dutina	30 mm		
RigiStabil	15 mm		
PK1: skladba podlahy			
laminátová podlaha	8 mm		
mirelon	2 mm		
Rigidur E25	25 mm		
Isover EPS 150S	140 mm		
Parozábrana Isover StopVap 90			
OSB doska	22 mm		
Isover Unirol profi	140 mm		
OSB doska	22 mm		

Obr. 3: Skladby použitých konštrukcií

2.2 Simulačný model a vstupné údaje

Na základe podkladov bol vytvorený simulačný 3D model experimentálnej bunky v programe DesignBuilder. Model je navrhnutý pre simulovanie povrchových teplôt na zimných štadiónoch.



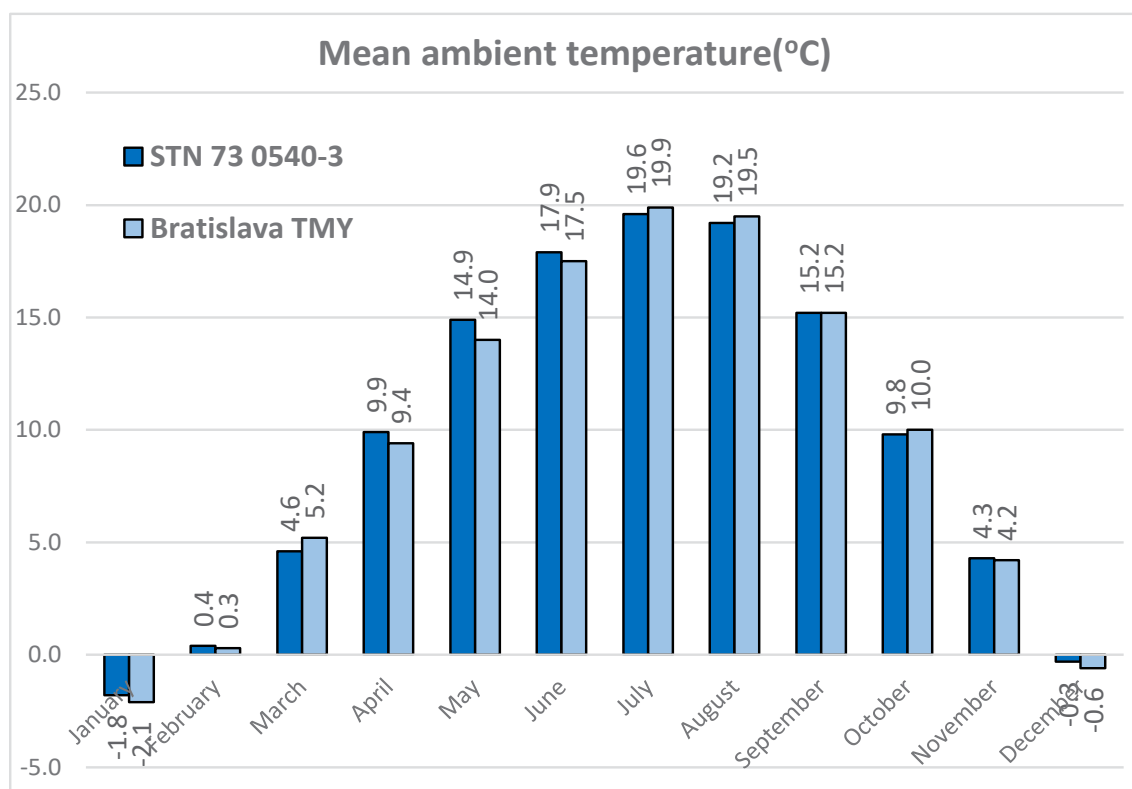
Obr. 4: 3D model experimentálnej bunky v programe DesignBuilder

3D model je rozdelený na 3 zóny: 1 je meracia miestnosť, KLASICKA je miestnosť s klasickou jednoplášťovou strechou a VEGETACNA je miestnosť s vegetačnou extenzívnou strechou. V simulácii sú zanedbané vnútorné zisky od ľudí, osvetlenia a elektrických prístrojov. Udržovanie vnútornej teploty vzduchu je zabezpečené technickým zariadením a teplota je nastavená na 0 – 5 °C (maximálna teplota v programe DesignBuilder). Simulácia je založená na hodinovom kroku a grafy zachytávajú ročnú simuláciu a extrémny výpočtový týždeň.

Model objektu je simulovaný v lokalite Bratislava, pre ktorú je použitý klimatický rok Bratislava LO (TRY IWEC).

Bratislava TRY - IWEC												
Location – BRATISLAVA SVK												
{N 48° 12'} {E 17° 12'} {GMT +1.0 Hour}												
Vonkajšia teplota vzduchu (°C)												
	JAN	FEB	MAR	APR	MÁJ	JÚN	JÚL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
MAX	11	10	16.4	27	28.2	30	33	32	27	22	20.2	14.4
Deň:čas	22:13	21:14	14:16	2:14	5:13	14:14	7:14	8:15	1:14	12:14	7:16	12:13
MIN	-12	-11	-3	0	5.8	8	9	10.7	8	-2	-5.7	-6
Deň:čas	7:02	1:08	23:06	11:05	1:04:00	18:05	18:02	20:04	10:05	3:06	20:07	4:06
Mean	-0.2	-0.4	5.3	10.7	15.8	18.3	21.2	20.8	15.8	9.8	5.3	1.5
Maximum:											7.JÚL	33.0°C
Minimum:											7. JAN	-12.0°C

Tabuľka 1: klimatické údaje BRATISLAVA LO



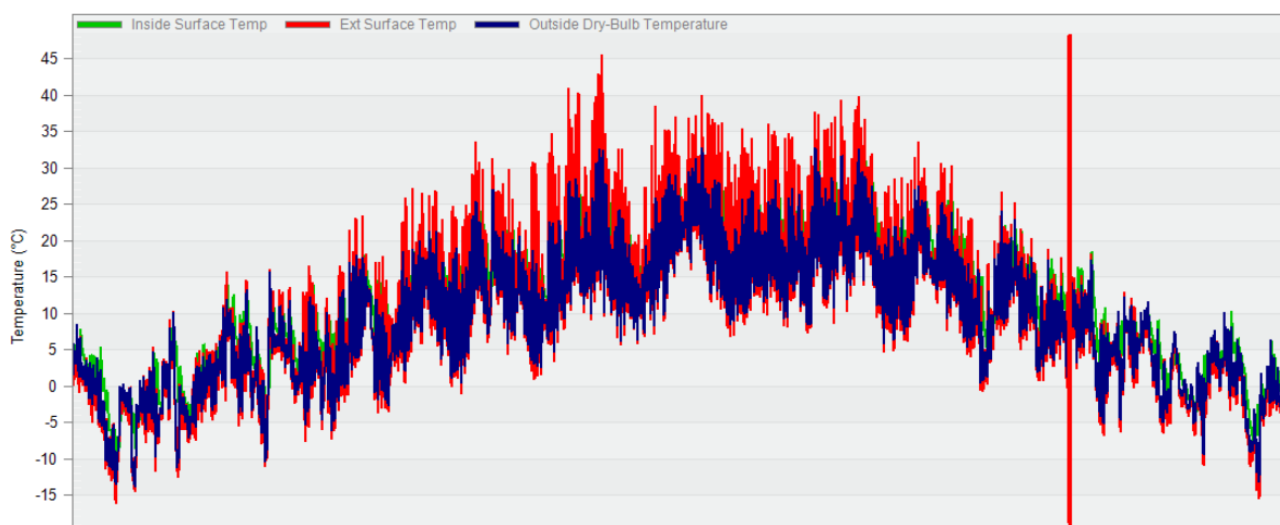
Obr. 5: Porovnanie strednej teploty okolia s normou STN

3. Sumarizácia výsledkov

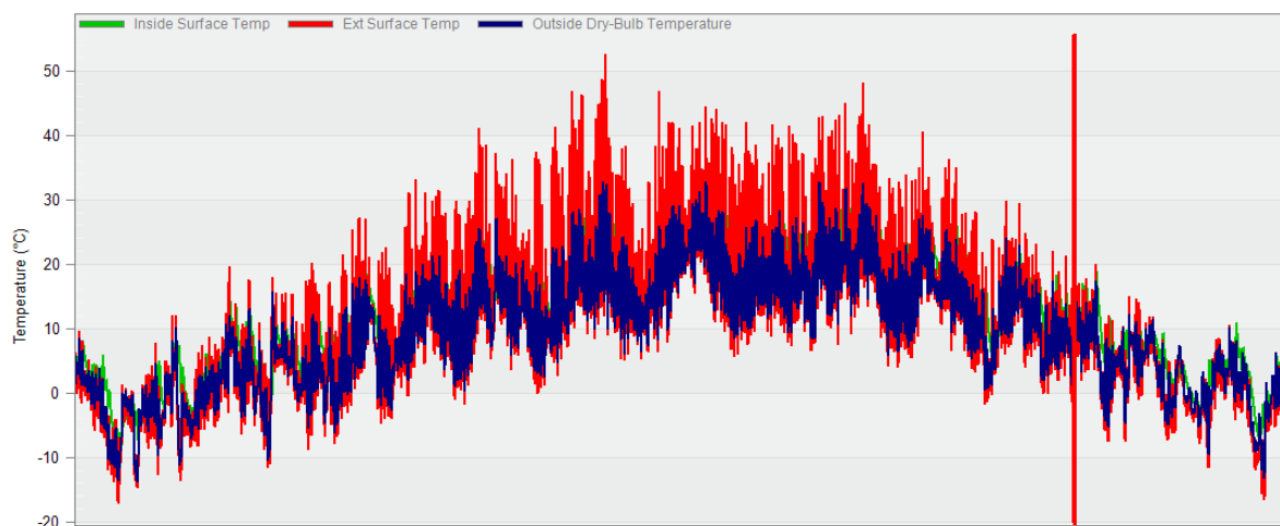
Výsledkom simulácie je zistenie interiérových a exteriérových povrchových teplôt na strešných konštrukciách simulovanej experimentálnej bunky. Grafy na obrázku č. 6 a č. 7 znázorňujú simuláciu počas celého roka a na obrázkoch č. 8 a č. 9 je znázornený týždeň s najväčšími teplotami počas daného klimatického roku.

Hodnoty zobrazované v grafoch v °C:

- Inside Surface Temp – teplota na vnútornom povrchu konštrukcie
- Ext Surface Temp – teplota na vonkajšom povrchu konštrukcie
- Outside Dry-Bulb Temperature – teplota vonkajšieho vzduchu
- Surface Outside Face Temperature – teplota vonkajšieho povrchu konštrukcie
- Surface Inside Face Temperature – teplota vnútorného povrchu konštrukcie

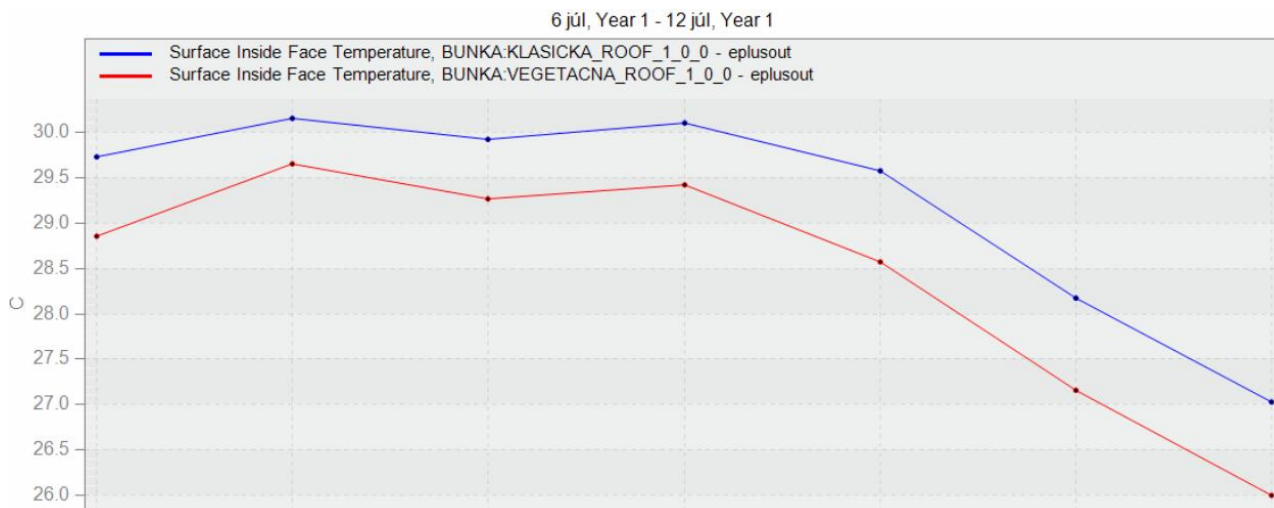


Obr. 6: Priebeh teplôt počas ročnej simulácie – vegetačná strecha

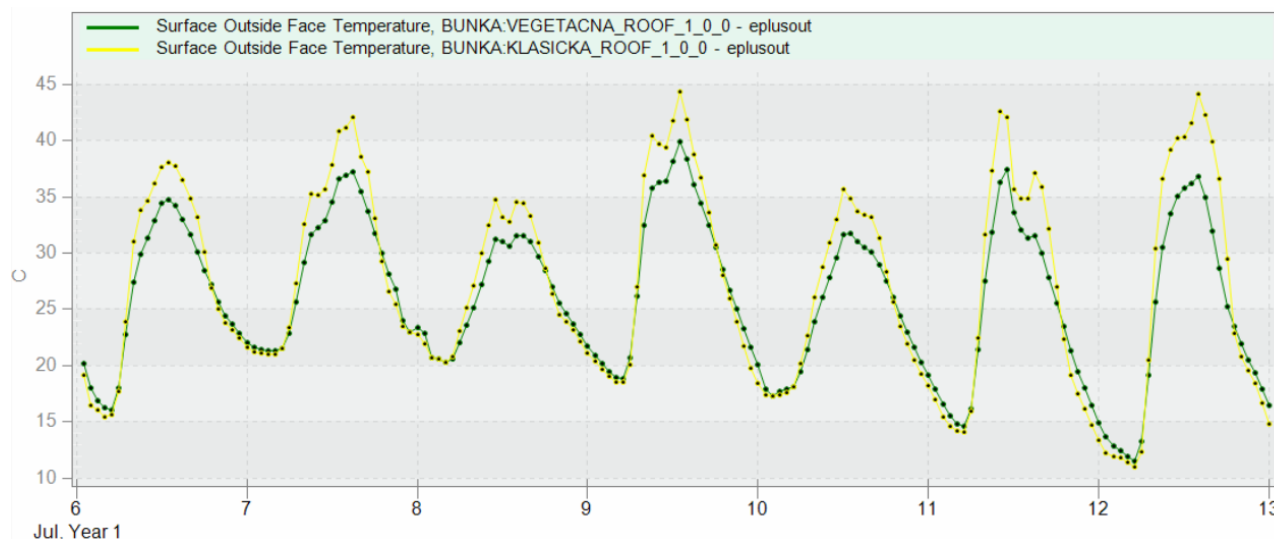


Obr. 7: Priebeh teplôt počas ročnej simulácie – klasická jednoplášťová strecha

Na vonkajšom povrchu strešnej konštrukcie s vegetačnou strechou je teplota o 7 K nižšia ako na klasickej jednoplášťovej streche. Vnútorný rozdiel interiérových povrchových teplôt je 0,5 K. Rozdiel povrchových interiérových teplôt je minimálny vzhľadom na rozmer experimentálnej bunky.



Obr. 8: Priebeh vnútorných povrchových teplôt počas extrémneho týždňa (6.júl – 12.júl) – porovnanie vegetačnej strechy s klasickou jednoplášťovou strechou



Obr. 9: Priebeh vonkajších povrchových teplôt počas extrémneho týždňa (6.júl – 12.júl) – porovnanie vegetačnej strechy s klasickou jednoplášťovou strechou

4. Záver

Na základe výsledkov simulácie môžeme konštatovať, že v skúmaných konštrukciách, a teda na ich povrchoch dochádza k zmene teploty. V grafických zobrazeniach výsledkov je vidno nepatrné rozdiely teplôt na povrchoch vegetačnej strechy a klasickej jednoplášťovej strechy. V článku je preukázaný pokles interiérových a exteriérových povrchových teplôt. Ďalším krokom výskumu je presnejšie odlad'ovať model experimentálnej bunky a porovnávať s experimentálnym meraním pre presnejšie výsledky. Zároveň údaje nameraných hodnôt na zimnom tréningovom štadióne využijem pre modelovanie a simulovanie zimného štadióna s aplikáciou vegetačnej strechy.

Pod'akovanie

Tento výskum bol podporený výskumným projektom VEGA č.01/0229/21 - Stavebno fyzikálna podstata budovy s takmer nulovou potrebou energie v kontexte environmentálnych aspektov.

Literatúra

- [1] POLIZIN, N.: *Dachbegrünungen als Ausgleichsmaßnahme für einen Eingriff in Natur und Landschaft*. 2017. Dostupné na:
https://repos.hcu-hamburg.de/bitstream/hcu/156/1/Polzin_Nils_Master_20181113.pdf
- [2] Internetový zdroj: <http://www.falcosystem.cz/files/Zelenestrechy.pdf>
- [3] Internetový zdroj: <https://mothership.sg/2019/09/timothy-seow-ntu-adm-building/>
- [4] VAN RENTERGHEM, T./BOTTELDOOREN, D.: Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. 2008. Dostupné na: <https://users.ugent.be/~tvrenter/publicaties/greenroofs.pdf>
- [5] ISOVER. Alternativní řešení zelených střech. (2014). Dostupné na:
<http://www.isover.cz/alternativni-reseni-zelenych-strech>
- [6] <https://designbuilder.co.uk/>

**THEORY AND STRUCTURES
OF CIVIL ENGINEERING WORKS**

Jaroslav Baran¹

Študijný program: D-TKeIS, ročník:3

PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA VPLYVU PREDPÄTIA NA ŠMYKOVÚ ODOLNOSŤ PREDPÄTÝCH NOSNÍKOV

PARAMETRIC STUDY OF INFLUENCE OF PRESTRESSING ON SHEAR RESISTANCE OF PRESTRESSED BEAM

Abstrakt

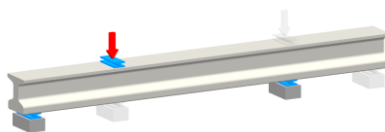
This paper deals with the preparation of an experimental program for verifying the influence of prestressing on the shear resistance of prestressed beams. The experimental specimens are prestressed beams with I cross-section of type DPS VP I/10 - 600 with a length of 7,0m. The prestressing of the beams consists of bonded prestressing tendons. The standard reinforcing of DPS VP I/10, which is currently used in bridge constructions is supplemented with longitudinal steel bars to increase bending resistance and shear reinforcement is designed in a form of stirrups. A parametric study presents the results of shear resistance calculated according to Eurocode 2.

Kľúčové slová / Key Words

Prestressing; prestressed beam; shear, resistance; I cross-section
Predpätie; predpätý nosník; šmyková odolnosť; I - prierez

1. Úvod

Na Slovensku máme približne 1800 predpätých mostov, ktorých väčšina bola realizovaná medzi rokmi 1963 – 2000. Pokročilý vek mostov so sebou nesie aj úbytok prepínacej sily [1], ktorá je spôsobená degradáciou materiálov, ich koróziou [2] alebo v prípade nehôd ich poškodením [3]. Takáto degradácia stavu predpínacích prvkov znižuje ohybovú aj šmykovú [4] odolnosť prierezu. Práve šmyková odolnosť prierezu sa stala záujmom viacerých vedeckých štúdií [5], [6], [7]. A to najmä kvôli komplikovanej mechanike spolupôsobenia betónu, betonárskej a predpínacej výstuže v šikmej trhline prierezu. Aktuálne prebiehajúci vývoj Eurokódov [8] sa tejto problematike intenzívne venuje a pripravovaný experiment, môže doplniť databázu výsledkov a overiť presnosť súčasných návrhových prístupov. Ako prvý krok v príprave experimentu je nevyhnutné vhodne navrhnuť statickú schému skúšanej vzorky, úroveň predpätia prvku a tiež jeho vystuženie pozdĺžnou a priečnou betonárskou výstužou. Na základe návrhových modelov následne stanoviť ohybovú a šmykovú odolnosť nosníkov a navrhnuť dostatočné rezervy ohybovej odolnosti oproti šmykovej. Na tento účel bola vypracovaná parametrická štúdia publikovaná v tomto príspevku, ktorá sa zaoberá vplyvom predpätia na šmykovú odolnosť predpätých nosníkov odvodená podľa aktuálnych výpočtových prístupov.



Obr. 1.1 Schéma zaťažovania jedného nosníka pre dve zaťažovacie skúšky

¹ Jaroslav Baran, Ing., Slovenská technická univerzita, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

2. Stanovenie šmykovej odolnosti

Šmyková odolnosť prvkov bez šmykovej výstuže sa podľa aktuálne platného Eurokódu 2 [9] stanovuje podľa vzorca:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (2.1)$$

Kde:	$C_{Rd,c} = 0,15 / \gamma_c$	- empirický súčiniteľ
	$\gamma_c = 1,5$	- bezpečnostný súčiniteľ
	$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$	- parameter výšky prierezu
	d	- účinná výška prierezu
	b_w	- najmenšia šírka v ťahanej oblasti
	$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$	- normálové napätie od osovej sily (tlak +)
	$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$	- stupeň vystuženia pozdĺžnou výstužou
	f_{ck}	- charakteristická hodnota valcovej pevnosti betónu

Návrhovú šmykovú odolnosť predpätých prvkov bez šmykovej výstuže je možné vypočítať z požiadavky, aby maximálna návrhová hodnota hlavného napätia v ťahu $\sigma_{1d,max}$ neprekročila návrhovú hodnotu ťahovej pevnosti betónu f_{ctd} . Táto podmienka je vyjadrená vzťahom:

$$v_{Rd1c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} \quad (2.2)$$

Kde:	b_w	- šírka prierezu v ťažisku prvku
	I	- moment zotrvačnosti prierezu
	S	- statický moment prierezu nad ťažiskovou osou
	$f_{ctd} = f_{ctk,0,05}$	- návrhová hodnota pevnosti betónu v centrickom ťahu
	$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$	- normálové napätie od osovej sily (tlak +)
	$\alpha_1 = a_p / l_{pt2}$	- kde platí:
	$l_{pt2} = 1,2l_{pt}$	- l_{pt} je dĺžka potrebná na vnesenie predpätia do prvku
	a_p	- vzdialenosť od začiatku vnášania predpínacej sily do prvku po kritický rez – len vopred predpäté prvky

Pre stanovenie šmykovej odolnosti prvku vystužených šmykovou výstužou umiestnenou kolmo na neutrálnu os prvku ($\alpha=90^\circ$) sa používa vzťah:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (2.3)$$

Kde:	A_{sw}	- prierezová plocha šmykovej výstuže
	$f_{ywd} = f_{yk} / \gamma_s$	- návrhová hodnota medze klzu šmykovej výstuže
	s	- vzdialenosť strmeňov
	θ	- sklon tlakovej diagonály
	z	- rameno vnútorných síl

Sklon tlakovej diagonály θ môže byť stanovený v rozsahu 22° až 45° , u predpätých prvkov sa odporúča použiť sklon 30° až 36° v závislosti od tlakovej diagonály. Čím plochejší je sklon tlakovej diagonály, tým je potrebná menšia plocha šmykovej výstuže na prenesenie šmykovej sily ale rastie potreba pozdĺžnej výstuže na prenesenie horizontálneho účinky šmykového namáhania H_{Ed} .

3. Experimentálna vzorka

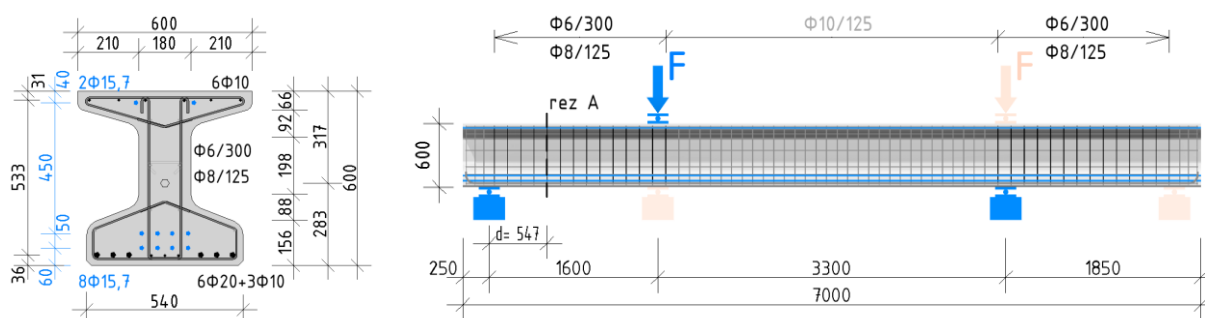
Na experiment budú použité nosníky s prierezom DPS VP I/10, ktorý je bežne používaný v mostnom staviteľstve. Vystuženie bude tvorené pozdĺžnou betonárskou výstužou, súdržnými predpínacími lanami a šmykovou výstužou vo forme strmeňov. Navrhnutá dĺžka nosníka je 7,0 m, pričom jeho teoretické rozpätie počas experimentu je stanovené na 4,9 m.

V teoretických výpočtoch je uvažované s betónom triedy C35/45 a C45/55 – XC2, XF1,(SK) – C1 0,1 – Dmax16 – S3. Predpínacia výstuž je tvorená 10 lanami priemeru $\phi 15,7$ mm (LSA) – 1860 MPa s nízkou relaxáciou. Výsledné predpínacie napätie lán s uvážením strát je stanovené na 1300 MPa. V spodnej prírubе nosníka bude umiestnených 8 lán a v hornej prírubе 2 laná. Úroveň predpätia vo vzorkách sa uvažuje nasledovne: 3 nosníky s predpätím 100 % (1300 MPa * 10 lán), 3 nosníky s predpätím 50 % (650 MPa * 10 lán) a 3 nosníky s takmer 0 % predpätím (5 MPa * 10 lán).

Pozdĺžna betonárska výstuž je navrhnutá priemeru $\phi 20$ mm v počte 6 ks v spodnej časti prierezu a priemeru $\phi 10$ mm v počte 6 ks v hornej časti prierezu. Trieda betonárskej ocele je B 500B.

Vystuženie šmykovou výstužou je navrhnuté vo forme dvoj-strižných strmeňov v dvoch stupňoch. Prvý stupeň vystuženia šmykovou výstužou $\rho_{swmin} = 0,105$ % ($\phi 6$ mm/300 mm) predstavuje minimálny stupeň vystuženia šmykovou výstužou a druhý stupeň vystuženia $\rho_{sw125} = 0,447$ % ($\phi 8$ mm/125 mm). Druhý stupeň vystuženia bol stanovený vzhľadom na požiadavku väčšej odolnosti šmykovej výstuže V_{Rds} (2.3) oproti odolnosti betónu v šmyku V_{Rdc} (2.2). Geometria prierezu, vystuženie nosníka a statická schéma sú zobrazené na Obr. 3.1. Vzďialenosť sily $F = 1600$ mm je stanovená ako trojnásobok efektívnej výšky prierezu $d = 547$ mm a zabezpečením roznosu aplikovanej sily do podpier v pomere 70% / 30%. Prierezové charakteristiky navrhnutého nosníka sú uvedené v Tab. 3.1 a

Tab. 3.2. Dĺžka nosníka a spôsob vystuženia dovoľuje využiť jeden nosník na dve experimentálne skúšky.



Obr. 3.1 Geometria prierezu a vystuženie vľavo. Statická schéma nosníka pri experimente vpravo

Tab. 3.1 Prierezové charakteristiky – betónový prierez

Nosník DPS VP I/10-600			
Plocha prierezu	A_c	0,20915	m^2
Statický moment	S_c	0,0662623	m^3
Moment zotrvačnosti	I_{yc}	$8,6133 \cdot 10^{-3}$	m^4
Kvadratický moment – horný	W_{ch}	$2,7170 \cdot 10^{-2}$	m^3
Kvadratický moment – dolný	W_{cd}	$3,0435 \cdot 10^{-2}$	m^3

Tab. 3.2 Prierezové charakteristiky – ideálny prierez pre betón C35/45

Nosník DPS VP I/10-600			
Plocha prierezu	A_i	0,227	m^2
Statický moment	S_i	0,0746513	m^3
Moment zotrvačnosti	I_{yi}	$9,3386 \cdot 10^{-3}$	m^4
Kvadratický moment – horný	W_{ih}	$2,8379 \cdot 10^{-2}$	m^3
Kvadratický moment – dolný	W_{id}	$3,4469 \cdot 10^{-2}$	m^3

Tab. 3.3 Uvažované úrovne predpätia prvku

Úroveň	Napätie	Počet lán	Predpínacia sila	
			V 1 lane	Spolu (P_{max})
[%]	[MPa]		[kN]	[kN]
100 %	1300	10	195	1950
50 %	650	10	97,5	975
0 %	5	10	0,75	7,5

Tab. 3.4 Materiálové charakteristiky

Betón				Betonárska oceľ			Predpínacia oceľ		
		C35/45	C45/55	B 500B			LSA - 15,7 mm		
f_{ck}	[Mpa]	35	45	f_{yk}	[Mpa]	500	Φ_p	[mm]	15,7
f_{cm}	[Mpa]	43	53	f_{ym}	[Mpa]	550	f_{pk}	[Mpa]	1860
f_{ctm}	[Mpa]	3,2	3,8	f_{yt}	[Mpa]	650	f_{p01k}	[Mpa]	1640
E_{cm}	[Gpa]	34	36	E_s	[Gpa]	200	E_p	[Gpa]	195

Predpätie prvku pre dvojicu vzoriek na pilotný experiment je navrhnuté tak, aby napätia pri spodnom a hornom povrchu krátko po vnesení predpätia do prvku – čo predstavuje kombináciu vlastnej tiaže prvku a predpätia, zodpovedalo napätostnému stavu používanému v praxi. Uvažované hodnoty tlakového napätia v priereze pri hornom povrchu $\sigma_{ih,g1PRAX} = 5$ MPa a pri spodnom povrchu $\sigma_{id,g1PRAX} = 15$ MPa. Pri výpočte sa uvažovalo s plným 100 % predpätím a teda 1300 MPa * 10 lán.

Napätia v navrhovanom priereze sú vypočítané podľa nasledujúcich vzťahov s uvážením pevnostnej triedy betónu C35/45:

	$\sigma_{ih,g1} = \frac{P_{max}}{A_i} + \frac{P_{max} \cdot e_{pi}}{W_{ih}} + \frac{M_{g1kmax}}{W_{ih}} = -3,297 \text{ MPa}$	(3.1)
	$\sigma_{id,g1} = \frac{P_{max}}{A_i} + \frac{P_{max} \cdot e_{pi}}{W_{id}} + \frac{M_{g1kmax}}{W_{id}} = -13,062 \text{ MPa}$	(3.2)

Kde:

- M_{g1kmax} - maximálny ohybový moment od vlastnej tiaže prvku
- P_{max} - celková predpínacia sila pri plnom predpätí
- e_{pi} - excentricita predpínacích prvkov v ideálnom priereze
- A_c - plocha betónového prierezu
- W_{id} - kvadratický moment dolnej časti ideálneho prierezu

W_{ih} - kvadratický moment hornej časti ideálneho prierezu

4. Parametrická analýza

Pre dosiahnutie rezervy medzi ohybovou odolnosťou prierezu M_{Rd} a šmykovou odolnosťou prierezu V_{Rd} boli rovnice (2.1), (2.2) a (2.3) uvedené v kapitole 2 upravené nasledovne:

$V_{Rd,EC}$	$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$	(4.1)
-------------	---	-------

$V_{Rd,TC}$	$v_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{(f_{ctm})^2 + \alpha_l \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctm}}$	(4.2)
-------------	--	-------

$V_{Rd,TR}$	$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{yt} \cdot \cot \theta$	(4.3)
-------------	--	-------

Kde: f_{cm} - stredná odolnosť betónu v tlaku
 f_{ctm} - stredná odolnosť betónu v ťahu
 f_{yt} - pevnosť ocele v ťahu

Stupeň vystuženia pozdĺžnou výstužou bol počítaný podľa vzťahu:

	$\rho_l = \frac{A_{pcelk} + A_{scelk}}{A_c} = 1,8\%$	(4.4)
--	--	-------

Kde: A_{pcelk} - Celková plocha predpínacej výstuže v priereze
 A_{scelk} - Celková plocha betonárskej výstuže v priereze
 A_c - Celková plocha betónového prierezu

V nasledujúcich tabuľkách sú uvedené ohybové a šmykové odolnosti prierezu s rôznou úrovňou predpätia a rôznou pevnostnou triedou betónu. Pre minimálny stupeň vystuženia šmykovou výstužou $\rho_{swmin} = 0,105\%$ ($\phi 6$ mm/300 mm) sú výsledky uvedené v tab. 4.1. A pre stupeň vystuženia $\rho_{sw125} = 0,447\%$ ($\phi 8$ mm / 125 mm) sú výsledky uvedené v tab. 4.2. V tabuľkách sú uvedené aj potrebné veľkosti pôsobiacich síl F pre dosiahnutie danej odolnosti umiestnené v stĺpci za danou odolnosťou.

Tab. 4.1 Odolnosti prierezu - $\rho_{swmin} = 0,105\%$

$\Phi 6$ mm / 300 mm $\Rightarrow \rho_{sw} = 0,105\%$									
Predpätie		$V_{Rd,TR}$	F	$V_{Rd,TC}$	F	$V_{Rd,EC2}$	F	M_R	F
[%]	[MPa]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]
C45/55									
100%	1300	142,1	211,1	509,8	757,0	266,9	396,3	1448,9	1344,6
50%	650	144,8	215,0	463,4	688,1	198,0	294,1	1461,0	1355,9
0%	5	145,4	215,9	324,8	482,3	134,5	199,7	1464,0	1358,6
C35/45									
100%	1300	128,8	191,3	429,3	637,4	258,2	383,4	1393,3	1293,0
50%	650	133,9	198,8	409,9	608,6	189,3	28,1	1417,3	1315,3
0%	5	140,1	208,0	275,7	409,4	125,8	186,8	1333,0	1237,1

Tab. 4.2 Odolnosti prierezu - $\rho_{swmin} = 0,447 \%$

$\Phi 8 \text{ mm} / 125 \text{ mm} \Rightarrow \rho_{sw} = 0,447 \%$									
		V_{RSTR}	F	V_{RcTC}	F	V_{RcEC2}	F	M_R	F
[%]	[MPa]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]
C 45/55									
100%	1300	606,5	900,5	509,8	757,0	266,9	396,3	1448,9	1344,6
50%	650	617,7	917,2	463,4	688,1	198,0	294,1	1461,0	1355,9
0%	5	620,3	921,1	324,8	482,3	134,5	199,7	1464,0	1358,6
C 35/45									
100%	1300	549,6	816,1	429,3	575,9	258,2	346,4	1393,3	1293,0
50%	650	571,1	848,1	409,9	608,6	189,3	281,1	1417,3	1315,3
0%	5	599,3	889,9	275,7	409,4	125,8	186,8	1326,0	1230,7

V Tab. 4.1 a Tab. 4.2 v stĺpcoch V_{RSTR} a M_R je viditeľná stúpajúca šmyková aj ohybová odolnosť pri klesajúcej úrovni predpätia. Tento nárast je spôsobený znížením výšky tlačenej zóny x v priereze a teda nárastom ramena vnútorných síl z .

5. Záver

Vypracovaná analýza dokazuje, že navrhnutá dvojica vzoriek dosahuje dostatočné rezervy medzi ohybovou a šmykovou odolnosťou prierezu. Tak isto preukazuje aj vplyv úrovne predpätia na tieto odolnosti. Použitím typického prierezu DPS VP I/10 – 600 mm aktuálne využívanom v mostnom staviteľstve, budú výsledky experimentu uplatniteľné nielen vo vedeckej ale aj v praktickej sfére.

6. Literatúra

- [1] J. Baran a V. Borzovič, „Comparison of the level of required prestressing of road bridges according to the historical development of technical standards in Slovakia,“ 2021.
- [2] J. Kolisko, V. Vacek, P. Pokorný a M. Kostecká, „Vliv koroze na vlastnosti ocelové predpínací výztuže,“ 2019.
- [3] M. Moravčík, P. Bujňáková a F. Bahleda, „Failure and damage of a first-generation precast prestressed bridge in Slovakia,“ 2020.
- [4] J. Baran, V. Borzovič a Ž. Šenšelová, „Shear Assessment of Existing Prestressed Box Girder Bridge,“ 2021.
- [5] M. Herbrand a J. Hegger, „Experimental Studies on the Shear Capacity of Continuous Prestressed Concrete Beams with External Prestressing,“ Rotterdam, 2013.
- [6] M. Herbrand, J. Hegger a F. Teworte, „Shear fatigue of prestressed I-beams with shear reinforcement,“ 2020.
- [7] M. Hillebrand a J. Hegger, „Fatigue Testing of Shear Reinforcement in Prestressed Concrete T-Beams of Bridges,“ 2020.
- [8] prEN 1992-1-1:2021 - Eurocode 2 : Navrhovanie betónových konštrukcií, Zv. %1 z %2Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy, mosty a inžinierske konštrukcie.
- [9] STN EN 1992-1-1 – Eurokód 2 - Navrhovanie betónových konštrukcií.

Stanislav Blaho

Študijný program: TKIS, ročník: tretí

ČIASTOČNÉ VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNEJ ŠTÚDIE PRVKOV VYSTUŽENÝCH GFRP VÝSTUŽOU PRI DLHODOBOM NAMÁHANÍ

PARTIAL EVALUTATION OF EXPERIMENTAL STUDY OF GFRP RC MEMBERS UNDER LONG-TERM LOADING

Abstract

The main alternative in terms of preventing corrosion of reinforcement is the use of composite materials. Glass fibre reinforced polymers are the most commonly used ones. In abroad, it is already used as load-bearing reinforcement, also due to its lower price among other FRP reinforcements.

Several scientific groups have processed and investigated the short-term properties of GFRP reinforcement. However, knowledge of the long-term properties is not sufficiently explored. Design codes of individual countries contain resistance reduction factors with relatively high values. However, the low number of long-term tests carried out shows that this reduction of mechanical properties may not be completely correct. The article presents realized as well as ongoing long-term experimental studies. These are simple plate beams reinforced with GFRP rods tested by a four-point loading test.

Kľúčové slová

GFRP; dlhodobé vlastnosti; prieťah; štvorbodová skúška

1. Úvod

GFRP je kompozitná výstuž pozostávajúca z polymérov vystužených sklenenými vláknami. Vďaka svojim vlastnostiam je možné túto výstuž použiť pri navrhovaní betónových konštrukcií a najmä tých, ktoré sa nachádzajú v prostrediach s vysokou triedou agresivity alebo environmentálnej záťaže. Výhodou GFRP výstuže je, že ide o odolný materiál, ktorý nepodlieha korózii (alkalické prostredie je nutné zohľadňovať osobitne), nevedie teplo, nevedie elektrický prúd, je teda izolantom, je nemagnetický, a teda nevytvára prekážku na šírenie elektromagnetických vln. Má vysokú pevnosť v ťahu a nízku objemovú hmotnosť.

Odolnosť proti korózii je jednou z niekoľkých pozitívnych vlastností, pre ktoré možno túto výstuž zvoliť pre betónové konštrukcie. V dôsledku prítomnosti chloridov v konštrukcii vystavenej vlhkosti by oceľovej výstuži hrozila korózia a je vhodnejšie použiť alternatívny typ výstuže. Hoci sa počiatočná investícia investora do stavby zdá byť vyššia v porovnaní s použitím klasickej oceľovej výstuže, predĺženie životnosti konštrukcie a zníženie nákladov spojených s jej údržbou svedčí o jej ekonomickej výhodnosti.

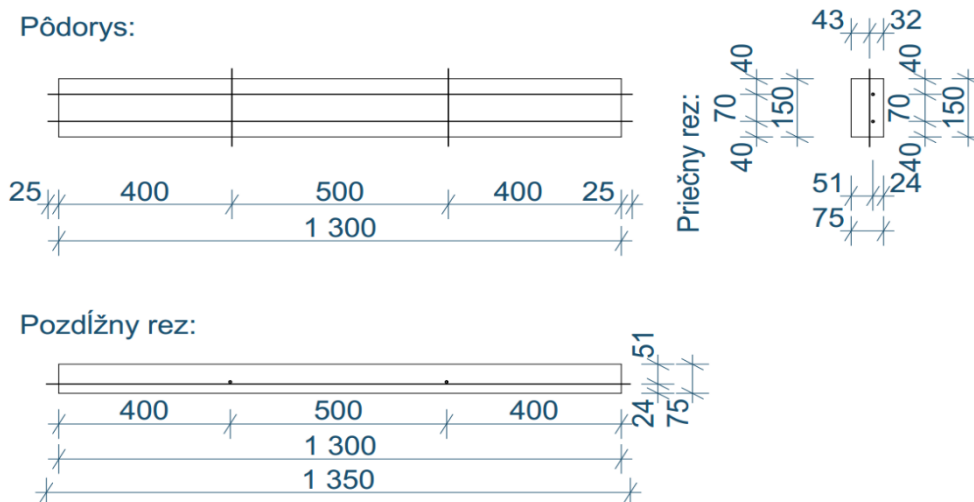
Vlastnosti FRP výstuže závisia vo veľkej miere od faktorov, ako je objem vlákien, typ vlákna, typ živice, smer vlákna a kontrola kvality počas výroby. Živica pôsobí ako matrica, ktorá spája vlákna a prenáša zaťaženie medzi vláknami. Pôsobí tiež ako ochrana vlákien proti mechanickému poškodeniu a vplyvom prostredia (voda, soli, alkálie), čím sa zachováva životnosť FRP produktov. Bežne používané sú uhlíkové vlákna (ktoré tvoria polyméry vystužené uhlíkovými vláknami - CFRP), sklenené vlákna (GFRP), aramidové vlákna (AFRP) a čadičové vlákna (BFRP).

Sklenené vlákna sú najlacnejšie, ale menej odolné, pretože sú chemicky citlivé na alkalické prostredie. GFRP vlákna neabsorbujú vodu, čo vedie k ich vysokej únavovej odolnosti. Nevýhodou polymérnej výstuže je jej nízka odolnosť voči teplote, ktorú ovplyvňuje najmä obsah živice.

Pre krátkodobé správanie sa prvkov vystužených GFRP výstužou existuje veľká databáza publikácií. V porovnaní s touto databázou je skúmanie dlhodobých vlastností nedostatočné. Arockiasamy et al [1]., Hall and Ghali [2], Vijay [3], Abdalla [4], Bischoff [5], Mia`s et al. [6] a Fergania et al. [7] uskutočnili rôzne výskumy v oblasti krátkodobých a dlhodobých vlastností FRP kompozitov. Pre rozšírenie aplikácie týchto materiálov je však ešte potrebné uskutočniť ďalší výskum a stanoviť výpočtové postupy pre prvky vystužené FRP výstužou. Predložený príspevok pozostáva z priebežných výsledkov experimentálnych meraní deformácií dlhodober experimentálnej štúdie.

2. Experimentálna štúdia

V rámci experimentálnej štúdie sa vybetónovalo 70 nízkych nosníkov vystužených 2 prútni GFRP výstuže priemeru 8 mm so špirálovito obalenou povrchovou úpravou (to predstavuje pre výpočet použitý prút s vnútorným priemerom 7 mm) a pre porovnanie 30 nosníkov s oceľovou výstužou – s 2 prútni priemeru 8 mm. Prierez nosníkov bol 150 mm na šírku a 70 mm na výšku a dĺžka nosníkov bola 1 300 mm. Krytie výstuže bolo zvolené 20mm. Presná poloha výstuže ako aj rozmery nosníkov sú zobrazené na obrázku nižšie. Nosníky boli rozdelené do dvoch štúdií - 1. krátkodobá - nosníky boli odskúšané a porušené po 30 dňoch od betonáže, 2. dlhodobá - nosníky sú dlhodobo zaťažené na 25, 50 a 75% ich krátkodobej únosnosti.



Obrázok 1: Rozmery betónových nosníkov

3. Materiály

Pred skúškou nosníkov boli overené materiálové vlastnosti betónu. Pre všetky vzorky bola použitá rovnaká betónová zmes. Počas betonáže nosníkov sa vybetónovali aj skúšobné telesá - kockové (150 x 150 x 150 mm), valcové (150 x 300 mm) a hranolové (100 x 100 x 400 mm), ktorých vlastnosti boli overené v súlade s normou STN EN 12390. Výsledky sú zhrnuté v Tabuľke 1.

Tabuľka 1: Materiálové vlastnosti betónu

Vlastnosti	Hodnota
Kocková pevnosť v tlaku (MPa)	32,3
Valcová pevnosť v tlaku (MPa)	24,3
Statický modul pružnosti (GPa)	30,7

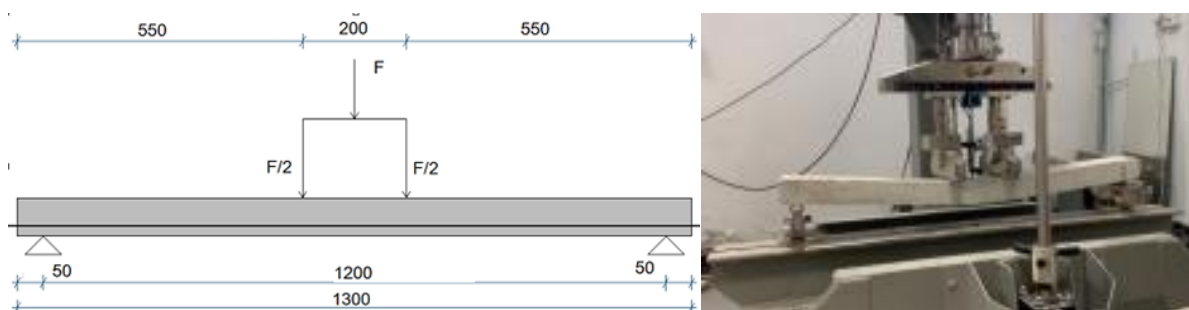
Vlastnosti prútov GFRP výstuže poskytnuté výrobcom (Tabuľka 2) neboli overované, pretože už bola dosiahnutá dobrá zhoda s výsledkami predchádzajúcich experimentálnych testov vykonaných na našej katedre v minulosti.

Tabuľka 2: Vlastnosti FRP výstuže

Vlastnosti	Hodnota od výrobcu	Hodnota z predošlých skúšok
Ťahová pevnosť (MPa)	1000	1070
Modul elasticity (GPa)	52	52

4. Testovanie nosníkov

Schéma krátkodobej experimentálnej štúdie je znázornená na nasledovnom obrázku. Výsledky skúšok slúžili na nakalibrovanie zaťaženia na dlhodobé skúšky.

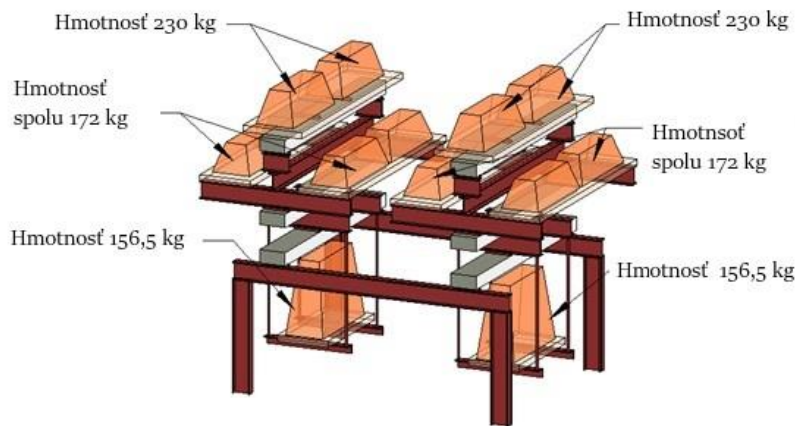


Obrázok 3: Zaťažovacia zostava

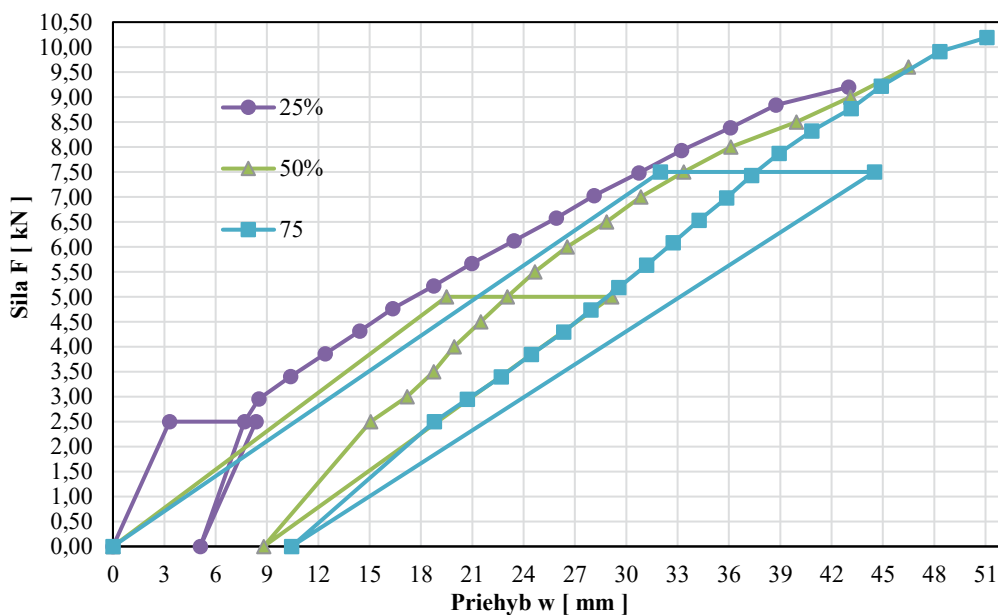
V rámci dlhodobej experimentálnej štúdie bolo postavených desať zaťažovacích zostáv, z ktorých každá pozostáva z troch nosníkov zaťažených na 25%, 50% a 75% ohybovej odolnosti získanej z krátkodobej skúšky. Zaťaženie bude trvať 1 rok, 3 roky a 10 rokov pre vybrané

nosníky. Vzdialenosti medzi podperami a pôsobiacimi silami sú rovnaké ako pri krátkodobých skúškach.

Séria nosníkov zaťažených po dobu trvania jeden rok bola odľahčená a odskúšaná v lise štvorbodovou zaťažovacou skúškou. Okrem jedného nosníka, ktorý zlyhal šmykovým porušením, všetky nosníky boli porušené ohybom - drvením betónu tak, ako boli navrhnuté. Napriek pomerne vysokej hodnote napätia nedošlo ani počas dlhodobého zaťaženia ani počas následnej skúšky k pretrhnutiu GFRP výstuže. Pred rozoberaním zaťažovacej zostavy bol zaznamenaný priehyb, aby bolo možné vypočítať celkový prírastok priehybu počas doby zaťaženia. Rovnako bol zaznamenaný aj zostatkový priehyb po odľahčení. Táto veličina bude vyšetrovaná aj pomocou numerickej analýzy. Na grafe nižšie sú výsledky vrátane nárastu dlhodobého priehybu počas 1-ročného zaťažovania, zvyškových priehybov po odľahčení a priehybov nameraných počas záverečného skúšania nosníkov (priemerné hodnoty).



Obrázok 4: Zaťažovacia zostava- dlhodobé merania



Obrázok 5: Porovnanie výsledkov

Tabuľka 3: Sumarizácia priemerných výsledkov na nosníkoch

Percentuálne zaťaženie (%)	Priehyb po 1 roku (mm)	Priehyb po odľahčení (mm)	Max. priehyb pri zlyhaní (mm)	Max. sila pri zlyhaní (kN)
25	8,2	5,1	43,0	9,2
50	29,2	8,8	46,5	9,6
75	44,5	10,4	51,1	10,2

Poslednou časťou dlhodobej štúdie je vystavenie nosníkov agresívnemu prostrediu. Ďalších deväť nosníkov vystužených GFRP výstužou rovnakých rozmerov je umiestnených v čističke odpadových vôd. Šesť z nich je umiestnených priamo v prítokovom kanáli, kde sa sledujú chemické vlastnosti privádzaných splaškových vôd. Ďalšie tri nosníky sú umiestnené v blízkych vyhňavacích nádržiach, kde sú ovplyvnené aerosólmi splaškovej vody a tiež klimatickými podmienkami. Na tomto mieste je umiestnených aj ďalších šesť nosníkov vystužených oceľovou výstužou pre budúce porovnanie environmentálnych efektov. Tieto nosníky budú vystavené agresívnym podmienkam po dobu 1, 3 a 5 rokov a po tomto čase budú testované štvorbodovou ohybovou skúškou. Sériu nosníkov po jednom roku bola práve odskúšaná a výsledky budú vyhodnotené v blízkej dobe.

Ďalšia sada 8 GFRP nosníkov a 8 oceľových nosníkov je umiestnená v exteriéri blízko parkovacích miest a tak sú vystavené vplyvom prostredia a v zimnom období mrazu a chloridom.



Obrázok 6 Nosníky umiestnené v čističke odpadových vôd (vľavo), nosníky v blízkosti parkovacích miest (vpravo)

5. Záver

Z výsledkov krátkodobých skúšok bolo možné nastaviť úrovne zaťaženia pre 25, 50 a 75% dosiahnutej odolnosti v ohybe pre dlhodobé zaťaženie. Tieto úrovne boli nastavené tak, aby maximálne aplikované zaťaženie prekonalo maximálnu povolenú kapacitu uvedenú v zahraničných návrhových postupoch pre dlhodobé použitie výstuže GFRP. Prírastok priehybu je v súčasnej dobe naďalej nepretržite sledovaný na zaťažovacích zostavách na dlhodobé zaťaženie. Následná podrobná analýza GFRP výstuže a správne vyhodnotenie výsledkov budú použité na určenie skutočných redukčných faktorov pre GFRP materiály v návrhových postupoch a normách. Podľa čiastkových výsledkov uvedených v [8] možno konštatovať, že trend správania sa dlhodobo a krátkodobo zaťažených nosníkov je rovnaký.

Literatúra

- [1] Arockiasamy M, Chidambaram S, Amer A, et al. Time-dependent deformations of concrete beams reinforced with CFRP bars. *Compos Part B: Eng* 2000; 31: 577–592.
- [2] Hall T and Ghali A. Long-term deflection prediction of concrete members reinforced with glass fiber reinforced polymer bars. *Can J Civ Eng* 2000; 27: 890–898
- [3] Vijay PV. Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, 1999, 3138
- [4] Abdalla HA. Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) bars. *Compos Struct* 2002; 56: 63–71.
- [5] Bischoff PH. Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars. *J Struct Eng* 2005; 131: 752–767
- [6] Mia` s C, Torres L, Turon A, et al. A simplified method to obtain time-dependent curvatures and deflections of concrete members reinforced with FRP bars. *Compos Struct* 2010; 92: 1833–1838
- [7] Fergani H, Di Benedetti M, Mia` s Oller C, et al. Longterm performance of GFRP bars in concrete elements under sustained load and environmental actions. *Compos Struct* 2018; 190: 20–31
- [8] S. Blaho and K. Gajdošová, Prepared experimental study for durability verification of FRP reinforced concrete members 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1209 012055

Daniel Čereš¹

Študijný program: TKIS, *ročník:* tretí

ŠMYKOVÉ SPOJENIE MEDZI NADBETONÁVKOU A PÔVODNOU LOKÁLNE PODOPRETOU DOSKOU

SHEAR CONNECTION BETWEEN CONCRETE OVERLAY AND FLAT SLAB

Abstract

My research is focused on the enhancement of punching capacity of the strengthened flat slabs without shear reinforcement by concrete overlay. An important aspect is the detailing of the interface between the two concrete layers namely the roughening the existing surface or the use of studs, which ensure a minimum longitudinal displacement of the two layers. In the experimental program two types of shear connectors will be used. This paper aims to the theoretical background of shear capacity of interface between flat slab and additionally casted concrete overlay.

Keywords

Punching shear, shear connectors, flat slab, concrete overlay

1. Úvod

Účinnosť spolupôsobenia medzi dvoma betónovými vrstvami závisí od kvality prevedenia tohto rozhrania. V prípade zosilňovania existujúcej konštrukcie, prenos napätí je priamo ovplyvnený úpravou drsnosti pôvodného betónového prvku a použitím oceľových spriahovacích prvkov na zabezpečenie spolupôsobenia medzi dvoma vrstvami betónu. Ak pri zosilňovaní rozhranie nepretína žiadna výstuž a spolupôsobenie je zabezpečené len adhéziou jednotlivých vrstiev betónu, so zvyšujúcim sa zaťažením a deformáciami dochádza k oddeleniu hornej vrstvy nadbetónávky a s tým je spojené krehké porušenie. Podmienky spolupôsobenia závisia od drsnosti povrchov, ktoré umožňujú vznik napätí v súdržnosti na rozhraní betón-betón.

Pri použití oceľových spriahovacích prvkov pretínajúcich rozhranie dochádza k vzniku troch komponentov odporového mechanizmu - adhézia, trenie a hmoždinkový efekt. Adhézia vzniká na základe chemického spojenia dvoch vrstiev betónu a mechanického spojenia kvôli makroskopickej drsnosti povrchu. Trenie je priamym dôsledkom pôsobenia vonkajšieho zaťaženia kolmo na rozhranie alebo v dôsledku koncentrácie ťahových síl v šmykových zarážkach [1]. Hmoždinkový efekt vzniká v dôsledku väčších relatívnych poklzo vplyvom ohybu a dochádza k vzniku šmykových a ohybových napätí v šmykových zarážkach, ktoré prechádzajú rozhraním. Maximálna hodnota hmoždinkového efektu závisí od odolnosti šmykovej zarážky (ohyb+ťah+šmyk) a drvenia okolitého betónu [2].

¹ Daniel Čereš, Ing. Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Parametre vplyvajúce na správanie rozhrania betón-betón

2.1. Úprava drsnosti rozhrania betón-betón

K dosiahnutiu lepšieho monolitického správania sa konštrukcie je úprava drsnosti rozhrania kľúčovým parametrom vstupujúcim do spolupôsobenia dvoch vrstiev betónových povrchov, nakoľko má vplyv na vývoj mechanizmu šmykového trenia. Mechanizmus je definovaný makrodrsnosťou rozhrania, ktorú ovplyvňuje kamenivo uložené v cementovom lôžku a mikrodrsnosťou, ktorú ovplyvňuje adhézia týchto dvoch povrchov. Adhézia vzniká z dôsledku roztvárania pórov betónového povrchu, ktoré umožňujú spojenie cementovej malty čerstvej betónovej zmesi s existujúcim betónovým povrchom, čím sa rozvinie efekt mikrosprávania chemickou adhéziou. Dodatočným zdrsnením povrchu pôvodného betónu sa napomáha kontrolovať zmršťovanie čerstvej betónovej zmesi, ktorá bude nanosená na pôvodnú betónovú dosku a tým zamedzí vzniku trhlín na rozhraní. Prípadné vzniknuté trhliny na rozhraní betón-betón majú za následok stratu pevnosti rozhrania [3]. Dôležitým faktorom je aj spôsob prípravy rozhrania betón-betón, ktorý môže negatívne ovplyvniť správanie sa rozhrania v dôsledku prítomnosti mikrotrhlín a odlupovania sa betónu. Príprava povrchu hrá hlavnú úlohu pri správaní sa rozhrania betón-betón tým, že zvyšuje vzájomné spojenie kontaktných vrstiev, čo má za následok otvorenie trhliny rozhrania, keď dôjde k relatívnemu poklzu [4]. Príprava povrchu môže byť vykonaná rôznymi spôsobmi. Za najagresívnejšiu metódu z hľadiska otvárania mikrotrhlín v betóne je považované použitie zbíjajúcich a sekacích kladív. Najmenej agresívnou metódou je otryskávanie vodným lúčom, nakoľko touto metódou je možné účinne odstraňovať povrch betónu a to z hľadiska hĺbky aj požadovanej výslednej drsnosti. Vysokotlakový vodný lúč odstraňuje cementové lôžko a odhaľuje kamenivo pri minimálnych vibráciách bez vzniku mikrotrhlín v pôvodnej doske.

2.2. Výstuž prechádzajúca rozhraním betón-betón

Šmyková výstuž, ktorá prechádza rozhraním zamedzuje horizontálnemu posunu dvoch vrstiev betónu a obmedzuje dilatáciu medzipovrchovej trhliny a to pôsobením hmoždinkového efektu a zvýšením trecích síl na rozhraní povrchov. Požadovaná šmyková deformácia potrebná na účinnosť hmoždinkového efektu nastane pri dosiahnutí väčšieho relatívneho poklzu, čím sa ale ohrozí funkcia obmedzenia relatívnych deformácií rozhrania. Účinok zovretia takejto výstuže preto prispieva k odporovému mechanizmu viac ako hmoždinkový efekt [5].

2.3. Materiálové charakteristiky betónových vrstiev

Dôležitým parametrom ovplyvňujúcim trecie a odporové mechanizmy je pevnosť betónu v tlaku. Prítomnosť výstuže alebo vonkajších síl umožňuje vyššie tlakové napätia, čím sa optimalizuje kontakt pri horizontálnom posúvaní dvoch betónových vrstiev. Pevnosť v ťahu bola neskôr zavedená do mechanizmu šmykového trenia na základe príspevku ku kohéznej pevnosti rozhrania [6].

2.4. Typ, tvar a veľkosť kameniva

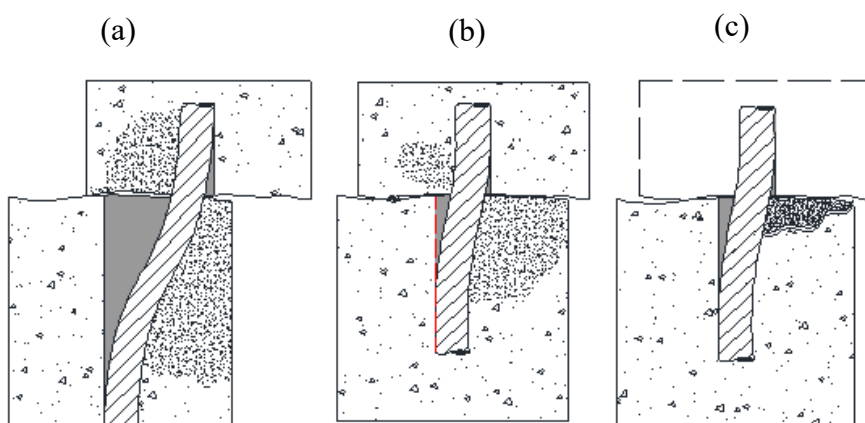
Typ kameniva je tiež dôležitý faktor pre pevnosť rozhrania, pretože pevnosť v tlaku kameniva normálnej hmotnosti je vyššia ako pevnosť cementového lôžka. To robí tento agregát silným článkom v mechanizme šmykového trenia. Tvar kameniva tiež ovplyvňuje pevnosť rozhrania, pričom drvené kamenivo poskytuje vyššiu pevnosť po strate adhézie ako riečne kamenivo oválneho tvaru [7]. Veľkosť kameniva je tiež mimoriadne dôležitý parameter pre mechanizmus šmykového trenia, pretože vyčnievajúce kamenivo z existujúceho povrchu umožňuje vyšší stupeň vzájomného spojenia betónu pôvodnej konštrukcie a nového betónu nadbetónávky.

2.5. Obmedzujúce sily

Sily pôsobiace na rozhranie betón-betón môžu byť aktívne alebo pasívne, v závislosti od toho, či je zdrojom externá sila alebo dôsledok rovnováhy tlakových napätí vyplývajúcich z aktivácie ťahového napätia výstuže. Prítomnosť výstuže dostatočne ukotvenej cez rozhranie umožňuje aktiváciu tlakových napätí a jej príspevok by sa mal brať do úvahy v mechanizme šmykového trenia. Treba poznamenať, že tieto typy obmedzujúcich síl môžu pôsobiť na rozhranie betón-betón súčasne.

3. Výstuž prechádzajúca rozhraním betón-betón

Prepojenie rozhrania betón-betón pomocou výstuže vedie k zlepšeniu šmykových mechanizmov rozhrania. Spôsoby zlyhania výstuže prechádzajúcej cez rozhranie zahŕňajú ohybovú deformáciu, ku ktorej dochádza v dôsledku vyššieho relatívneho poklzu kontaktných vrstiev. V tomto bode dochádza k strate adhézie a takéto vystuženie by zabezpečilo štrukturálnu integritu prostredníctvom trenia a príslušného pôsobenia hmoždinkového efektu. Takáto deformácia si vyžaduje rozdrvenie betónu a dosiahnutie medze klzu šmykovej záračky, čo závisí od pevnosti oboch materiálov a zvyčajne vedie k jednému z troch možných spôsobov porušenia znázornených na Obr. 3.1.

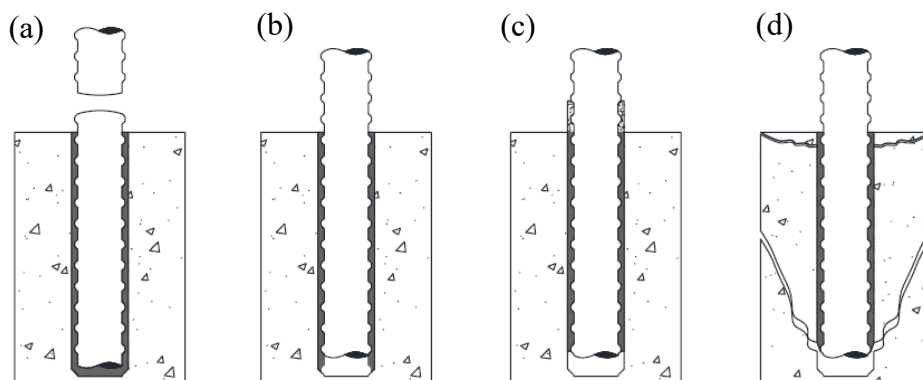


Obr. 3.1 - Spôsoby zlyhania šmykových konektorov [8]

Šmykové konektory s dostatočnou dĺžkou kotvenia zvyčajne dosiahnu medzu klzu a pevnosti ocele. Ak je zabezpečené správne ukotvenie do betónu, dochádza k drveniu betónu pre väčšie relatívne poklzy (Obr. 3.1a). V prípade nižšej pevnosti betónového podkladu môže šmykový konektor rozdrviť betónový podklad a následne sa odpojiť za kotevnou oblasťou, čo má za následok stratu tuhosti a porušenie rozhrania (Obr. 3.1b). V závislosti od kvality podkladného betónu a ohybovej tuhosti šmykového konektora môže dôjsť k odlupovaniu betónu v dôsledku zvýšeného relatívneho poklzu dvoch vrstiev, hoci nová vrstva betónu môže poskytnúť určitý stupeň obmedzenia k podkladnému betónu (Obr. 3.1c).

Všetky vyššie uvedené predpoklady vychádzajú z vyššej pevnosti novej betónovej vrstvy a relatívne zdravého podkladového betónu. V prípade väčších relatívnych deformácií môže dôjsť k vytiahnutiu šmykového konektora z podkladného betónu aj v prípade, ak je správne zakotvený do novej betónovej vrstvy. Spôsoby porušenia sú znázornené na Obr. 3.2. Spôsoby porušenia zahŕňajú vytiahnutie výstuže z rozhrania medzi výstužou a spojivom (Obr. 3.2b) alebo medzi spojivom a betónom, v ktorom je výstuž ukotvená (Obr. 3.2c). Môžu nastať aj extrémne prípady dosiahnutia ťahovej pevnosti výstuže, pri ktorej dochádza k jej pretrhnutiu (Obr. 3.2a) alebo vytrhnutiu

betónového kužľa (Obr. 3.1d). Nakoľko sa na šmykových konektoroch nepredpokladá pôsobenie prostého ťahu, tieto prípady sú ťažko dosiahnuteľné.



Obr. 3.2 - Spôsoby zlyhania dodatočne vložených šmykových konektorov [8]

4. Návrh šmykovej výstuže na základe šmykovej odolnosti kontaktnej plochy

Zohľadnenie rozhrania betón-betón je možné charakterizovať a posúdiť aj na základe niektorých výpočtových postupov. Návrhové postupy, ktoré je potrebné zväžiť pri zosilňovaní lokálne podopretej dosky technológiou nadbetónávky sú Model Code 2010 [9], Eurokód 2 [10] a prEC2 [11], nakoľko poskytujú výpočet šmykového trenia a odolnosti na rozhraní medzi betónmi rôzneho veku. V tomto príspevku sa budem venovať len výpočtu šmykovej odolnosti na základe Eurokódu 2 [10].

4.1. Šmyková odolnosť kontaktnej plochy podľa EC 2

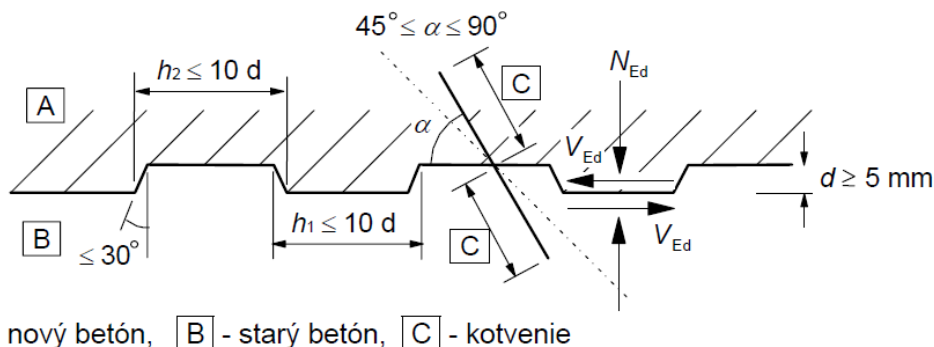
Šmyková odolnosť na kontaktnej ploche medzi dvoma betónmi rôzneho veku na základe EC2 je definovaná formou šmykových napätí ako:

$$v_{Rd,i} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd}(\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (4.1.1)$$

kde je:

$v_{Rd,i}$	návrhová šmyková odolnosť na kontaktnej ploche [MPa],
f_{ctd}	návrhová pevnosť betónu v ťahu; $f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0,05} / \gamma_C$ [MPa],
$f_{ctk,0,05}$	charakteristická pevnosť betónu v ťahu s 5% fraktilom [MPa],
σ_n	normálové napätie, ktoré vzniká kolmo na kontaktnú plochu medzi betónmi, vplyvom vonkajšej normálovej sily, ktorá môže pôsobiť spolu so šmykovou silou. V prípade ak má tendenciu ťahových napätí, hodnota $c \cdot f_{ctd} = 0$ [MPa],
f_{yd}	návrhová hodnota medze klzu výstuže v rozhraní [MPa],
α	uhol sklonu šmykovej výstuže, ktorá prechádza kontaktnou plochou medzi betónmi rôzneho veku; $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ [°],
ρ	stupeň vystuženia kontaktnej plochy; $\rho = A_s / A_i$ [-]
A_s	plocha výstuže prechádzajúca kontaktnou plochou, s primeraným zakotvením do oboch betónov [m ²],
A_i	plocha kontaktného styku medzi betónmi rôzneho veku [m ²],
$c; \mu$	súčinitele závisiace na drsnosti kontaktnej plochy [-].

Na základe EN-1992-1-1 sa povoľuje kontaktné povrchy klasifikovať ako veľmi hladký, hladký, drsný alebo zazubený, v prípade ak povrchy stykov nie sú definované podrobnejšími špecifikáciami. Veľmi hladký povrch sa vytvorí po uložení betónu do ocelového, plastového alebo hladkého dreveného debnenia a súčinitele $c = 0,025 \approx 0,1$; $\mu = 0,5$. Ak povrch betónu nie je po z vibrovaní upravovaný, prípadne je vytvorený len posuvným debnením, definuje sa ako hladký povrch a $c = 0,2$; $\mu = 0,6$. Na dosiahnutie drsného povrchu sú potrebné aspoň 3 mm ryhy so vzájomnou vzdialenosťou okolo 40 mm a takýto povrch vzniká hrabaním čerstvej betónovej zmesi alebo obnažením kameniva, prípadne inou metódou s podobným účinkom a $c = 0,4$; $\mu = 0,7$. Definíciu zazubeného povrchu udáva Obr. 4.1 a súčinitele $c = 0,5$; $\mu = 0,9$.



[A] - nový betón, [B] - starý betón, [C] - kotvenie

Obr.4.1 - Tvar zazubeného kontaktného styku medzi betónmi rôzneho veku [10]

Záver

Súčasťou môjho experimentálneho programu je použitie šmykových konektorov na zabezpečenie spolupôsobenia medzi pôvodnou lokálne podopretou doskou a novou vrstvou nadbetónávky. Vyriešenie spolupôsobenia medzi týmito dvoma vrstvami je dôležitým faktorom k dosiahnutiu požadovaného zosilnenia na zvýšenie šmykovej odolnosti v pretlačení. Na základe odporúčaní a teoretických znalostí budú na experimentálny výskum použité šmykové konektory vo forme ocelových šmykových trťní s rozkovanou hlavou a svorníky, ktoré budú dodatočne utiahnuté. Prehľad skúšobných vzoriek udáva Tab. 5.1. Rozdiel vo vzorkách predstavuje plocha nadbetónávky a spôsob spriahnutia nadbetónávky a pôvodnej dosky.

Tab. 5.1.: Zoznam skúšobných vzoriek

Označenie	Definícia vzorky
S-0	Referenčná doska bez zosilnenia.
S ₂₀₀₀ -RS	Doska s nadbetónávkou 2000 x 2000 mm, s rozhraním upraveným len pomocou zdrsnenia povrchu.
S ₂₀₀₀ -SC	Doska s nadbetónávkou 2000 x 2000 mm, so šmykovými trťňami prechádzajúcimi rozhraním. Rozhranie bude upravené aj zdrsnením.
S ₂₀₀₀ -SB	Doska s nadbetónávkou 2000 x 2000 mm, so svorníkmi prechádzajúcimi rozhraním a celou doskou. Rozhranie bude upravené aj zdrsnením.
S ₁₄₀₀ -SC	Doska s nadbetónávkou 1400 x 1400 mm, so šmykovými trťňami prechádzajúcimi rozhraním. Rozhranie bude upravené aj zdrsnením.
S ₁₄₀₀ -ALR	Doska s nadbetónávkou 1400 x 1400 mm, so šmykovými trťňami prechádzajúcimi rozhraním a súčasne zakotvenou hornou ohybovou výstužou nadbetónávky do referenčnej dosky. Rozhranie bude upravené aj zdrsnením.

Literatúra

- [1] RANDL, N. Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010. In *Structural Concrete* [online]. 2013. Vol. 14, no. 3, s. 230–241.
- [2] KOSEKI, K.; BREEN, J. Texas, Exploratory study of shear strength of joints for precast segmental bridges, 1983.
- [3] HOFBECK, J. et al. Shear transfer in reinforced concrete. In *ACI Journal Proceedings* . 1969. Vol. 66, s. 119–128.
- [4] SANTOS, P.M.D. - JÚLIO, E.N.B.S. Interface Shear Transfer on Composite Concrete Members. In *ACI Structural Journal* [online]. 2014. Vol. 111, no. 1, s. 113–121.
- [5] MILLARD, S.G. - JOHNSON, R.P. Shear transfer across cracks in reinforced concrete due to aggregate interlock and to dowel action. In *Magazine of Concrete Research* [online]. 1984. Vol. 36, no. 126, s. 9–21.
- [6] RANDL, N. *Investigations on Transfer of Forces between Old and New Concrete at Different Joint Roughness*. [s.l.]: University of Innsbruck, Austria, 1997.
- [7] HOFF, G. High Strength Lightweight Aggregate Concrete for Arctic Applications—Part 3: Structural Parameters. In *ACI Special Publication*, . 1993. s. 175–246.
- [8] MILTENBERGER, M. Capacity Design of Grouted Anchors. In [online]. 2001. no. August.
- [9] COMITÉ EURO- INTERNATIONAL DU BÉTON *fib Model Code 2010, Final draft – Volume 2*. 2012. 148–162 s. ISBN 9782883941069.
- [10] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*. . CEN/CENELE. vyd. 2004. 118 s. ISBN 978-0-580-98289.
- [11] CEN/TC250/SC2/WG 101 N 256 Background to prEN 1992-1-1:2021-09. In . 2021.

Klara Freudenberger¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 3. ročník

PRÍPOJ STROPNEJ DOSKY K NOSNÍKU PRI HYBRIDNÝCH SÚSTAVÁCH Z KRÍŽOM LEPENÉHO LAMELOVÉHO DREVA A OCELE

CONNECTION OF CEILING DESK AND BEAM OF HYBRID SYSTEM CONTAINING CROSS LAMINATED TIMBER END STEEL

Abstract

The use of hybrid systems brings advantages in their application. The construction is able to withstand higher loads and overcome greater spans. By creating hybrid systems from cross laminated timber and steel is possible to create efficient and also ecological structures. Creating an appropriate detail of connecting the ceiling desks and beam can create a load-bearing ceiling structure that behaves like a continuous desk.

Kľúčové slová / Key Words

CLT, DELTABEAM, hybridné sústavy.

1. Úvod

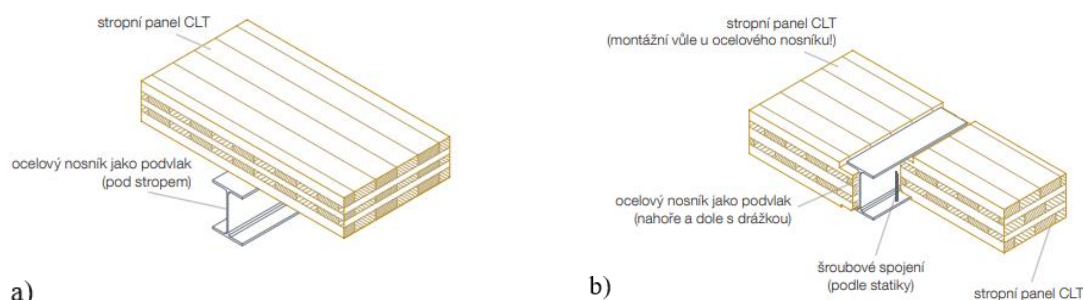
V súčasnosti sa kladie dôraz na používanie materiálov a konštrukcií, ktoré sú schopné byť použité pri návrhu s maximálnou možnou mierou efektivity. Práve hybridné sústavy sú charakteristické tým, že sa používajú kombinácie materiálov, pričom jednotlivé materiály sú používané v čo najpriaznivejších návrhových situáciách. Dovoľuje to navrhovanie efektívnejších konštrukčných systémov s ktorými je možné dosahovať väčšie rozpätia resp. odolávať väčšej miere zaťaženia [1] [2]. Takéto konštrukčné systémy sa uplatňujú primárne pri viacpodlažných budovách. Hybridné sústavy sa používajú aj v iných kombináciách materiálov ako oceľ a betón [3]. Medzi už zaužívané kombinácie materiálov v rámci systému patria oceľ a drevo [4].

2. Hybridné sústavy pozostávajúce z CLT panelov a DELTABEAM nosníkov

2.1 Špecifikácia hybridnej sústavy

Vzhľadom na požiadavku dosahovať čoraz vyššiu efektivitu jednotlivých systémov, je potrebné upraviť a zvoliť čo najefektívnejšie moduly jednotlivých komponentov v rámci systému. Vhodnou kombináciou materiálov sa vie dosiahnuť omnoho efektívnejšia konštrukcia, avšak pri stropných konštrukciách aj výška stropnej konštrukcie hrá značnú úlohu. Práve z tohto dôvodu je tendencia vytvárať čo najtenšie konštrukcie tzv. Slim-Floor, to sa vie doceliť uložením stropných panelov na dolnú pásnicu nosníku [5]. Na základe tohto princípu dochádza k redukcii výšky o výšku stropného prievlaku, keďže už stropné dosky nie sú uložené na hornej hrane prievlakov (obr. 1). Častá kombinácia pri štíhlych stropných konštrukciách je oceľový prievlak kombinovaný s masívnou drevenou stropnou doskou, najčastejšie sa používa krížom lepené lamelové drevo (CLT).

¹ Klara, Freudenberger, Ing. , Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 812 43 Bratislava



Obr. 1: Príklad hybridnej sústavy oceľ-CLT [9]

- a) Ocelový nosník na ktorom je uložený CLT panel
- b) Ocelový nosník do ktorého je vsunutý CLT panel

Kombinácia stropných dosiek z CLT a DELTABEAM nosníku od spoločnosti Peikko sa používa od roku 2011 [6]. A však aj pri tejto sústave dochádza k vývoju. V dnešnej dobe už je možné použiť spriahnuté CLT- betónové stropné dosky uložené na spriahnutom DELTABEAM nosníku ktorý je vyplnený betónom. V rámci systému je dosky možné aplikovať ako prsto uložené dosky alebo ako spojené. Avšak nastáva otázka, ako vzájomne prepojiť jednotlivé dosky na opačných stranách prievlaku aby bolo možné sústavu považovať za spojitú.

2.2 Vykonaný výskum

Výskum prebiehajúci v rámci spoločnosti Peikko sa zaoberá aplikovaním ich certifikovaných nosníkov DELTABEAM s použitím drevených masívnych dosiek. Jedná sa o laboratórny výskum zameriavajúci sa na overenie prenosu zaťaženia z dosky do nosníku. Overujú sa dve štádia, štádiom užívania a požiarne situácia.

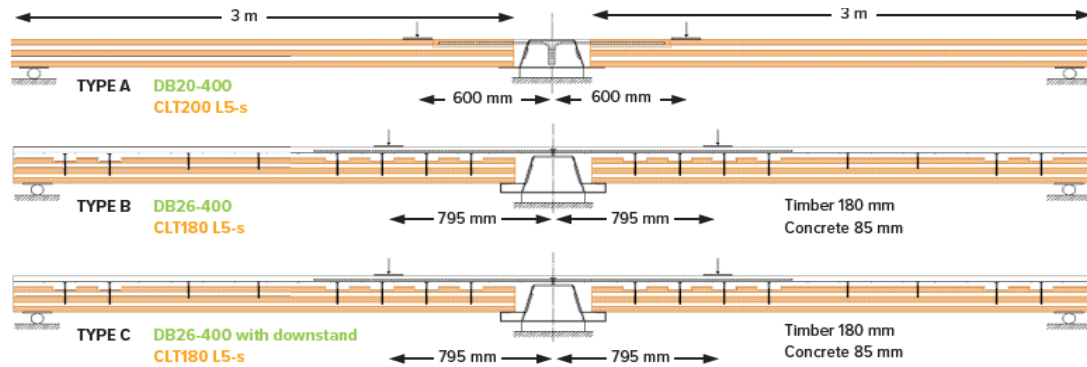
Počas experimentu boli používané tri skupiny vzoriek (obr. 2). V prvej skupine (A1-A4) sa jednalo o CLT dosku vzájomne prepojenú s nosníkom, v druhej (B1-B4) a tretej (C1 a C2) skupine sa jednalo už o spriahnuté CLT-betónové dosky prepojené s nosníkom s tým, že v tretej skupine bol použitý nosník obsahujúci zahnutú prírubu (downstand) na dolnom páse DELTABEAM nosníku.

	Specimen	Timber edge	Ledge
DELTABEAM® Timber slab	A1	Vertical	yes
	A2	Inclined	yes
	A3	Inclined	no
	A4	Inclined with pockets	no
DELTABEAM® Composite Timber slab	B1	Vertical	yes
	B2	Inclined	yes
	B3	Inclined	no
	B4	Inclined with chamfers	yes
	C1	Vertical	yes
	C2	Inclined	yes

Obr. 2: Zoznam vzoriek [7].

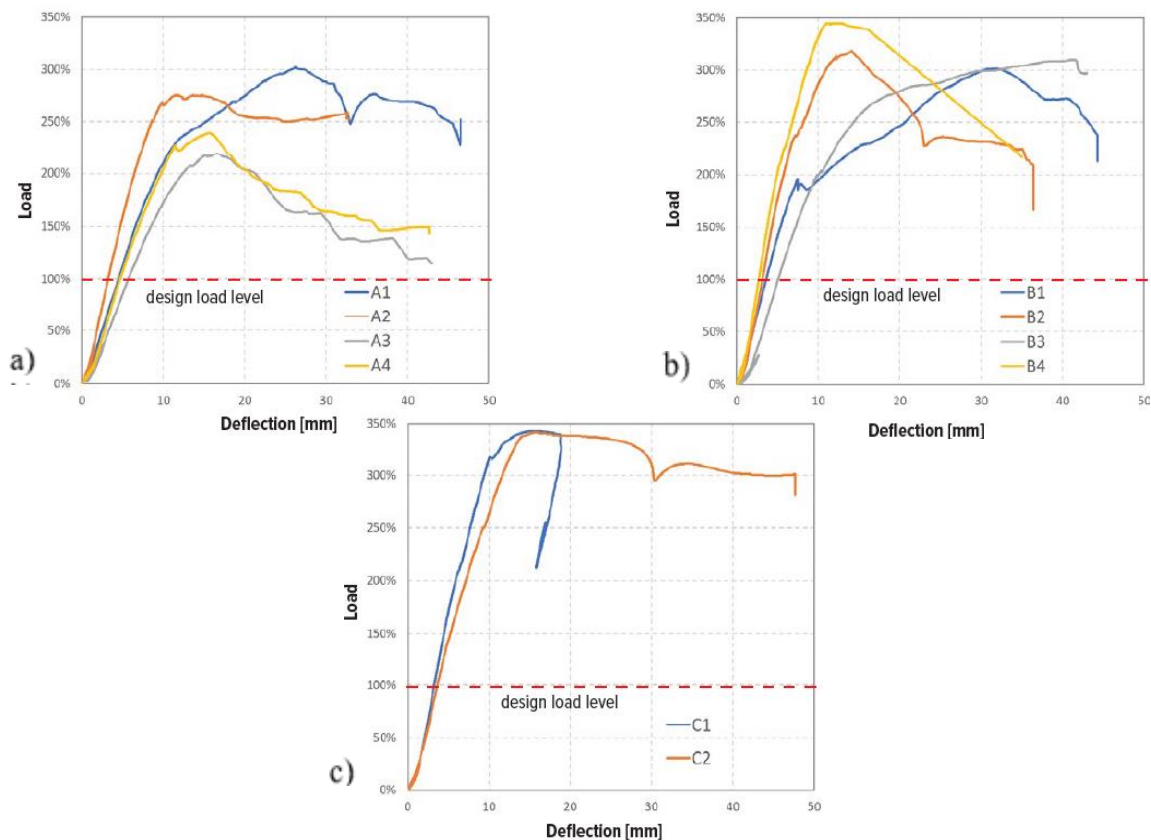
V rámci skupiny A a B boli vyhotovené po štyri vzorky a v poslednej skupine C boli zhotovené dve vzorky, s tým, že vzorka 1 a 3 mala kolmú hranu CLT panelu v mieste ukončenia pri nosníku, vo vzorkách 2 a 4, hrana už bola upravená a sklon hrany bol identický so šikmou stenou nosníku. S tým, že vo vzorkách 3 a 4 došlo k odstráneniu dolného pásu v dôsledku simulácie požiarnej situácie.

Skupina vzoriek A, teda aplikované CLT dosky sú zaťažované 3 kN/m^2 v rámci rastru $6 \times 6 \text{ m}$. Skupiny vzoriek B a C sú zaťažované zaťažením s 3 kN/m^2 v rámci rastru $7 \times 7 \text{ m}$ (obr. 3).



Obr. 3: Dimenzie vzoriek [7].

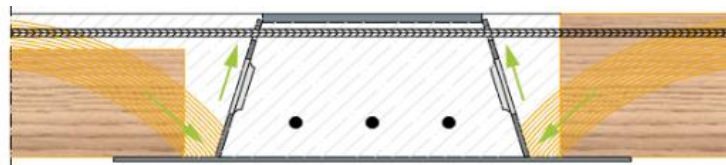
Výsledky experimentálnych skúšok preukázali, že všetky overované vzorky sú schopné odolávať násobnému zaťaženiu so zreteľom na predpokladané odolnosti (obr. 4). Práve výsledky potvrdili predpokladanú hypotézu zvýšenia únosnosti použitím zošikmenej hrany CLT panelu.



Obr. 4: Deformácie vzoriek vplyvom zaťaženia [7].

- CLT doska (skupina vzoriek A)
- Kompozitová CLT-betónová doska (skupina vzoriek B)
- Kompozitová CLT-betónová doska so zahnutou prírubou (skupina vzoriek C)

Na základe tejto analýzy je možné usúdiť, že zvolenie naklonenej hrany je výhodnejším riešením aj vďaka mechanizmu prenosu zaťaženia (klenbový efekt) (obr. 5).

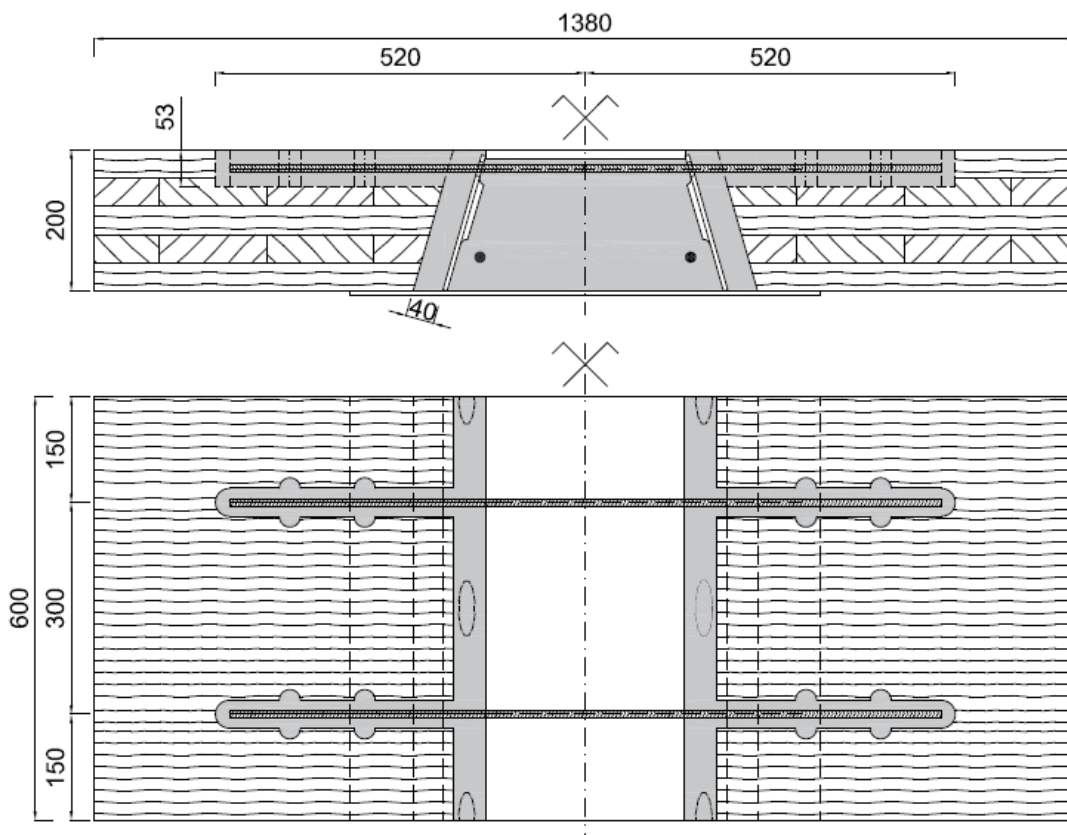


Obr. 5: Prenos zaťaženia v štádiu užívania [8].

2.3 Príprava experimentu

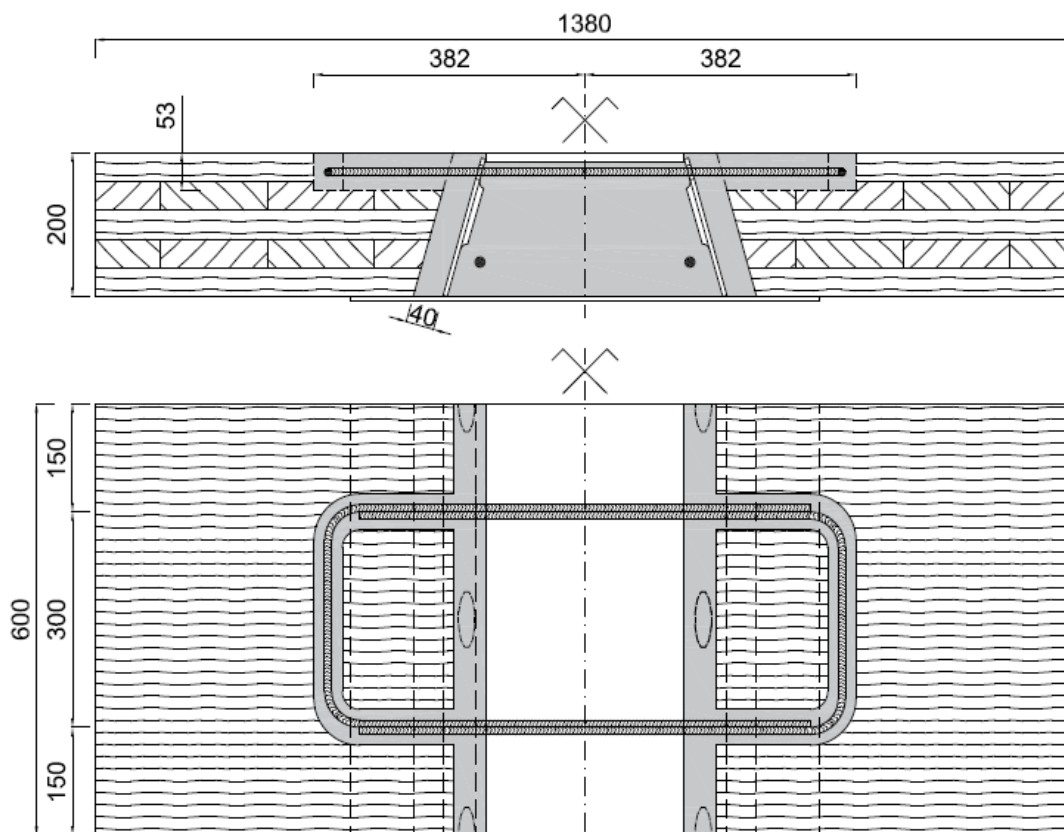
V rámci pripravovaného experimentu sa nadviaže na získané poznatky z komerčného výskumu. Keďže v predošlom výskume sa potvrdila účinnosť použitia zošikmenej hraný CLT panelu, aplikuje sa to aj v nastávajúcom experimente.

Budú overované dve vzorky (vzorka A a B). Vzorka A je obdobná zo vzorkou A2 (obr. 2). Na základe podobnosti vzorky A zo vzorkou A2 sa predpokladá dosiahnutie primerane rovnakých výsledkov. Vzorka bude pozostávať z CLT panelu typu: CLT 200 L5s do ktorého budú vyfrézované drážky označené v rámci obr. 6, DELTABEAM nosníku D20-400, betonárskej výstuže B500B priemeru 10 mm a betonovej zálievky triedy C20/25.



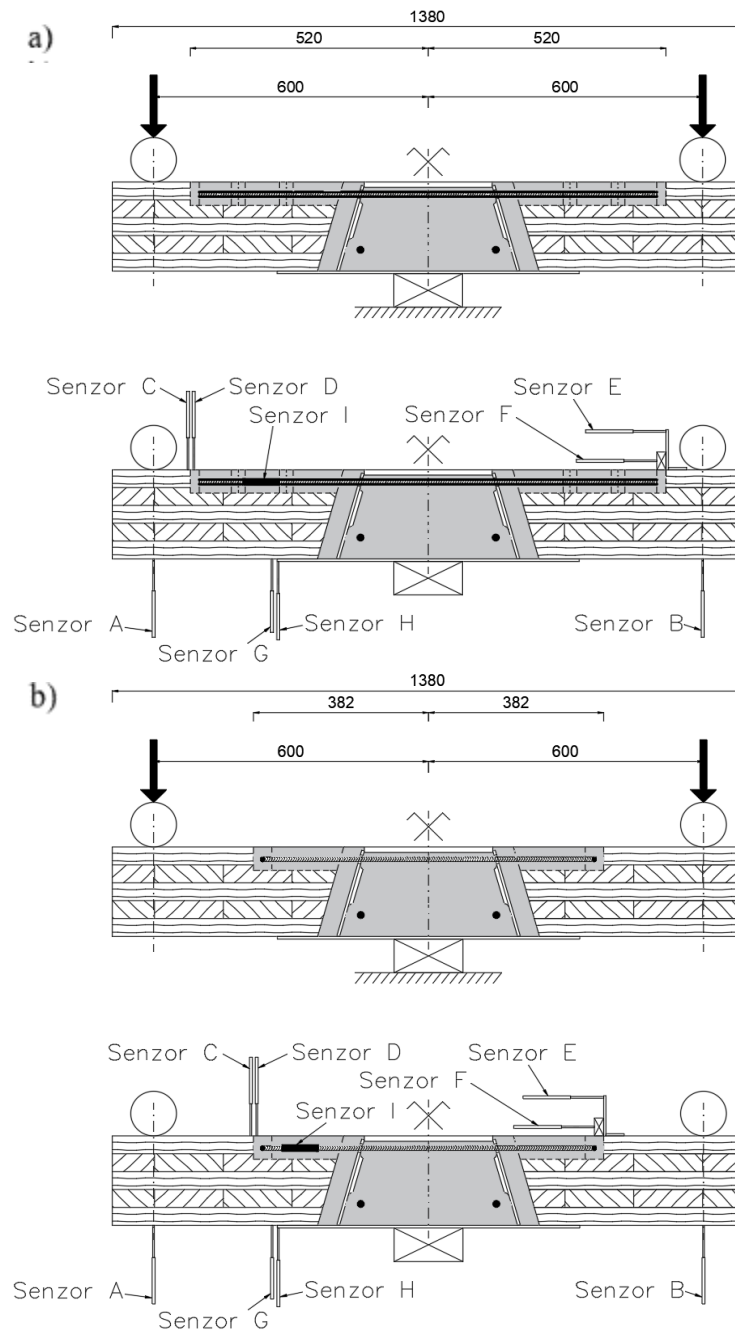
Obr. 6: Schéma prípoju CLT dosky k DELTABEAMu (Vzorka A).

Vzorka B (obr. 7) bude pozostávať z podobných súčastí ako predošlá vzorka. S tým, že dôjde k úprave tvaru drážok a tým potrebnému ohýbaniu výstuže. Dôjde k vytvoreniu kapsy v tvare U. Predpokladá sa vyššia odolnosť oproti vzorke A.



Obr. 7: Schéma prípoju CLT dosky k DELTABEAMu (Vzorka B).

Obe vzorky budú zaťažované podľa zaťažovacích schém znázornených na obr. 8 Zaťažovacia skúška bude simulovať pôsobiace zaťaženie pôsobiace na stropné dosky. DELTABEAM nosník bude podporený líniovo v strednicovej rovine pod dolnou pásnicou. Zaťaženie bude pôsobiť na oboch stranách konzol vytvorených zo stropných dosiek z CLT panelov (obr. 6 a 7). V počiatočnej fáze bude aplikované zaťaženie odpovedajúce 3 kN/m² z pôvodného rastru 6x6 m s tým že sa predpokladá dosiahnutie porušenia vzorky až pri zaťažení približujúcom sa 9 kN/m² z pôvodného rastru 6x6 m. Predpokladá sa porušenie výstuže v dôsledku ťahových účinkov. Z tohto dôsledku dôjde k nadmernému praskaniu betónu. Z týchto dôvodov budú na vzorkách umiestnené meracie ihly, pomocou ktorých bude možné dôkladne vyhodnotiť jednotlivé vzájomné deformácie (obr.8). Pomocou tenzometrov umiestnených na výstuži sa stanovia vznikajúce napätia vo výstuži.



Obr. 8: Scéma zostavenia vzoriek a rozmiestnenia snímačov na vzorkách.

- a) vzorka A
- b) vzorka B

Výsledkom experimentu bude zhodnotenie efektivity úpravy detailu pripojenia vykonanom na vzorke B. Predpokladá sa, že vytvorením kapsy dôjde pri simulovanom zaťažení k aktivácii nie len výstuže ako v prípade vzorky A ale aj k otláčaniu betónovej výplne v kapsy o drevo. Táto úprava by mala mať za následok dosiahnutia menších deformácií. Taktiež sa predpokladá dosiahnutie väčšej odolnosti prípojového detailu.

Literatúra

- [1] F. Y. Moritani, C. E. J. Martins, A. M. P. G. Dias, „A Literature Review on Cold-Formed Steel-Timber Composite Structures,“ *BioResources*, 2021.
- [2] J. Kozák, Š. Gramblička, J. Lapos, Sprishnuté a kombinované oceľobetónové konštrukcie, Jaga group, 2001.
- [3] S. Pargáč et al., *Efektívny návrh stropných konštrukcií nemocnice v Českých Budejoviciach. In: STATIKA STAVIEB 2020: zborník príspevkov z 25. konferencie*, Piešťany, 2022, pp. 168-173.
- [4] A. Ataei, A. A. Chiniforush, M. Bradford, H. Valipour, „Cyclic behaviour of bolt and screw shear connectors in steel-timber,“ *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 328-340, 2019.
- [5] ArcelorMittal - LongProducts Sections and Merchant Bars, „Slim-Floor - An innovative concept for floors,“ 2017.
- [6] S. Pargáč, *Použitie DELTABEAM nosníkov v stropoch drevostavieb. In: STATIKA STAVIEB 2020: zborník príspevkov z 25. konferencie*, Piešťany, 2020, pp. 292-296.
- [7] Peikko, „PEIKKO WHITE PAPER - DELTABEAM WITH HYBRID TIMBER FLOORS - LOAD TRANSFER TESTS,“ 2022.
- [8] Peikko, „DELTABEAM Slim Floor Structure - With Timber Construction,“ 2022.
- [9] StoraEnso, StoraEnso Wood Products - Building Solutions, rethink, 2015.

Jakub Gašpárek¹, Lukáš Húlek²

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 4.ročník

PRAVDEPODOBNOŠTNÁ PREDIKCIA KONTAMINÁCIE BETÓNU SIMULÁCIOU ZOHLADŇUJÚCOU PROBLÉM POHYBLIVÝCH HRANÍC

PROBABILISTIC PREDICTION OF CONCRETE CONTAMINATION BY SIMULATION TAKING INTO ACCOUNT THE MOVING BOUNDARY PROBLEM

Abstract

This article presents basic information about the MC-CIDS methodology (Monte Carlo Chloride Diffusion Simulation) for predicting concrete contamination with chlorides considering a sharp moving carbonation front. This methodology is a result of a three-year research on bridges located in the environment of roads and highways where the combined action of carbonation and chloride ingress significantly affects the prediction of future concrete contamination. In connection with laboratory tests, it is used for predictions of the development of the chloride concentration profiles in concrete, whose quantity is a direct indicator of the risk of corrosion of the embedded steel or prestressing reinforcement. At the same time, the MC-CIDS is able to simulate the effect of the proposed repair solution on the future development of concrete contamination with chlorides.

Kľúčové slová /KeyWords

simulácia difúzie chloridov, karbonatizácia, koncentrácia, problém pohyblivých hraníc /chloride diffusion simulation, carbonation, moving boundary problem

1. Úvod

Kombinovanému pôsobeniu karbonatizácie za súčasného pôsobenia chloridov v betóne, ktoré nastáva v reálnych podmienkach na mostoch, sa venovalo viacero autorov. Na základe experimentálnych výskumov, ktoré boli realizované v dominantnej miere v laboratórnych podmienkach, bolo zistené, že karbonatizácia má výrazný vplyv na rýchlosť prieniku chloridových iónov do betónu [1]–[7]. Na základe najnovších poznatkov karbonatizácia betónu ovplyvňuje jeho pórovú štruktúru [8] takým spôsobom, že znižuje chemickú kapacitu betónu viazať chloridy do nepohyblivej kryštalickej formy Friedelových solí [1], [6], [9] a tým znižuje schopnosť betónu chrániť zabudovanú výstuž [10], zvyšuje difúznú rýchlosť chloridových iónov v skarbonatizovanej vrstve [3], [5] čo v princípe vedie na deformáciu profilu koncentrácie chloridov po hĺbke betónu a tým výrazne komplikuje predikciu vývoja koncentrácie použitím zaužívaných modelov pre difúziu, ktoré sú obsiahnuté napríklad vo *fib* Model Code for Service Life Design (MC SLD) [11]. Niektorí autori sa venovali tomuto problému a navrhli deterministické riešenie problému pohybujúcich sa hraníc, resp. pohybujúceho sa karbonatizačného frontu, ktorý moderuje difúziu chloridov [7]. Takýto prístup vyžaduje veľké množstvo dát a rozsiahle parametrické štúdie pre získanie veľkého množstva neznámych konštánt vstupujúcich do výpočtov a takýmto spôsobom sa

¹Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

²Ing., Technický a skúšobný ústav stavebný n.o., Studená 3, 821 04 Bratislava a Fakulta chemickej a potravinárskej technológie STU v Bratislave, Ústav anorganickej chémie, technológie a materiálov, Radlinského 9, 812 37 Bratislava

snažia zohľadniť jav, ktorý podlieha náhodným procesom. V súčasnej dobe sa pre predikciu karbonatizácie a koncentrácie chloridov stále používa jednodimenzionálny, jednodruhový difúzny model založený na Fick-ových zákonoch difúzie. Druhý Fick-ov zákon pre difúziu bol prevzatý do stavebnej praxe pre modelovanie a predikciu difúzie chloridov a zobrazuje tvar „prechodného profilu“ (približuje sa k ustálenému stavu) [12], [13] podľa rovnice (1):

$$f_{Cl}(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (1)$$

Niektoré úpravy pôvodného vzťahu (1) dokážu zohľadniť aj viazanie chloridov podľa Langmuir-ových a Freundlich-ových izoteriem [5], [14] ale nedokážu obísť okrajové podmienky, pre ktoré bol vzťah (1) odvodený, čo výrazne komplikuje predikciu vývoja koncentračného profilu ak dochádza vplyvom vonkajších faktorov k jeho deformáciám. V súčasnej dobe na upravenom vzťahu (1) funguje viacero modelov ako DURACON [15], DuraCrete [16], ktorý je súčasťou MC SLD [11], ClinConc vyvinutý v spolupráci Tang a Nilsson [17], Life-365TM [18] a iné. V súčasnosti asi najvyspelejší je model multi-iónového toku STADIUM (Software for Transport and Degradation In Unsaturated Materials) od dvojice autorov Marchand a Samson [19], [20]. Táto dvojica autorov tiež poukázala na neadekvátnosť zjednodušených modelov, pre predikcie vývoja koncentrácie z dôvodu limitujúcich okrajových podmienok a to najmä predpokladu konštantnej počiatkovej koncentrácie na povrchu C_s [21]. Ako upozornil Matthews [22] v reálnych podmienkach mostov vystavených rozmrazovacím soliam, koncentrácia na povrchu betónu môže s časom stúpať. V prípade konštrukcií vystavených prímorským podmienkam, podľa Bamforda [23] zjednodušený model kde sa uvažuje konštantná počiatková koncentrácia na povrchu betónu C_s , dostatočne presne aproximuje koncentračný profil.

2. Princíp MC-CID simulácie

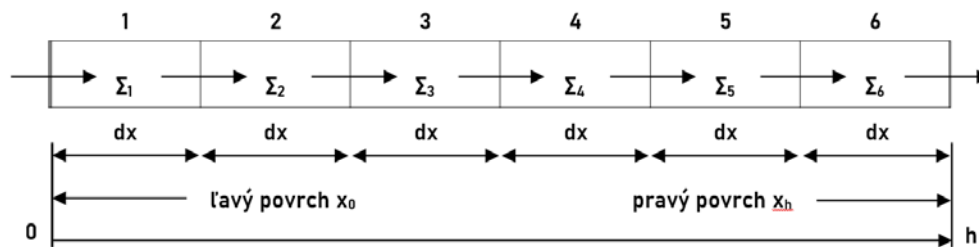
Ako podklad pre model slúžili laboratórne získané údaje, vo forme koncentračných profilov, ktoré sa získali na odobratých vzorkách z existujúcich mostov v blízkosti ciest a diaľnic. Odobraté vzorky betónov boli spravidla vo forme odvrátených valcov rôznej dĺžky, priemeru 100 mm, ktoré sa neskôr delili na menšie vzorky v rôznych hĺbkach od povrchu. Funkcia simulácie bola odvodená z reálnych chloridových koncentračných profilov pri danej hĺbke karbonatizácie a v danom veku betónu mosta. Koncentrácie chloridov boli pre účely simulácie pretransformované na častice Cl^- podľa rovnice (2) a (3):

$$\Sigma_{P,i}(x_i, t_{SL}) = \frac{C_i(x_i, t_{SL})/100}{M_{Cl}} \cdot N_a \cdot \gamma_{con,exp} \cdot dx - \Sigma_{0P,i} \left[\frac{\text{častice}}{m^2} \right] \quad (2)$$

$$\Sigma_{0P,i}(x_i) = \frac{C_0/100}{M_{Cl}} \cdot N_a \cdot \gamma_{con,exp} \cdot dx \left[\frac{\text{častice}}{m^2} \right] \quad (3)$$

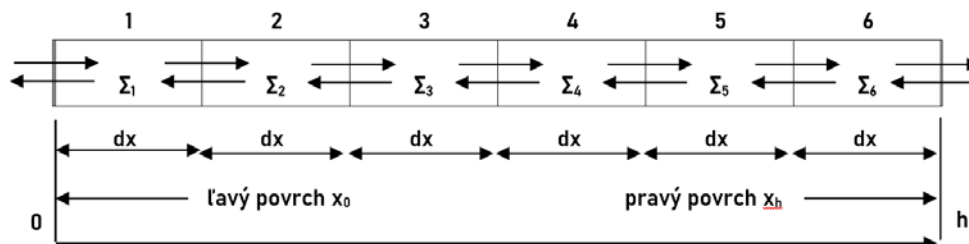
kde $C_i(x_i, t_{SL})$ je laboratórne získaná koncentrácia chloridov v percentách z hmotnosti betónu (% wt.) v hĺbke i v danom veku mosta t_{SL} , M_{Cl} je mólová hmotnosť chloridu (kg/mol), N_a je Avogadrova konštanta (mol^{-1}), $\gamma_{con,exp}$ je laboratórne zistená objemová hmotnosť betónu (kg/m^3), a dx je hrúbka konečného prvku (m). Člen $\Sigma_{P,i}(x_i, t_{SL})$ reprezentuje počet častíc, ktoré prechádzajú konečným prvkom hrúbky dx s plochou 1 m^2 . Člen $\Sigma_{0P,i}(x_i)$ reprezentuje chloridové pozadie betónu C_0 , t.j. chloridy, ktoré sú rovnomerne obsiahnuté už priamo pri výrobe betónu a teda častice, ktoré sa nezúčastňujú difúzneho procesu. Spravidla je chloridové pozadie stanovené laboratórnou

analýzou v dostatočnej hĺbke od povrchu odobratého valca. Delenie betónu na konečné prvky s hrúbkou dx zobrazuje obrázok 1, v ktorom sú uvážené koncentrácie častíc Σ_i aj so zobrazením difúzneho toku J šípkami.



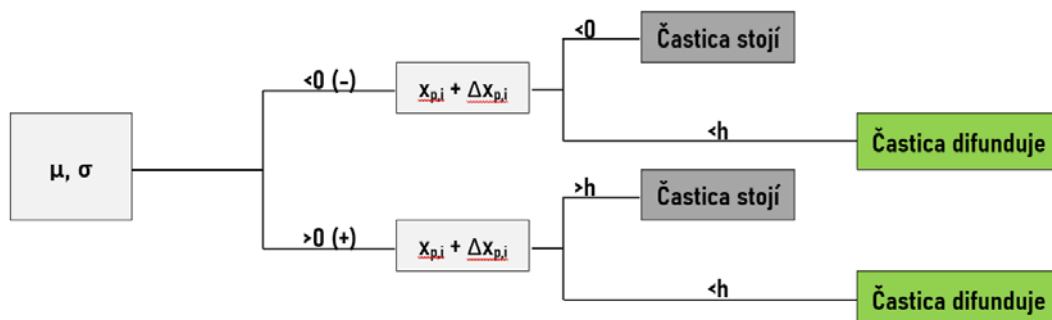
Obrázok 1: Jednosmerná schéma difúzie v konečných prvkoch s hrúbkou dx .

Takáto reprezentácia difúzie je typická pre II. Fickov zákon a v praxi takéto fungovanie simulácie povedie na akumuláciu častíc v šiestom elemente, čo je v prípade II. Fick-ovho zákona ošetrované okrajovými podmienkami. Ak podľa obrázku 2 uvážime, že každá častica v každom elemente má 50 % pravdepodobnosť skočiť do pravého alebo ľavého elementu, hnacia sila simulovanej difúzie je potom v počte jednotlivých častíc v tom danom elemente v ktorom sa nachádzajú, respektíve v ich hustote Σ_i . V takomto prípade dôjde v určitom časovom kroku výpočtu k rovnomernému rozdeleniu koncentrácie častíc $\Sigma_1 \approx \Sigma_2 \approx \Sigma_3 \approx \Sigma_4 \approx \Sigma_5 \approx \Sigma_6$ po hĺbke betónového prvku.



Obrázok 2: Obojsmerná schéma difúzie v konečných prvkoch s hrúbkou dx .

Keďže sa častice na pravom alebo ľavom povrchu nemôžu stratiť zo simulácie, je potrebné výpočet ošetriť kontrolným blokom, ktorý bude moderovať čiastkové skoky $\Delta x_{p,i}$ častíc v povrchových elementoch podľa obrázku 3. Pravdepodobnosť pohybu častíc možno zohľadniť prostredníctvom Bellovej krivky normálneho rozdelenia pravdepodobnosti, ktorá je charakterizovaná strednou hodnotou μ a smerodajnou odchýlkou σ . Ak strednú hodnotu μ uvážime nulovou hodnotou v každom časovom kroku dt bude existovať 50 % pravdepodobnosť, že častica skočí doľava alebo doprava.



Obrázok 3: Kontrolný blok simulácie pre povrchové vrstvy.

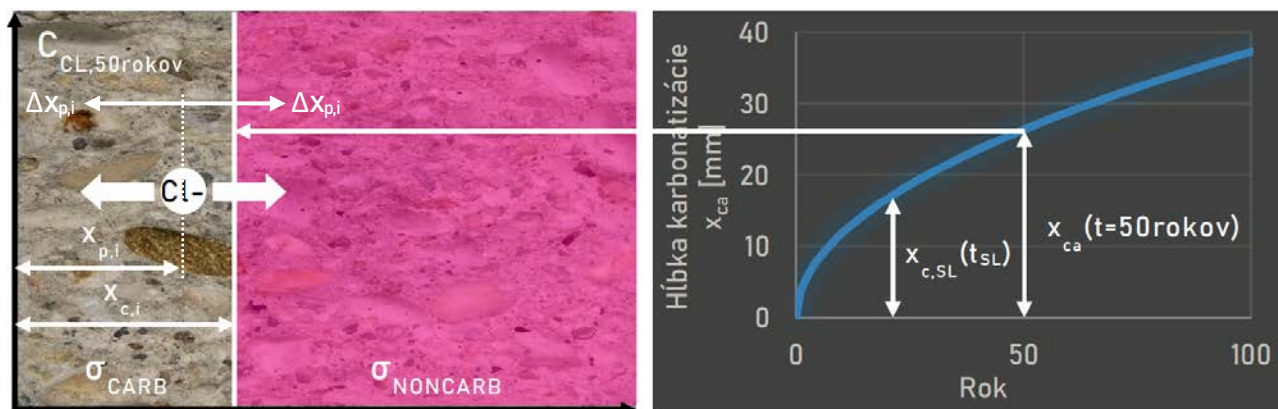
Tým je pohyb častíc definovaný znamienkom „+“ pre skok doprava a znamienkom „-“ pre skok doľava. Vzďialenosť skoku častice, respektíve difúzna rýchlosť, je definovaná smerodajnou odchýlkou σ , ktorá je ukrytá v laboratórne získanom koncentračnom profile a po hĺbke betónového prvku sa môže meniť v závislosti od chemických zmien štruktúry betónu počas degradácie.

3. Úskalia simulácie

Aby boli výsledky simulácie dostatočne presné je potrebné výpočet realizovať veľký počet krát, čo zabezpečuje zviazanie simulácie s metódou Monte Carlo. Takéto riešenie bolo zvolené z dôvodu samotnej podstaty pravdepodobnostného výpočtu kedy neplatí teoretický predpoklad, že v každom časovom kroku skočí presne 50 % častíc doprava a zároveň 50 % častíc doľava. Pri jednej simulácii nastáva jav takzvaného štatistického hluku a koncentračný profil nie je dostatočne hladký aby boli výsledky predikcie použiteľné v praxi. Metóda Monte Carlo prepočíta rovnakú simuláciu niekoľko desiatok až stoviek krát a spriemeruje výsledky počtom simulácií čo eliminuje fenomén štatistického hluku. Počet simulácií závisí od koncentrácie častíc a je na odborníkovi v oblasti životnosti konštrukcií, aby zvolil ich adekvátne množstvo. Všeobecne platí, že čím je zvolený väčší počet simulácií tým sú výsledky simulácie presnejšie.

4. Zohľadnenie súčasného pôsobenia karbonatizácie a difúzie chloridov – problém pohyblivých hraníc

Počas diagnostiky mostov sa hĺbka karbonatizácie obvykle získa meraním prostredníctvom fenolftaleínového indikátora a neskôr v laboratóriu prostredníctvom chemickej a termickej TG-DTA analýzy. Na základe nameraných údajov karbonatizácie je použitím metodiky *fib* MC SLD [11] možné predikovať hĺbku karbonatizácie v každom roku životnosti konštrukcie. Na základe predikcie ostrého frontu karbonatizácie, submakro karbonatizácie v každom časovom kroku dt prepočíta prírastok posunu frontu a jeho nová poloha vstupuje do simulácie podľa obrázku 4. Výpočet na základe súčasnej polohy častice $x_{p,i}$ a polohy frontu $x_{c,i}$ vyšetrí či sa častica nachádza v skarbonatizovanom alebo v zdravom betóne a priradí jej príslušnú pravdepodobnosť difúzie σ_{carb} alebo $\sigma_{noncarb}$. Následne častica skočí do novej pozície o hodnotu $\Delta x_{p,i}$, ktorá sa pripočíta ku súčasnej polohe a nová poloha sa zapíše do matice polôh častíc. Takýmto spôsobom sa vyšetrí poloha všetkých častíc v simulovanom koncentračnom profile v danom časovom kroku výpočtu.



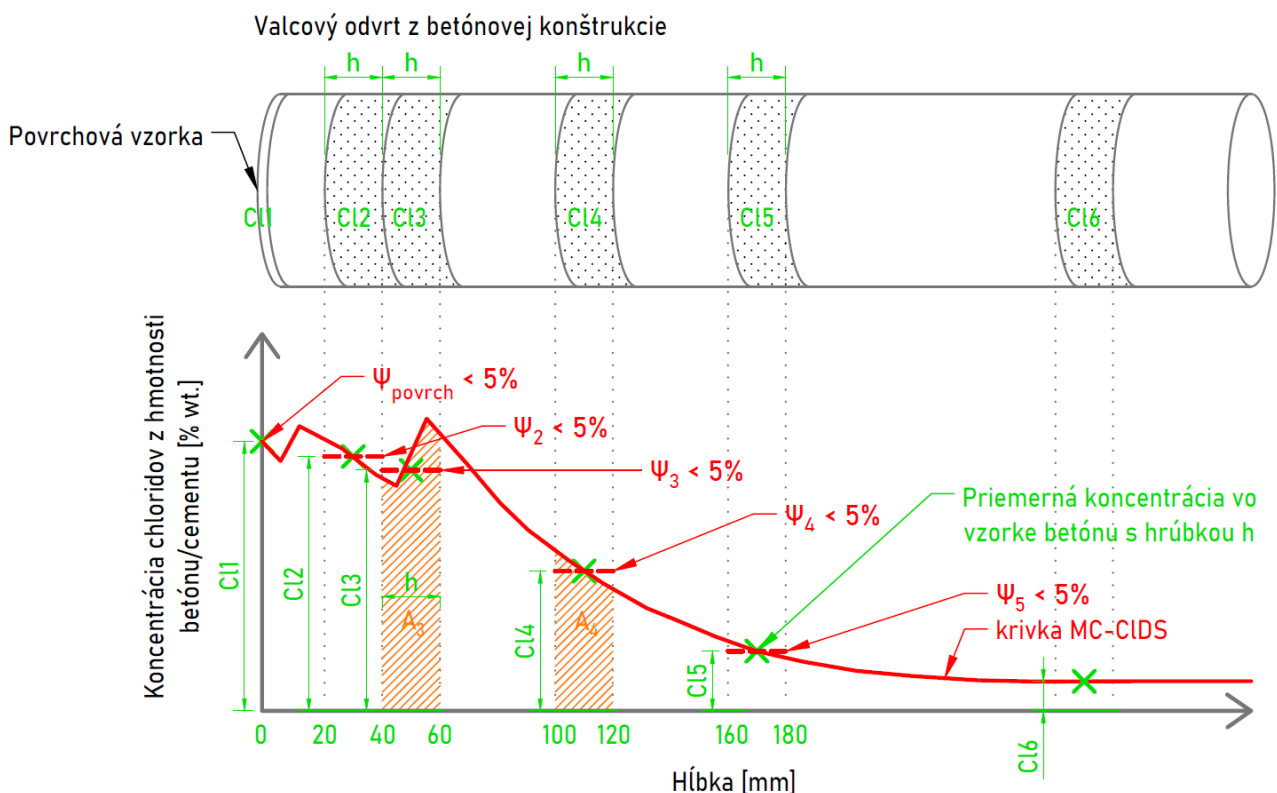
Obrázok 4: Diagram súčasného pôsobenia karbonatizácie betónu a difúzie chloridov v MC-CIDS. Vysvetlivky: $x_{c,SL}$ – front karbonatizácie získaný meraním v danom veku mosta t_{SL} , x_{ca} – postup karbonatizácie v danom roku t , $x_{c,i}$ – hĺbka karbonatizácie v definovanom časovom kroku dt , $x_{p,i}$ – súčasná poloha častice, $\Delta x_{p,i}$ – budúci skok častice z originálnej pozície

Matica polôh následne prechádza do nového časového kroku kde submakro karbonatizácie priradí novú polohu frontu a opätovne sa vyšetruje kde sa jednotlivé častice nachádzajú. Simulácia má oneskorenie o jeden časový krok dt preto podľa obrázka 4 musí byť časový krok dostatočne malý ako aj skok častice aby simulácia dokázala dostatočne presne zohľadniť súčasne pôsobiace javy.

5. Aplikácia simulácie pri predikcii kontaminácie betónu existujúcich konštrukcií

Na základe nameraných hodnôt koncentrácie po hĺbke betónu sa MC-CIDS iteračným spôsobom dopočíta k neznámym difúznym vlastnostiam betónu. Pri tom sa uvažuje priemerná ročná koncentrácia chloridov získaná laboratórnou analýzou, ktoré sú pri výpočte aplikované jednorazovo na povrch betónu vo forme častíc každý výpočtový rok. Pre ďalšiu predikciu vývoja koncentrácie je potrebné aby simulácia splnila konvergenčné kritériá v danom veku mosta, kedy bol realizovaný odber vzoriek. Tieto kritériá sú silne závislé od spôsobu akým sa vyhotovila laboratórna analýza. Zväčša sú výsledky laboratórnej analýzy získané zo vzoriek s určitou hrúbkou, ako priemerná hodnota v strede tejto vrstvy betónu, čomu je potrebné prispôbiť konvergenčné kritérium simulácie. Na základe toho dochádza k integrácii plochy pod krivkou v danom rozsahu podľa hrúbky vzorky, na ktorej bola vykonaná laboratórna analýza podľa vzťahu (4) a obrázku 5. Konvergenčné kritérium ψ v danej hĺbke je splnené ak rozdiel v nameranej koncentracii na betónovej vzorke so simulovanou priemernou koncentraciou v rozsahu hrúbky vzorky je menšie ako 5%. Konvergenčné kritérium môže byť zvolené aj iným percentom odchýlky v závislosti od želanej presnosti simulácie a má vplyv na dĺžku času výpočtu.

$$A_i(t_{SL}) = \int_{x_i}^{x_j} f_{MC-CIDS}(t_{SL}) dx \quad [\text{častice alebo koncentrácia}] \quad (4)$$

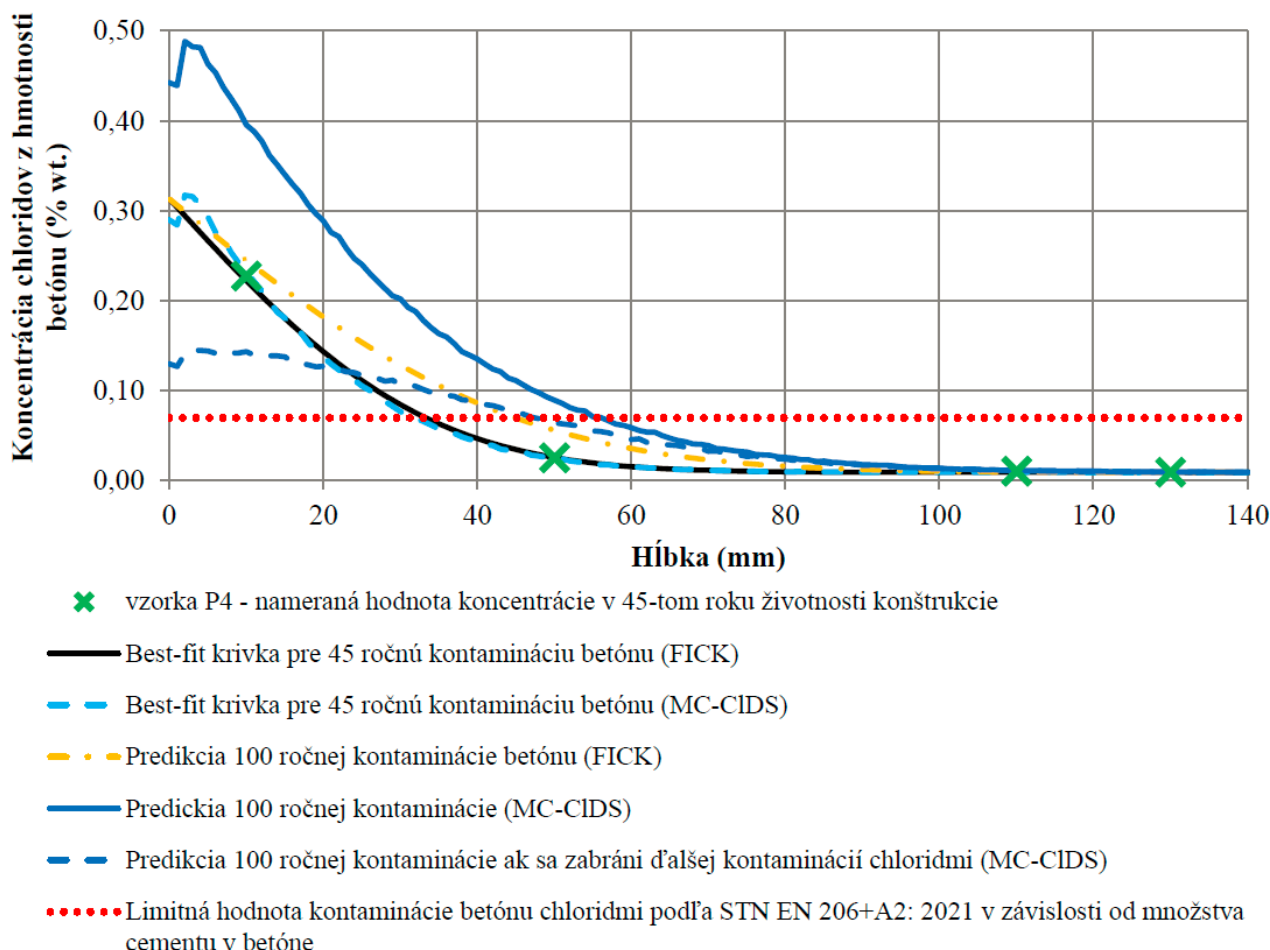


Obrázok 5: Konvergenčné kritérium MC-CID simulácie v danom veku konštrukcie.

Po splnení konvergenčného kritéria a získaní neznámych difúzných vlastností betónu je možné vykonať predikciu vývoja koncentrácie. Zároveň je možné simulovať rôzne situácie, znižovať alebo zvyšovať ročný príjem chloridov betónom, prípadne simulovať rekonštrukčné opatrenia ako odstraňovanie a nahrádzanie celých krycích vrstiev. Na základe simulácie je možné zhodnotiť najvhodnejší spôsob rekonštrukcie konštrukčného elementu, ktorého kontaminácia je za prijateľnou mierou, ktorú stanovujú normy a predpisy a tým znižovať riziko korózie zabudovanej výstuže.

6. Porovnanie MC-CID simulácie zo zjednodušeným modelom

Na základe vyššie spomenutých informácií je presnosť MC-CID simulácie výrazne závislá od presnosti laboratórnej analýzy, resp. od počtu delenia existujúcej vzorky betónu, ktorá sa má podrobiť laboratórnej analýze. Hústejšie delenie vzorky vedie na sprísnovanie konvergenčného kritéria simulácie ako vyplýva z obrázku 5. Zároveň je pre účely nastavenia konvergenčného kritéria nutné poznať hrúbku vzorky, ktorá bola podrobená analýze, preto je metóda použiteľná len v úzkej spolupráci s laboratórnymi výsledkami a pre nové konštrukcie je obťažne použiteľná. Na obrázku 6 vidieť porovnanie simulácie so zjednodušeným modelom na nezdeformovanom profile.



Obrázok 6: Porovnanie zjednodušeného modelu difúzie fungujúceho na základe II. Fick-ovho zákona a MC-CID simulácie na nezdeformovanom koncentračnom profile chloridov.

V prípade MC-CID simulácie, koncentrácia chloridov na povrchu postupne rastie nakoľko difúzne vlastnosti betónu nedovoľujú taký rýchly prienik chloridov, aby ich celý ročný príjem prenikol do hlbších vrstiev. Tento efekt je v dobrej zhode s reportom HETEK [24] Dánskeho cestného

riaditeľstva, ktorý sa venuje vplyvu chloridov na cestnú infraštruktúru. Ak je kontaminácií betónu chloridmi zabránené možno pozorovať postupný pokles koncentrácie difundujúcich častíc z povrchu a postupné vyrovnávanie koncentrácie v hlbších vrstvách betónu. Naproti tomu zjednodušený model predpokladá konštantnú koncentráciu na povrchu čomu zodpovedá neadekvátne zvýšenie koncentrácie v hlbšej vrstve betónu. Simulovať postupné klesanie koncentrácie na povrchu betónu vzťahom (1) je nerealizovateľné z dôvodu okrajovej podmienky, pre ktorú bol vzťah odvodený. Z daného dôvodu nie je možné vzťahom (1) posúdiť, či navrhnuté riešenie rekonštrukcie prinesie želaný efekt a taktiež nie je možné stanoviť presný čas ďalšieho cyklu opravy konštrukcie. Cyklus životnosti (časový úsek životnosti konštrukcie medzi dvoma rekonštrukciami, resp. zhotovením a rekonštrukciou konštrukcie) môže byť definovaný požiadavkami STN EN 206+A1:2021 [25] napríklad pre koncentrácie chloridov v blízkosti výstuže kedy ich dosiahnutie je maximálne prípustné len pre plánovaný koniec životnosti konštrukcie.

7. Záver

Pre použitie MC-CID simulácie v praxi možno formulovať nasledujúce závery:

- MC-CIDS je pravdepodobnostná metóda vyvinutá na predikciu kontaminácie betónu chloridmi, ktorá nastáva v reálnych podmienkach mostov na Slovensku ako aj vo svete;
- predikčná metóda je schopná riešiť problém pohyblivých hraníc, ktoré predstavuje pohybujúci sa front karbonatizácie s vplyvom na difúziu chloridov;
- v spojení s urýchlenými skúškami materiálov má navrhnutá metodika dobrý predpoklad simulovať konštrukčné opatrenia a opravy realizované na existujúcich mostoch v spojení s laboratórnou analýzou, s cieľom dosiahnuť najefektívnejšie riešenie a tým šetriť financie potrebné pre ich údržbu ako aj prioritizovať ich opravy;
- poznanie presného tvaru koncentračného profilu chloridov po hĺbke je jeden z faktorov, ktorý ovplyvňuje pravdepodobnosť iniciácie korózie zabudovanej ocelevej výstuže.

Referencie

- [1] M. Saillio, V. Baroghel-Bouny, and F. Barberon, “Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 82–91, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.049.
- [2] P. Castro, E. I. Moreno, and J. Genescá, “Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1565–1571, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00344-6.
- [3] K. Li, Y. Zhang, S. Wang, and J. Zeng, “Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application,” *Mater. Struct.*, vol. 51, no. 6, p. 164, Dec. 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1295-8.
- [4] B.-H. Oh, S.-K. Lee, M.-K. Lee, and S.-H. Jung, “Influence of Carbonation for Chloride Diffusion in Concrete,” *J. Korea Concr. Inst.*, vol. 17, no. 2, pp. 179–189, Apr. 2005, doi: 10.4334/JKCI.2005.17.2.179.
- [5] J. Geng, D. Easterbrook, Q.-F. Liu, and L.-Y. Li, “Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride-contaminated concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 68, no. 7, pp. 353–363, Apr. 2016, doi: 10.1680/jmacr.15.00234.
- [6] A. K. Suryavanshi and R. Narayan Swamy, “Stability of Friedel’s salt in carbonated concrete structural elements,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 5, pp. 729–741, 1996, doi: 10.1016/S0008-8846(96)85010-1.
- [7] K. Li, F. Zhao, and Y. Zhang, “Influence of carbonation on the chloride ingress into

- concrete: Theoretical analysis and application to durability design,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 123, no. June, p. 105788, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105788.
- [8] V. T. Ngala and C. L. Page, “EFFECTS OF CARBONATION ON PORE STRUCTURE AND DIFFUSIONAL PROPERTIES OF HYDRATED CEMENT PASTES,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 7, pp. 995–1007, Jul. 1997, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00102-6.
- [9] T. Luping and L. O. Nilsson, “Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, no. 2, pp. 247–253, 1993, doi: 10.1016/0008-8846(93)90089-R.
- [10] G. K. Glass and N. R. Buenfeld, “The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete,” *Corros. Sci.*, vol. 42, no. 2, pp. 329–344, 2000, doi: 10.1016/S0010-938X(99)00083-9.
- [11] International Federation for Structural Concrete Task Group 5.6, *Bulletin No. 34: Model Code for Service Life Design*. 2006.
- [12] A. Fick, “Ueber Diffusion,” *Ann. Phys.*, vol. 170, no. 1, pp. 59–86, 1855, doi: <https://doi.org/10.1002/andp.18551700105>.
- [13] D. A. Fick, “V. On liquid diffusion,” *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 10, no. 63, pp. 30–39, 1855, doi: 10.1080/14786445508641925.
- [14] V. G. Papadakis, A. P. Roumeliotis, M. N. Fardis, and C. G. Vagenas, “Mathematical modelling of chloride effect on concrete durability and protection measures,” in *Concrete Repair, Rehabilitation and Protection*, no. June, R. K. Dhir and M. R. Jones, Eds. London: E & FN Spon, 1996.
- [15] O. Trocónis de Rincón and Duracon Collaboration, “Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results,” *Build. Environ.*, vol. 41, no. 7, pp. 952–962, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.04.005.
- [16] “DuraCrete - Final technical report: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete structures,” 2000.
- [17] L. Tang and L.-O. Nilsson, “A Numerical Method for Prediction of Chloride Penetration into Concrete Structures,” in *The Modelling of Microstructure and its Potential for Studying Transport Properties and Durability*, H. Jennings, J. Kropp, and K. Scrivener, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996, pp. 539–552.
- [18] E. C. Bentz, “Probabilistic Modeling of Service Life for Structures Subjected to Chlorides,” *ACI Mater. J.*, vol. 100, no. 5, doi: 10.14359/12814.
- [19] E. Samson, J. Marchand, and J. J. Beaudoin, “Modeling the influence of chemical reactions on the mechanisms of ionic transport in porous materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 12, pp. 1895–1902, Dec. 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00458-0.
- [20] STADIUM®, “SIMCO Technologies.” www.simcotechnologies.com (accessed Jan. 20, 2022).
- [21] J. Marchand and E. Samson, “Predicting the service-life of concrete structures – Limitations of simplified models,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 8, pp. 515–521, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.007.
- [22] S. Matthews, *Design of durable concrete structures*. Glasgow: IHS BRE Press, 2014.
- [23] P. Bamforth, “The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 51, no. 2, pp. 87–96, Apr. 1999, doi: 10.1680/mac.1999.51.2.87.
- [24] L.-O. Nilsson, P. Sandberg, E. Poulsen, L. Tang, A. Andersen, and J. M. Frederiksen, “HETEK - A system for estimation of chloride ingress into concrete: Theoretical background,” *Danish Road Directorate Report No. 83*. 1997, [Online]. Available: www.vejdirektoratet.dk.
- [25] STN EN 206+A2: 2021, *Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda*.

Natália Gregušová¹

Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník 2

ANALÝZA MODELOV PRE URČENIE MAXIMÁLNEJ ODOLNOSTI V PRETLAČENÍ LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK

ANALYSIS OF MODELS FOR THE DETERMINATION OF PUNCHING SHEAR CAPACITY OF FLAT SLABS

Abstract

This paper concerns the assessment of the suitability of the newly developed maximum punching capacity model. Currently, the maximum punching capacity of flat slabs is limited by the resistance of concrete diagonal strut and by k_{\max} or η_{sys} multiple of the punching capacity without any transverse reinforcement. The coefficient k_{\max} is clearly empirical and its value depends only on the type of punching shear reinforcement. In the second generation of Eurocode 2, the k_{\max} factor is replaced by η_{sys} . The factor η_{sys} considers the performance of the shear reinforcement, so the maximum punching capacity depends on several transverse reinforcements' parameters. According to the results, it can be concluded that there is a possibility to create a more effective model for the determination of the maximum punching capacity by considering the performance of punching shear reinforcement.

Kľúčové slová / Key Words

maximálna odolnosť v pretlačení; šmyková výstuž; kontrolný obvod

1. Úvod

Lokálne podopreté dosky sú v súčasnosti stále častejšie používaným nosným konštrukčným systémom, najmä kvôli množstvu výhod ktoré ponúka. Keďže v stropnom systéme nie sú nosníky a teda zaťaženie je zo stropnej dosky prenášané priamo do stĺpa, dochádza ku koncentrácii pomerne veľkého zaťaženia na relatívne malej ploche stĺpa. V prípade prekročenia odolnosti dosky v pretlačení dôjde k porušeniu, pretlačeniu dosky. Takéto porušenie sa často označuje ako krehké, môže vzniknúť bez varovných signálov a to najmä vtedy ak k nemu príde pred plastizovaním ohybovej výstuže. Rozhodujúcim kritériom pri návrhu stropnej dosky proti pretlačeniu, jej hrúbky a vystuženia, je porovnanie odolnosti stropnej konštrukcie v pretlačení a pôsobiaceho zaťaženia. Jedným zo spôsobov ako zvýšiť odolnosť dosky v pretlačení je vystuženie dosky šmykovou výstužou. Existuje množstvo rôznych typov šmykovej výstuže, medzi najčastejšie používané patria ohyby, šmykové trne a strmene. Pridávaním šmykovej výstuže ale nie je možné zvyšovať odolnosť stropnej dosky v pretlačení neobmedzene. V určitom okamihu ďalší nárast množstva šmykovej výstuže nespôsobí aj nárast odolnosti dosky v pretlačení. Z toho je zrejmé, že pre možnosť zvýšenia odolnosti šmykovou výstužou je potrebné zaviesť určité obmedzenia. V súčasnosti je maximálna odolnosť lokálne podopretých dosiek v pretlačení často diskutovanou témou, najmä v Európe, kvôli príprave druhej generácie Eurokódu (prEC2). Na stanovenie maximálnej odolnosti lokálne podopretých dosiek v pretlačení existuje viacero návrhových postupov, tie ktoré boli predmetom porovnávania je možno vidieť v Tab. 1. V návrhu podľa súčasnej verzie Eurokódu (EC2) sa jej určenie mení aj v závislosti od

¹ Natália, Gregušová, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

krajiny (Tab. 1). Ako je možné vidieť v Tab. 1, rozdiely nie sú zanedbateľné, čím vzniká potreba zjednotiť stanovenie hornej hranice odolnosti dosky v pretlačení. V EC2 má odolnosť dosky v pretlačení dve obmedzenia. V prvom prípade ide o obmedzenie odolnosťou betónovej tlakovej diagonály (1), druhým limitom je k_{\max} násobok šmykovej odolnosti dosky bez šmykovej výstuže $V_{Rd,c}$ (2) [1].

$$V_{Rd,max} = 0.4 v f_{cd} u_0 d \quad (1)$$

kde:

- v - je redukčný súčiniteľ $v = 0.6 * (1 - f_{ck}/250)$ v MPa
- f_{ck} - je charakteristická valcová pevnosť betónu v tlaku
- f_{cd} - je návrhová pevnosť betónu v tlaku $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_C$
- γ_C - je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti; $\gamma_C = 1.0$ (pre evauláciu) and $\gamma_C = 1.5$ (pre návrh)
- u_0 - je kontrolný obvod, obvod stĺpa
- d - je efektívna výška dosky

**Poznámka: (1) V Tab.3 je pri výpočte použité nie 0.4 ale 0.5 násobok, pretože efekt nevyrovnaných ohybových momentov je väčší v u_0 ako v základnom obvode u_1 .*

$$V_{Rd,max} = k_{\max} V_{Rd,c} \quad (2)$$

kde:

- $V_{Rd,c}$ - je odolnosť dosky v pretlačení bez šmykovej výstuže
- k_{\max} - je konštanta, závislá od typu šmykovej výstuže

Koeficient k_{\max} je stanovený na základe experimentov, je čisto empirický a závisí od typu šmykovej výstuže. Ako ukazuje Tab. 1, jeho hodnota je rôzna aj pre jednotlivé krajiny. Na Slovensku sa pre strmene používa $k_{\max} = 1.4$, pre dosky s efektívnou výškou do 200 mm a $k_{\max} = 1.7$, pre dosky s efektívnou výškou nad 700 mm, medziľahlé hodnoty sa určia lineárnou interpoláciou. V prípade vystuženia šmykovými trňmi $k_{\max} = 1.9$. Ďalšie hodnoty koeficientu k_{\max} , používané v iných krajinách sú zobrazené v Tab. 1.

Často sa môžeme stretnúť s príspevkami alebo diskusiami, ktoré spochybňujú efektívnosť, dokonca aj spoľahlivosť takéhoto určovania maximálnej odolnosti dosiek v pretlačení. Je správne uvažovať, že napríklad šmykové tŕne s rôznymi parametrami majú rovnaký účinok na zvyšovanie odolnosti dosky v pretlačení? Parametre ako napríklad účinnosť kotvenia šmykovej výstuže, jej usporiadanie a mnoho ďalších, môžu ovplyvniť účinnosť šmykovej výstuže a teda aj maximálnu možnú mieru zvýšenia odolnosti dosky v pretlačení a malo by byť s nimi uvažované pri jej určovaní.

Pre návrh lokálne podopretých dosiek sa v praxi často používa softvér Peikko, ktorý vychádza z kombinácie modelu ETA-13/0151(ETA) a EOTA TR 060 [2]. Tento program umožňuje návrh iba jedného typu šmykovej výstuže a to PSB výstuže, ktorá pozostáva zo šmykových trňov privarených k spojovaciemu profilu. Hlavnou úlohou profilu je zabezpečiť správnu polohu šmykových trňov, nemá žiadnu nosnú funkciu. Návrh podľa ETA modelu je veľmi podobný EC2 návrhu, dokonca sa na neho aj často odkazuje [2]. Čo sa týka maximálnej odolnosti dosky v pretlačení, rozdiel je v stanovení odolnosti dosky bez šmykovej výstuže pri malom pomere obvodu stĺpa k efektívnej výške dosky [3]. Maximálna odolnosť dosky v pretlačení podľa ETA sa určí podľa vzťahu (3).

Napriek tomu, že tento model s obmedzením odolnosťou tlakovej diagonály (1) neuvažuje, v praxi je často používaná kombinácia (1) a (3).

$$V_{Rd,max} = 1.96 V_{Rd,c} \quad (3)$$

Ďalším porovnávaným modelom je americký model ACI 318-19 (ACI). Hlavným rozdielom medzi vyššie spomínanými modelmi a ACI modelom je vo výpočte odolnosti bez šmykovej výstuže, ktorá sa určí v kontrolnom obvode vzdialenom 0.5d od líca podpery [4]. Maximálna odolnosť v pretlačení sa potom stanoví:

$$V_{Rd,max} = 0.5\sqrt{f'_c} b_0 d \quad (4)$$

kde:

- f'_c - je valcová pevnosť betónu v tlaku
 b_0 - je kontrolný obvod vo vzdialenosti 0.5d od líca podpery
 d - je účinná výška dosky

Tab. 1: Maximálna odolnosť v pretlačení podľa jednotlivých návrhových postupov. [5], [2]

Krajina	Maximálna odolnosť dosky v pretlačení	Poznámky
EC2		
EN 1992-1-1(2004)	$\min \{0.4 v f_{cd} u_0 d ; 1.5 v_{Rd,c} u_1 d \}$	Odporúčané
STN EN 1992-1-1 Slovakia	$\min \{0.4 v f_{cd} u_0 d ; k_{max} * v_{Rd,c} u_1 d \}$ $k_{max} = 1.4 - 1.7^{2)}$ pre strmene a ohyby $k_{max} = 1.9$ pre trne	u_0 je obvod stĺpa
Onorm EN 1992-1-1 Austria	$\min \{0.4 v f_{cd} u_0 d ; k_{max} * v_{Rd,c} u_1 d \}$ $k_{max} = 1.4 - 1.6^{2)}$ pre strmene a ohyby $k_{max} = 1.9$ pre trne	u_1 je základný kontrolný obvod vo vzdialenosti 2d od líca stĺpa
DIN EN 1992-1-1 Germany	$1.4 * v_{Rd,c} u_1 d^{1)}$	1) Pre všetky typy
BS EN 1992-1-1 United Kingdom	$\min \{0.4 v f_{cd} u_0 d ; 2.0 * v_{Rd,c} u_1 d \}$	2) Hodnota závisí od efektívnej výšky dosky "d".
SIS EN 1992-1-1 Sweden	$\min \left\{ 0.5 v f_{cd} u_0 d ; 1.6 * v_{Rd,c} \frac{u_1}{u_0} u_1 d \right\}$	
ETA		
	$1.96 * v_{Rd,c} u_1 d$	u_1 je základný kontrolný obvod vo vzdialenosti 2d od líca stĺpa
ACI		
	$0.5\sqrt{f'_c} b_0 d$	b_0 je kontrolný obvod vo vzdialenosti 0,5d od líca stĺpa

2. Druhá generácia Eurokódu (prEC2) - η_{sys}

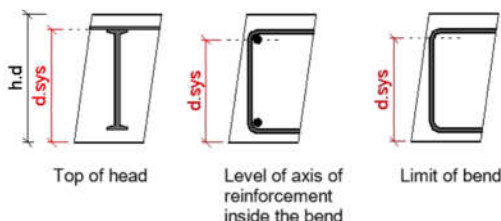
Výsledky posledných experimentov ukázali, že možnosť zvyšovania odolnosti v pretlačení pridávaním šmykovej výstuže je závislá od viacerých parametrov šmykovej výstuže a nie iba od jej typu, ako to uvažuje súčasná verzia Eurokódu (EC2). Parametre, ktoré by mohli ovplyvniť účinnosť šmykovej výstuže a teda aj maximálnu možnú mieru jej zvýšenia sú napríklad: účinnosť kotvenia šmykovej výstuže, vzdialenosť medzi prvým obvodom šmykovej výstuže a lícom podpery, rozmery a tvar podpery ale aj usporiadanie šmykovej výstuže, teda niektoré konštrukčné zásady. V prEC2 budú pri stanovovaní maximálnej odolnosti dosiek v pretlačení vyššie spomenuté parametre zohľadnené koeficientom η_{sys} . Obmedzenie odolnosťou tlakovej diagonály (1) sa v prEC2 nebude používať. Empirický koeficient k_{max} sa nahradí η_{sys} a maximálna odolnosť lokálne podopretých dosiek v pretlačení sa určí podľa vzťahu (5). V porovnaní s k_{max} , hodnota η_{sys} už viac nebude konštantná, ale určí sa podľa vzťahu (6) [6].

$$V_{Rd,max} = \eta_{sys} V_{Rd,c} \quad (5)$$

$$\eta_{sys} = 1.15 \frac{d_{sys}}{d_v} + 0.63 \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{\frac{1}{4}} - 0.85 \frac{s_0}{d_{sys}} \geq 1.0 \quad (6)$$

kde:

- d_{sys} - je účinná šmyková výška (podľa Obr. 1)
- d_v - je priemerná účinná šmyková výška dosky
- b_0 - je základný kontrolný obvod, resp. obvod stĺpa
- s_0 - je radiálna vzdialenosť prvého radu šmykovej výstuže od líca stĺpa



Obr. 1: Stanovenie parametra d_{sys}

Pri návrhu nových konštrukcií môže byť na výpočet η_{sys} použitý zjednodušený vzťah, (6a) pre šmykové trne a (6b) pre strmene [6].

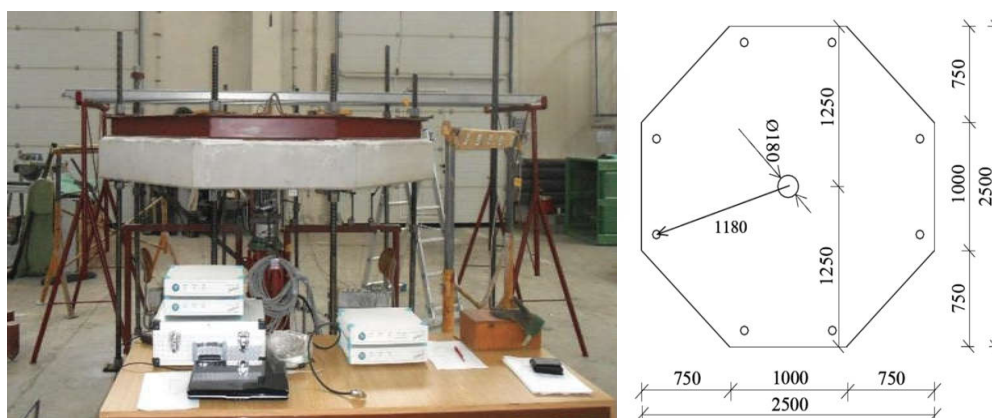
$$\eta_{sys} = 0.70 + 0.63 \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{\frac{1}{4}} \geq 1.0 \quad (6a)$$

$$\eta_{sys} = 0.50 + 0.63 \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{\frac{1}{4}} \geq 1.0 \quad (6b)$$

3. Experimentálny program

Pre porovnanie teoreticky vypočítaných hodnôt maximálnych odolností dosiek v pretlačení s reálnymi, boli použité výsledky experimentu Majtánovej (2017), ktorý pozostával zo skúšky štyroch železobetónových dosiek s hrúbkou 250 mm, podopretých kruhovým stĺpom priemeru 180 mm a vystužených pozdĺžnou výstužou $\Phi 20/100$, ocele B500B. Detailný opis experimentu sa nachádza v referencii [5]. Dve vzorky dosiek boli bez šmykovej výstuže a ďalšie dve (S1-1 a S2-1) silne

vystužené šmykovými tržmi priemeru 10 mm. Geometria vzoriek dosiek je znázornená na Obr. 2 a parametre dosiek ako trieda betónu alebo stupeň vystuženia v Tab. 2.



Obr. 2: Experimentálna zostava a geometria vzoriek [5]

Tab. 2: Parametre vzoriek; n_{st} je množstvo PSB šmykovej výstuže. [5]

	D	d_{eff}	ρ	$f_{c,cyl}$	Typ šmyk. výstuže	n_{st}	$V_{R,test}$
	[mm]	[mm]	[%]	[MPa]	[-]	[ks]	[kN]
S1-1	180	200	1.57	38.2	Třne	15	1520
S2-1	180	200	1.57	28.1	Třne	16	1250

Pri vzorkách silne vystužených šmykovou výstužou, prišlo k porušeniu dosiek rozdrvením betónu v tlakovej diagonále a preto sila, pri ktorej sa vzorky porušili je zároveň maximálnou odolnosťou dosky v pretlačení získanou z experimentu - $V_{R,test}$. Toto porušenie možno vidieť na Obr. 3, kde je fotografia prerezaných porušených vzoriek.



Obr. 3: Priečny rez porušenými vzorkami [5]

3.1 Analýza a porovnanie výsledkov

Maximálne odolnosti vzoriek S1-1 a S2-1, vypočítané podľa jednotlivých návrhových postupov sú v Tab. 3 a Tab. 4. $V_{R,max1}$ predstavuje odolnosť betónovej tlakovej diagonály a $V_{R,max,2}$ je k_{max} alebo η_{sys} násobok odolnosti dosky bez šmykovej výstuže. V prípade, že sa v stĺpci nachádza označenie (-), pre návrhový postup chýba dané obmedzenie. Výsledná maximálna odolnosť v pretlačení je potom určená ako:

$$V_{R,max} = \min(V_{R,max,1}; V_{R,max,2}) \quad (7)$$

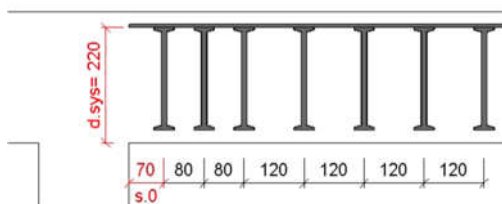
Vypočítané hodnoty boli následne porovnané s maximálnymi odolnosťami vzoriek získanými z experimentu a ich pomery V_{test}/V_{model} sú v Tab. 5. Parametre d_{sys} a s_0 , vstupujúce do výpočtov sú vyznačené v Obr. 4.

Tab. 3: Maximálne odolnosti v pretlačení vzoriek podľa súčasných návrhových modelov [kN].

	EC2			ETA			ACI		
	$V_{R,max,1}$	$V_{R,max,2}$	$V_{R,max}$	$V_{R,max,1}$	$V_{R,max,2}$	$V_{R,max}$	$V_{R,max,1}$	$V_{R,max,2}$	$V_{R,max}$
S1-1	1097	1648	1097	-	1500	1500	737	-	737
S2-1	846	1487	846	-	1354	1354	633	-	633

Tab. 4: Maximálne odolnosti v pretlačení vzoriek podľa prEC2.

	prEC2				prEC2 (6a)			
	η_{sys}	$V_{R,max,1}$	$V_{R,max,2}$	$V_{R,max}$	η_{sys}	$V_{R,max,1}$	$V_{R,max,2}$	$V_{R,max}$
	[-]	[kN]			[-]	[kN]		
S1-1	1.81	-	1378	1378	1.52	-	1157	1157
S2-1	1.81	-	1243	1243	1.52	-	1044	1044



Obr. 4: Priečný rez vzoriek; stanovenie d_{sys} a s_0

Ako najviac konzervatívny sa ukázal byť ACI model, kde vypočítaná maximálna odolnosť bola dva-krát menšia ako experimentálna. Návrh podľa EC2 sa ukázal byť bezpečný, ale so značnými rezervami. Najlepšia zhoda s experimentom bola dosiahnutá pri použití prEC2 modelu. Jediným modelom kedy bol pomer V_{test}/V_{model} menší ako 1 (model nie je bezpečný), bol ETA model, pre vzorku S2-1, vid' Tab. 5.

Tab. 5: Pomer experimentálnej k teoretickej maximálnej odolnosti v pretlačení.

	$V_{R,test} / V_{R,max,EC2}$	$V_{R,test} / V_{R,max,ETA}$	$V_{R,test} / V_{R,max,ACI}$	$V_{R,test} / V_{R,max,prEC2}$	$V_{R,test} / V_{R,max,prEC2 (6a)}$
S1-1	1.38	1.01	2.06	1.10	1.30
S2-1	1.48	0.92	1.98	1.01	1.20

4. Záver

Hlavným cieľom bolo posúdiť vhodnosť novo pripravovaného modelu (prEC2) pre stanovenie maximálnej odolnosti v pretlačení lokálne podopretých dosiek. V druhej generácii Eurokódu bude maximálna odolnosť dosky v pretlačení ovplyvnená napríklad usporiadaním šmykovej výstuže ale aj jej ďalšími spomínanými parametrami, ktoré by mohli mať vplyv na účinnosť šmykovej výstuže.

Posúdenie vhodnosti prEC2 modelu sa uskutočnilo prostredníctvom porovnania maximálnych odolností v pretlačení vypočítaných podľa v súčasnosti používaných návrhových postupov (EC2), (ETA), (ACI) a experimentálnych maximálnych odolností. Výsledky ukázali, že vo väčšine prípadov sú súčasne používané modely dostatočne spoľahlivé ale uvážením niektorých parametrov šmykovej výstuže je možné vytvoriť efektívnejší návrhový model. Pri výpočte maximálnej odolnosti v pretlačení vzorky S2-1 podľa EC2, vznikla rezerva skoro 50%, preto je otázne či môžeme hovoriť o efektívnosti modelu. Napriek tomu, že v prEC2 obmedzenie odolnosťou tlakovej diagonály chýba, preukázal tento model najlepšiu zhodu s experimentom a to aj v prípade, že bol pre výpočet η_{sys} použitý zjednodušený vzťah. Preto tento model vyšiel pre stanovenie maximálnej odolnosti v pretlačení lokálne podporených dosiek ako najvhodnejší. Výsledky tejto analýzy sú ale obmedzené len na jeden typ šmykovej výstuže (šmykové trne) a dosky s pomerom $b_0/d_v = 2.83$. Preto je toto tvrdenie potrebné potvrdiť ďalšími experimentami, ktoré by zohľadnili aj iné parametre.

Literatúra

- [1] EN1992-1-1 (2004): *Design of Concrete Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, (CEN 2004)
- [2] J. Bujniak, R&D Manager, Peikko Group, *ETA 13/0151: Design of flat slabs with PSB reinforcement elements*, (ETA 13/0151: Design of flat slabs with PSB reinforcement elements-customer magazine), pp.1-4.
- [3] Peikko Group, “*European Technical Approval ETA-13/0151*, (PEIKKO PSB punching reinforcement,2013) 25 pp.
- [4] ACI Committee 318, 2019, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 524 pp.
- [5] J. Halvonik and L. Majtánová, *Experimental investigation of the maximum punching resistance of slab-column connections* (Slovak Journal of Civil Engineering,–2018), pp.22-28.
- [6] prEN1992-1-1 (2021), *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings bridges and civil engineering works*, 374 pp, (CEN 2021)

Roman Herda¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

ŠKRUPINOVÉ KONŠTRUKCIE VOLNÝCH TVAROV

SHELL STRUCTURES OF FREE SHAPES

Abstract

The article deals with the development and design issues of timber curved structures, from the first types of arches used in the past to modern shell structures made on the principle of active bending of flexible beams. The specifics of the design are related to the need to use either physical experimental models or modern numerical and analytical methods. Individual structural systems are presented on examples of constructions realized in the world, where previously known procedures for the analysis and design of curved roof structures suitable for large spans were applied. When designing a structure of this type, the emphasis must be placed on the assembly stage, during which it is necessary to prevent the occurrence of failures due to active bending.

Kľúčové slová / Key Words

Škrupina; Aktívne ohýbanie; Montážne štádium; Experimentálne modely

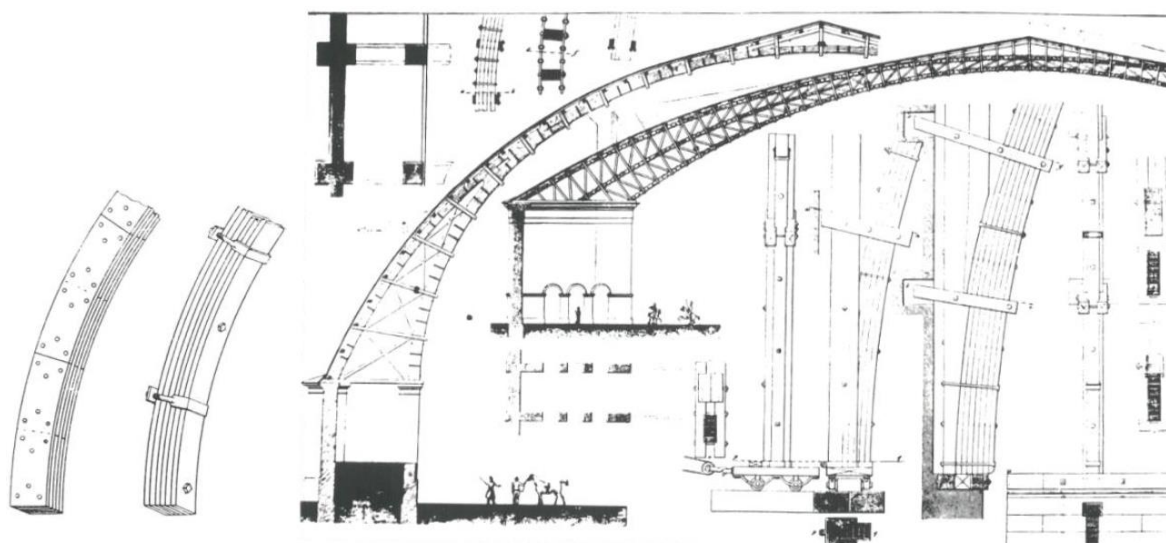
1. Úvod

Drevo je dnes, rovnako ako v minulosti veľmi rozšíreným stavebným materiálom. Vďaka svojim pozitívnym vlastnostiam umožňuje vytvárať tvarovo zaujímavé a staticky efektívne konštrukcie. Do tejto kategórie drevené škrupinové konštrukcie nepopierateľne patria. Uplatnenie v stavebnom priemysle nemajú len z hľadiska funkcie daného objektu, ktorá často vyžaduje preklenúť veľké rozpätia, ale vynikajú tiež schopnosťou sledovať modernú architektúru a esteticky sa začleniť do okolitého prostredia.

2. História a rozvoj drevených zakrivených konštrukcií

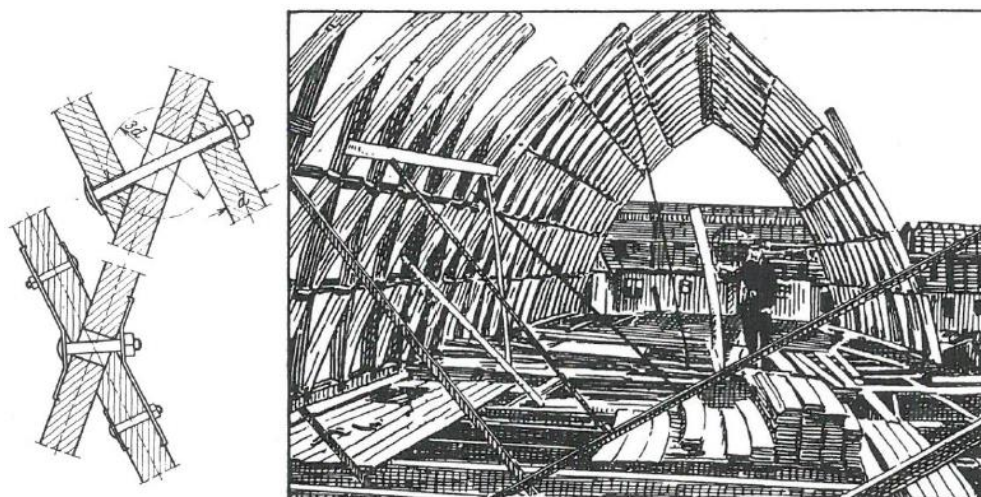
V literatúre [1] je uvedený historický prehľad drevených konštrukcií využívaných pre halové stavby. Podľa uvedených informácií je práve koniec 18. storočia charakteristický hľadaním nových typov a tvarov drevených konštrukčných sústav s aplikáciou pre halové stavby veľkých rozpätí. Jednalo sa predovšetkým o oblúkové konštrukcie. Medzi najstaršie sústavy na vytvorenie konštrukcii oblúkového tvaru patrí sústava del'Ormeho (Obrázok 1 - vľavo). Tieto oblúky boli vytvorené z dvoch až siedmich vrstiev nastojato orientovaných dosiek a fošní, ktoré sa spájali pomocou klincov, svorníkov, prípadne dubových kolíkov. Ďalšou sústavou tvoriacou oblúky bola Emyho sústava (Obrázok 1 – vľavo druhý). Skladala sa z niekoľkých vrstiev dosiek hrúbky 18 až 40 mm, ohnutých na plocho tak, aby sa pozdĺžne styky medzi doskami vystriedali. Tieto časti boli priečne spojené a stiahnuté oceľovými objímkami vo vzdialenostiach 1 až 1,5 m a navyše sa po dĺžke oblúku medzi objímkami spájali svorníkmi. V tomto období začala vznikať aj séria prototypov drevených škrupín.

¹ Roman, Herda, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 810 05 Bratislava



Obrázok 1: Typy konštrukcií pre vytvorenie oblúkov a zakrivených tvarov strešnej roviny [2]

V druhej polovici 19.storočia boli drevené konštrukcie veľkých rozpätí vytlačené oceľovými konštrukciami. Na strešné konštrukcie veľkých rozpätí sa drevo začalo opäť používať až na počiatku 20. storočia. Typom drevených strešných konštrukcií, ktorý sa začal využívať v tomto období boli lamelové klenby. Patent pre tieto konštrukcie získal nemecký architekt Friedrich Zollinger v roku 1921. Vytvoril systém „Zollbau Lamellen Dach“ (Obrázok 2).

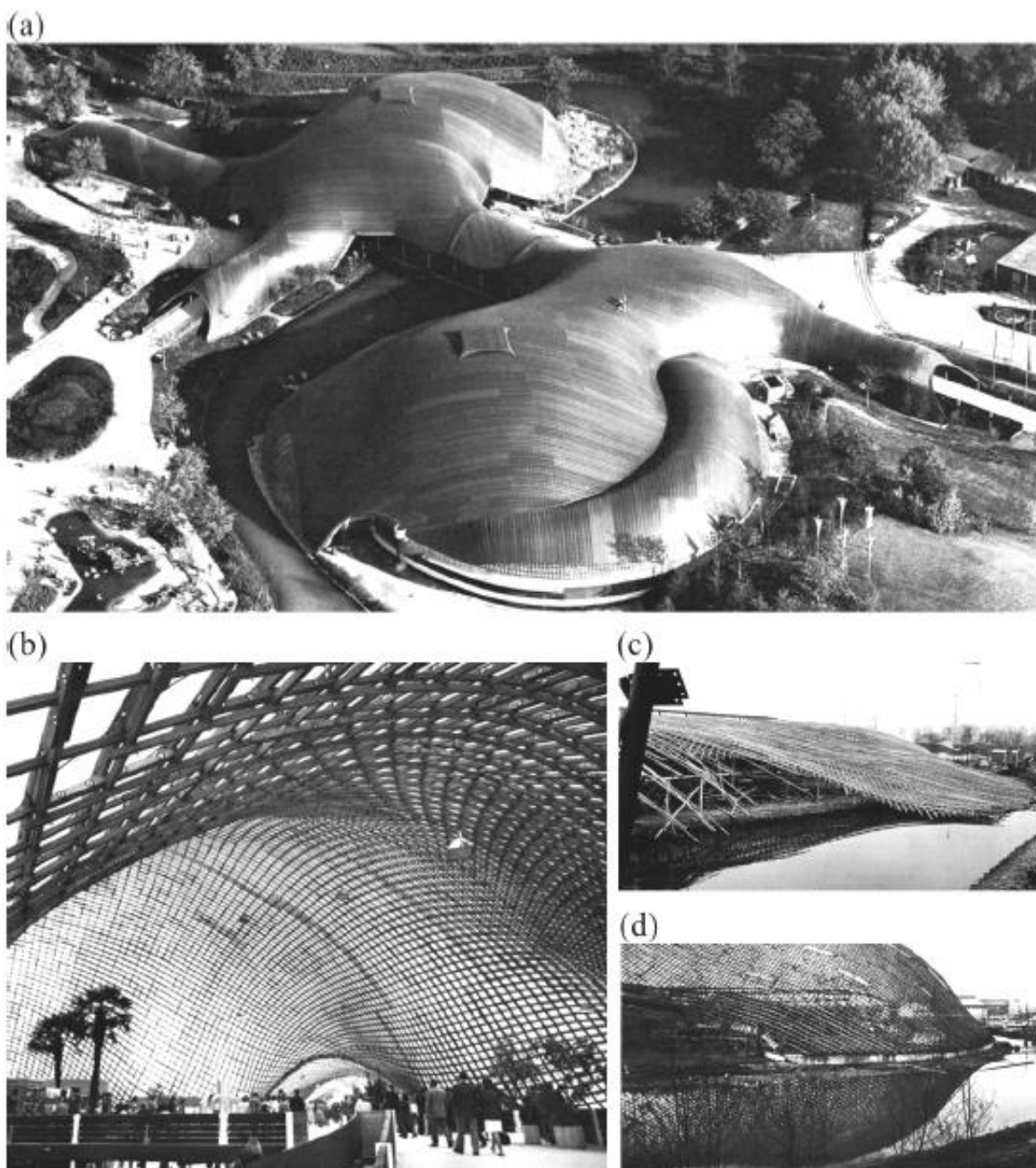


Obrázok 2: Friedrich Zollinger – Prípoje a sústava Zollbau Lamellen Dach [2]

2.1 Frei Otto - Multihalle in Mannheim

Podľa [3] nemecký architekt Frei Otto v nadväznosti na systém Zollbau spomenutý v kapitole 2 vytvoril v roku 1962 svoju prvú drevenú lamelovú kupolu. Konštrukcia sa odlišila od jeho predošlých stavieb najmä spôsobom výstavby. Sústava lamiel sa zhotovila najskôr na rovnom podklade, kde sa lamely navzájom pospájali v jednotlivých uzloch, čím sa vytvorila sústava drevenej mriežky. Následne sa zostava prútov v strede zdvihla pomocou autožeriavu do výšky 5 m. Až po ukotvení drevenej konštrukcie do podpier, sa dotiahli spoje na drevených lamelách, aby sa minimalizovali

poruchy v montážnom štádiu. Neskôr v roku 1975 v rámci vyhlásenej súťaže pre záhradnú výstavu „Federal Garden Show“ v Mannheime sa zhotovila drevená mriežková škrupina Freia Otta, kde sa uplatnil rovnaký spôsob výstavby pomocou aktívneho ohýbania zostavy pružných prútov.



Obrázok 3: Mannheim Multihalle: a) pohľad na konštrukciu, b) Pohľad zvnútra, c) plochá mriežka d) vytvorená škrupina [4]

Konštrukcia Multihalle mala pôvodne plniť funkciu dočasnej stavby len počas trvania záhradníckej výstavy. Dodnes však táto stavba nebola zbúraná a v roku 1998 bola zapísaná medzi kultúrne pamiatky. Dnes je jednou z najznámejších a najväčších drevených škrupín nepravidelného tvaru.

Východiskom pre návrh tejto konštrukcie boli fyzické drôtené modely v zmenšenej mierke. Na základe informácií, ktoré sú uvedené v [5] boli vyhotovené dva modely. Prvý zavesený model

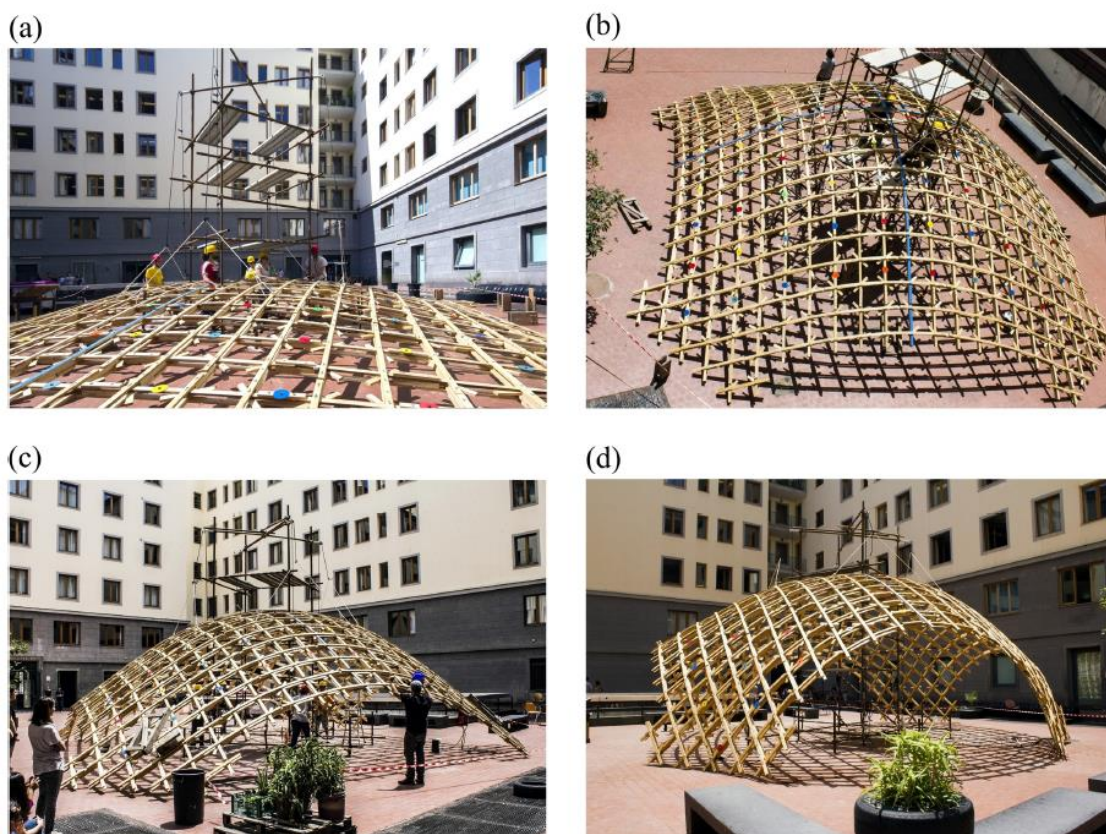
vytvorený v mierke 1:300 slúžil na stanovenie základného tvaru a geometrie konštrukcie. Druhým modelom v mierke 1:98,9 sa overovala stabilita konštrukcie a miesta podopretia.

Podľa [3] počas výstavby sa výsledný tvar zabezpečil za pomoci lešenárskych veží a vysokozdvížných vozíkov, ktoré opatrne zdvihli zostavu lamelových prútov do jej konečnej polohy. Na žiadosť kontrolného inžiniera Fritza Wenzela sa začiatkom roku 1975 vykonala zaťažovacia skúška na samotnej strešnej konštrukcii, pri ktorej bolo na strešné lamely zavesených 205 naplnených sudov s vodou. Deformácia škrupiny bola 79 mm, čo bolo o 1 mm menej, ako sa získalo výpočtom.

Konštrukcia Multihalle v Mannheime bola úspešným projektom drevenej škrupinovej konštrukcie vyhotovenej systémom aktívneho ohýbania. Pojem aktívne ohýbanie sa pri konštrukčných systémoch vzťahuje na prípady, pri ktorých sa výsledný tvar získa ako výsledok ohýbania zostavy pružných prútov. Jedná sa o systematizovanú elastickú deformáciu.

2.2 Toledo 2.0

Literatúra [4] popisuje výskumnú skupinu vedenú Sergiom Poneom z Neapolskej technickej univerzity, ktorá sa zaoberala analýzou mriežkovej škrupiny v mierke 1:1 s názvom Toledo 2.0. Najskôr bola vyhotovená sieť prútov na rovnej zemi a následne sa pomocou zdvíhania systémom kladiek zabezpečil konečný tvar.



Obrázok 4: Toledo 2.0, Neapol, Taliansko, 2014, Proces výstavby, a-c) centrálne uzly sú ťahané nahor, d) Zabezpečenie horizontálneho podopretia na dosiahnutie finálneho tvaru [4]

Na obrázku 4 je zobrazený proces zdvíhania 8 centrálnych uzlov mriežkového plášťa, ktoré boli ťahané nahor cez systém kladiek umiestnených na vrchu lešenia. Pre ťahanie boli použité káble, slúžiace pôvodom pre námornú dopravu a štyri ručné kladkostroje. Prútová sieť bola zdvíhaná až do maximálneho bodu, ktoré dané podmienky umožňovali. Po dosiahnutí končenej výšky boli pridané ďalšie stabilizujúce káble, poskytujúce dostatočnú horizontálnu tuhosť.

3. Problematika návrhu

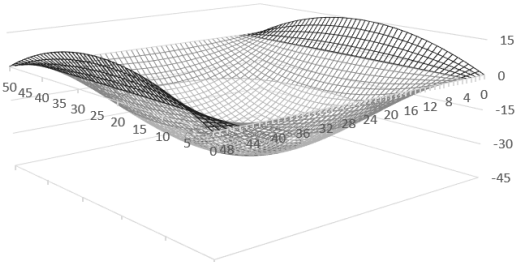
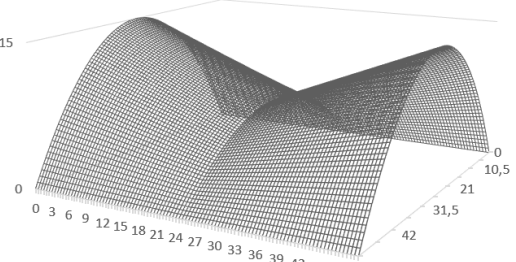
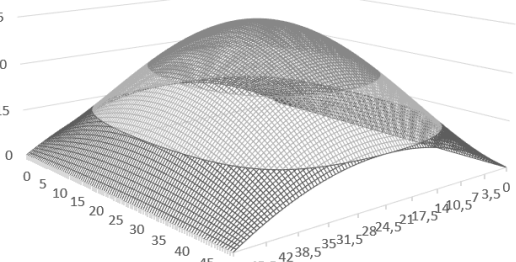
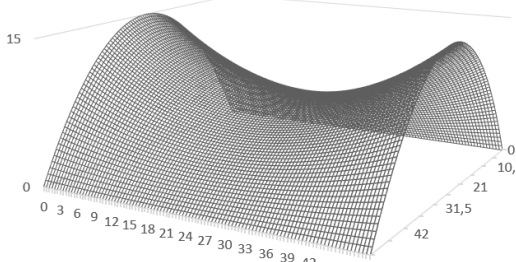
Pri návrhu drevených škrupinových konštrukcií vystupujú do popredia tri hlavné body, ktoré sú závislé od špecifikácií konkrétneho tvaru.

1. Návrh prípojov – montážne štádium, vyššia náročnosť návrhu vzhľadom na výrazne nižšiu pevnosť dreva pre smer kolmý na vlákna.
2. Analýza tvaru a konštrukcie – nepravidelne zakrivené tvary so sebou prinášajú osobitú problematiku z hľadiska postupov analyzovania
3. Form – finding – hľadanie optimalizovaného tvaru – fyzické modely, numerické modely.

4. Vývoj modelovacieho softvéru

Pre vývoj softvéru na modelovanie známych tvarov škrupinových konštrukcií, prípadné voľné tvarovanie rovinnej siete, bol zvolený softvér Microsoft Excel s preddefinovaným vykresľovaním 3D grafu na základe súradníc. Softvér umožňuje rotáciu modelu v rozsahu 360° a voľne modifikovateľné parametre konštrukcie ako sú dĺžka, výška, rozpätie, tvar a veľkosť vzopätia/previsu/zalomenia a hustota siete popisujúca tvar zakrivenia.

Table 3: Modelovací softvér - Tvary strešnej roviny .

Voľný tvar	Zalomená škrupina
	
Parabolické vzpätie konkávneho tvaru	Parabolický previs kovexného tvaru
	

Možnosti volenia hustoty siete sú po 0,5m, v rozsahu 0,5-5m. Softvér umožňuje voľbu nielen hustoty siete, ale aj samotného tvaru. Modifikovateľné bunkové tvary siete sú štvoruholník a trojuholník. Zadefinovaným vykresľovaním pre priečny rez je funkcia paraboly. Princíp tvorby modelovacieho softvéru sa opiera o metódy modelovania terénu so zohľadnením krivosti na základe matematických funkcií. Model umožňuje export do CAD programu vo forme súradníc s následným exportom dxf formátu, ktorý je možné importovať do analytického FEM softvéru. Ďalším cieľom vo vývoji bude voľné tvarovanie rovinnej siete na základe váhových parametrov.

5. Záver

Drevené oblúkové a škrupinové konštrukcie sú dnes rovnako ako v minulosti veľmi efektívnym spôsobom na zastrešenie objektov s veľkými rozpätiami. Využitie aktívneho ohýbania, ktoré priamo súvisí s montážnym štádiom, je veľmi dôležitým faktorom pri návrhu konštrukcii tohto typu. Architekti a projektanti boli v minulosti odkázaní na fyzické a experimentálne modely, ktorými simulovali skutočné podmienky a hľadanie optimálneho tvaru škrupinovej konštrukcie. Nevýhodou takého riešenia je vysoká prácnosť pri analýze viacerých tvarov a vnesenie nepresnosti pri práci s mierkovým modelom. Je potrebné venovať zvýšenú pozornosť a ďalší výskum dnešným numerickým metódam a modelom, ktoré dokážu zohľadniť napätosť a montážne štádium počas výstavby, čím je možné predísť vzniku porúch vplyvom dvíhania prútovej siete zhotovenej na rovnom podklade.

Literatúra

- [1] KUKLÍK, P.: *Dřevěné konstrukce*. Praha : 2005. 170 s. ISBN 80-86769-72-0
- [2] JIAN-MIN LI,.: *Timber Shell Structurec. Form finding and Structural Analysis of Active Bent Grid Shells and Segmental Plate Shells*, Universität Stuttgart : 2017. 200 s. ISBN 978-3-922302-42-1
- [3] FRITZ, W.: Multihalle Mannheim. Wie kann es weitergehen mit Frei Ottos Holzgitterschale?. *Bautechnik*. 2019, Jg. 96, Nr. 1, S. 21-24, mit Abbildungen vom Aufbau.
- [4] D'Amico, B.: *Timber Grid-shell Structures: form-finding, analysis and optimisation*: Phd. Thesis, Edinburg Napier University, 2015. 161s
- [5] GRANČIČOVÁ, I. *Teoretické a konštrukčné problémy prútových škrupinových konštrukcií*. Dizertačná práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Stavebná fakulta, 2015. 140s

Matej Jurgoš¹

Študijný program: TKIS, ročník: druhý

ÚVODNÉ VYHODNOTENIE PILOTNÉHO EXPERIMENTU NA ŠMYKOVÉ A OHYBOVÉ NAMÁHANIE NOSNÍKOV Z BETÓNU Z RECYKLOVANÉHO KAMENIVA

INTRODUCTORY EVALUATION OF PILOT EXPERIMENT OF SHEAR AND BENDING LOAD OF BEAMS OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

Abstract

This article deals with an experimental study of the bending and shear behaviour of reinforced beams of recycled aggregate concrete with two types of longitudinal reinforcement. Only a slightly reduced reliability factor is confirmed. For concrete with recycled concrete aggregate, it was 3% for EC2 and 5% for prEC2. For concrete with recycled brick aggregate, it was 13 % for EC2 and 14% for prEC2.

Considerably reduced modulus of elasticity did not affect the final deflection. The coefficient of variation for beams reinforced with GFRP reinforcement is 6,98% for beams with 10 mm diameter reinforcement and 9,40% for beams with 16 mm diameter reinforcement. Beams reinforced with traditional steel reinforcement got a coefficient of variation notably wider, beams reinforced with 10 mm diameter reinforcement got 25,08% and beams reinforced with 16 mm reinforcement got a coefficient of variation of 9,87%. Beams reinforced with 10 mm steel reinforcement got unbalanced values. Further investigation is needed.

Kľúčové slová

Betón z recyklovaného kameniva, Nosník, Šmyk, Ohyb

1. Úvod

Slová ako ekológia a udržateľnosť sa začínajú čoraz viac spomínať vo svete, hlavne vo vyspelých krajinách Európy. Európska zelená dohoda chce dosiahnuť aby Európa bola prvý klimaticky – neutrálny kontinent do roka 2050 [5]. Stavebníctvo je jedno z odvetví s vysokým podielom vyprodukovaných emisií skleníkových plynov [6]. Recyklácia betónu a použité kompozitnej výstuže môže byť jedna z možností ako zredukovať uhlíkovú stopu. Momentálne v Českej republike dochádza k nedostatku prírodného kameniva z dôvodu neotvárania nových kameňolomov a postupného vytŕaženia otvorených [1]. Recyklované kamenivo dokáže nahradiť prírodné v niektorých prípadoch. Náhrada kompozitnej výstuže za oceľovú môže mať výhody napríklad v odolnosti voči korózií, vyššej ťahovej pevnosti, vyššej únavovej odolnosti [7]. Odlišný výrobný proces, ktorý je menej ekologicky náročný môže taktiež dopomôcť ku splneniu stanoveného cieľa.

V Českej republike už existuje patentovaný produkt, ktorý obsahuje 100 percentnú náhradu prírodného kameniva za recyklované. Novovytvorená betónová zmes dosahuje porovnateľné mechanické a fyzikálne parametre ako tradičná betónová zmes, dokonca aj v problémových oblastiach nasiakavosti a odolnosti voči namrzaniu [2]. Vďaka použitej nanotechnológii je možné aj

¹ Matej Jurgoš, Ing. Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

s použitím recyklovaného kameniva zabezpečiť rovnaké pevnostné parametre pre triedu C25/30 s rovnakou alebo ešte menšou dávkou cementu [3]. Použitie recyklovaného kameniva dokáže ušetriť až 35 percent nákladov spojených s realizáciou [4]. V momentálnej ekonomickej situácii to je veľmi atraktívna úspora, ktorá je veľmi motivujúca pre zhotoviteľov.

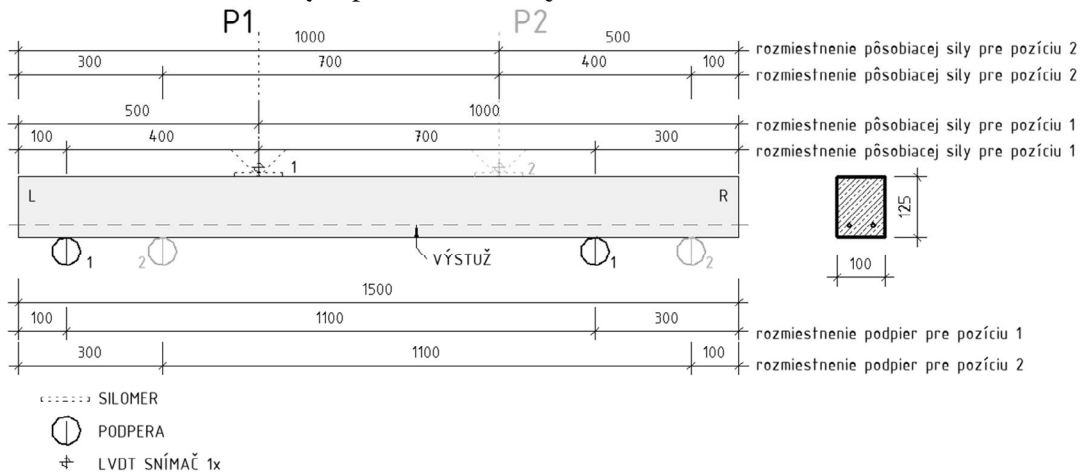
Betón z recyklovaného kameniva je pomerne ešte málo preverený materiál s množstvom neznámych parametrov. Pilotný experiment má za úlohu preveriť požadované vlastnosti a parametre, ktoré je potrebné preveriť pre správne navrhovanie konštrukcií z betónu s recyklovaným kamenivom.

2. Experiment

Experimentálna časť pozostávala zo šmykovej a ohybovej skúšky. Tvar nosníkov bol pre každú časť odlišný, stupeň vystuženia bol totožný. Súčasťou experimentálnej časti je aj vyhodnotenie vzoriek. Použili sa tri zmesi. Prvá zmes, ktorá je v článku označovaná ako REF je referenčná zmes betónu, ktorý obsahuje výlučne prírodné kamenivo. Zmes označovaná ako REC je zhotovená z recyklovaného kameniva, ktorého pôvod je prevažne betón. V zmesi označenej ako REB sa nachádza recyklované kamenivo, ktoré prevažne obsahuje tehliarsky črep. V experimente sa použili dva typy výstuže, prvá je tradičná oceľová, druhá je kompozitná sklolaminátová výstuž označovaná ako GFRP.

2.1 Šmyk

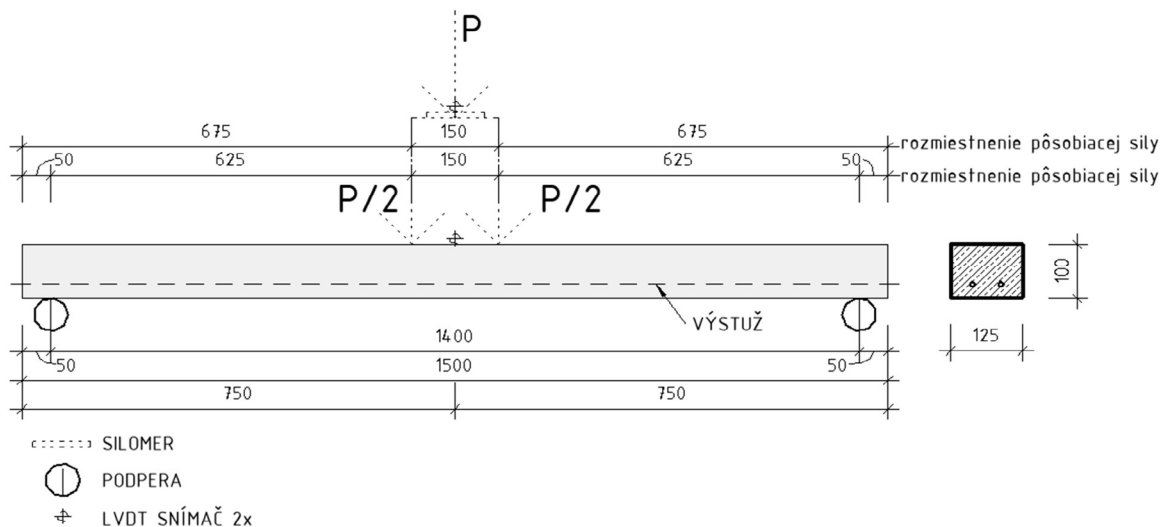
Bolo otestovaných dokopy 24 nosníkov, ktoré boli zhotovené z troch rôznych typov betónu (REF, REB, REC), dvoch typov výstuže (oceľová a GFRP) a v dvoch stupňov vystuženia. Každá kombinácia mala dva nosníky s odlišným stupňom vystuženia. Vďaka návrhu zaťažovacej zostavy sme dokázali z jedného nosníka získať dáta z dvoch nezávislých testov (Obrázok 1.). Počas priebehu testu sa merala pôsobiaca sila, aktuálny priehyb v mieste zaťažovania a zaznamenával sa rozvoj trhlín. Nosník sa zaťažoval silovým prírastkom, kde jeden krok bol 1.5 kN



Obrázok 1. Schéma zaťažovacej zostavy pre šmyk

2.2 Ohyb

Na namáhanie ohybom bolo otestovaných dokopy 36 nosníkov, ktoré boli zhotovené z troch rôznych typov betónu (REF, REB, REC), dvoch typov výstuže (oceľová a GFRP) a v dvoch stupňov vystuženia. Každá kombinácia mala 3 nosníky. Z jedného nosníka sme dokázali získať 1 sadu dát (Obrázok 2.). Počas priebehu testu sa merala pôsobiaca sila, aktuálny priehyb v mieste zaťažovania a zaznamenával sa rozvoj trhlín. Nosník sa zaťažoval silovým prírastkom, kde jeden krok bol 1 kN.



Obrázok 2. Schéma zaťažovacej zostavy pre ohyb

2.3 Vzorky

Súčasťou experimentu sú aj skúšky betónových vzoriek. Každá zmes mala 6 kociek, 6 valcov a 3 hranoly. Skúšala sa kocková pevnosť v tlaku (kocka), valcová pevnosť v tlaku (valec), modul pružnosti (hranol) a pracovný diagram príslušného betónu (hranol). Výsledky sú znázornené v Tabuľke 1. Koeficienty variácie pre jednotlivé zmesi sú vyhodnotené v Tabuľke 2. Pracovný diagram vybraných betónových zmesí je znázornený na Obrázku 3. Parametre výstuže zatiaľ neboli testované, vo výpočte sa uvažuje s hodnotami udávanými výrobcom, tieto hodnoty sú znázornené v Tabuľke 3. Ťahová pevnosť betónu bola odvodená od pevnosti v tlaku.

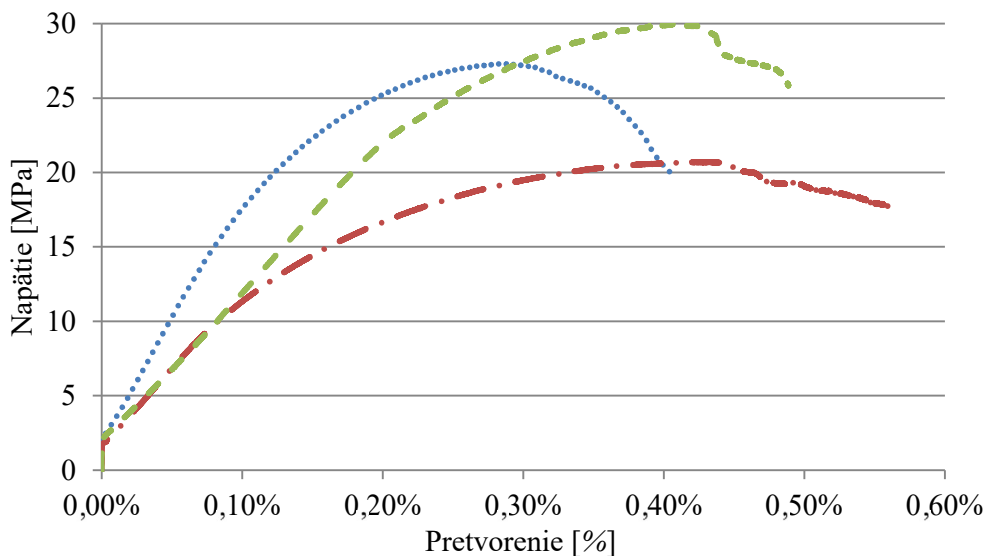
Tabuľka 1. Mechanické vlastnosti skúšaného betónu

Typ zmesi	f_{cube} (MPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)	ε_{c1} (%)	ε_{cu} (%)
REF – oceľ	36,82	27,92	2,76	25,33	2,83	4,05
REF – kompozit	40,13	30,67	2,94	26,17	2,83	4,05
REC – oceľ	26,36	19,38	2,16	15,83	4,34	5,60
REC - kompozit	26,68	25,84	2,62	19,50	4,34	5,60
REB – oceľ	39,67	30,23	2,91	15,17	4,06	4,89
REB- kompozit	36,65	29,26	2,85	14,50	4,06	4,89

f_{cube} – kocková pevnosť v tlaku; f_c – valcová pevnosť v tlaku; E_c – modul pružnosti betónu; ε_{c1} – vrcholové pomerné pretvorenie betónu; ε_{cu} – medzné pomerné pretvorenie betónu; f_t – ťahová pevnosť betónu

Tabuľka 2. Koeficienty variácie pre jednotlivé zmesi

Typ zmesi	Kocka	Valec	Typ zmesi	Kocka	Valec
REF – oceľ	5,26 %	6,74 %	REF – kompozit	1,01 %	8,32 %
REC – oceľ	3,68 %	11,23 %	REC - kompozit	7,34 %	3,78 %
REB – oceľ	1,46 %	7,43 %	REB- kompozit	4,90 %	7,31 %



modrá bodkovaná čiara – REF, červená bodko-čiarkovaná čiara – REC, zelená čiarkovaná - REB
Obrázok 3. Pracovný diagram vybraných vzoriek betónu

Tabuľka 3. Mechanické vlastnosti skúšanej výstuže

Typ výstuže	Priemer \varnothing (mm)	Modul pružnosti E (GPa)	Medza pevnosti f_y (MPa)	Ťahová pevnosť f_t (MPa)
GFRP	10	50	-	1000
GFRP	16	50	-	1000
Oceľ	10	200	550	
Oceľ	16	200	550	

3. Výsledky – šmyk

Vytýčeným cieľom z experimentu namáhania šmykom je vyhodnotenie a porovnanie výsledkov experimentu s teoretickou odolnosťou vychádzajúcou z platnej normy EC2 [8] a z druhej generácie nastupujúcej normy prEC2 [9]. Prvá rovnica (1) predstavuje výpočet šmykovej odolnosti prierezu podľa aktuálne platného Eurokódu (EC2) a druhá rovnica (2) predstavuje výpočet šmykovej odolnosti prierezu podľa druhej generácie Eurokódu (prEC2)

$$V_{EC2} = \left[C_{R,c} k_h \left(100 \rho_l \frac{E_f}{E_s} f_c \right)^{\frac{1}{3}} \right] b d \quad (1)$$

$$V_{pr.EC2} = C_k \left(100 \rho_l \frac{E_f}{E_s} f_c \cdot \frac{d_{dg}}{\sqrt{\frac{a_{cs} \cdot d}{4}}} \right)^{\frac{1}{3}} b d \quad (2)$$

$C_{R,c}$ – koeficient s hodnotou 0,18; $k_h - 1 + \sqrt{200/d}$, v experimentálnej časti sa nelimitoval tento parameter s maximálnou hodnotou 2; ρ_l – stupeň vystuženia pozdĺžnou výstužou; f_c – valcová pevnosť v tlaku v MPa; b – šírka nosníka; d - efektívna výška nosníka; C_k - koeficient s hodnotou 0.66; E_f - modul pružnosti GFRP výstuže; E_s - modul pružnosti oceleovej výstuže; d_{dg} - 32 mm, parameter popisujúci drsnosť povrchu betónu v trhline; $a_{cs} - |M_E/V_E| > d$

Nosníky vystužené GFRP výstužou prekonávajú teoretický predpoklad Eurokódu 2 v 79,2 % prípadov. Konkrétne, REF prekonáva Eurokód 2 v 100 % prípadov, REC v 100 % prípadov a REB v 37,5 % prípadov. Nosníky vystužené oceľovou výstužou prekonávajú teoretický predpoklad Eurokódu 2 v 33,3 % prípadov. Konkrétne REF prekonáva Eurokód 2 v 62,5 % prípadov, REC v 37,5 % prípadov a REB v 0 % prípadov.

Nosníky vystužené GFRP výstužou prekonávajú teoretický predpoklad druhej generácie Eurokódu 2 v 87,5 % prípadov. Konkrétne, REF prekonáva druhú generáciu Eurokódu 2 v 100 % prípadov, REC v 100 % prípadov a REB v 75 % prípadov. Nosníky vystužené oceľovou výstužou prekonávajú teoretický predpoklad druhej generácie Eurokódu 2 v 45,8 % prípadov. Konkrétne REF prekonáva druhú generáciu Eurokódu 2 v 87,5 % prípadov, REC v 37,5 % prípadov a REB v 12,5 % prípadov.

V Tabuľkách 4. a 5. je zobrazený priemerný pomer nameranej a predpokladanej šmykovej odolnosti. Výsledky zmesi REB vykazujú spoľahlivosť modelu nižšiu ako 1 a teda teoretický predpoklad je nadhodnotený oproti experimentálnemu výsledku. Rovnaký výsledok platí pre oceľovú výstuž.

Tabuľka 4. Porovnanie pomeru šmykovej odolnosti V_{test}/V_{model} pre EC2 a prEC2 (betón)

Typ betónu	EC2	prEC2
REF	1,09	1,13
REC	1,06	1,08
REB	0,96	0,99

Tabuľka 5. Porovnanie pomeru šmykovej odolnosti V_{test}/V_{model} pre EC2 a prEC2 (výstuž)

Typ výstuže	EC2	prEC2
Oceľ	0,99	0,99
GFRP	1,08	1,13

4. Výsledky - ohyb

Tento článok sa taktiež zaoberá porovnaním výsledného priehybu rôznych betónových zmesí. Odlišný modul pružnosti a pracovný diagram je najväčším rozdielom medzi jednotlivými betónovými zmesami. Tabuľka 6. zobrazuje výsledky nosníkov s prútni priemeru 10 mm a Tabuľka 7, s prútni 16 mm.

Tabuľka 6. Porovnanie priemernej sily a priehybu pri zlyhaní v ohybe pre prúty priemeru 10mm

Typ zmesi	Sila (kN)	Prieťah (mm)
REF - Oceľ	5,22	16,20
REF - GFRP	5,17	38,36
REC - Oceľ	5,46	20,84
REC - GFRP	5,13	39,14
REB - Oceľ	5,67	34,46
REB - GFRP	5,05	41,59

Tabuľka 7. Porovnanie priemernej sily a priehybu pri zlyhaní v ohybe pre prúty priemeru 16mm

Typ zmesi	Sila (kN)	Prieťah (mm)
REF - Oceľ	8,80	16,95
REF - GFRP	7,54	26,56

REC - Oceľ	7,87	17,77
REC - GFRP	6,98	25,22
REB - Oceľ	10,81	20,13
REB - GFRP	7,35	26,96

Nosníky s prútni priemeru 16 mm z kompozitnej výstuže vykazujú veľmi podobný finálny priebeh, pri nosníkoch vystužených oceľovou výstužou je disperzia väčšia. Rovnaká situácia nastala aj pri nosníkoch vystužených výstužou priemeru 10 mm.

5. Záver

Šmyková odolnosť betónových prvkov bez šmykovej výstuže má niekoľko faktorov. Dôležitou zložkou je zaklinenie zrn kameniva v šikmej trhline, tento jav má schopnosť prenášať šmykové namáhanie cez šmykovú trhlinu. Prirodzene je očakávaná nižšia úroveň tohto efektu pri betóne z recyklovaného kameniva. Avšak z výsledkov experimentu bola potvrdená iba znížená spoľahlivosť. Pre betón s recyklovaním betónom bola 3 % pre EC2 a 5 % pre prEC2. Pre betón s recyklovaným tehliarskym črepom 13 % pre EC2 a 14 % pre prEC2, konkrétnejšie výsledky sú uvedené v 3 kapitole. V porovnaní typu výstuže nosníky vystužené GFRP výstužou mali priemerne vyššiu spoľahlivosť ako oceľová výstuž. Očividne vplyv kompozitnej výstuže, ktorý je zahrnutý pomocou pomeru modulov pružnosti GFRP a ocele nie je dostatočne presný a neodzrkadľuje skutočné správanie nosníka.

Takmer polovičný modul pružnosti betónu z recyklovaného kameniva sa prejavil iba čiastočne, Nosníky vystužené GFRP výstužou mali veľmi podobné hodnoty priebehu. Nosníky vystužené oceľovou výstužou mali rozptyl maximálneho priebehu väčší. Koeficient variácie pre GFRP nosníky s 10 mm výstužou bol v našom prípade 6,98 %, a nosníky vystužené 16 mm výstužou 9,40 %. Koeficient variácie pre nosníky vystužené oceľovou výstužou priemeru 10 mm bol 25,08 % a nosníky vystužené oceľovou výstužou priemeru 16 mm bol 9,87 %.

Literatúra

- [1] Veselý, Vladimír. 2021 "Recyklované kamenivo a beton – aktuální stav v ČR." Článok prezentovaný na konferencii BETÓN, Štrbské Pleso, 7.-8.10. strana 44-50
- [2] Slánský B., Zelinka P., Čermák J. 2021. "Beton z recyklovaného kameniva" *Beton-TKS 1/2021*. Praha 2021, strana 32-37
- [3] Slánský B., Fiala J., Čermák J. "Beton z recyklovaného kameniva" publikované v zborníku z 27 Betonárskych dní. ČBS, 2020. ISBN 978-80-907611-3-1, strana 167-177
- [4] Čermák J., Fiala J., Polak F., "Comparison of utility properties of concrete with different types of recycled aggregates". Brno: University of Technology, 2020. ISBN 978-80-214-5894-9., strana 4-8
- [5] European Commission 2022. "A European Green Deal." Stiahnuté v máji 2022. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en,
- [6] Our World in Data 2022. "Emission by sector." Stiahnuté v máji 2022. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- [7] Alsayed, S.H, 2010. "Flexural behaviour of concrete beam reinforced with GFRP bars. *Cement and Concrete Composites*, 20(1) strany 460-496
- [8] EN1992-1-1 (2004). Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for building, 198 pp, CEN 2004
- [9] prEN1991-1-1 (2021). Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for building bridges and civil engineering works, 374 pp, CEN 2021

Veronika Knapcová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 4.

VPLYV POUŽITIA RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETÓNU NA ODOLNOSŤ BETÓNOVÝCH STĽPOV

INFLUENCE OF THE USE OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE ON RESISTANCE OF CONCRETE COLUMNS

Abstract

Numerous studies have been performed to investigate various characteristics of recycled aggregate concrete (RAC). In general, RAC exhibits lower performance compared to concrete manufactured with natural aggregate (NA). The focus of most of studies is aimed on mechanical and durability properties of RAC and the major portion of tests is concentrating on small scale samples. We want to contribute to understanding of the RAC with our experimental program. We plan to make full scale columns using RAC. Cross section of proposed columns will be 250 mm x 250 mm and planned height is of 3,3 m. There will be various replacement levels tested – 25, 50, 75, 100%. This will be compared with columns made using concrete entirely with NA.

Kľúčové slová / Key Words

Recyklovaný betón; stĺpy; excentricita, softvér Atena

1. Úvod

Recyklovaný betón (recycled aggregate concrete - RAC) je typ betónu, v ktorom je všetko kamenivo alebo jeho časť nahradená recyklovaným kamenivom (recycled aggregate - RA). Toto kamenivo sa najčastejšie získava zo stavebného a demolačného odpadu (construction and demolition waste - CDW). Pre výrobu RAC sa môžu používať rôzne druhy recyklovaných produktov – drvený betón, tehelný recyklát, ale aj odpad zo starých pneumatík [1], plastov [2], [3] atď. Najpoužívanejšie je recyklované kamenivo z betónu, tehál alebo mix týchto materiálov. Predmetom nášho výskumu bude recyklované kamenivo tehlové.

Množstvo výskumu sa v súčasnej dobe venuje „zelenšiemu“ betónu. Dôvodom sú environmentálne dopady. S produkciou približne 3 tony na človeka za rok patrí betón k najviac používaným materiálom na zemi. Používanéjšia je len voda. Čo sa týka stavebného priemyslu, betón sa používa dvakrát toľko ako všetky ostatné materiály dokopy [4].

Veľký tlak na zníženie uhlíkovej stopy a množstva odpadu vo všetkých aspektoch ľudskej aktivity je cítiť od medzinárodných organizácií. Z porovnania vplyvu na životné prostredie recyklovaného a normálneho betónu vychádza lepšie recyklovaný betón – o 1 – 7% [5]. Pričom hlavný prínos recyklovaného kameniva je v znížení množstva odpadu, ktorého množstvo rastie každým rokom, a ktorého veľkú časť tvorí práve stavebný priemysel (približne 30%). Recyklovaním časti tohto odpadu zmenšíme potrebu skládkovania a zredukujeme ťažbu primárnych surovín (štrk, piesok) na výrobu betónu.

¹ Veronika Knapcová, Ing. Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko

2. Vlastnosti recyklovaného betónu

Faktory, ktoré najviac ovplyvňujú vlastnosti recyklovaného betónu sú: podiel recyklovaného kameniva v RAC, kvalita recyklovaného kameniva, vodný súčiniteľ, množstvo vody pridanej na kompenzáciu zvýšenej vodnej absorpcie, množstvo zostatkového cementového kameňa na kamenive, technika recyklovania, použitie prísad a chemických prímiesí.

2.1 Spracovateľnosť

Z vlastností čerstvého betónu je použitím recyklovaného kameniva najviac ovplyvnená spracovateľnosť betónu. Čím je množstvo zostatkového cementového kameňa na recyklovanom kamenive väčšie, tým je kamenivo ľahšie. Ľahšie kamenivo znamená vyššiu porozitu a teda zvýšenú vodnú absorpciu. Čím sú zrná kameniva menšie, tým je podiel zostatkovej malty na jeho povrchu väčší. Preto je jemná frakcia kameniva 0 mm až 4 mm vo väčšine výskumov tvorená prírodným kamenivom. Množstvo zostatkovej malty sa pohybuje v rozmedzí 30 – 60% [6].

Vzhľadom na zvýšenú absorpciu vody, recyklované kamenivo absorbuje časť zámesovej vody z betónu, a tým sa zhorší spracovateľnosť betónu. Efektívny vodný súčiniteľ čerstvej betónovej zmesi sa teda rýchlo zníži (výskum ukázal, že približne 90% 24-hodinovej absorpcie vody sa udeje počas prvých 15 minút) [7].

Bolo navrhnutých niekoľko metód na zlepšenie spracovateľnosti čerstvej betónovej zmesi:

- Navlhčenie pred použitím (Pre-saturation) – recyklované kamenivo je do betónovej zmesi pridávané v saturovanom stave so suchým povrchom. Týmto spôsobom RA nemôže absorbovať vodu z betónovej zmesi [8].
- Metóda kompenzácie vody (Water compensation method) – táto metóda pozostáva z pridania extra zámesovej vody. Množstvo pridanej vody zodpovedá objemu vody absorbovanej RA. Cieľom je zachovať rovnaký efektívny vodný súčiniteľ ako pri betóne s NA [8].
- Dvojfázové mixovanie (Two-Stage mixing approach - TSMA) – 50% z celkovej vody sa v prvej fáze zmieša s kamenivom kvôli zosilneniu slabého spojenia RA s cementovým tmelom. Cement a zvyšná voda sa pridajú v druhej fáze. Tento spôsob umožní zvýšiť pevnosť betónu v tlaku o 15%. Trvanlivosť betónu (penetrácia chloridových iónov a karbonatácia) sú tiež lepšie v porovnaní s jednofázovým mixovaním. Pozitívny efekt sa vysvetľuje zlepšením prechodových zón okolo zrn recyklovaného kameniva [8]–[10].

2.2 Vlastnosti zatvrdnutého betónu

Vplyv recyklovaného kameniva na vlastnosti zatvrdnutého betónu môžeme vidieť v Tabuľke 1.

Tabuľka 1: Vplyv recyklovaného kameniva na vlastnosti zatvrdnutého betónu [6]

Vlastnosť	Rozsah zmeny	Vlastnosť	Rozsah zmeny
Hustota	o 5 - 15% menšia	Permeabilita	o 0 – 500% väčšia
Pevnosť v tlaku	o 0 – 30% menšia	Absorpcia vody	o 0 – 40% väčšia
Pevnosť v ťahu	o 0 – 10% menšia	Chloridová penetrácia	o 0 – 30% väčšia
Ohybová pevnosť	o 0 – 10% menšia	Zmrašťovanie	o 20 – 50% väčšia
Súdržnosť	o 9 – 19% menšia	Dotvarovanie	o 30 – 60% väčšia
Modul pružnosti	o 10 – 45% menšia	Teplotná rozťažnosť	o 10 – 30% väčšia
Porozita	o 10 – 30% väčšia		

2.3 Pevnosť v tlaku

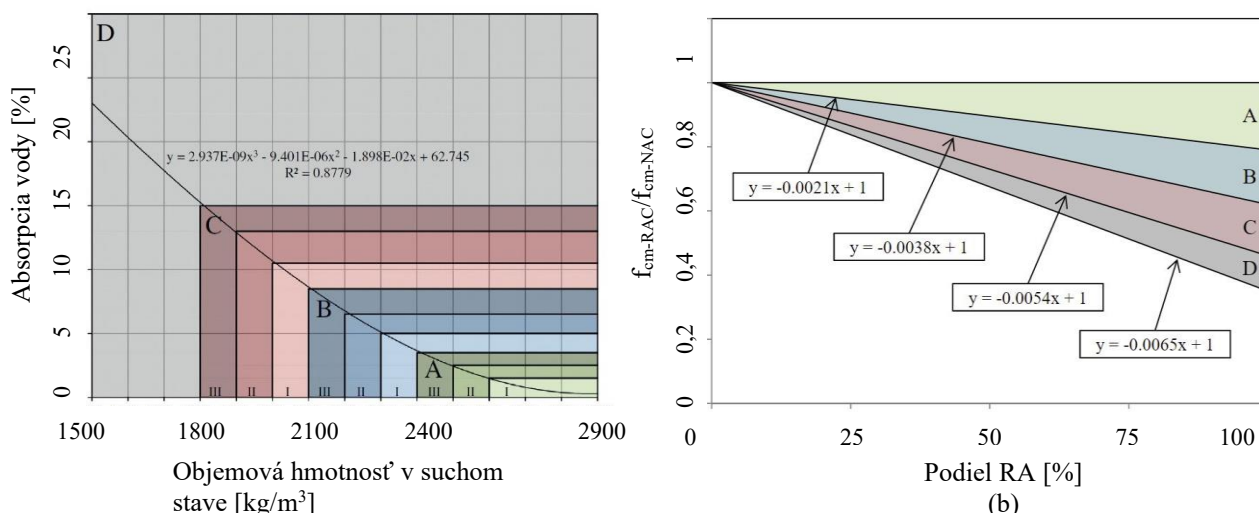
Pevnosť v tlaku zvyčajne dobre koreluje s ostatnými vlastnosťami a trvanlivosťou betónu – pozorujeme zlepšenie s rastúcou pevnosťou betónu [8].

Podľa výskumov, nahradenie prírodného kameniva do 30% recyklovaným kamenivom má minimálny efekt na pevnosť betónu. (Na porovnanie – takýto minimálny vplyv je tiež pozorovaný pri nahradení 20% jemného kameniva.) [8] So stúpajúcim podielom recyklovaného kameniva, pevnosť betónu postupne klesá. Pri použití 100% recyklovaného kameniva môžeme v priemere predpokladať pokles pevnosti v tlaku o 20 – 30% pri porovnaní s normálnym betónom [8], [11]. Niektorí autori uvádzajú nižší pokles vďaka vysokej kvalite recyklovaného kameniva získaného z vysokopevnostného betónu [12], [13], extra ošetrovaniu recyklovaného kameniva [14], nenavýšeniu množstva pridanej vody ako kompenzácie zvýšenej vodnej absorpcie RA [15], spôsobu drvenia RA [16] atď. Použitie recyklovaného tehlového kameniva má obvykle väčší vplyv na pevnosť betónu, pričom plné nahradenie prírodného kameniva tehlovým RA môže spôsobiť pokles pevnosti o 50% [8].

Pevnosť značne závisí na kvalite kameniva pochádzajúceho z CDW. Na základe typu recyklovaného kameniva môžeme rozlíšiť tieto základné typy RA [17]:

- Recyklované betónové kamenivo (recycled concrete aggregate - RCA) – obsah drveného betónu musí byť $\geq 90\%$
- Recyklované tehlové kamenivo (masonry recycled aggregate - RMA) – obsah tehlovej zložky RA musí byť $\geq 90\%$
- Zmiešané recyklované kamenivo (mix recycled aggregate - MRA) – zmiešané RCA a RMA
- Stavebné a demolačné recyklované kamenivo (construction and demolition recycled aggregate - CDRA) – RA, ktoré je kontaminované alebo ho nevieme presne kategorizovať.

Existujú rôzne spôsoby klasifikácie kameniva v závislosti od krajiny resp. výskumu [18]–[20]. Silva a kol. vytvorili klasifikáciu znázornenú na Obrázku 1(a) na základe viac ako 200 publikácií, z ktorých 100 bolo zvolených pre podrobnejšiu analýzu [17]. Graf ukazuje vzťah medzi hustotou v suchom stave a vodnou absorpciou bez ohľadu na typ kameniva, jeho veľkosť či pôvod. Kamenivo rozdelili do tried A až D, pričom A je najkvalitnejšie kamenivo.



Obrázok 1: (a) Klasifikácia kameniva založená na vzťahu medzi vodnou absorpciou a objemovou hmotnosťou v suchom stave [17]; (b) relatívna pevnosť v tlaku betónu z recyklovaného kameniva na základe klasifikácie kameniva z (a) [8].

Keďže pevnosť značne závisí od kvality a podielu RA, môžeme očakávať dobrú zhodu s týmito vlastnosťami. Výskum [8] bol zameraný na určenie vzťahu medzi kvalitou RA a pevnosťou betónu

na základe klasifikačného systému z Obrázka 1(a). Výsledok môžeme vidieť na Obrázku 1(b). Z obrázku vidíme, že použitie 100% recyklovaného kameniva triedy A by nemalo spôsobiť pokles pevnosti väčší ako 21%, pri triede B by úbytok pevnosti nemal prekročiť 38%, pri triede C 54% a 65% pri triede D.

2.4 Modul pružnosti

Modul pružnosti závisí od zloženia betónu a hlavne použitého hrubého kameniva. Preto je silne ovplyvnený nahradením prírodného kameniva recyklovaným. Kamenivo vytvára tuhú konštrukciu betónu, ktorej kvalita silne závisí od kvality kameniva. RA obsahujú zostatkovú maltu a teda dosahujú nižší modul pružnosti ako betóny z prírodného kameniva. Prítomnosť kapilárnych pórov a progresívny rozvoj trhlin ovplyvňujú deformačné vlastnosti RAC [21].

Medzi modulom pružnosti a pevnosťou v tlaku existuje vzťah, ktorý je uvedený vo viacerých normách. Veľa autorov navrhuje rôzne vzťahy pre výpočet modulu pružnosti recyklovaného kameniva. Niektoré z nich závisia iba od pevnosti v tlaku, iné aj od podielu recyklovaného kameniva, prípadne od vodného súčiniteľa alebo objemovej hmotnosti. Príklady postupov pre určenie modulu pružnosti:

$$E_c = \frac{10^5}{2,8 + \frac{40,1}{f_c}} \quad (1) \quad [22]$$

$$E_c = (1 - 0,002 \cdot r) \cdot 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (2) \quad [23]$$

$$E_c = 18\,800 \cdot \sqrt[3]{0,083 \cdot f_{cu}} \quad (3) \quad [24]$$

$$E_c = 2,25 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1,25} \cdot \sqrt[2]{f_{ck}/2000} \quad (4) \quad [25]$$

kde r je podiel recyklovaného kameniva ($0 \leq r \leq 1$), f_{cm} je stredná hodnota pevnosti betónu v tlaku [MPa], f_{cu} je kocková pevnosť betónu v tlaku [MPa], ρ je objemová hmotnosť betónu [kg/m^3].

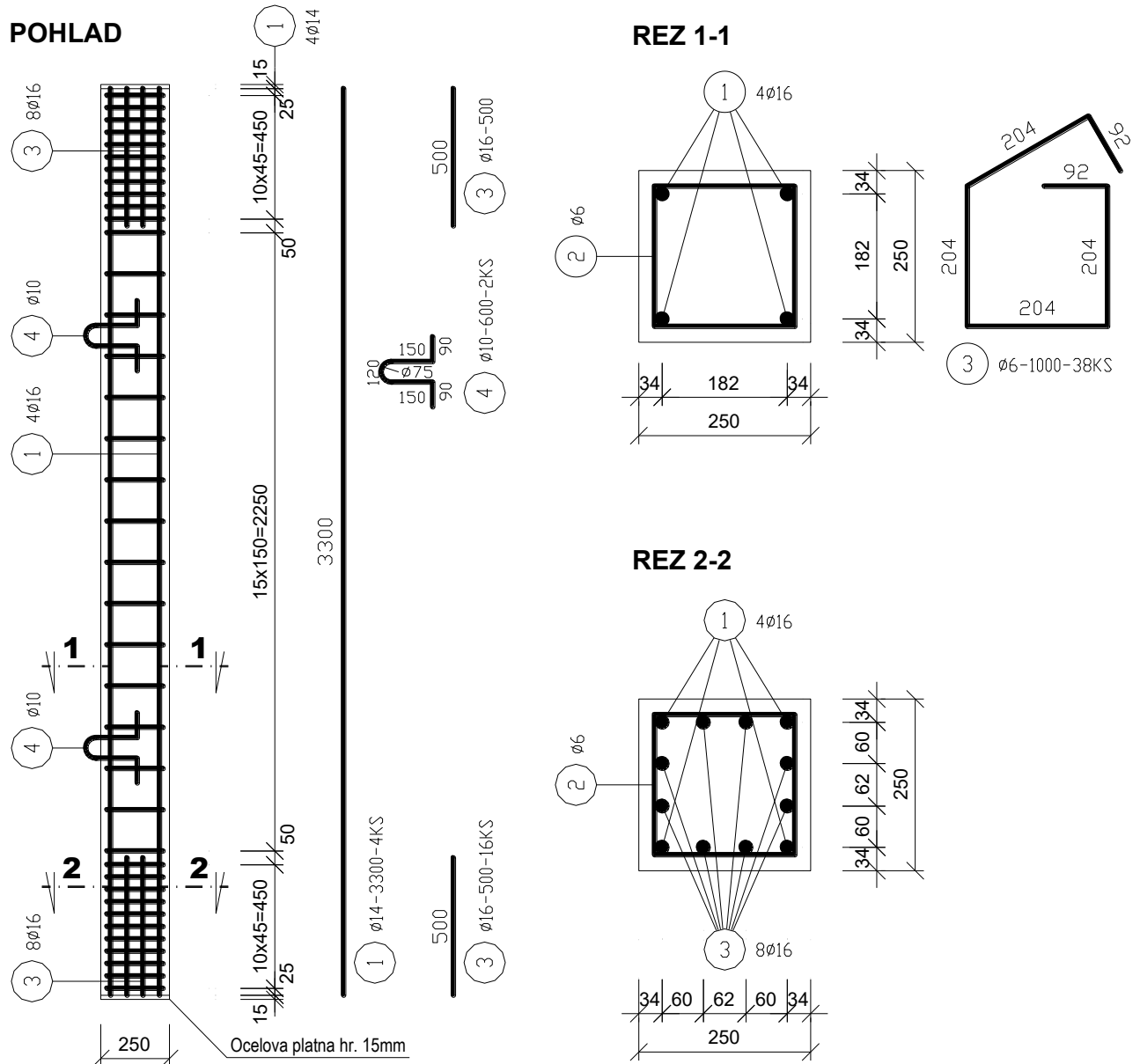
3. Experimentálny program

Experimentov s použitím recyklovaného kameniva do betónu bolo v zahraničí realizovaných veľa. Väčšina týchto experimentov však bola realizovaná na malých vzorkách, prípadne sa testovali iba materiálové charakteristiky. Výskum na prvkoch reálnej veľkosti je značne limitovaný, a preto chceme naším experimentálnym programom prispieť k pochopeniu správania RAC stĺpov reálnych rozmerov.

Priečny prierez stĺpov bude 250 mm x 250 mm. Výška 3,3 m. Tlaková sila bude pôsobiť na excentricite 40 mm. Podiel recyklovaného kameniva vo vzorkách bude 25%, 50%, 75% a 100%. Počet vzoriek bude 9, z každého variantu 2 a zo 100% 3 vzorky. Budú tiež vyrobené dve referenčné vzorky z betónu s prírodným kamenivom.

Navrhované sú stĺpy s pevnostnou triedou betónu C25/30 a vystužené výstužou triedy B 500B, pozdĺžna výstuž bude mať priemer 16 mm, strmene 6 mm. Vystuženie stĺpov môžeme vidieť na Obrázku 2.

Stĺpy budú vyrobené v Olomouci v betonárke spoločnosti Skanska, a.s., ktorá prišla na trh s vlastnou verziou recyklovaného betónu pod názvom Rebetong.



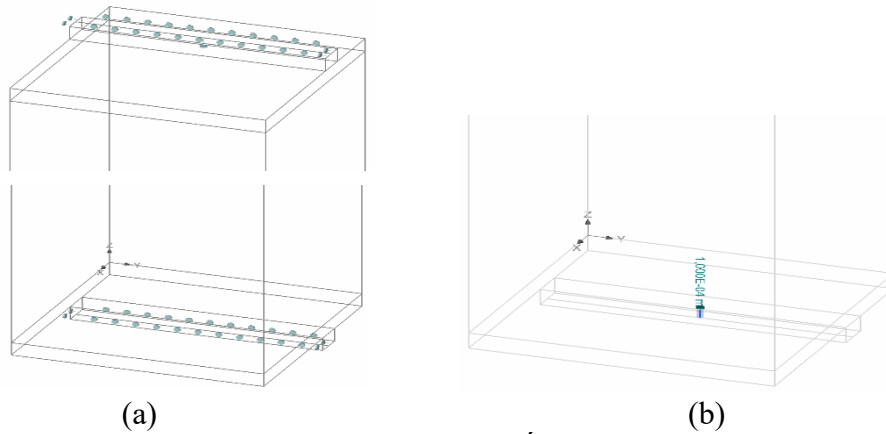
Obrázok 2: Schéma vystuženia stĺpov

3.1 Numerická analýza navrhovaných stĺpov

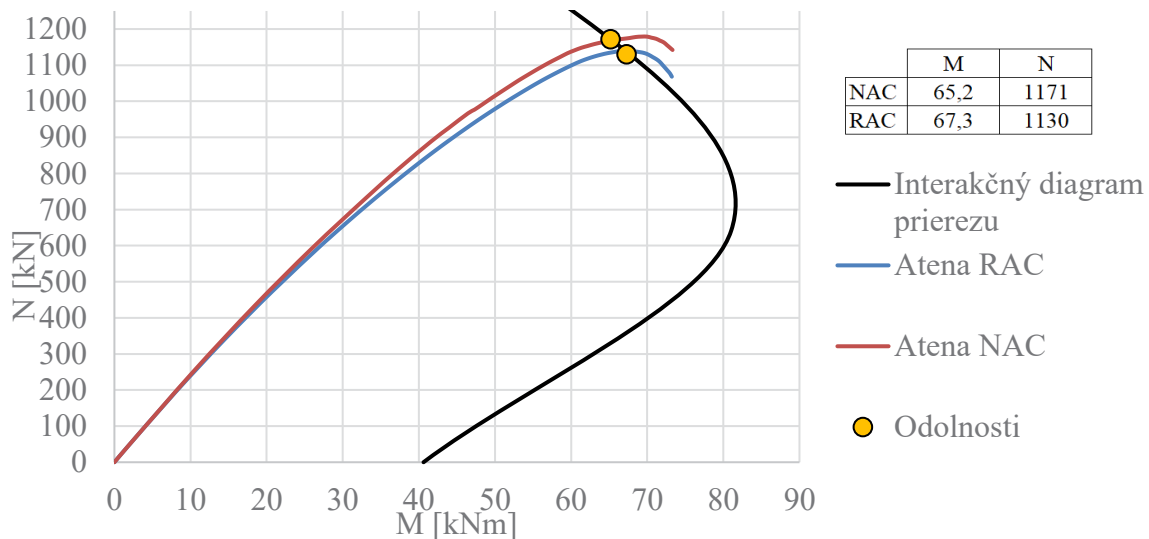
V numerickej analýze zatiaľ predpokladáme, že bola dosiahnutá požadovaná pevnosť betónu. Výskum a analýza ukázali, že môžeme dosiahnuť požadovanú pevnostnú triedu betónu použitím chemickým prísad, znížením efektívneho vodného súčiniteľa a pod. [15]

Na rozdiel od pevnosti v tlaku, na ktorej dosiahnutie môžeme použiť množstvo prístupov, hodnota modulu pružnosti je silne ovplyvnená použitím recyklovaného kameniva [26]. Pre účely predbežnej numerickej analýzy sme použili odhadnutú hodnotu 22 GPa na základe rovnice (1).

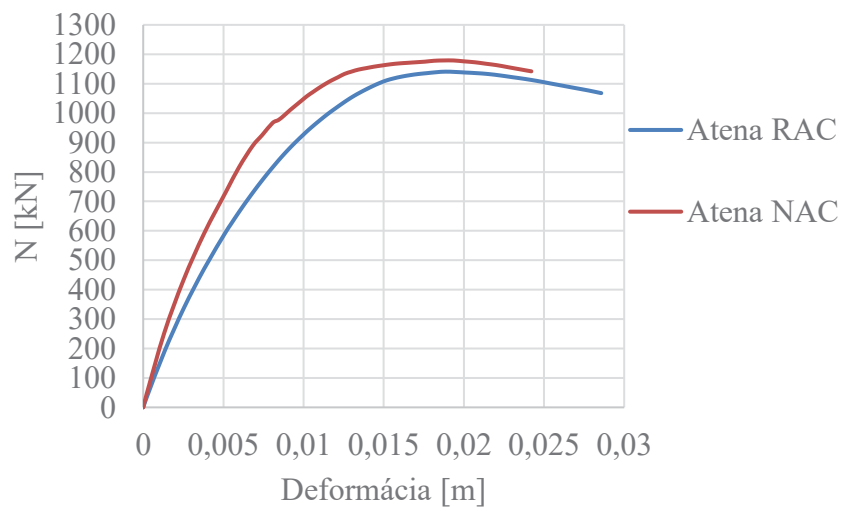
Okrajové podmienky namodelované v programe Atena 3D sú znázornené na Obrázku 3(a), zaťaženie deformáciou v päte stĺpa je na Obrázku 3(b). Na Obrázku 4 môžeme vidieť interakčný diagram stĺpov spolu s M-N krivka získaná z Ateny 3D. Na Obrázku 5 je závislosť deformácie od normálovej sily.



Obrázok 3: (a) Okrajové podmienky v päte a hlave stĺpa v programe ATENA 3D, b) Prírastok zaťaženia deformáciou s excentrickým pôsobením v päte stĺpa v programe ATENA 3D



Obrázok 4: Interakčný diagram riešeného stĺpa, M-N krivka získaná z Ateny 3D



Obrázok 5: Deformácia v strede stĺpa v závislosti od zaťaženia

4. Záver

Cieľom tohto článku bolo zhrnúť kľúčové vlastnosti recyklovaného betónu a predstaviť plánovaný výskumný program. Keďže vidíme potrebu ďalšieho výskumu, hlavne na vzorkách reálnej veľkosti, budú mať skúšané stĺpy výšku 3,3 m s prierezom 250 x 250 mm.

Model navrhovaných stĺpov bol vytvorený v programe Atena 3D. Niektoré výstupy a porovnanie so stĺpmi s prírodným kamenivom môžeme vidieť na Obrázkoch 4 a 5. Relatívne malý pokles odolnosti (4%) stĺpu z RAC v porovnaní so stĺpom z NAC je spôsobený zachovaním rovnakej pevnosti v tlaku v oboch prípadoch. Rozdiel bol len v module pružnosti, pre určenie ktorého sme zvolili vzťah (1). Pri reálnych vzorkách predpokladáme väčším rozptyl hodnôt pevností betónu v tlaku.

Pod'akovanie

Projekt bol realizovaný za finančnej podpory Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovanskej akadémii vied VEGA č. 1/0522/20.

Literatúra

- [1] V. Corinaldesi and J. Donnini, "Waste rubber aggregates," in *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, Elsevier, 2018, pp. 87–119. doi: 10.1016/B978-0-08-102480-5.00004-X.
- [2] A. Gholampour and T. Ozbakkaloglu, "Recycled plastic," in *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, Elsevier, 2018, pp. 59–85. doi: 10.1016/B978-0-08-102480-5.00003-8.
- [3] N. Saikia and J. de Brito, "Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 34. pp. 385–401, Sep. 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.
- [4] C. R. Gagg, "Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis," *Eng Fail Anal*, vol. 40, pp. 114–140, 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.
- [5] H. al Ajmani, F. Suleiman, I. Abuzayed, and A. Tamimi, "Evaluation of concrete strength made with recycled aggregate," *Buildings*, vol. 9, no. 3, 2019, doi: 10.3390/buildings9030056.
- [6] M. Safiuddin, U. J. Alengaram, M. M. Rahman, M. A. Salam, and M. Z. Jumaat, "Use of recycled concrete aggregate in concrete: A review," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 19, no. 6, pp. 796–810, Dec. 2013, doi: 10.3846/13923730.2013.799093.
- [7] M. Sadagopan, K. Malaga, and A. Nagy, "Modified pycnometer method to measure the water absorption of crushed concrete aggregates," *J Sustain Cem Based Mater*, vol. 9, no. 5, pp. 259–269, Sep. 2020, doi: 10.1080/21650373.2020.1715902.
- [8] R. v. Silva, J. de Brito, and R. K. Dhir, "The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 825–849, Aug. 2015, doi: 10.1080/19648189.2014.974831.
- [9] H. B. Le and Q. B. Bui, "Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance," *Construction and Building Materials*, vol. 257. Elsevier Ltd, Oct. 10, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119522.
- [10] W. Li, J. Xiao, Z. Sun, S. Kawashima, and S. P. Shah, "Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches," *Constr Build Mater*, vol. 35, pp. 1045–1055, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.022.

- [11] A. Akbarnezhad, K. C. G. Ong, M. H. Zhang, C. T. Tam, and T. W. J. Foo, “Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates,” *Constr Build Mater*, vol. 25, no. 8, pp. 3469–3479, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038.
- [12] W. C. Choi and H. do Yun, “Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading,” *Eng Struct*, vol. 41, pp. 285–293, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.03.037.
- [13] M. Breccolotti and A. L. Materazzi, “Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete,” *Eng Struct*, vol. 32, no. 11, pp. 3704–3712, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.08.015.
- [14] M. Thiery, P. Dangla, P. Belin, G. Habert, and N. Roussel, “Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials,” *Cem Concr Res*, vol. 46, pp. 50–65, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.01.005.
- [15] J. J. Xu, Z. P. Chen, T. Ozbakkaloglu, X. Y. Zhao, and C. Demartino, “A critical assessment of the compressive behavior of reinforced recycled aggregate concrete columns,” *Eng Struct*, vol. 161, pp. 161–175, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.02.003.
- [16] J. Kim, “Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview,” *Constr Build Mater*, vol. 328, p. 127071, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127071.
- [17] R. v. Silva, J. de Brito, and R. K. Dhir, “Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production,” *Constr Build Mater*, vol. 65, pp. 201–217, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117.
- [18] K. McNeil and T. H. K. Kang, “Recycled Concrete Aggregates: A Review,” *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 7, no. 1. Korea Concrete Institute, pp. 61–69, Mar. 01, 2013. doi: 10.1007/s40069-013-0032-5.
- [19] F. de Andrade Salgado and F. de Andrade Silva, “Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 52. Elsevier Ltd, Jul. 15, 2022. doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104452.
- [20] J. Xiao, Z. Cheng, Z. Zhou, and C. Wang, “Structural engineering applications of recycled aggregate concrete: Seismic performance, guidelines, projects and demonstrations,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01520, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01520.
- [21] B. González-Fonteboa, S. Seara-Paz, J. de Brito, I. González-Taboada, F. Martínez-Abella, and R. Vasco-Silva, “Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis,” *Materiales de Construcción*, vol. 68, no. 330. CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Apr. 01, 2018. doi: 10.3989/mc.2018.13317.
- [22] J. Z. Xiao, J. B. Li, and C. Zhang, “On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 39, no. 6, pp. 655–664, 2006, doi: 10.1617/s11527-006-9093-0.
- [23] G. F. Belén, M. A. Fernando, C. L. Diego, and S. P. Sindy, “Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 25, no. 5, pp. 2335–2342, May 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.031.
- [24] V. Corinaldesi, “Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 9, pp. 1616–1620, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031.
- [25] L. Boehme and M. Joseph, “Assessment of the E-modulus of recycling concrete with different replacement rate,” 2016.
- [26] R. v. Silva, J. de Brito, L. Evangelista, and R. K. Dhir, “Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2,” *Constr Build Mater*, vol. 105, pp. 144–156, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.080.

Denis Kopásek¹, Jakub Gašpárek²

Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: druhý

POZNATKY NADOBUDNUTÉ Z DIAGNOSTÍK MOSTOV NA SLOVENSKU

KNOWLEDGE OBTAINED FROM BRIDGE INSPECTIONS IN SLOVAKIA

Abstract

The article presents part of the information from bridge inspections, which are currently being carried out due to the deterioration and technical condition of bridges in Slovakia. From the obtained data, it is clear that, with a high probability, the maintenance and inspections of the bridges were neglected in all cases. The article contains measured data from six bridges all located in such an environment, where the contamination of concrete with chlorides and the carbonation are concerning the real state of the embedded reinforcement. These two factors mentioned above can have a decisive influence on the determination of the condition of bridges and their remaining service life as well as their residual load bearing capacity. By this means it is necessary to carry out inspections of bridges regularly, according to the valid regulations.

Kľúčové slová/ keywords

korózia; predpínacia výstuž; betonárska výstuž, chloridy, karbonatizácia
corrosion, prestressing strands, reinforcing steel, chlorides, carbonation

1. Úvod

Na Slovensku sa nachádza približne 8200 cestných mostov pod správou Slovenskej správy ciest (SSC, NDS a VÚC). Ich stavebný stav sa delí na sedem kategórií od bezchybného až po havarijný. Podľa údajov SSC [1] bolo do troch najhorších kategórií „zlý“, „veľmi zlý“ a „havarijný“ zaradených 1737 mostov (tj. 21% z celkového počtu), z tohto počtu je 22 mostov v havarijnom stave a ich počet medziročne stúpa. Okrem toho v nedávnej minulosti došlo k haváriám niekoľkých mostov, ktoré začali indikovať závažné problémy len niekoľko mesiacov pred kolapsom, prípadne ich závažné problémy, vzhľadom na ich nenápadné prejavy, unikli pozornosti úplne [12],[13].

Pri mostoch zo železobetónu a predpätého betónu zohráva najdôležitejšiu úlohu stav výstuže, ktorá v podstate definuje celkový stav konštrukcie. Typický prejav pri korózii predpínacej výstuže predstavuje najmä to, že konštrukcie nedostatočne včas signalizujú závažné problémy až do bodu tesne pred zrútením[12],[13]. Na Slovensku a v členských štátoch Európskej únie je v súčasnosti táto téma na vzostupe, pretože sa po medializovaných udalostiach pádu mostov (napr. v Taliansku, v Pražskej Tróji), zvýšila požiadavka a pozornosť na ich dôkladnú a pravidelnú kontrolu, aby sa obdobné situácie už neopakovali. Táto téma je aktuálna aj z toho dôvodu, že väčšina mostov na území SR má viac ako 50 rokov a existuje reálny predpoklad, že tieto mosty sa môžu nachádzať na konci svojej životnosti.

V bežnom prípade sa mosty navrhujú na návrhovú životnosť 100 rokov. Mosty, ktoré sa javia ako problémové majú približne (50-70 rokov) a zdá sa nereálne očakávať, že bez včasného zásahu dokážu dosiahnuť svoju návrhovú životnosť.

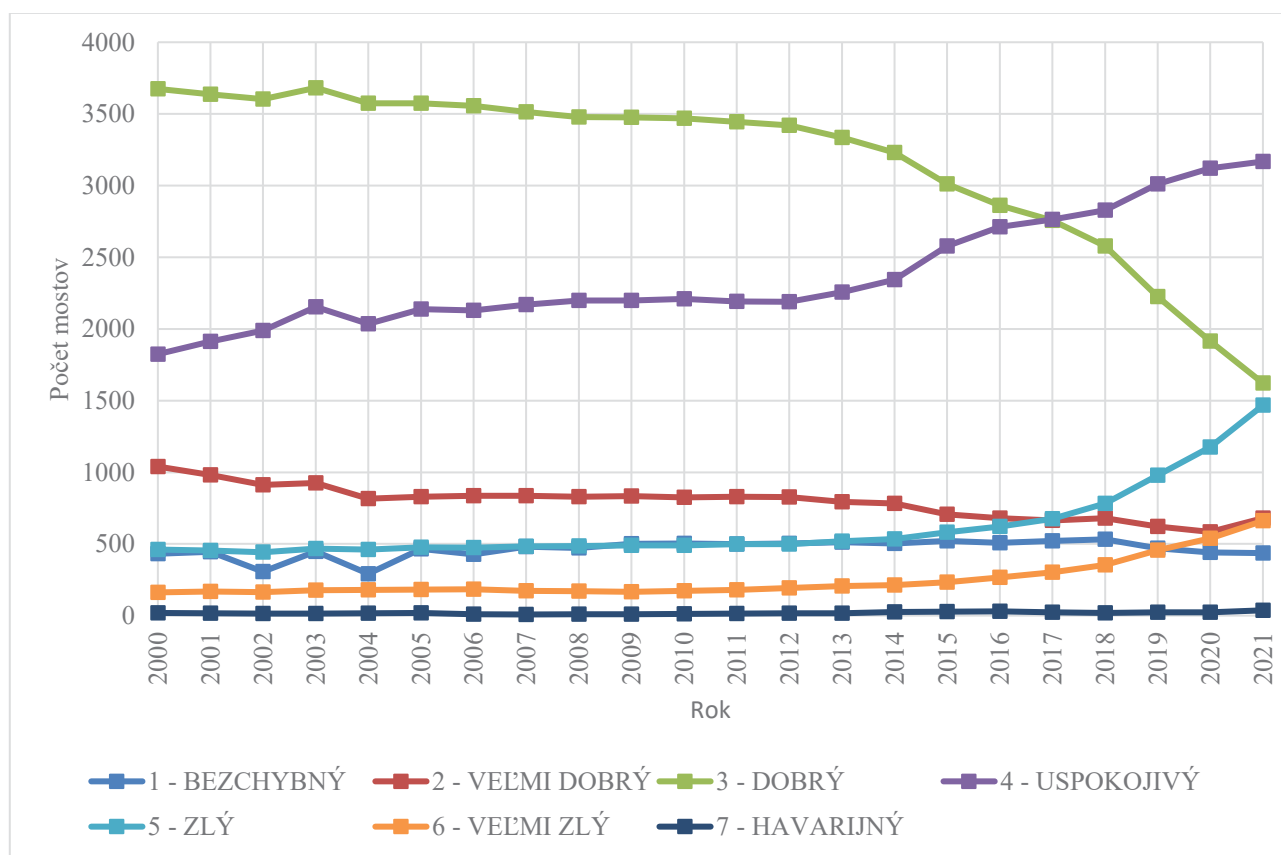
¹ Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov Radlinského 11, Bratislava 810 05

² Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov Radlinského 11, Bratislava 810 05

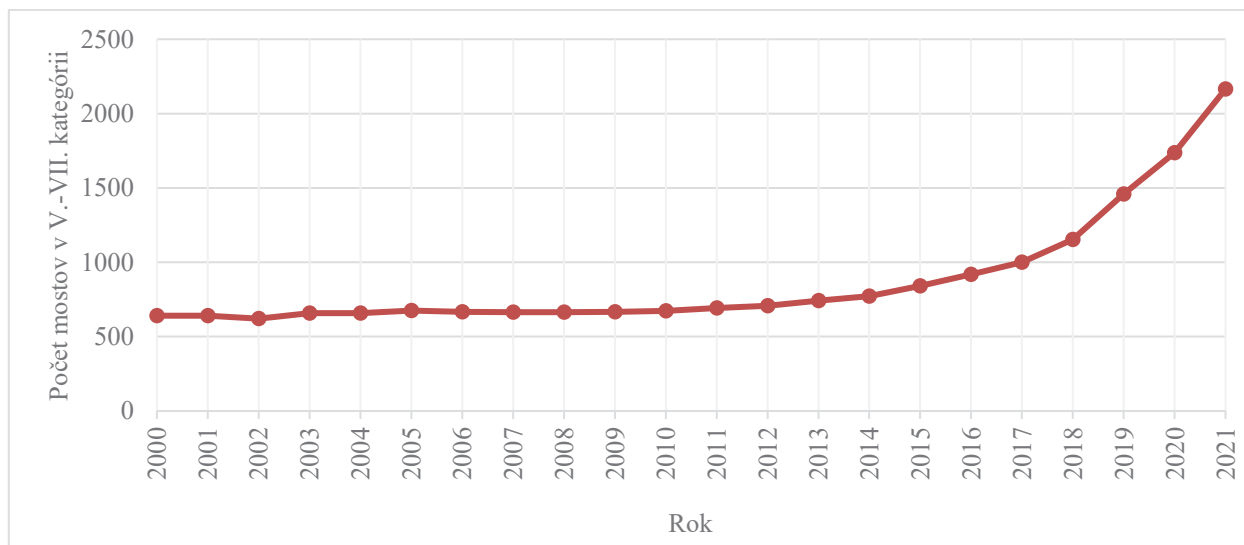
Uzavretie mosta prináša veľké problémy z dôvodu dopravných obmedzení, a preto je potrebné v čo najkratšom čase navrhnuť vhodný a spoľahlivý spôsob overenia zostatkovej únosnosti. Takýmto spôsobom je možné most prevádzkovať až do zhotovenia projektu (alternatívne rekonštrukcie) a do doby zhotovenia novej konštrukcie alebo jej rekonštrukcie.

2. Stav mostov na Slovensku

V posledných rokoch vidieť na Obrázok 1 a Obrázok 2 negatívny trend degradácie mostov na Slovensku. Jedným z dôvodov je aj zanedbaná údržba mostov. Ako ďalší z dôvodov sú nedostatočné dostupné vedomosti týkajúce sa trvanlivosti betónových konštrukcií, ktoré boli v čase ich výstavby. Zároveň je dôležité spomenúť, že železobetónové a predpäté konštrukcie niekoľkonásobne prevyšujú počet mostov z iných konštrukčných materiálov ako ukazuje tabuľka 1. Obrázok 1: Grafické znázornenie mostov v SR z hľadiska ich stavebno-technického stavu.



Obrázok 1: Grafické znázornenie mostov v SR z hľadiska ich stavebno-technického stavu.



Obrázok 2: Grafické znázornenie vývoja počtu mostov zaradených do 5.-7. stavebno-technického stavu medzi rokmi 2000-2021.

Tabuľka 1: Rozdelenie havarijných mostov podľa hlavného nosného materiálu.

Typ mostu podľa hlavnej NK	Počet mostov	Počet mostov v havarijnom stave	Pomer počtu havarijných mostov daného typu	Pomer jednotlivých typov havarijných mostov
	[ks]	[ks]	[%]	[%]
Oceľ	309	5	1,6	13,0
Tehla	25	0	0,0	0,0
Spriahnutý žb	140	0	0,0	0,0
Železobetón	5475	16	0,3	42,0
Prostý betón	235	0	0,0	0
Predpätý betón	2474	16	0,6	42,0
Kameň	197	1	0,5	3,0
Iná konštrukcia	49	0	0,0	0,0
	8904	38		

3. Korózia výstuže

Hoci sa železobetónové a predpäté konštrukcie všeobecne označujú ako trvanlivé, bez adekvátnej údržby a čiastkových opráv ani po splnení všetkých požiadaviek noriem a predpisov nemusia byť dostatočne odolné voči degradácii [2]–[4]. Rozsiahle použitie týchto materiálov v konštrukciách v priebehu rokov, najmä z dôvodu únosnosti, dostupnosti a ceny, sa nevyhlo niektorým problémom, ktoré súvisia s ich trvanlivosťou. Trvanlivosť je potom obmedzená nedostatkom poznatkov o pôsobení niektorých látok na betón ako sú napríklad chloridy z posypových solí alebo pôsobenie CO₂, a častým konštrukčným chybám, ktoré nastávali pri výstavbe konštrukcií v nedávnej minulosti a ktorých vplyv sa často zanedbával z mylnej predstavy o schopnosti odolávať prostrediu. Z daného

dôvodu sa v súčasnej dobe, najmä u existujúcich konštrukcií, stretávame so skrátením životnosti z dôvodu korózie oceleovej alebo predpínacej výstuže, ktorá preukázateľne spôsobuje praskanie a odlupovanie betónu [5] a v pokročilom štádiu korózie aj k redukcii únosnosti prvku. Korózia výstuže je teda limitujúcim faktor zo samotnej podstaty prenosu ťahových namáhání v betóne, a teda najviac limituje životnosť vystužených betónových konštrukcií.

3.1 Ochrana výstuže

Ochrana výstuže je zabezpečená ak je alkalita v prostredí ocele viac ako $\text{pH}=11$ a zároveň musí byť splnená podmienka dostatočne nízkeho elektrického potenciálu [5]. V takom prípade je povrch ocele pasivovaný veľmi tenkou a nepriepustnou vrstvou oxidov železa, ktorá poskytuje ochranu výstuže pred vplyvmi prostredia. Ak dôjde k porušeniu tejto vrstvy, pravdepodobnosť korózie výstuže sa výrazne zvyšuje.

Dlhoročným výskumom boli odhalené rôzne chemické látky a kombinácie korozívneho prostredia a v prípade ocele zabudovanej do betónu môžeme tento okruh zmenšiť na dva faktory najčastejšie spôsobujúce koróziu zabudovanej výstuže:

- 1) redukcia pH vplyvom pôsobenia atmosférického CO_2 na betón (nazývaná aj karbonatizácia)
- 2) difúzia chloridov z externého zdroja do betónu alebo kontaminácia betónu chloridmi priamo pri výrobe konštrukčného prvku

3.2 Karbonatizácia

Karbonatizácia je výsledkom chemického neutralizačného procesu v dôsledku rozdielneho pH betónu a okolitého prostredia obsahujúceho oxid uhličitý prítomný v atmosfére. Oxid uhličitý sa rozpúšťa v pórovej vode betónu do slabej kyseliny uhličitej. Táto kyselina chemicky reaguje so zásaditými hydrátmi cementového tmelu pričom produktom reakcie sú formy uhličitanu vápenatého, ktorý lemujú póry a znižuje pH betónu pod 9 [6]. Z daného dôvodu sa zvyšuje pravdepodobnosť korózie výstuže ak hĺbka karbonatizácie dosiahne povrch výstuže.

3.3 Koncentrácia chloridov

Chloridy pôvodom z posypových solí, sú všeobecne označované za korozívny katalyzátor, ktorý rozpúšťa pasivačnú vrstvu výstuže [7] a ich dovolené množstvo v betóne je limitované normami. Tabuľka 2 uvádza dovolený obsah chloridov v betóne podľa STN EN 206+A2:2021 [4]. Okrem korózie výstuže, preniknuté chloridy prispievajú aj k rozpadu betónu vplyvom chemických zmien pri zmrazovacích cykloch. Pri kritických koncentráciách chloridov nie je možné proces korózie zastaviť, pretože v procese vzniku korozívnych splođín nie sú chemickými reakciami spotrebované a cyklicky môžu opätovne napádať povrch výstuže [8].

Tabuľka 3 uvádza pravdepodobnosť korózie pre betonársku výstuž podľa [11].

Tabuľka 2: Dovoľený obsah chloridov v betóne podľa STN EN 206 [4].

Materiál	Povoľený maximálny obsah chloridov
Prostý betón	1,00%
Železobetón	0,40%
Dodatočne predpätý betón	0,20%
Vopred predpätý betón	0,10%

Tabuľka 3: Pravdepodobnosť korózie pre betonársku výstuž podľa [11].

Chloridy (% z hmotnosti cementu)	Pravdepodobnosť vzniku korózie
<0,4	Zanedbateľná
0,4 do 1,0	Možná
1,0 do 2,0	Pravdepodobná
>2,0	Istá

4. Vykonané diagnostiky

V priebehu roka 2021 bolo vykonaných 6 prehliadok cestných mostov za účelom zistenia ich stavebno-technického stavu. Mosty podrobené prehliadkam boli hlavne zo železobetónu a z predpätého betónu. Na všetkých diagnostikovaných mostoch bola detekovaná korózia výstuže v rôznom rozsahu. Za účelom zistenia pôvodcu korózie výstuže boli vykonané skúšky na zistenie hĺbky karbonatizácie a úrovne kontaminácie betónu chloridmi. Stručná charakteristika diagnostikovaných mostov je uvedená v tabuľke 4.

Tabuľka 4: Zoznam diagnostikovaných mostov.

Označenie mosta	Lokalita	Rok výstavby	Korózia výstuže	Typ konštrukcie
M007	Prešov	1972	☑	Predpätý b.
M044	Pezinok	1975	☑	Predpätý b.
M5296	Pernek	1962 ³	☑	Železobetón
M3173	Pernek	1962 ³	☑	Železobetón
M1795	Malacky	1974	☑	Železobetón
M6631	Budmerice	1970	☑	Predpätý b.

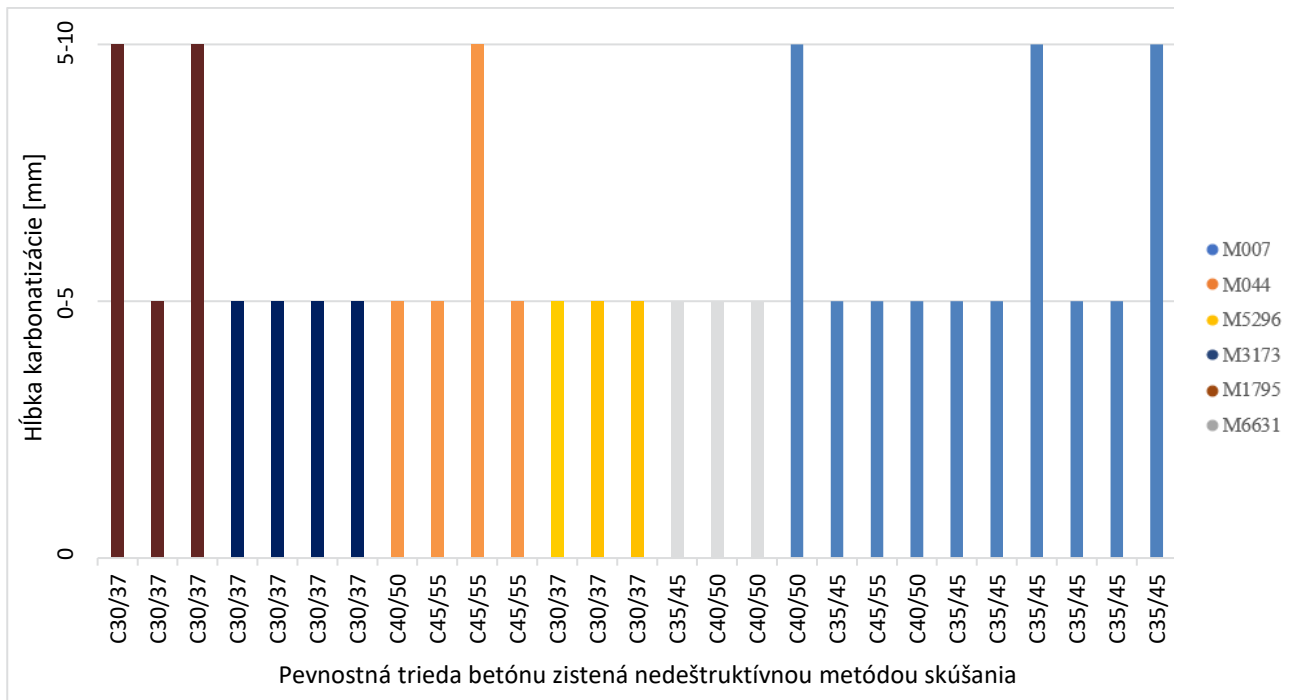
4.1 Karbonatizácia - diagnostika

Hĺbka karbonatizácie bola zisťovaná postupným navrtávaním s použitím 1% roztoku fenolftaleínu, pričom presnosť takéhoto merania je ± 5 mm (Obrázok 3).



Obrázok 3: Meranie hĺbky karbonatizácie postupným navrtávaním.

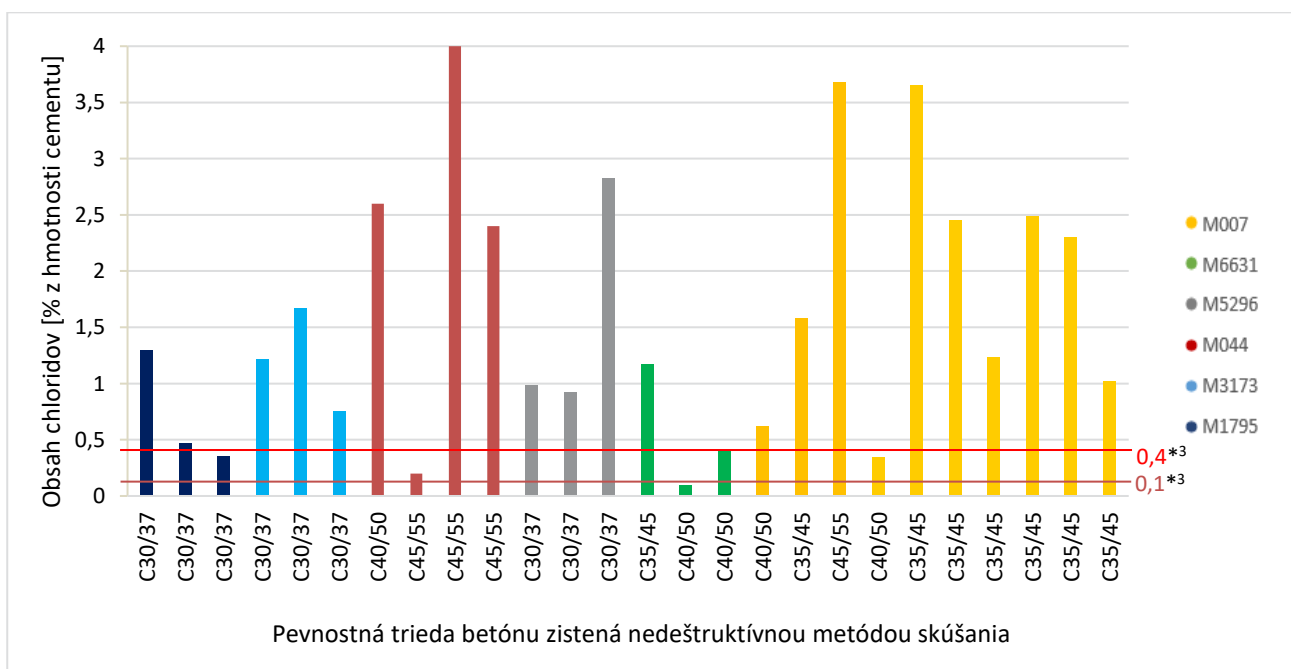
³ Rok výstavby daných mostov nie je známy a bol odhadnutý na základe začiatku výroby použitých prefabrikátov



Obrázok 4 Zistená hĺbka karbonatizácie na nosníkoch jednotlivých mostov pre zistené triedy betónu.

Pevnosť betónu bola stanovená nedeštruktívne, Schmidovým tvrdomerom, na základe STN 731373 [9] a STN EN 13791 [10].

Pri prepočte množstva chloridov sa uvažovala dávka cementu 300kg/m^3 pre betón triedy C30/37, 360kg/m^3 pre betón triedy C35/45 a 400kg/m^3 pre triedu betónu C40/50.



Obrázok 5 Zistené množstvo chloridov v povrchovej vrstve 0-10mm v rámci nosníkov jednotlivých mostov.

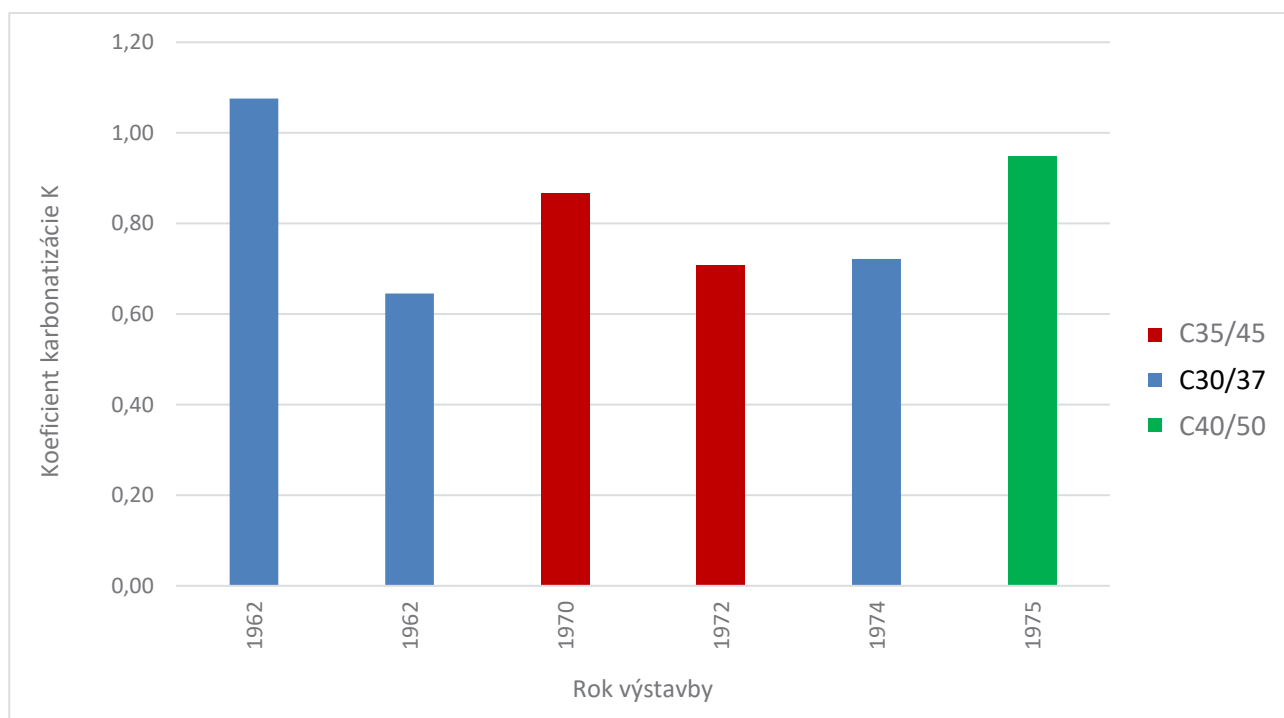
Existujú rôzne metódy, ktoré opisujú vzťah medzi hĺbkou karbonatizácie a vekom betónu. Závislosť týchto veličín vyjadruje koeficient karbonatizácie.

Koeficient karbonatizácie závisí od okolitých podmienok konštrukcie ako je napríklad koncentrácia CO₂ v prostredí, vlhkosť prostredia, od pomeru vody/cementu alebo typu použitého cementu, preto sa môže výrazne líšiť medzi jednotlivými konštrukciami. Koeficient karbonatizácie pre vyšetované mosty bol vypočítaný podľa vzťahu (1):

$$K = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

kde: x – nameraná priemerná hĺbka karbonatizácie
t - vek konštrukcie.

Na obrázku 6 sú uvedené priemerné hodnoty koeficientu karbonatizácie vzhľadom na zistené pevnostné triedy betónu. Pre výpočet priemeru bola pre hodnotu hĺbky karbonatizácie 5-10 mm použitá hodnota 10mm a pre hodnotu 0-5mm bola použitá hodnota 5mm. Z nameraných hodnôt možno pozorovať, že neexistuje priamy vzťah medzi koeficientom karbonatizácie vzhľadom na triedu a vek betónu.

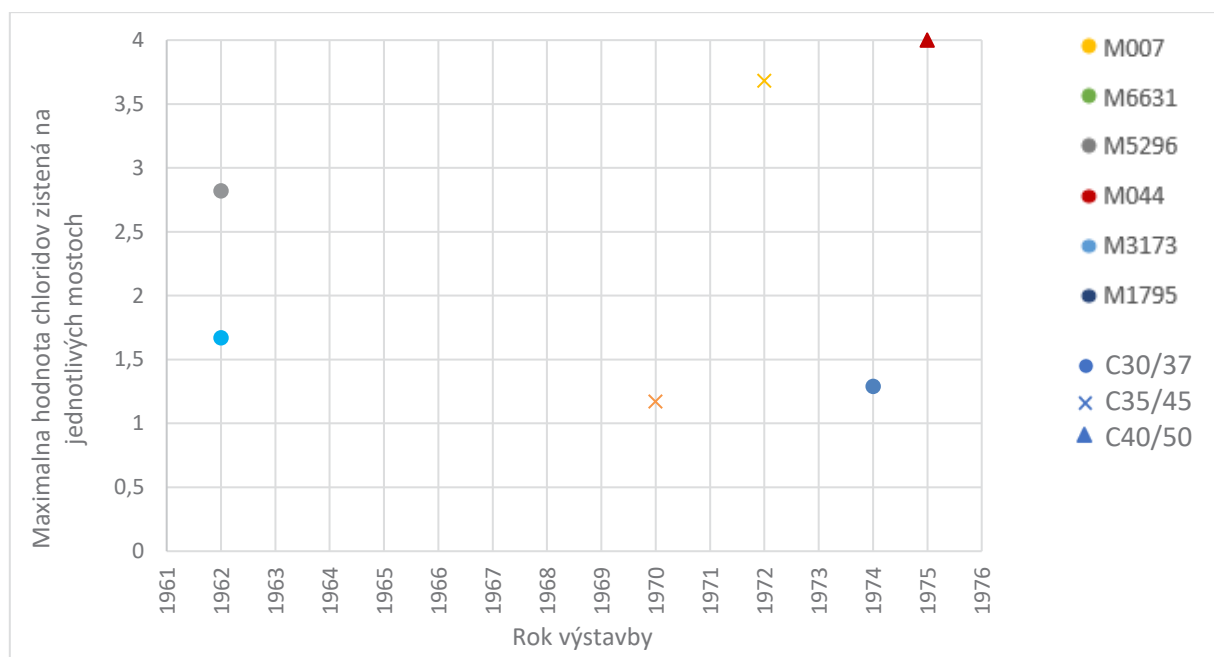


Obrázok 6 Priemerná hĺbka karbonatizácie pre jednotlivé triedy betónu na všetkých diagnostikovaných mostoch

4.2 Chloridy - diagnostika

Prienik chloridov je označovaný ako časovo závislý jav, v určitých prípadoch môže byť značne urýchlený pomocou nepriaznivých vplyvov prostredia, a preto vek konštrukcie nemusí byť považovaný za faktor, z ktorého možno priamo odhadovať hodnotu koncentrácie chloridov ako prezentuje obrázok 7. Koncentrácia chloridov (okrem kontaminácie betónu chloridmi priamo pri

výrobe konštrukčného prvku) je priamo závislé od správneho vyhotovenia odvodnenia a v prípade neuspokojivého riešenia sa životnosť konštrukcie zásadne skraca.



Obrázok 7 Maximálny obsah chloridov v závislosti od roku výstavby mostov a pevnostnej triedy betónu

3. Záver

Na základe nameraných údajov získaných počas diagnostík mostov nachádzajúcich sa v špecifických podmienkach prostredia možno formulovať nasledujúce závery:

- Rozdielne pevnostné triedy zistené na nosníkoch diagnostikovaných mostov nemali zásadný vplyv na hĺbku karbonatizácie betónu, ktorá je jedným z faktorov zvyšujúcich pravdepodobnosť korózie ocelevej výstuže;
- Z nameraných údajov kontaminácie betónu chloridmi vyplýva postupné progresívne zasoľovanie betónu mostov v prostredí cestných komunikácií na Slovensku, ktoré predstavuje budúce riziko a postupne zvyšujúce sa problémy ako aj čiastočnú odpoveď na negatívny vývoj stavebnotechnického stavu mostov
- Vek mosta sa nejaví ako kritický faktor v prípade správne vykonávanej údržby mostného objektu
- Pevnostná trieda betónu nedokáže zvrátiť nepriaznivý vplyv nadmerného vystavenia pôsobeniu chloridov, najčastejšie z dôvodu zatekania konštrukcie

Literatúra

- [1] SSC, "Road objects. Graphic representation according to the construction and technical condition. State of the road network to 1.1.2022.," Bratislava, 2022. [Online]. Available: https://www.cdb.sk/files/documents/cestna-databanka/vystupy-cdb/2022/kniha_mosty_sts_2022-01-01.pdf.

- [2] STN EN 1992-1-1+A1, *Eurokód. Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy.* .
- [3] STN EN 1992-2, *Eurokód. Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 2: Betónové mosty. Navrhovanie a konštruovanie.* .
- [4] STN EN 206+A2: 2021, *Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda.* .
- [5] K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete.* Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [6] V. T. Ngala and C. L. Page, "EFFECTS OF CARBONATION ON PORE STRUCTURE AND DIFFUSIONAL PROPERTIES OF HYDRATED CEMENT PASTES," *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 7, pp. 995–1007, Jul. 1997, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00102-6.
- [7] U. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, and Ø. Vennesland, "Critical chloride content in reinforced concrete - A review," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 12, pp. 1122–1138, 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.08.006.
- [8] Z. Ahmad, "CONCRETE CORROSION," in *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, Z. B. T.-P. of C. E. and C. C. Ahmad, Ed. Oxford: Elsevier, 2006, pp. 609–646.
- [9] STN 731373, *Tvrdomerné metódy skúšania betónu*
- [10] STN EN 13791, *Eurokód. Stanovenie pevnosti betónu v tlaku v konštrukciách a v betónových prefabrikátoch*
- [11] R.D. Browne, "Design prediction of the life of reinforced concrete in marine and other chloride environments. In durability of building materials," Amsterdam, Elsevier, Vol. 3, 1982
- [12] Kolísko J., Vacek V., Pokorný P., Kostecká M., „*Properties of prestressed reinforcement structures under corrosion*“ *Betón TKS*, vol. 6, pp. 3-9, 2019
- [13] Moravčík M., Bujňaková P., and Krkoška L., "Výsledky diagnostického prieskumu havarijného stavu mosta na severe slovenska," *CONSTRUMAT 2016 – Conference on Structural Materials*, vol. 1, pp. 124–132, 2016.
- [14] Matthews, S. „*Design of durable concrete structures*“, Bracknell, IHS BRE Press, 2014.
- [15] Monteiro I., Branco F.A., deBrito J., Neves R., „*Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures*“, *Construction and Building Materials*, Volume 29, April 2012, Pages 263-269, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.028

Silvia Martinkovičová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 2.

TYPOLÓGIA A HISTÓRIA TESÁRSKYCH SPOJOV

TYOLOGY AND HISTORY CARPENTER'S JOINTS

Abstract

This article presents the basic types of carpentry joints. It divides them from the point of view of connections, assembly, use and from the point of view of connection with fasteners. Carpentry is one of the oldest crafts and has been considered a construction profession since ancient times. Carpentry consists of a wide range of construction works. However, by this term we mean construction work mainly with wood. With the help of traditional and modern carpentry, various wooden structures began to be created, but especially roof structures - trusses. For the roof truss to work properly, every single part of it must be well connected. That is why carpentry joints are one of the most important parts of the truss.

Kľúčové slová / Key Words

Tesárske spoje; Krov; Väzby; Spojovací materiál

1. Úvod

Tesárske spoje sú najstarším spôsobom spájania drevených prvkov a profilov. V minulosti boli tieto spoje zhotovované jednoducho a s minimálnym počtom spojovacích prostriedkov. Na ich vzájomné spájanie sa prevažne používali drevené dubové kolíky.(1) Neskôr boli prvý krát použité tesárske skoby tzv. kramle a ešte v neskorších časoch sa začali objavovať na spájanie aj prvé oceľové klince. V súčasnosti je použitie spojovacích prostriedkov vo forme oceľových klincov, svorníkov so závitovými tyčami alebo aj pomocou oceľových plechov.

Zatiaľ, čo v minulosti boli tesárske spoje jediným spôsobom spájania dvoch drevených prvkov, v dnešnej dobe majú uplatnenie skôr pri rekonštrukciách historických budov. Pamiatkové odbory dbajú na zachovanie pôvodných drevených konštrukcií a ich tesárskych spojov. Pokiaľ sú pôvodné spoje veľmi poškodené, dbá sa na vytvorenie presnej repliky. (2)

2. Tesárske spoje

2.1 Prevedenie tesárskych spojov

Aby bol tesársky spoj efektívny, musí zaistiť kvalitný prenos vnútorných síl z jedného prvku na druhý. Preto tesárske spoje vyžadujú čo najkvalitnejšie prevedenie. Najviac vplývajúcim faktorom na skonštruovanie kvalitného spoja je jeho presnosť. Vnútorné sily musia byť prenesené celou plochou prvkov, preto sa vyžaduje tesné doliehanie ich styčných plôch. Pritom sa dbá na dobré zabezpečenie spojov, aby nenastalo ich rozpojenie. Pri zlom, alebo len bodovom styku sa ich únosnosť znižuje.

¹ Silvia Martinkovičová, Ing. , Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 810 05 Bratislava

Ďalšiu dôležitú rolu hrá v spojoch vlhkosť dreva. Ideálna vlhkosť by sa mala pohybovať od 12 – 15%, pretože inak sa objavia vzniknuté medzery v spoji spôsobené zmenšením objemu vplyvom zosýchania.

Treba taktiež spomenúť hlavnú nevýhodu tesárskych spojov, a to je oslabovanie drevených prierezov. Únosnosť spojov sa dokazuje statickým výpočtom a posúdením podľa platných noriem. Vo výpočtoch sa nezohľadňujú spájacie prostriedky, pretože tie len zaisťujú polohu spoja.

Tesárske spoje môžu byť zhotovené dvoma spôsobmi. Prvý spôsob zhotovenia je ručná výroba a to pilami, alebo dlátami. Pri druhom spôsobe je možné použitie reťazových píl, to však môže viesť k nepresnosti spojov. Preto sa vo veľkovýrobe v súčasnosti používajú pre presný výsledok stroje riadené počítačom.

3. Základné rozdelenie tesárskych spojov

Tesárske spoje sa rozdeľujú na väzby pozdĺžne, priečne alebo väzby rozširujúce, pričom rozširujúce väzby sa používajú prevažne len pre doskové rezivo. Medzi pozdĺžne väzby patria zrazy, spoje s príložkami a plátovanie. Do skupiny priečných väzieb zaraďujeme lipnutie, zapustenie, čapovanie, preplátovanie, kampoanie a v neposlednom rade osedlanie. V praxi sa často používa aj kombinácia uvedených spojov.

4. Základné tesárske spoje

4.1 Tesárske pozdĺžne väzby

Tento typ väzby patrí k najjednoduchším tesárskym spojom. Používajú sa hlavne pri spojovaní pomúrnic podopretých po celej dĺžke prvku, alebo väzníc, ktoré sú podopreté na stene, alebo na stĺpe. Väzby sa dopĺňajú tesárskymi skobami, alebo príložkami a sú zaistené spojovacími prostriedkami.

4.1.1 Zraz

Ide o najjednoduchší spoj, ktorým sa zväčšuje dĺžka prvkov a to jednoduchým prirazením daných prvkov k sebe. Toto prirazenie môže byť tupé, šikmé, alebo šikmé s vložkou. Väčšinou sa jedná o napojenie pomúrnic či väznice. Pokiaľ sa však prvky dotýkajú navzájom čelami, ide o zraz čelný. Ďalej sa zraz rozdeľuje na bočný, kde sa spajované prvky dotýkajú bočnými stranami. Menej používaný je krížový zraz, ktorý sa vyznačuje rôznobežnosťou spájaných prvkov.

Aby nedošlo k vybočeniu prvku do strán, prvok sa zabezpečí a spevní tesárskou skobou, tzv. kramľou. Ak sú použité oceľové príložky, sú do drevených prvkov priskrutkované skrutkami. Drevené príložky sú väčšinou pripojené cez klince a svorníky. Dané príložky môžu byť nasadené, čiastočne zapustené, úplne zapustené, alebo skonštruované so zapustením. Najčastejšie sa príložky používajú z dvoch, alebo zo štyroch strán. (5)

4.1.2 Plátovanie

Spojenie plátovaním je najviac používaným spojením. Nájdeme ho pri nastavovaní líniových prvkov, čiže pomúrnic, alebo väzníc. Dĺžka plátu závisí od prierezu spajovaného prvku. V bežných prípadoch býva približne 20 centimetrov a je potrebné ju vždy vypočítať. Avšak, nevýhodou je výrazné oslabenie spajovaného prvku. Pláty môžu byť prevedené ako rovné, alebo šikmé. Ďalej sa rozdeľujú na jednoduché, dvojité a viacnásobné.



Obrázok 1: Zraz čelný tupý [3]



Obrázok 2: Plátovanie - Jednoduchý plát [3]

4.2 Tesárske priečne väzby

4.2.1 Preplátovanie

Ďalší veľmi často používaný tesársky spoj je preplátovanie. Je to spojenie dvoch vodorovných trámov, ktoré pôsobia konštrukčne ako celok. Prvky sú lícované do roviny a zvierajú medzi sebou pravý, alebo iný uhol. Po vyrobení plátu sa prvky uložia na seba, pričom sa dbá na to, aby boli spojené čo najdokonalejšie a neposúvali sa. Posunutiu sa najčastejšie zabráni skrútkami, skobami, klinmi, alebo kombináciu týchto spájajúcich prostriedkov. (5)

Preplátovanie sa delí na kolmé, alebo šikmé. V oboch prípadoch sa vytvoria odpovedajúce výrezy, ktorými prvky do seba zapadnú. Rozlišujeme taktiež:

a) Rybinový plát

Jednoduchý lichobežníkový tvar. Názov spoju je odvodený od toho, že na pohľad vytvára podobu rybej plutvy – rybiny. Môže mať kryté, alebo nekryté čelo. Ďalej sa delí na jednostrannú a obojstrannú rybinu.

b) Pozdĺžny plát

Používa sa pri napojení - predĺžovaní dĺžky dvoch trámov. Viditeľný napr. pri napojení pomúrnic, alebo väzníc.

c) Rohový plát

Využívaný pri spojoch v nárožiach. Ide napríklad o spojenie pomúrnic a väzníc.

d) Krížový plát

Prvky krížiace sa v akýchkoľvek uhloch bývajú spojené práve týmto typom spoja.

e) Priečny plát

Zachytáva najmä tlakové sily.

4.2.2 Zadraptionie

Ide o výnimočný spoj šikmého a líniového prvku, kedy šikmý prvok v mieste spoja končí. Môžeme ho realizovať hlavne v mieste spojenia krokvy a hrebeňovej väznice, alebo na spojenie krokvy a úžľabnej krokvy.



Obrázok 3: Preplátovanie – Rybinový plát [1]



Obrázok 4: Zadraptionie – pred spojením [3]

4.2.3 Osedlanie

Najčastejšie ide o zadrapanutie prvku v šikmej polohe o hranu tlačeneho prvku – napr. spoj krokvy s pomúrniceou. Môžeme ho pozorovať teda pri prvkoch, ktoré sú vo dvoch rovinách.

4.2.4 Čapovanie

Najtradičnejší, najstarší a najznámejší spôsob spojovania drevených prvkov. Ide o skrytý spoj. Realizuje sa vsadením výpusťku t.j. čapu do otvoru nazývaným aj dlabom. Pri výrobe čapového spoja sa necháva malá vôľa v spoji a to z dôvodu, že je veľmi zložitá zrealizovať presne zapadajúci dlab. Historický spôsob zaistenia čapového spoja bol dubový kolík. Dnes sa však používajú skrutky, alebo klince. V novodobých spojoch sa však najčastejšie naniesie lepidlo na zlepšenie kontaktu spojovaných častí.

Ďalším dôležitým faktorom je navrhnutie správnej veľkosti a šírky dlabu, pretože nesprávny návrh môže viesť k jeho rozštiepeniu, alebo rozpadnutiu. Čap taktiež nesmie byť hlbší ako je dlab. Ak nastane takáto situácia spoj sa musí rozobrať a dĺžka čapu sa skrátiť.

a) Rovný čap

Zvislé prvky s vodorovnými sú navzájom spojené kolmým spojom. Ten je viditeľný pri spájaní stojatých stĺpikov s väzným trámom, poprípade prahového trámu s väznicou alebo spojov s pozdĺžnymi rozperami.

b) Šikmý čap

Najčastejšie používaný v ležatých stolicich (minimálne v stojatých stolicich), pretože spája prvky, ktoré nezvierajú pravý uhol. Ide o spoj realizovaný pri spájaní rozpery s ležatým stĺpikom, krokvy s kráčaťom, krokvy v spojení s hambálkom, pásikom a stĺpikom (poprípade ližiny/väznice), podkrokvovej vzpery a stĺpiku/väzného trámu.

c) Nárožné čapovanie (ostrih)

Spája dva konce krokiev a vytvára tak vrcholový spoj. Zaujímavým poznatkom pri tomto spoji je z troch strán otvorený dlab.



Obrázok 5: Čapovanie – Spojenie dlabu a čapu [3]



Obrázok 6: Osedlanie [3]

4.2.5 Kampovanie

Umožňuje spojiť dva jednotlivé prvky, ktoré ležia cez seba, avšak nevytvárajú spoločnú rovinu. Ide o osadenie na ozub. Týmto riešením sa dosiahne zabránenie posunutia prvku. Kampovaním môžeme taktiež označiť čiastočné preplátovanie. V jednom prvku je vytvorený zárez, avšak druhý môže zostať bez zárezu. Výška daného zárezu je 1/7 výšky dreva. Kampovanie je najčastejšie využívané napríklad pri spájaní väzného trámu a pomúrnice, väznice a trámu, alebo klieštín navzájom. Podľa umiestnenia zárezu môžeme kampovanie deliť na jednostranné, obojstranné a dvojitú. Kampovanie sa podľa tvaru zárezu sa delí na rovné, rybinovité a krížové. Pričom, najkomplikovanejším je krížové kampovanie, ktoré vzniká prečatím uhlopriečok spoja a vyrezaním dvoch protiľahlých trojuholníkov na každom prvku.

4.2.6 Zapustenie

Hovoríme o ňom v prípade, kedy je jeden prvok zapustený celým svojim čelom do prvku druhého. V druhom prvku sa prevedie zodpovedajúci výrez a spoj sa realizuje v mieste predpokladaného tlakového namáhania.

Spoj je využívaný najmä v šikmých vešadlových krovoch a môžeme ho vidieť hlavne u pásikov, stĺpov alebo vzpier. Zapustenie je ďalej charakteristické pri zapustení krokiev vo vrchole do vešiaka, rovnako aj pri ramenách vešiaka. Ďalej sa ním realizuje taktiež zapustenie vzpery vešadla do hambáľku alebo väzného trámu.

V prípade, že dva prvky nemajú rovnakú šírku, vznikne zvláštny typ zapustenia a to zapustenie kryté. To sa ďalej rozdeľuje na zapustenie jednostranné a obojstranné. Pri jednostrannom zapustení sú prvky zalícované z jednej strany. Pri obojstrannom zapustení nedochádza k zalícovaniu z jednej strany a je zapustené do prvku. zárez je vytvorený z oboch strán prvku a je veľmi náročný na prevedenie.

Najčastejším delením zapustenia je delenie podľa uhla, ktorý zvierajú spojované prvky. Potom definujeme zapustenie ako kolmé zapustenie (prvky zvierajú pravý uhol), alebo šikmé zapustenie (prvky nezvierajú pravý uhol).



Obrázok 7: Zapustenie – kolmé [3]



Obrázok 8: Karpovanie [3]

5. Spojovací materiál a istiace prvky tesárskych spojov

Ako spojovací materiál sú pri novodobých spojoch stále používané spojovacie prostriedky aj staršieho typu. V súčasnosti existuje veľký sortiment spojovacieho materiálu. Delí sa na spojovacie prostriedky kolíkového typu a spojovacie prostriedky povrchového typu. Samostatnú skupinu však tvoria novodobé moderné spojovacie prostriedky.

Medzi spojovacie prostriedky klasického zaužívaného kolíkového typu patria: kolíky, klnce, svorníky, skrutky a spony. Do povrchového typu zaraďujeme záchytky, dosky s prelisovanými trňmi a rôzne typy spájacích prostriedkov z tenkostenného oceľového plechu.

Modernými spojovacími prostriedkami sú vlepané závitové tyče, rybinové zámky a vložené strmene.

6. Záver

V kapitolách boli zosumarizované základné typy tesárskych spojov a ich použitie v konkrétnych prípadoch. Spoje boli stáročiami zdokonaľované a realizované tými najskúsenejšími tesármi. Avšak používaním striech iného typu, ako tých klasických s krovom, sa historické spoje začali využívať menej a v súčasnosti ich môžeme vidieť najmä pri sanáciach pamiatkových objektov. V dôsledku toho sa v posledných rokoch znalosti o týchto spojeniach začali postupne strácať.

V súčasnosti začína byť tesárstvo postupne opäť využívané. Rastie dopyt po realizácii striech s krovom a tesárske spoje sa tak v novodobej podobe opäť vracajú do konštrukcie budov.

Literatúra

- [1] SUCHÝ, L., ZACHAROVÁ, D., a kol.: Metodika identifikácie a výskumu historických krovov. 1. vyd. Bratislava: 2018, ISBN 978-80-89175-85-7.
- [2] KRUPKA, J., SLÁNSKÝ, O., VANEK, J.: Kvalita sanácií historických krovů, Praha: 2011
- [3] MARÍK, M. Bakalárska práca: Spoje drevených konštrukcií, Praha: 2018.
- [4] KUKLÍK, P.: Dřevěné konstrukce, 1. vyd. Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005, Praha, ISBN 80-01-03310-4.
- [5] GRENEK, M.: Tesařské spoje, 1, vyd., Praha: 2003, ISBN 9788024700762.
- [6] HÁJEK, V. a kol. : Pracujeme na střeše, 2. vyd., Sobotáles: 2000, ISBN 80-85920-68-9.
- [7] KOLB, J. : Dřevostavby: systémy nosných konštrukcií, obvodové plášťe, 1. vyd., Grada Praha: 2008, ISBN 978-80-247-2275-7.
- [8] KOHOUT, J., TOBEK, A.: Tesařství z pohledu dneška, vyd.8 , Grada Publishing, s.r.o.:1996, ISBN 80-7169-413-4.
- [9] GERNER, M. : Tesařské spoje, 1. vydání, Grada Praha, 2003, ISBN 80-2470076-X.
- [10] KUKLÍK, P., STUDNIČKA, J.: Dřevěné a kovové konstrukce: pro SPŠ stavební, 1. vydání, Informatorium, Praha: 2006, ISBN 80-7333-047-4.
- [11] AUGUSTINOVÁ, L., KRUŠINSKÝ, A., a kol.: Historické krovky Moravy, Slezska a Slovenska, Ostrava: 2015, ISBN 978-80-248-3869-4.
- [12] RAPOVÁ, L: Diplomová práca: Historický vývoj krovů, Plzeň: 2018.
- [13] Suchý , L., Krušinský , P., Grůňová , Z., Ďurian , K., Zacharová , D., Korenková , R.: Historické krovky v regiónoch Oravy a Kysúc. Žilinská univerzita v Žiline: 2010, ISBN 978-80-970171-1-8.
- [14] JELÍNEK, L., Tesařské konstrukce. Praha: 2003. ISBN 80-86364-98-4.
- [15] JELÍNEK, L., ČERVENÝ P., RÁHA F.: Nové krovky, vyd.1, Praha: 2017, ISBN 9788087438947.

*Martin Marton*¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

KALIBRÁCIA VALIDÁCIA A VERIFIKÁCIA NUMERICKÉHO MODELU NA ZÁKLADE EXPERIMENTÁLNYCH TESTOV

CALIBRATION VALIDATION AND VERIFICATION NUMERICAL MODEL BASED ON EXPERIMENTAL TEST RESULTS

Abstract

This article describes the method of calibration validation and verification FE model of truss structure. The calibration of numerical models is carried out in order to achieve the best possible match between measured and calculated results. With such a calibrated and verified model, experimental tests can be better controlled later. This fine-tuned calibrated numerical model will serve us in later studies in the damage identification experiment. The damage identification method is based on changes in the values of measured quantities. In order for this method to be successful, it is necessary to have the best possible match in the initialization model at the beginning. This means that the differences between measured and calculated values in an undamaged model must be as small as possible. This article describes the preparation of such an initialization model.

Kľúčové slová / Key Words

MKP model; priehradová konštrukcia; nit; prvková mostovka, kalibrácia

1. Úvod

Na kontrolu a porovnanie výsledkov z experimentu sa v súčasnosti často vytvárajú numerické modely, ktoré sú založené na metóde MKP[1]–[3]. Tieto modely sa vytvárajú na základe geometrických rozmerov skutočnej konštrukcie. Aj keď sú dodržané všetky rozmery, je potrebné sa sústrediť taktiež na správne nastavenie materiálových konštánt a iných detailov, ktoré menia výsledky výpočtov. Keďže MKP je aproximačná metóda, výsledky výpočtov sú závislé na rôznych detailoch a spôsoboch modelovania. Pri porovnaní výsledkov skutočného (experimentálneho) a fiktívneho (MKP) modelu, vieme so skúsenosťou meniť parametre konštrukcie tak, aby namerané hodnoty korešpondovali s vypočítanými. V súčasnej dobe sa na kalibráciu a validáciu používajú rôzne metódy a postupy, či už na základe rozdielov vlastných frekvencií [4]–[7] alebo iných veličín.

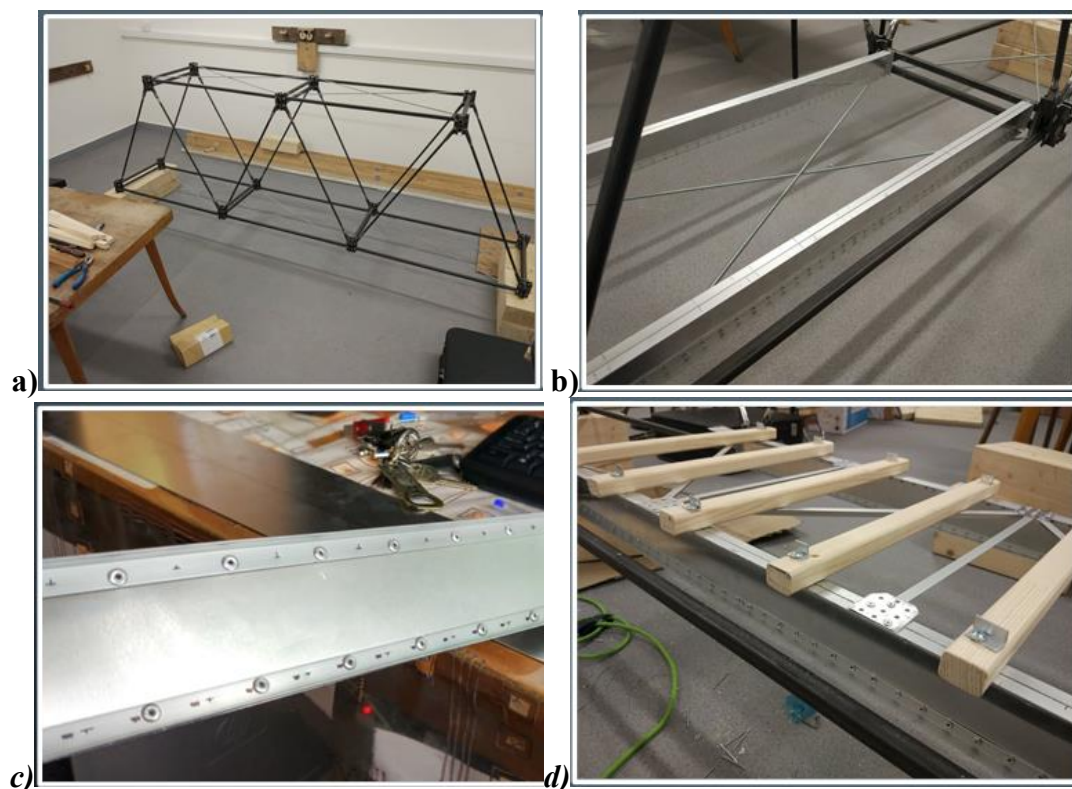
V tomto článku je opísaný postup prípravy experimentálneho modelu a neskôr numerického modelu metódou MKP, následne kalibrovanie, validácia a verifikácia numerického modelu na základe meraných veličín. Meranými veličinami boli pomerné pretvorenia na pozdĺžniku v stredom poli rozpätia a na koľajnici nad ním. Tieto hodnoty sa následne porovnávajú s hodnotami z výpočtov. Na základe rozdielov v týchto hodnotách sa menia rôzne nastavenia, napojenia a detaily v modeli. Pre túto analýzu bol použitý výpočtový software ANSYS Mechanical APDL [8], [9]. Cieľom tohto článku je poukázať na niektoré detaily v modeli, ktoré zapríčiňujú rozdiely v nameraných a vypočítaných hodnotách. Je zrejmé, že reálny experimentálny model obsahuje imperfekcie alebo chyby či nepresnosti. Tieto nedokonalosti je potrebné zohľadniť vo fiktívnom, teda numerickom

¹ Martin, Marton, Ing. Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

modeli. Ďalším cieľom článku je ukázať spôsob, ako tieto nedokonalosti reálneho modelu zakomponovať do fiktívneho modelu tak, aby rozdiely medzi výsledkami boli čo najmenšie.

2. Vyhotovenie experimentu – prvkovej mostovky

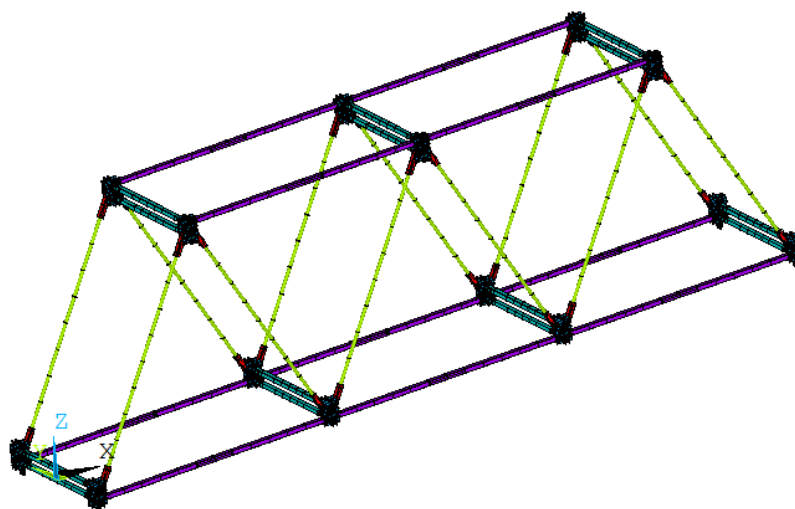
Na oceľovú priehradovú konštrukciu vo vlastníctve Katedry stavebnej mechaniky (Obr. 2.1 a) sme dorobili prvkovú mostovku. Mostovka pozostáva z pozdĺžnikov (Obr. 2.1 b), stužidiel, drevených mostníc a koľajníc. Materiál na výrobu pozdĺžnikov, stužidiel, a koľajníc sa použil hliník. Pozdĺžniky sú vytvorené z hliníkového plechu rozmeru 80x840x0.8mm, ktorý tvorí stenu pozdĺžnika, k nej sú prinitované dva hliníkové L profily na spodnej časti ako spodná pásnica a rovnako dva rovnaké L profily na hornej časti ako horná pásnica (Obr. 2.1 c) a (Obr. 3.2). Tieto profily sú rozmeru 10x10x1mm a sú tiež použité ako stužidlá horného pásu mostovky (Obr. 2.1 d). Stužidlá sú k hornému pasu prichytené cez roznášacie pliešky hrúbky 0.8mm (Obr. 2.1 d). Na koľajnice sme použili hliníkové profily JAKL 15x15x1.4, ktoré sú k dreveným mostniciam prichytené cez hliníkové uholníky. (Obr. 4.1)



Obr. 2.1 Výroba experimentálneho modelu mosta

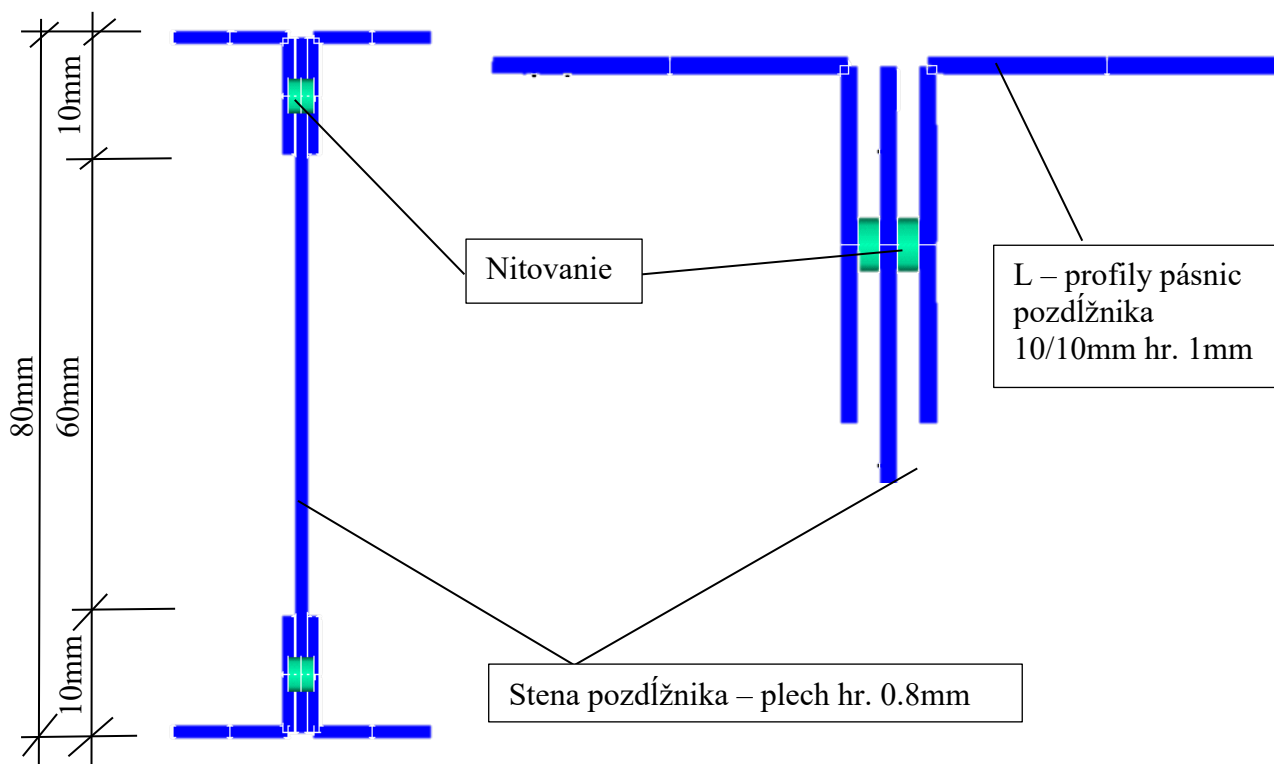
3. Opis zostrojenia numerického modelu

Konečno prvkový model oceľovej priehradovej konštrukcie bol vytvorený v programe ANSYS Mechanical APDL[8], [9]. Vychádzali sme z poskytnutého modelu hlavného nosníka a priečnikov ako je na (Obr. 3.1). [10]



Obr. 3.1 MKP model prihradovej konštrukcie [10]

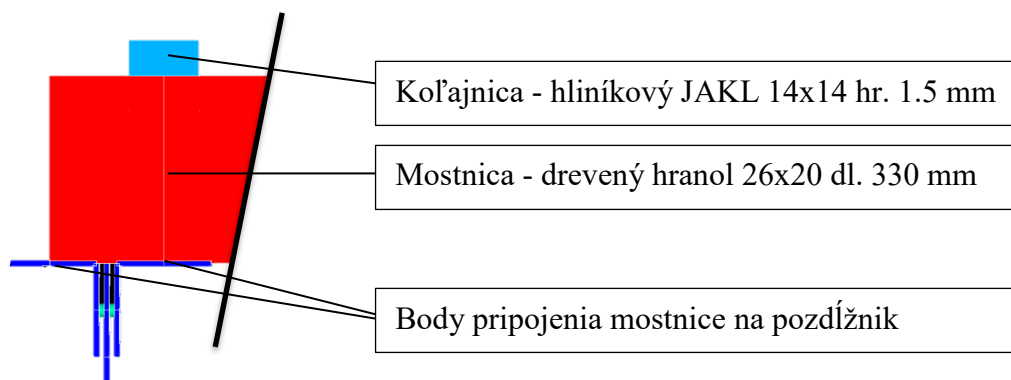
Prvkovú mostovku bolo nutné domodelovať. Mostovka bola následne pre účely tejto práce namodelovaná presne podľa rozmerov vyrobeného experimentu opísaného v kap 2. Pozdĺžniky tvaru I profilu sú tvorené zo steny, ktorú tvorí hliníkový plech hrúbky 0,8 mm, ku ktorej sú prinitované hore aj dole dva hliníkové L profily 10/10mm s hrúbkou plechu 1mm (Obr. 3.2). Steny a pásnice pozdĺžnikov sú modelované pomocou plošného prvku SHELL63.



Obr. 3.2 Priečný rez pozdĺžnikom

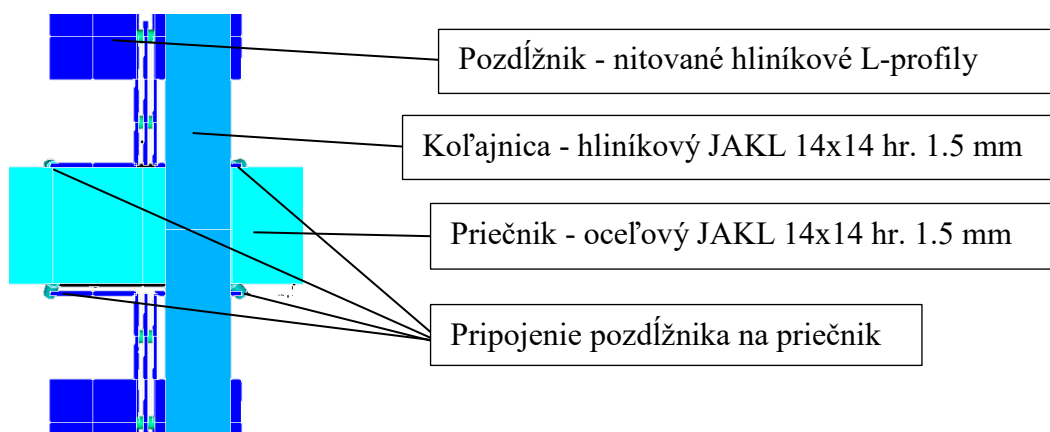
L-profily pásnice sú od steny vzdialené 0,2 mm + hrúbka príslušného materiálu. Tento parameter je možné upravovať pri nasledujúcom ladení modelu. Stena a L-profil pásnice sú spojené prostredníctvom nitov. Nity sú modelované prútovými prvkami typu PIPE16. V pozdĺžnom smere sú nity rozmiestnené po 2 cm na hornej aj spodnej pásnici.

Mostnice (podvaly) sú tvorené plošným prvkom SHELL63 s hrúbkou, ktorá sa rovná šírke podvalu, teda 2cm. Mostnice sú od seba v pozdĺžnom smere vzdialené cca 0,14m (Obr. 1.5). Sú pripojené na priečnik priamo a pevne v dvoch bodoch na oboch uholníkoch pozdĺžnika (Obr. 1.3).



Obr. 3.3 Priečny rez pozdĺžnikom – pripojenie mostnice a koľajnice

Koľajnice (Obr. 1.3 a 1.4) sú vytvorené ako líniový prvok BEAM. Majú prierezové charakteristiky podľa hliníkového jakla z ktorého sú reálne vyrobené. Pripojené sú na mostnice v jednom bode.

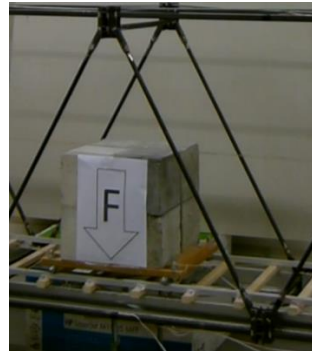


Obr. 3.4 Pohľad zhora – pripojenie pozdĺžnikov na priečnik

Pozdĺžniky sú v mieste napojenia na priečniky pripojené v 2 bodoch na hornú časť priečnika a v dvoch bodoch na spodnú časť. Z druhej strany to isté. Pripojenie je realizované tiež cez líniové prvky od priečnika k pozdĺžniku.

4. Spôsob výpočtu a technika merania napätí

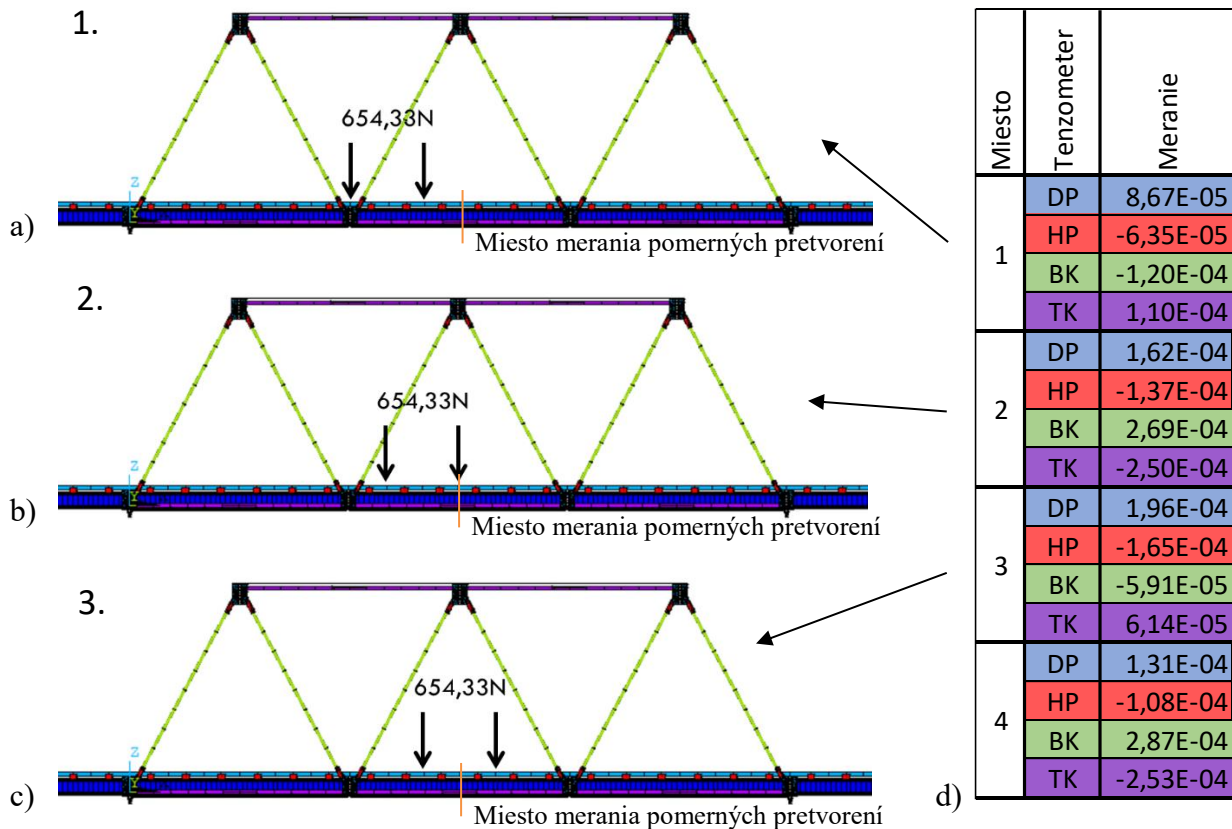
Ladenie modelu bolo uskutočnené na základe analyzovania rozdielov medzi meranými a počítanými pomernými pretvoreniami. Pomerné pretvorenie bolo merané v čase na jednom pozdĺžniku v strednom poli konštrukcie (Kap. 4.1) od zaťaženia 8 betónových kociek umiestnených na pohyblivom vozíku. (Obr. 4.1). Výpočet pomerných pretvorení sa MKP modeli sa uskutočnil pomocou automatického cyklického výpočtu pozdĺž mosta (Kap. 4.2).



Obr. 4.1 Zaťaženie v strednom poli mosta.

4.1 Aplikované zaťaženie a spôsob merania napätí

Zaťaženie na konštrukciu bolo prenášané prostredníctvom štvorkolesového vozíka. Ložiskové kolesá sú uložené na koľajnice a sú od seba osovo vzdialené 32.5cm. Na vozíku bolo uložené zaťaženie v podobe ôsmich betónových kociek rozmeru 15x15x15 cm. Každá z týchto kociek váži okolo 7.5-8kg. Celkové zaťaženie spolu s vozíkom je 65,433kg (Obr. 4.1). Zaťaženie bolo posúvané na vozíku pozdĺž mosta. Meranie pomerných pretvorení sa uskutočnilo na spodnej a hornej prasnici v strede pozdĺžnika stredného poľa mosta (Obr. 4.2 a). Tenzometre boli tiež umiestnené na spodnom a hornom okraji koľajnice. Aj keď merané veličiny boli zaznamenané počas celého prejazdu, (Obr. 4.2) znázorňuje dôležité polohy zaťaženia pozdĺž mosta. V tabuľke (Obr. 4.2 d) sú zosumarizované hodnoty nameraných pomerných pretvorení na dolnom páse pozdĺžnika (DP), hornom páse (HP), spodnom (BK) a hornom (TK) okraji koľajnice.



Obr. 4.2 Poloha zaťaženia a) 1. pozícia; b) 2. pozícia; c) 3. pozícia; d) sumarizácia záznamov z merania v jednotlivých polohách zaťaženia

4.2 Spôsob výpočtu napätí

V programe ANSYS bol vytvorený dávkový súbor, ktorý cyklicky zaťažoval konštrukciu spúšťal výpočet a zapisoval výsledné dáta do externého súboru. Na dosiahnutie presnejších výsledkov výpočtu bolo potrebné posúvať zaťaženie v relatívne malých krokoch pozdĺž konštrukcie. V tomto prípade bolo zaťaženie posúvané v kroku 0.5mm. Pri dĺžke konštrukcie 2400mm to je 4800 pozícií zaťaženia a teda 4800 výpočtov. Ak jeden výpočet so zápisom hodnôt trvá 3s je to $4800 \cdot 3 = 14400s$, čo reprezentuje 4 hodiny. Pre účely tohto článku sme sa rozhodli hodnotiť len 4 významné polohy zaťaženia (Obr. 4.2) a teda aj výpočet bol jednoznačne kratší. V tab. 4.1 je vidieť porovnanie vypočítaných a nameraných hodnôt pomerných pretvorení. Vidíme, že veľký rozdiel je hlavne na hornom (TK) a spodnom (BK) okraji koľajnice, v 1 a 3. pozícii zaťaženia. Priemerná chyba týchto meraných hodnôt je 35%.

Tabuľka 4.1: Porovnanie meraných a počítaných hodnôt pred kalibráciou

Miesto	Tenzometer	Meranie	Vypočet (povôdy model)	Rozdiel
1	DP	8,67E-05	9,81E-05	12%
	HP	-6,35E-05	-8,90E-05	29%
	BK	-1,20E-04	-7,09E-06	94%
	TK	1,10E-04	7,14E-06	93%
2	DP	1,62E-04	1,96E-04	17%
	HP	-1,37E-04	-1,66E-04	18%
	BK	2,69E-04	2,46E-04	9%
	TK	-2,50E-04	-2,40E-04	4%
3	DP	1,96E-04	2,04E-04	4%
	HP	-1,65E-04	-1,75E-04	6%
	BK	-5,91E-05	-5,56E-06	91%
	TK	6,14E-05	5,56E-06	91%
4	DP	1,31E-04	1,90E-04	31%
	HP	-1,08E-04	-1,73E-04	38%
	BK	2,87E-04	2,39E-04	17%
	TK	-2,53E-04	-2,36E-04	7%

35%

5. Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt a kalibrácia FE modelu

Pri porovnaní nameraných a vypočítaných pomerných pretvorení sme si všimli určité rozdiely aj v priebehoch nielen v hodnotách. V prvom rade pri meraní nejde docieľiť plynulosť manuálnym posúvaním vozíka. Ďalším rozdielom sú extrémne špičky pri prejazde kolesa v blízkosti tenzometra umiestneného na koľajnici a to hlavne na hornom povrchu. Koleso prechádza pár milimetrov od tenzometra, čo zapríčiňuje v danom okamihu extrémny výkyv pomerných pretvorení. Koleso prenáša celé zaťaženie len na určitej malej ploške kontaktu kolesa s koľajnicou a na tom bode vytvára lokálny tlak na element koľajnice v smere Z. Keďže v numerickom modeli je koľajnica modelovaná ako prúťový prvok a nie ako plošný nie je tam zachytený efekt stačenia elementu a preto na priebehoch nie sú rovnaké špičky. Tento efekt sme zohľadnili zarovnaním týchto špičiek pri meranom zázname.

Pri sledovaní meraných pomerných pretvorení na koľajnici je vidieť že pomerné pretvorenia majú opačné znamienka keď je vozík v strede konštrukcie. Je to zapríčinené tým, že koľajnica sa správa ako spojité nosník s podperami na mostniciach a v bode keď je vozík presne v strede sú kolesá mimo poľa v ktorom sa meria (Obr. 4.2). To zapríčiňuje opačné hodnoty pomerných pretvorení. Na spodnej strane koľajnice je tlak a na hornej je ťah. Ak sa pozrieme na počítané dáta, tieto hodnoty sú zanedbateľné. Je to z dôvodu, že koľajnica sú v modeli prichytené pevne k mostniciam a teda je zabránený posun v pozdĺžnom smere. Preto ako prvé bolo potrebné do modelu uložiť koľajnice na ložiská v pripojení na mostnice v pozdĺžnom smere, aby bolo umožnené tomuto posunu. Ďalšie zmeny modelu boli stenčenie hrúbky steny nitu a úprava modulu pružnosti dreva.

Tabuľka 5.1: Porovnanie meraných a počítaných hodnôt po kalibrácii

Miesto	Tenzometer	Meranie	Vypočet (povôdy model)	Rozdiel	Vypočet (kalibrovaný model)	Rozdiel
1	DP	8,67E-05	9,81E-05	12%	1,01E-04	14%
	HP	-6,35E-05	-8,90E-05	29%	-8,56E-05	26%
	BK	-1,20E-04	-7,09E-06	94%	-6,00E-05	50%
	TK	1,10E-04	7,14E-06	93%	5,95E-05	46%
2	DP	1,62E-04	1,96E-04	17%	1,79E-04	9%
	HP	-1,37E-04	-1,66E-04	18%	-1,53E-04	11%
	BK	2,69E-04	2,46E-04	9%	2,52E-04	6%
	TK	-2,50E-04	-2,40E-04	4%	-2,52E-04	1%
3	DP	1,96E-04	2,04E-04	4%	2,27E-04	14%
	HP	-1,65E-04	-1,75E-04	6%	-2,06E-04	20%
	BK	-5,91E-05	-5,56E-06	91%	4,32E-05	27%
	TK	6,14E-05	5,56E-06	91%	-4,27E-05	30%
4	DP	1,31E-04	1,90E-04	31%	1,82E-04	28%
	HP	-1,08E-04	-1,73E-04	38%	-1,54E-04	30%
	BK	2,87E-04	2,39E-04	17%	2,65E-04	8%
	TK	-2,53E-04	-2,36E-04	7%	-2,65E-04	4%

35%

20%

Po aplikovaní všetkých spomenutých zmien bol model znova prepočítaný a hodnoty pomerných pretvorení sú zhrnuté v tabuľke 5.1. Je vidieť výraznú zmenu hlavne v pomerných pretvoreniach na koľajniciach v polohe zaťaženia 1. a 3. Avšak maxima na hornej a spodnej pásnici v polohe 3.sa mierne zvýšili. Táto poloha je podľa (Obr. 4.2 a) poloha vozíka presne v strede konštrukcie a preto pomerné pretvorenia v tejto pozícii sú veľmi dôležité pre správne fungovanie pozdĺžnikov v modeli.

To znamená že v ďalšom kroku bude potrebné znova upraviť niektoré nastavenia tak, aby sa pomerné pretvorenia na pásniciach znížili ale zároveň aby pomerné pretvorenia na koľajnici zostali v týchto priebehoch alebo sa ešte zlepšili. Pre účely tohto článku sledujeme len 4 údaje v 4 polohách zaťaženia. Pri kalibrovani väčších konštrukcií je potrebné sledovať a porovnávať oveľa viac parametrov. Z tohto je vidieť, že upravovať a kalibrovat model týmto manuálnym kalibrovaním je veľmi náročné a zdĺhavé a neefektívne.

6. Záver

Na záver hodnotíme, že je možné kalibrovať numerický model čiastočne manuálnym spôsobom sledovania zmien počítaných hodnôt po zmenení niektorých parametrov z predchádzajúceho výpočtu. Je to však veľmi časovo náročné a neefektívne. O to viac ak ide o veľkú konštrukciu napr. mosta, kde je zozbieraných dát oveľa viac. Je náročné Dnes je mnoho efektívnych optimalizačných matematických metód z oblasti umelo inteligentných metód ako napríklad PSO (Particle Swarm Optimization), CNN (Convolutional Neural Networks) alebo GA (Genetic Algorithm), ktoré je možné použiť ako nástroj na kalibrovanie modelov. Preto je tu priestor na implementáciu niektorých optimalizačných metód na postupné automatizované kalibrovanie numerických modelov. V ďalších štúdiách sa chceme venovať použitiu jednej z nich na hľadanie poškodenia na tejto konštrukcii.

Použitá literatúra

- [1] M. M. Rahman, T. T. Nahar, and D. Kim, “FeView: Finite element model (FEM) visualization and post-processing tool for OpenSees,” *SoftwareX*, vol. 15, p. 100751, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SOFTX.2021.100751.
- [2] R. L. Taylor, “FEAP: A Finite Element Analysis Program, Theory Manual,” *Manuals*, no. March, 2001.
- [3] Š. Benča, “Výpočtové postupy MKP,” *Slov. Tech. UNIVERZITA V BRATISLAVE*, 2006.
- [4] H. Wang, A. Q. Li, and J. Li, “Progressive finite element model calibration of a long-span suspension bridge based on ambient vibration and static measurements,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 9, pp. 2546–2556, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2010.04.028.
- [5] F. Lambiase, S. Genna, and R. Kant, “A procedure for calibration and validation of FE modelling of laser-assisted metal to polymer direct joining,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 98, pp. 363–372, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2017.08.016.
- [6] T. Wichtmann, A. Niemunis, and T. Triantafyllidis, “Validation and Calibration of a High-Cycle Accumulation Model Based on Cyclic Triaxial Tests on Eight Sands,” *Soils Found.*, vol. 49, no. 5, pp. 711–728, Oct. 2009, doi: 10.3208/SANDF.49.711.
- [7] T. Marwala, *Finite-element-model Updating using Computational intelligence Techniques*, vol. 148. 2010.
- [8] Ansys®, “Academic Teaching Mechanical and CFD.” Release 17.0, Help System, ANSYS Inc, p. 600, 2017.
- [9] P. C. Kohnke, “ANSYS BT - Finite Element Systems: A Handbook,” C. A. Brebbia, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1982, pp. 19–25. doi: 10.1007/978-3-662-07229-5_2.
- [10] M. Venglar, M. Sokol, and M. Marfoldi, “Modal Analysis for Revision of a Fem Model of a Steel Truss Beam,” *Acta Polytech. CTU Proc.*, vol. 13, p. 148, 2017, doi: 10.14311/app.2017.13.0148.

*Maroš Mojto*¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

SIMULÁCIA NASÚVANÉHO SPOJA POUŽITÉHO VO VETERNEJ TURBÍNE

SIMULATION OF SLIP JOINT USED IN OFFSHORE WIND TURBINE

Abstract

A slip joint is an alternative connection in column construction without welds or bolts. This contribution presents the slip joint with circular cross-section used in the offshore wind turbine. The traditional solution is insufficient due to unexpected long-term settlement of the upper part. The paper focuses on the structural analysis of the slip joint. The measuring data from six months campaign are compared with a mathematical model. The results indicate that the mathematical model can reproduce the primary trends of slip joint behaviour.

Kľúčové slová / Key Words

Axiálne napätie; nasúvaný spoj; veterná turbína

1. Úvod

Vo všeobecnosti je nasúvaný spoj zložený z dvoch navzájom nasunutých oceľových kónických rúr. Tieto rúry môžu byť kruhového alebo polygonálneho prierezu. Vnútorne sa sily prenášajú na základe geometrie a trenia. Hlavnou výhodou tohto spoja je vylúčenie zvarov a skrutiek. Napriek tejto výhode, je využitie nasúvaného spoja sporadickéjšie v porovnaní s alternatívou napríklad vo forme prírubového spoja. Jedným z dôvodov je aj nedostatočný návrhový postup. V súčasnosti sa pri návrhu nasúvaného spoja využívajú empirické zásady. Jedinou normovou požiadavkou je splnenie minimálnej dĺžky nasunutia, ktorá je definovaná ako 1,5 násobok priemeru dielca.

Príspevok nadväzuje na vykonaný výskum [01], [02], [03], [04] a [05]. Namerané dáta sú poskytnuté univerzitou TU Delft, kde sa nasúvanému spoju venovali napríklad v [06] a [07].

Príspevok prezentuje čiastočné výsledky zo 6 mesačnej stáže na TU Delft. Cieľom príspevku je simulácia a verifikácia matematického modelu na základe nameraných údajov.

2. Metodika príspevku

Príspevok porovnáva merané axiálne napätia (napätia vo vertikálnom smere) s matematickým modelom, ktorý je vypracovaný na základe metódy konečných prvkov (MKP). Príspevok nemá za cieľ exaktné porovnanie, ale overiť trend správania. V príspevku sa predpokladá, že použité merané hodnoty sú v prevažnej miere výsledkom ohybového namáhania nasúvaného spoja. Tento predpoklad je zabezpečený tak, že pred každým meraním (eventom) sú predchádzajúce namerané dáta znulované (napr. odstránenie vplyvu montáže). Dominantnými zaťažzeniami veternej turbíny je otáčanie vrtule, pôsobenie vetra alebo morských vln. Toto zaťaženie, v prevažnej miere, vyvoláva horizontálne účinky a teda ohybový moment. Na základe tohto predpokladu sa vhodne zvolený segment

¹ Maroš, Mojto, Ing. Katedra kovových a drevených konštrukcií, STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

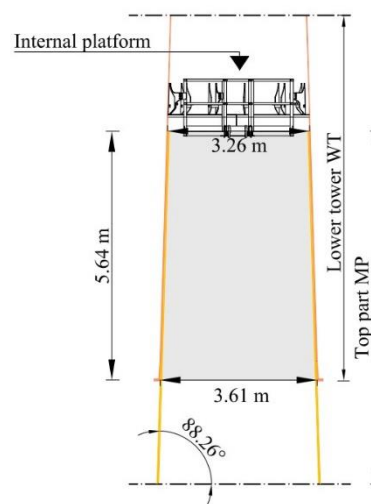
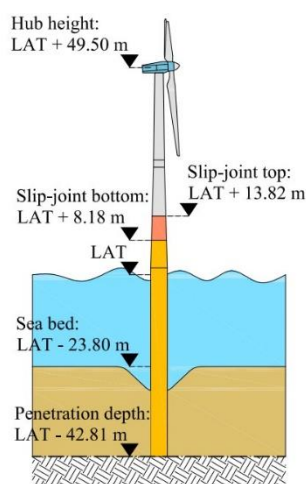
konštrukcie namodeluje v MKP softwari a zaťažá sa horizontálnou silou (ohybovým momentom). V porovnaní budú použité normalizované hodnoty a preto nezáleží na veľkosti aplikovaného ohybového momentu.

3. Meracia kampaň, geometria veternej turbíny a použité senzory

Meranie prebiehalo na veternej turbíne s výkonom 500 kW, umiestnenej v severnom mori, približne 25 km od Holandského pobrežia. Turbína bola nainštalovaná v Septembri v roku 2018 a po nepretržitom meraní bola demontovaná v Marci v roku 2019. Nasunutie spoja bolo realizované silou od vlastnej tiaže (vrchná časť turbíny má hmotnosť približne 450 t) a demontovaný pomocou ťahovej sily v kombinácii s vibráciami.

Poskytnuté údaje sú vo forme 30 minútových eventov, ktoré obsahujú vytipované udalosti. Najčastejšie sa jedná o udalosti ako zapnutie/vypnutie otáčania vrtule, náhleho sadnutia vrchného dielca alebo udalosť s vysokou rýchlosťou vetra. Celkovo bolo vypracovaných a analyzovaných 17 eventov.

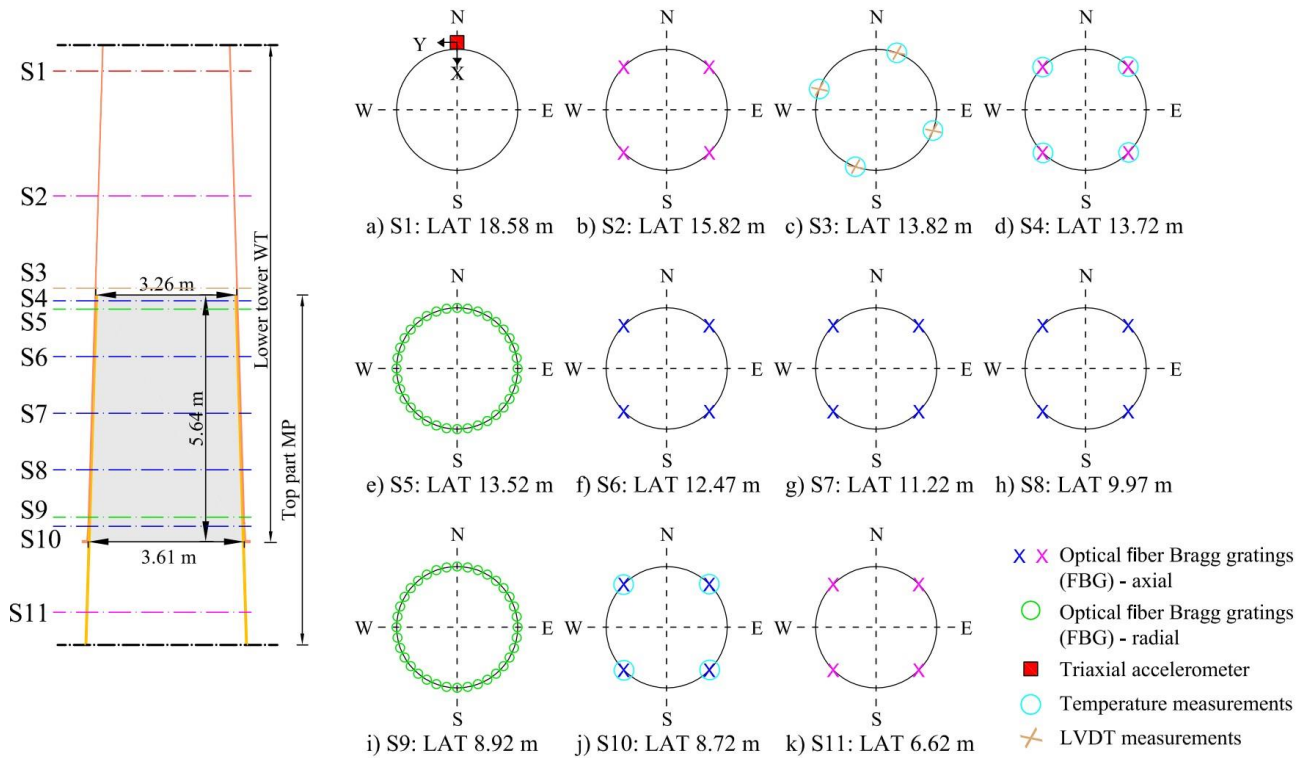
Obrázok 1 zobrazuje geometriu veternej turbíny. Celková výška veternej turbíny je približne 92 m. Hrúbka steny prierezu sa s pribúdajúcou výškou znižuje zo 65 mm na 10 mm. V mieste nasúvaného spoja v spodnom dielci (monopile) je hrúbka steny 40 mm a vo vrchnom dielci (lower tower) je hrúbka steny 15 mm.



Obrázok 1 Geometria veternej turbíny. Na ľavej strane transport vrchného dielca. [07], [08]

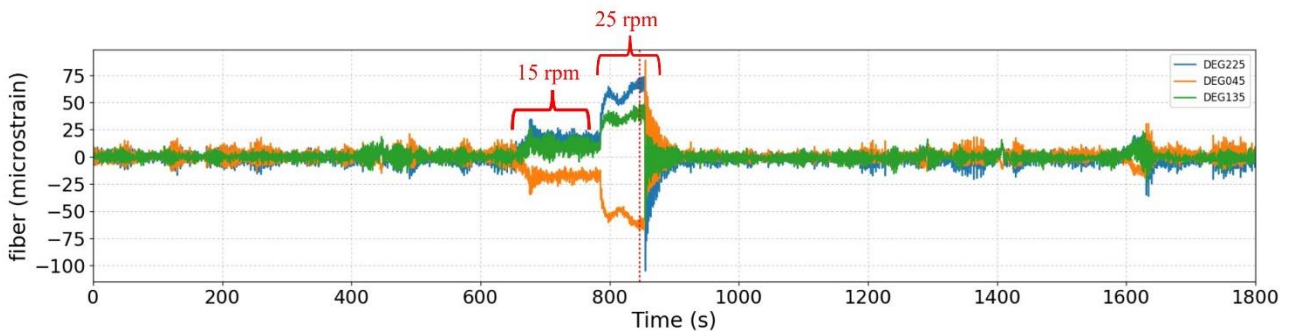
Obrázok 2 prezentuje použité typy a polohy meracích senzorov. V ďalšej časti príspevku sú použité výsledky z axiálnych senzorov (tenzometrov) a to konkrétne polohy S2, S4, S6, S7, S8, S10 a S11. Číslo za označeným LAT definuje polohu senzorov nad úrovňou hladiny mora. V horizontálnej polohe sú senzory odklonené od severného smeru (ďalej azimuty) o 45°, 135°, 225° a 315°. Sensory sú umiestnené na vonkajšej strane horného dielca a na vnútornej strane spodného dielca nasúvaného spoja (oproti sebe v totožnej výške).

V príspevku budú analyzované eventy 15 a 17 vid'. Obrázok 3 a Obrázok 4. Tieto eventy zaznamenávajú spustenie a zastavenie otáčania turbíny (rpm = počet otočení za minútu).

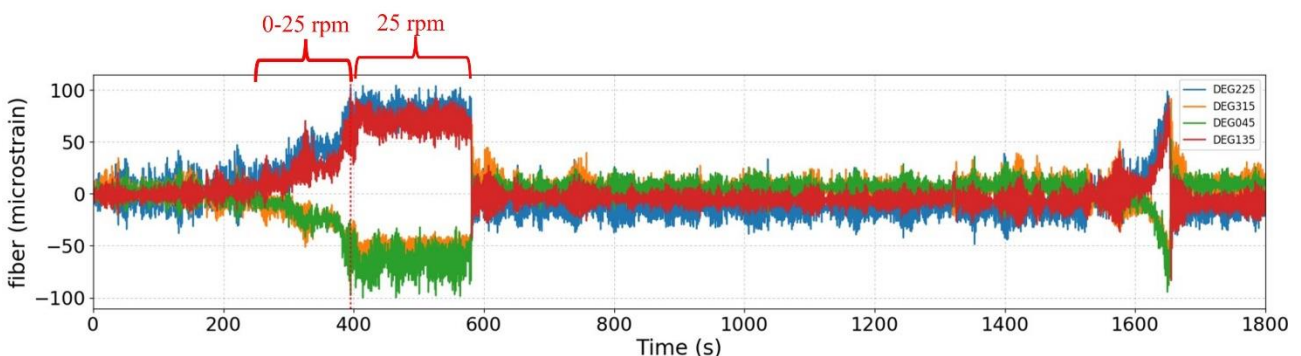


Obrázok 2 Typy a poloha senzorov. [08]

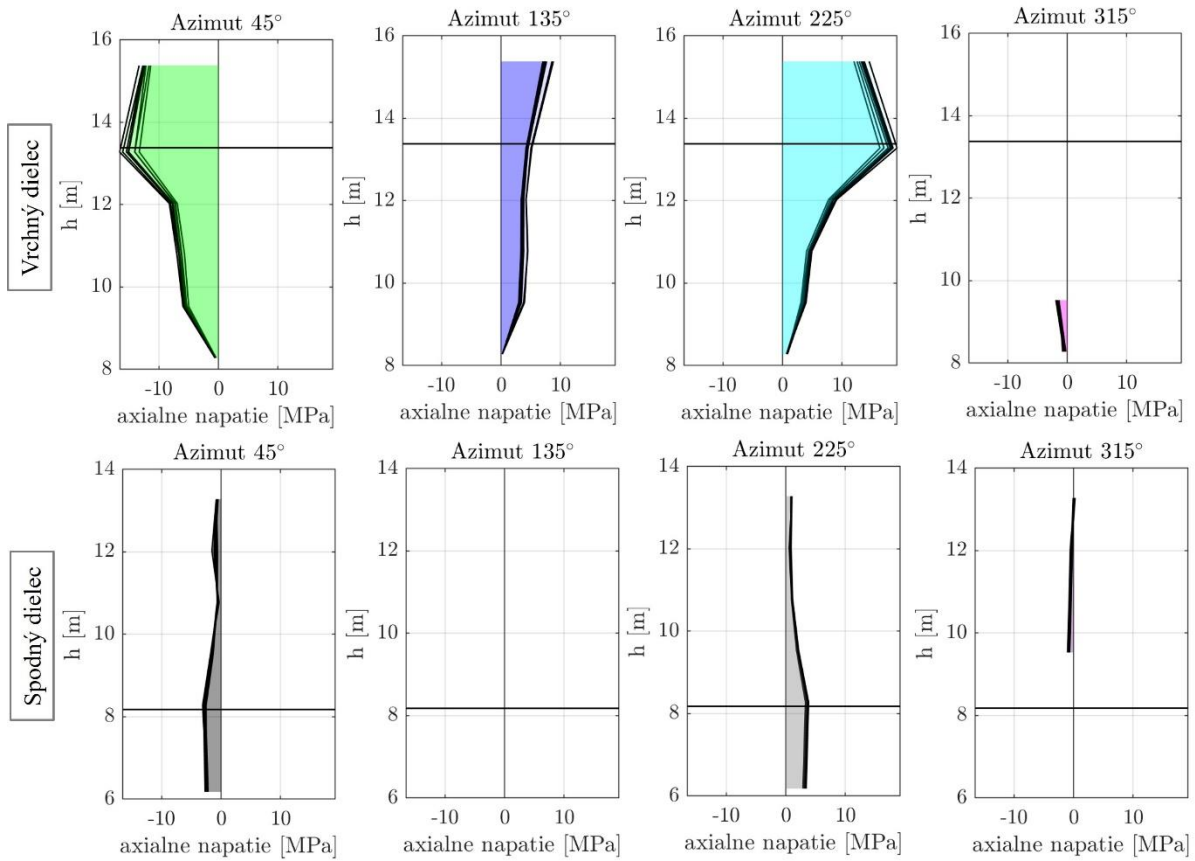
Vyhodnotené údaje pre event 15 a event 17 je možné vidieť na Obrázok 5 a Obrázok 6, kde je zobrazené merané axiálne napätie k výške „h“ nad hladinou mora. Zobrazené krivky v rámci jedného azimutu predstavujú vybraných 8 časových bodov v intervale ustáleného maximálneho otáčania turbíny. V niektorých bodoch sú dáta nedostupné, v týchto prípadoch došlo k chybným meraniam.



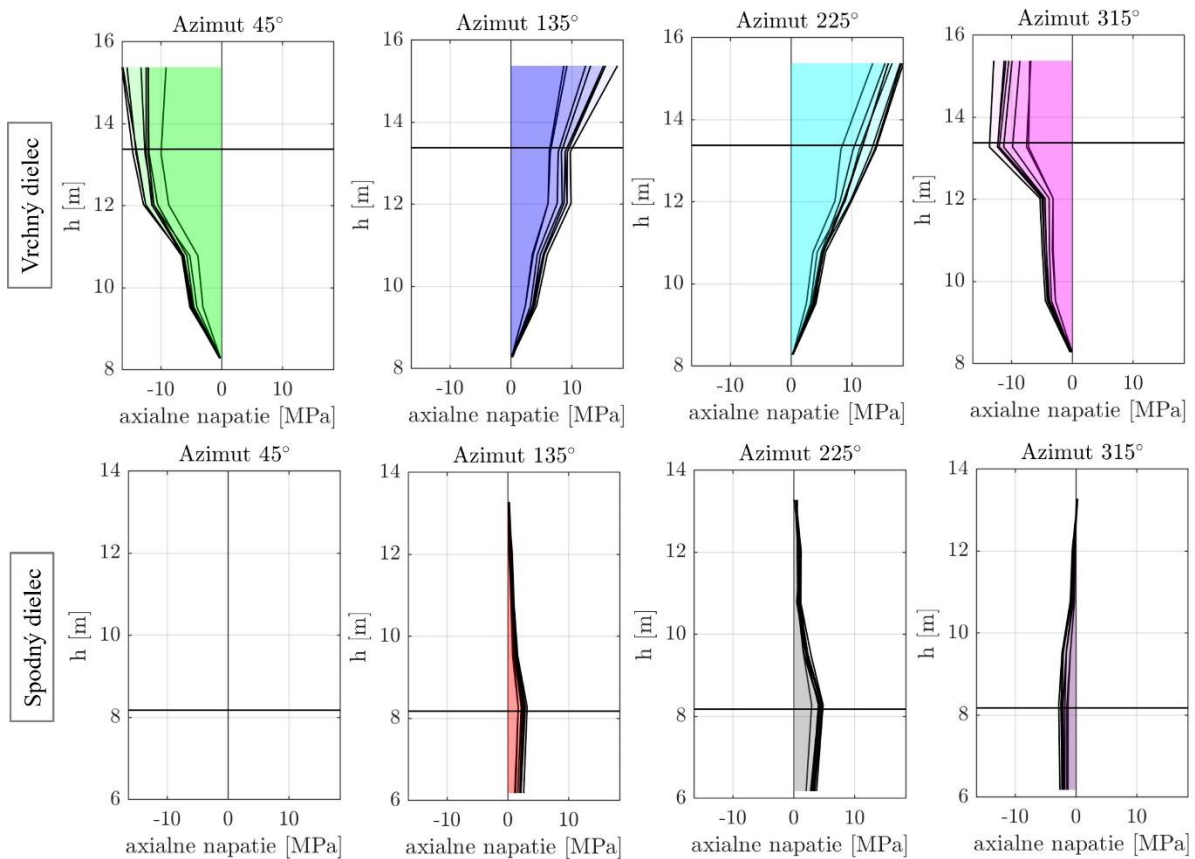
Obrázok 3 Priebeh vybraných axiálnych napätí počas eventu 15. [8]



Obrázok 4 Priebeh vybraných axiálnych napätí počas eventu 17. [8]



Obrázok 5 Axiálne napätie v rámci eventu 15 (časové body od 800s do 950s).

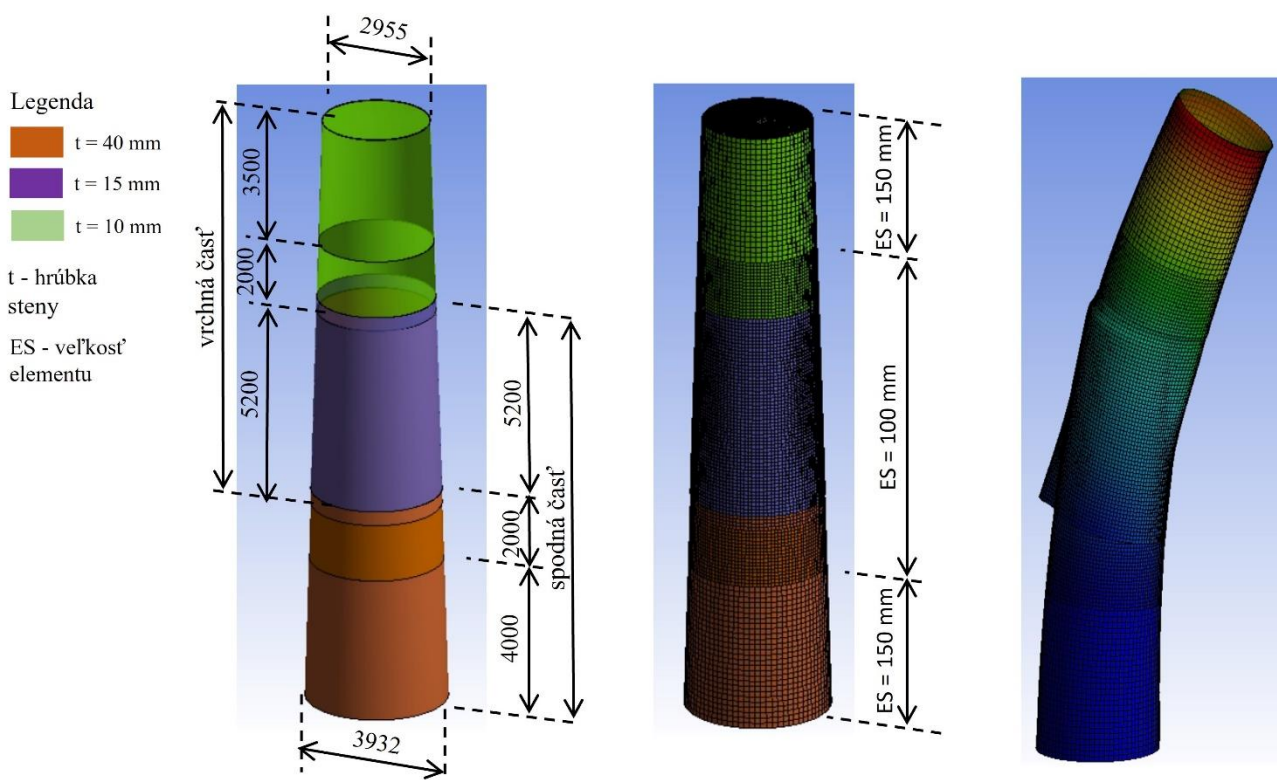


Obrázok 6 Axiálne napätie v rámci eventu 17 (časové body od 400s do 600s).

4. MKP model

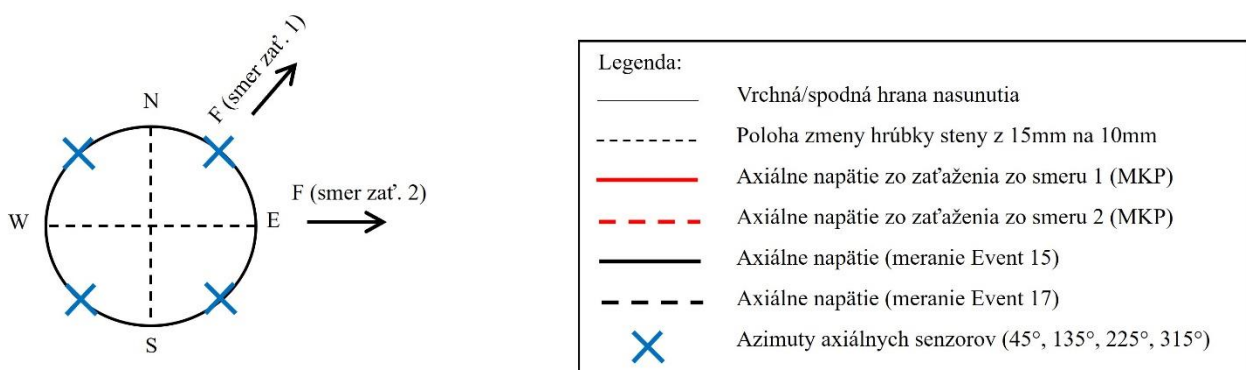
MKP model je vypracovaný v softvare ANSYS 2019 [09] vid'. Obrázok 7. Vo výpočte bol použitý segment veternej turbíny obsahujúci nasúvaný spoj s dostatočne dlhým spodným a vrchným dielcom tak aby roznesenie vnútorných síl do rovnomerného stavu neovplyvňovalo nasúvaný spoj.

Výpočet bol vykonaný statickou analýzou pomocou iteračného riešenia s numerickou nesymetrickou Newton-Raphsonovou metódou. V modeli boli použité kvadratické 3D elementy SOLID 186 a kontaktné elementy CONTA 174 s veľkosťou siete vid'. Obrázok 7. Kontakt medzi vrchnou a spodnou časťou je nastavený ako trecí so statickým súčiniteľom trenia 0,3 a s kontaktným algoritmom Augmented Lagrange. Použité telesá (vrchná a spodná časť) sú uvažované ako flexibilné.



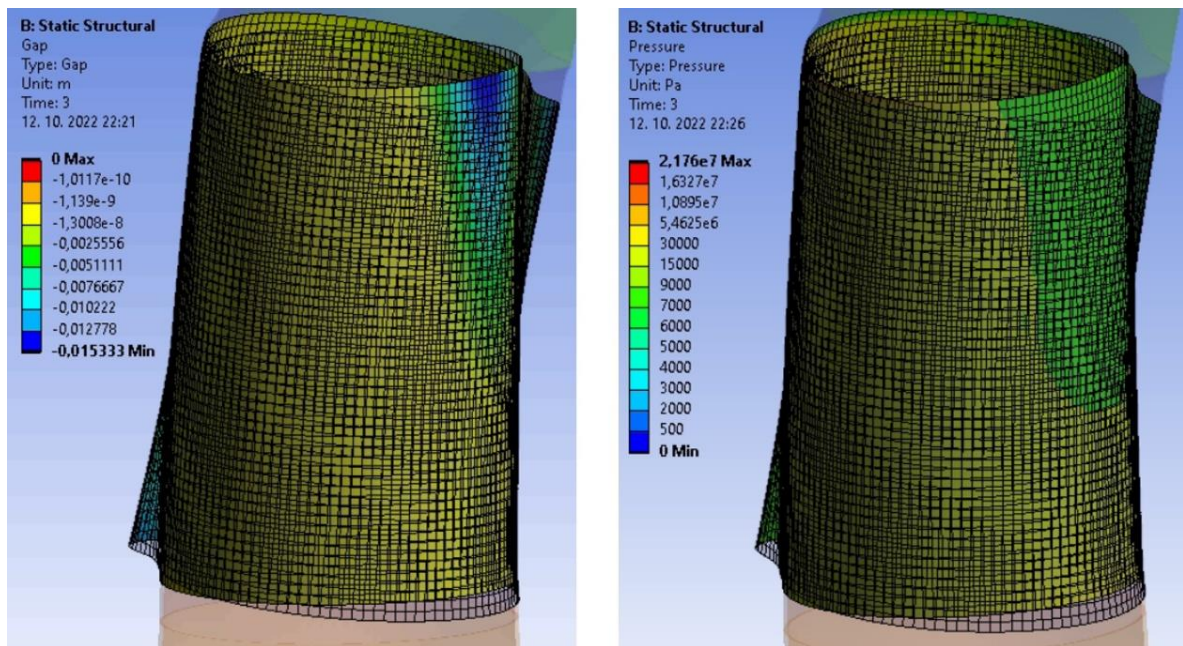
Obrázok 7 Geometria MKP modelu. Na pravej strane príklad deformácie od horizontálnej sily.

V rámci meracej kampane nie je jednoznačné z akého smeru zaťaženie pôsobí. Z tohto dôvodu v MKP modeli boli zvolené dva smery zaťaženia vid' Obrázok 8. Jeden v smere dvoch senzorov a kolmo na ďalšie dva senzory a druhý medzi senzormi.



Obrázok 8 Smery zaťaženia v MKP modeli a použitá legenda.

Obrázok 9 zobrazuje kontakt v stave pôsobiacej sily. Podľa predpokladov dochádza na jednej strane k otvoreniu spoja a na druhej strane zatvoreniu spoja (kontaktného tlaku).



Obrázok 9 Kontakt medzi vrchnou a spodnou časťou pri pôsobení zaťaženia v MKP modeli. Na ľavej strane je zobrazená medzera. Na pravej strane je zobrazené kontaktné napätie.

5. Porovnanie výsledkov

Obrázok 10 zobrazuje porovnanie medzi meranými axiálnymi napätiami a hodnotami z MKP modelu. Prezentované hodnoty sú normalizované na maximálnu hodnotu zo všetkých azimutov. Legenda k jednotlivým krivkám je zobrazená na Obrázok 8 na pravej strane. Zobrazené merané axiálne napätia (čierne krivky) sú priemernou hodnotou z prezentovaných napätí pre event 15 a 17, ktoré sú zobrazené na Obrázok 5 a Obrázok 6.

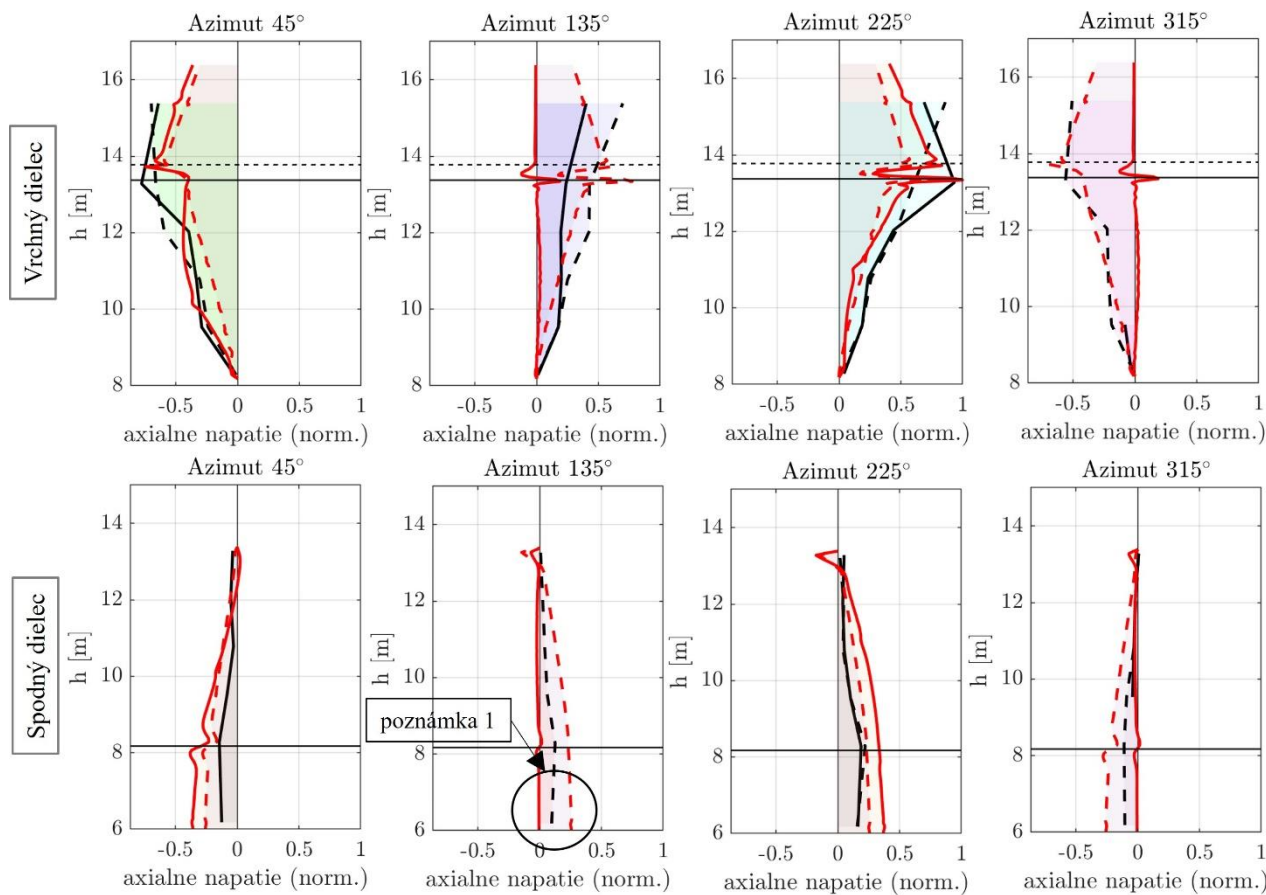
Je možné konštatovať, že merané hodnoty sú podobnejšie k výsledkom zo smeru zaťaženia 2 a teda je možné predpokladať, že ohybový moment pôsobí približne v strede medzi senzormi.

Možno konštatovať, že MKP model ako aj merané dáta ukazuje očakávané výsledky. Axiálne napätia sa postupne prenášajú z vrchného dielca (max. vo vrchnej polohe) do spodného dielca (max. v spodnej polohe).

Je možné konštatovať, že trend medzi výsledkami z MKP modelu a meranými hodnotami je značne podobný.

6. Diskusia

V prvej časti príspevku boli prezentované merané údaje vid' Obrázok 5 a Obrázok 6. Určitá nezrovnalosť medzi vybranými eventami je na vrchnom dielci vo vrchnej polohe. Tento rozdiel môže byť spôsobený buď čiastočným rozdielnym smerom zaťaženia (vrtuľa sa neotáčala v úplne totožnom smere v jednotlivých eventoch) alebo aj vplyvom dodatočného sadnutia vrchného dielca (15 mm), ktoré nastalo medzi eventom 15 (začiatok meracej kampane) a eventom 17 (koniec meracej kampane).



Obrázok 10 Porovnanie medzi MKP modelom (červené krivky) a meranými hodnotami (čierne krivky).

V rámci MKP výsledkov, vid'. Obrázok 10 červené krivky, je zaujímavý stav v hornej polohe vrchného dielca. Je možné sledovať, že hlavne v ťahanej časti (v oblasti kontaktu) dochádza k výraznej zmene napätia. Tento jav je spôsobený kontaktom, ktorý vytvára lokálny ohybový moment. V tlačenej časti k takémuto javu nedochádza. Je taktiež dôležité povedať, že približne 0,4 m nad hornou hranou nasúvaného spoja (Obrázok 10 čiarkovaná vodorovná čiara) dochádza k zmene hrúbky steny prierezu z 15 mm na 10 mm. Táto zmena taktiež vyvolávala určité lokálne napätie, ktoré sa prejavuje vo výsledkoch. Avšak to nie je vplyv nasúvaného spoja. Podľa predpokladu sa taktiež správajú axiálne napätia v orientácii 135° a 315°, ktoré vykazujú takmer nulové napätia. Iba v krátkych zónach pri hranách nasúvaného spoja dochádza ku kontaktu a teda z neho plynúceho lokálneho ohybového momentu.

Obrázok 10 taktiež prezentuje porovnanie výsledkov medzi meranými hodnotami a MKP modelom. Najväčšia nezrovnalosť je na spodnom dielci v spodnej časti (vid'. Obrázok 10 poznámka 1). V tomto prípade sú dáta z MKP modelu výrazne vyššie ako namerané hodnoty. Tento jav môže byť spôsobený tým, že v MKP modeli nebolo prispôsobované rameno pôsobiacej sily. Veľkosť vybraného segmentu bola volená čo najmenšia možná z dôvodu rýchlosti výpočtu. V prípade ak by sa zaťaženie (pôsobiacia sila) umiestnila do inej výškovej úrovne tak by bol získaný iný pomer ohybovým momentom medzi vrchnou a spodnou časťou nasúvaného spoja. Keďže dáta sú normalizované na maximálnu hodnotu, ktorá je vo vrchnej časti, tak pri zachovaní rovnakej hodnoty vo vrchnej časti by sa pri zmene pomeru zmenili iba hodnoty v spodnej časti. V ďalšej práci sa navrhuje, aby sa ohybový moment vypočítal z axiálnych napätí zo senzorov S2 a S11 (mimo nasúvaný spoj) a následne sa použila sila na takom ramene, ktorá vyvolá vypočítané ohybové momenty v mieste S2 a S11.

V rámci porovnania výsledkov je ešte nutné poznamenať, že na základe MKP výsledkov dochádza v extrémnych hodnotách k náhlej zmene napätia (horný dielec horná časť). V meraní je v tejto oblasti iba jeden senzor. Z toho vyplýva, že daný senzor môže vykazovať vysokú citlivosť aj na malé zmeny.

7. Záver

Z prezentovaných výsledkov je možné konštatovať, že MKP model dokáže v značnej miere kopírovať merané axiálne napätia. Možno taktiež povedať, že priebeh axiálnych napätí splnil predpoklad a to, že napätie postupne prechádza z vrchného dielca do spodného. Maximálne hodnoty sú v rámci vrchného dielca na vrchnej časti a v rámci spodného dielca na spodnej časti.

Pod'akovanie

Tento príspevok bol podporený Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky v programe VEGA Nr. 1/0397/22.

Literatúra

[1] RECKÝ, J.: Teoretické a konštrukčné problémy ocelových stožiarov. *Dizertačná práca 2012*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Evidenčné číslo SvF-10935-4286.

[2] BOTLÓ, M.: Nasúvané spoje ohraňovaných stožiarov. *Dizertačná práca 2017*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, s. 40-44. Evidenčné číslo SvF-13420-50559.

[3] BRODNIANSKY, J. – BRODNIANSKY(Prof.), J. – KLAS, T. – MAGURA, M. - RECKÝ, J.: Laboratórna skúška nasúvaného spoja na 8-hrannej rúre. V: 44. *Aktív pracovníkov odboru ocelových konštrukcií*. Košice : TU Košice SvF, 2019. s. 15-22. ISBN 978-80-553-3388-5.

[4] MOJTO M., Parameter of overlap length on slip joint connection. In: Juniorstav 2021, Brno, 2021. p. 255-261. ISBN 978-80-86433-75-2

[5] MOJTO M. - BRODNIANSKÝ J. BRODNIANSKÝ J. – RECKÝ J. & TILINGER M.: Modelling and experimental tests of spatial structure focused on slip joints. The 7th International Conference on Spatial Structures and the Annual Symposium of the IASS. Surrey 2020/21. ISBN 978-1-7399393-1-1

[6] KAMPHUIS T., Design, testing and verification of the DOT500 slip joint support structure, *Master thesis*, Delft University of Technology (2016) Available on <http://resolver.tudelft.nl/uuid:22375c41-8627-4509-bf94-5da3559d1002>

[7] CABBOI A. - KAMPHUIS T. - van VELDHUIZEN E. - SEGEREN M and HENDRIKSE H.: Vibration-assisted decommissioning of a slip joint: Application to an offshore wind turbine. *Marine Structures* 76(2021) 102931, (2021)

[8] CABBOI A. and HENDRIKSE H.: Slip-joint Finite Element Model Development and Validation. *Report*. Delft: Delft University of Technology. 2019

[9] ANSYS 2019 R3 (2019), <http://www.ansys.com>

[10] MATLAB R2022a, <http://www.mathworks.com>

Adrián Ondák¹ – tituly a adresa do poznámky pod čiarou

Študijný program: D-TKeIS4 teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 3

VPLYV MNOŽSTVA RECYKLOVANÉHO BETÓNOVÉHO KAMENIVA NA DLHODOBÉ VLASTNOSTI PRVKOV Z RECYKLOVANÉHO BETÓNU

THE EFFECT OF AMOUNT OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE ON THE LONG-TERM PROPERTIES OF OF RECYCLED CONCRETE MEMBERS

Abstract

Concrete is the most used building material in the world. Its success lies in its versatility and availability, as it is essentially a local material. At present, however, the existence of concrete will be achieved first by the challenge of its arrival, which is its sustainability for the next generations, in connection with the growing population. With the passage of time, there is an increasing deficit of non-renewable resources. It is because of this that most informed people agree with the transition from a linear to a circular economy. Of course, concrete must keep pace with this significant paradigm shift. The time has come for concrete to literally recycle. This paper will deal with the components of recycled concrete and the design of an experiment focused on the long-term properties of structures made of recycled concrete.

Kľúčové slová / Key Words

Recyklovaný betón, recyklované kamenivo, mechanické vlastnosti recyklovaného betónu / recycled concrete, recycled aggregate, mechanical properties of recycled concrete

1. Úvod

Betón je najpoužívateľnejším stavebným materiálom na svete. Jeho úspech spočíva v jeho všestrannosti a dostupnosti, keďže ide v podstate o miestny materiál. V súčasnosti však existencia betónu čelí najťažšej výzve od svojho objavenia, ktorá spočíva v jeho udržateľnosti pre ďalšie generácie, v súvislosti narastajúcou populáciou, ktorá sa už dnes blíži k 10 mld. obyvateľov.



a)



b)

Obrázok 1: a) Green Corner Varšava – vysoko udržateľný admin. objekt (ŽB Skelet);
b) Prístavba technickej Univerzity Nowej Kresliarnie Varšava (ŽB skelet)

¹ Ing. Adrián Ondák, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

S postupom času začína byť čoraz väčší deficit po neobnoviteľných zdrojoch. Práve kvôli tomu väčšina informovaných ľudí súhlasí s prechodom z lineárneho na obehové (cirkulárne) hospodárstvo. Betón samozrejme túto významnú zmenu paradigmy nemôže vynechať.



a)



b)

Obrázok 2: a) Miznutie pohorí, vznik štrkovísk a narušenie fauny a flóry z dôvodu ťažby;
b) Skládka minerálneho konštrukčného a demolačného odpadu

2. Stavebný odpad z demolácií

Betónové konštrukcie sa vyznačujú dlhou životnosťou a trvanlivosťou. Aj napriek tomu je potrebné ich niekedy odstrániť z dôvodu straty funkčnosti, za účelom uvoľnenia miesta stavbám s novým využitím alebo z dôvodu nadmerných porúch, ktoré nie je možné sanovať, prípadne je sanácia príliš nákladná.



a)



b)

Obrázok 3: a) Schátralý objekt varne piva Poper, Bytča – čiastočná sanácia; b) Schátralý objekt depa autobusov v Trnávke, Bratislava – čiastočná sanácia

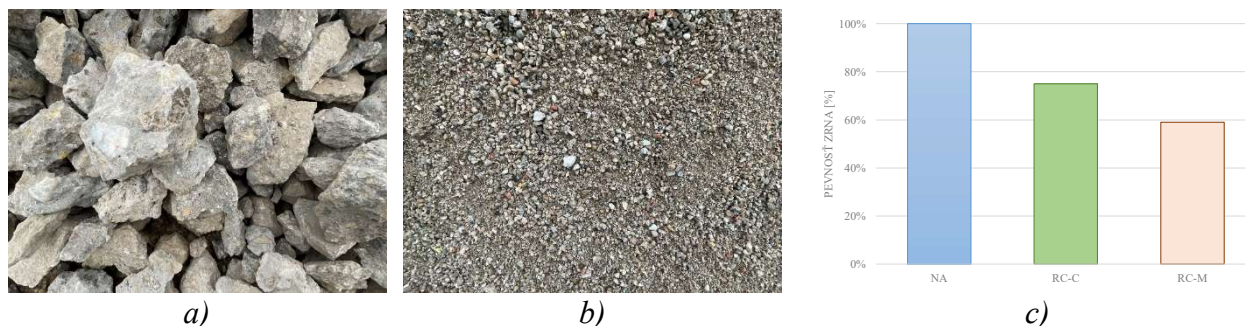
3. Zložky recyklovaného betónu (RC)

3.1 Recyklované kamenivo (RA)

Recyklovaný betón RAC (recycled aggregate concrete) alebo RC (recycled concrete) je spoločné pomenovanie pre betóny, ktoré využívajú recyklované kamenivo (recycled aggregate – RA) vyrobené čiastočným alebo úplným drvením odpadového betónu a jeho následným triedením.

RA značí kamenivo s priemerom menším ako 40mm, vyrobené drvením odpadového betónu. Pokiaľ je veľkosť zrna drveného kameniva v rozmedzí 0,5 mm do 4,75 mm; hovoríme o jemne recyklovanom kamenive s označením RFA (recycled fine aggregate). V prípade, že je veľkosť zrna drveného kameniva veľkosti 4,75 mm až 40 mm, takto recyklované kamenivo sa označuje ako RCA

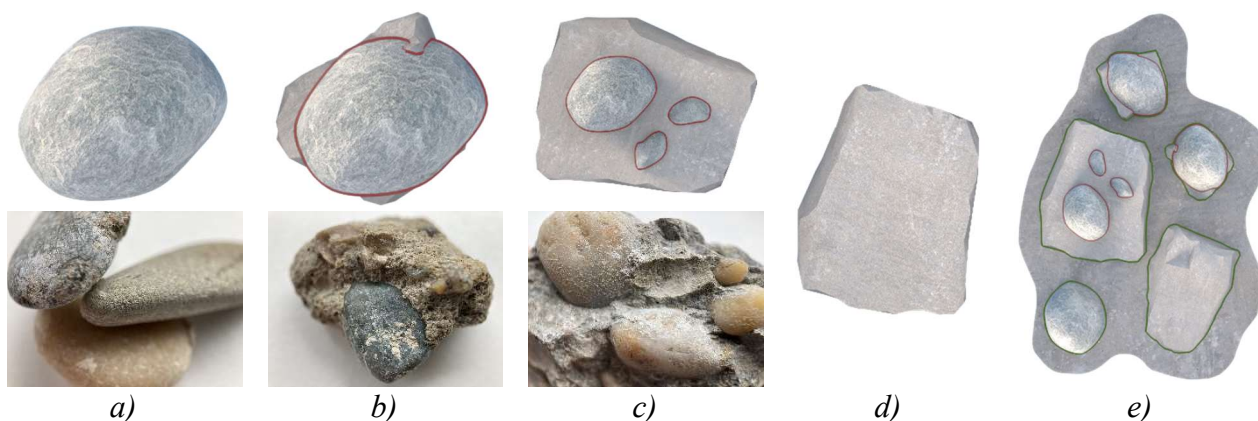
(recycled coarse aggregate) – hrubo recyklované kamenivo. Štandardné prírodné kamenivo používa značenia NFA (natural fine aggregate) a NCA (natural coarse aggregate) na základe veľkosti zŕn kameniva.



Obrázok 4: a) Recyklované kamenivo frakcia > 40mm; b) Recyklované kamenivo frakcia ≤ 16mm; c) Porovnanie pevností kamenív [1]

3.2 Cement v RC

V prípade RC sa bude v novo-vytvorenom betóne nachádzať jednak novo-použitý cement, no v rámci výsledného betónu, sa v ňom môže nachádzať aj pôvodný cement inej triedy. Pôvodné cementy sú tvorené zosťatkami po recyklácii pôvodných betónov a ich premiešaním na skladovacích priestoroch v betonárni. Prítomnosť pôvodných cementov v betóne bude mať vplyv na výslednú pevnosť novo vytvoreného betónu, nakoľko nevieme s istotou určiť presné zloženie pôvodného cementu.

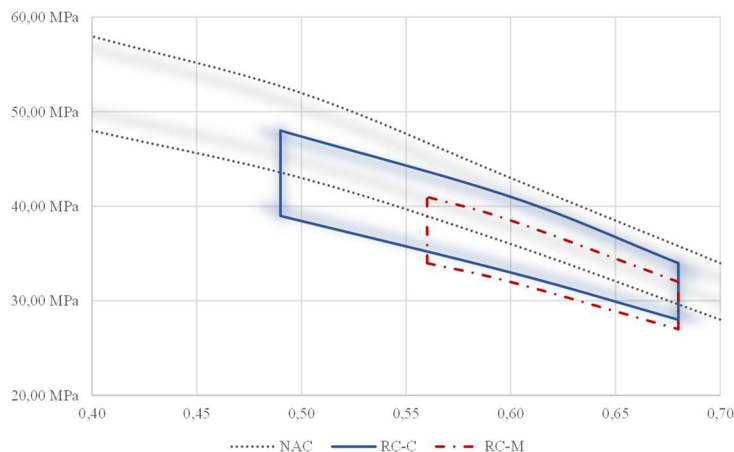


Obrázok 5: a) NA (natural aggregate) vylúpené zo štruktúry materského betónu po procese drvenia; b) NA čiastočne pokryté zvyškami cem. tmelu materského betónu po procese drvenia; c) Zhluk NA spojený reziduálnym cem. tmelom po procese drvenia; d) RA (recycled aggregate) tvorené iba cem. tmelom materského betónu; e) RA v štruktúre RC, vznik novej ITZ (interfacial transition zone) na rozhraní RA a nového cementového tmelu (zelené obrisy) a pôvodná ITZ zo štruktúry materského betónu (červené obrisy)

3.3 Voda a vodné súčinitele w/c

Množstvo zámesovej vody v RC veľkým podielom ovplyvňuje výslednú pevnosť RC. Pre RC sa predpokladá s použitím vyššieho vodného súčiniteľa w/c z dôvodu väčšej nasiakavosti a väčšej pórovitosti na ITZ vrstve RA kameniva.

Podobne ako pri NC aj pri RC platí, že s narastajúcim vodným súčiniteľom w/c klesá jeho pevnosť v tlaku. V dostupnej literatúre [2] sa uvádza, že pri zvyšujúcom sa vodnom súčiniteli w/c sa pevnosť v tlaku RC-C50% najskôr zvyšuje, následne však s narastajúcim w/c klesá. U ostatných RC pevnosť v tlaku klesá lineárne so zvyšujúcim sa vodným súčiniteľom.



Graf 2: Pevnosť betónov v tlaku vzhľadom na použitý vodný súčiniteľ w/c a typ kameniva, kde NAC – natural aggregate concrete; RC-C – recycled concrete with concrete coarse aggregate; RC-M – recycled concrete with masonry coarse aggregate [1]

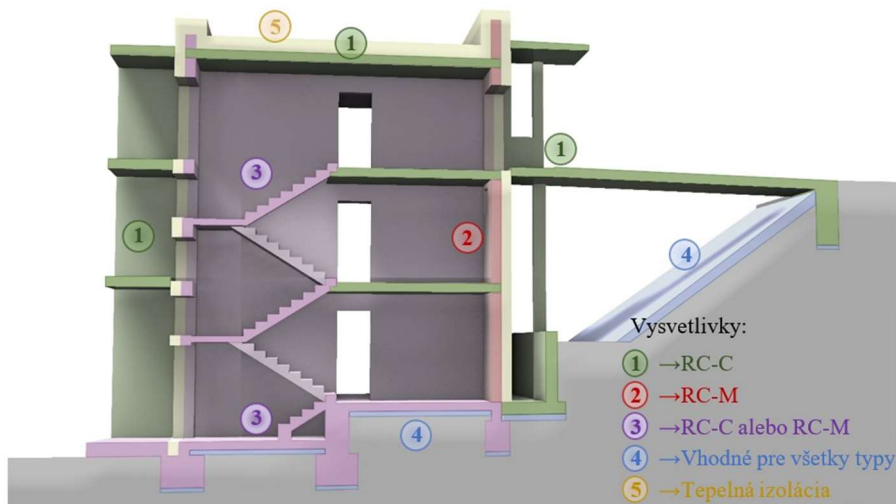
3.4 Návrh zloženia a použiteľnosť

Návrh zloženia RC (recycled concrete) by mal byť prispôbený požiadavkám kladeným na kvalitu RC počas zhotovenia a užívania konštrukcie z neho zhotovenej tak, ako to je pri NC (natural concrete). Požiadavky by mali byť zamerané na všetky parametre RC. Na Slovensku zatiaľ neexistuje žiadny predpis, podľa ktorého sa riadiť pri návrhu zloženia RC. Dostupná je však zahraničná literatúra, ktorá zahŕňa návrh zloženia RC pre jednotlivé expozičné triedy.

Tabuľka 1: Vhodnosť použitia RC na základe expozičných tried [1]

Recyklovaný betón		Expozičné triedy				
Ozn.	Hmotn. podiely	X0	XC1 suché	XC1 mokré, XC2, XC3	XC4	XD, XF, XA
RC-C	$R_c \geq 25\%$ $R_b < 5\%$	Dovolené použiť				••
RC-M	$5\% \leq R_b \leq 25\%$ $R_c + R_b \geq 25\%$	Dovolené použiť			••	Nevhodné
	$R_b > 25\%$	Dovolené použiť	••			

•• Povolené len po preukázaní vlastností príslušnými predbežnými skúškami !!!



Obrázok 6: Vhodnosť použitia RC v nosných konštrukciách [1]

4. Návrh experimentu a ciele práce

4.1 Návrh receptúry RC-C_{50%}

Tabuľka 2: Receptúra RC-C_{50%} zvolená na základe odporúčani Švajčiarskej príručky [1]

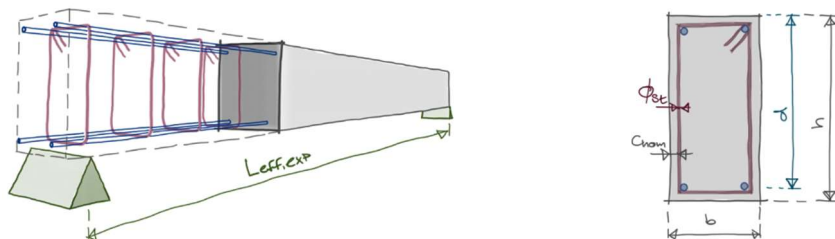
		Hustota	Podiel	Dávkovanie	Objem
Cement	CEM II/B-M	3,03 kg/dm ³	-	330 kg/m ³	109 l/m ³
	Piesok 0/4	2,68 kg/dm ³	38%	731 kg/m ³	273 l/m ³
Kamenivo	Štrk 4/8	2,68 kg/dm ³	7%	135 kg/m ³	50 l/m ³
	Štrk 8/16	2,68 kg/dm ³	5%	96 kg/m ³	36 l/m ³
	Štrk 16/32	2,68 kg/dm ³	0%	0 kg/m ³	0 l/m ³
	R _c 8/16	2,55 kg/dm ³	50%	916 kg/m ³	359 l/m ³
Voda		1,00 kg/dm ³	-	158 kg/m ³	158 l/m ³
Vzduch			-	-	15 l/m ³
Prísady a prímеси (superplastifikátory)			podľa potreby – napríklad 1-1,5%		
Odhad hustoty čerstvého betónu				2366 kg/m ³	
Vodný súčiniteľ w/c				0,48	
Odhadovaná pevnosť betónu v tlaku				40 MPa	
Odhadovaný modul pružnosti betónu				30 000 MPa	

4.2 Geometria vzoriek, statická schéma a zaťažovacia zostava

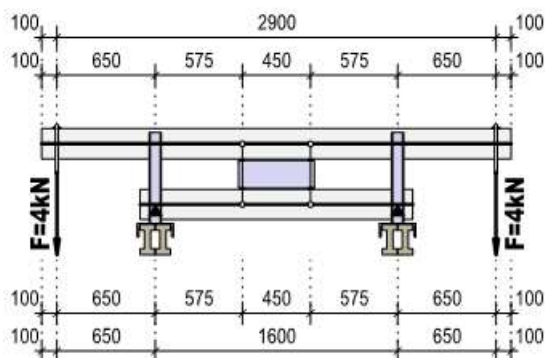
Geometria vzoriek bola definovaná na základe empirických vzťahov podľa zvolenej statickej schémy v mierke 1:2.

Tabuľka 3: Návrh geometrie vzoriek

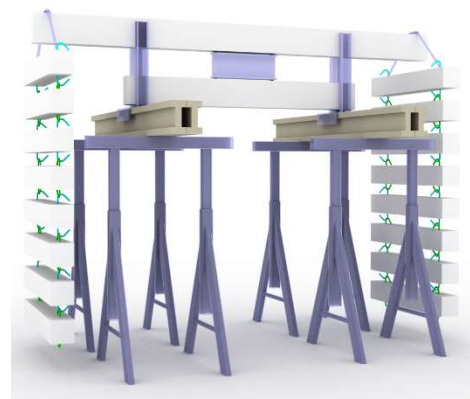
L_{eff}	$L_{eff,exp}=0,5 * L_{eff}$	$d = \frac{1}{18} * L_{eff,exp}$	$h = d + \Phi_{st} + c_{nom}$	$b=0,5 * h$
6200 mm	3100 mm	174 mm	200 mm	100 mm



Obrázok 7: Schéma efektívnej dĺžky uloženia prostých nosníkov a priečného rezu vzoriek



Obrázok 8: Statická schéma vzoriek



Obrázok 9: Návrh zaťažovacej zostavy

4.3 Ohybová a šmyková únosnosť prostých nosníkov

Do vzoriek bola navrhnutá pozdĺžna výstuž ako 2x2Ø10mm a priečna výstuž ako Ø6/125mm.

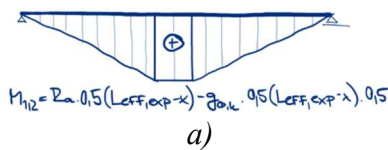
• OHYBOVÁ ODOLNOSŤ

$$x_b = \frac{A_{sc} \cdot f_{yk}}{b \cdot f_{ctd}} = 19,6 \text{ mm} < x_{b,lim} = \frac{580 \cdot d}{700 + f_{yk}} = 77,9 \text{ mm}$$

$$M_{Rk} = x_b \cdot b \cdot f_{ctd} \cdot (d - 0,5 \cdot x_b) = 12,35 \text{ kNm}$$

$$M_{Rk} = \left[\frac{0,5 \cdot g_{0k} \cdot L_{eff,exp} + F_i}{1,05 + 1,4 F_i - 0,25} \right] \cdot g_{0k} \cdot 0,25 (L_{eff,exp} \cdot \lambda)$$

$$F_i = 8,296 \text{ kN} \rightarrow 2 \cdot F_i = 16,593 \text{ kN} \rightarrow 16,971,4 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$



• ŠMYKOVÁ ODOLNOSŤ

$$\gamma_1 = 0,16 \left(1 - \frac{f_{ctd}}{250} \right) = 0,5232 ; i_{cw} = 1,0 ; \theta = 40^\circ ; d = 90^\circ$$

$$V_{Rk,max} = i_{cw} \cdot z \cdot b \cdot \gamma_1 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{\cotg \theta + \cotg \alpha}{1 + \cotg^2 \theta} = 125,39 \text{ kN}$$

→ VEDIALEĽNOSŤ STREMEŇOV PODĽA KOH. ZÁSAAD:
 $s_{max} = \min(0,75 \cdot d, 400 \text{ mm}) = 125 \text{ mm}$

$$V_{Rk,smax} = f_{yk} \cdot \frac{A_{sv}}{s_{max}} \cdot z \cdot \cotg \theta = 40,44 \text{ kN}$$

$$b \cdot V_{Rk,smax} = R_{a,i} = R_{b,i} = (g_{0k} \cdot L_{eff,exp} + 2 \cdot F_i) \cdot 0,5$$

$$F_i = 52,18 \text{ kN} \rightarrow 2 \cdot F_i = 104,361 \text{ kN} \rightarrow 10,638,23 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

Obrázok 10: a) Výpočet ohybovej odolnosti; b) Výpočet šmykovej odolnosti

4.4 Priehyb prostých nosníkov

Keďže hlavným cieľom experimentu bude sledovanie dlhodobých vlastností prostých nosníkov z RC-C, boli vypočítané dlhodobé priehyby pre RC s 50% náhradou kameniva (s vplyvom súčiniteľa dotvarovania), zhruba v čase kedy budú vzorky zaťažovacej zostavy zaťažené (35 dní) a v čase kedy bude zaťažovacia zostava rozobraná a následne budú vzorky zaťažované samostatne až do porušenia ohybom (450 dní). Ďalej bol výpočet priehybov rátný rovnakým postupom ako pre obyčajné železobetóny, so silou na medzi vzniku trhlin a silou použitou pri porušení ohybom, aby bolo stanovené rozmedzie, v ktorých by sa mali priehyby z experimentu pohybovať.

Tabuľka 4: Vypočítané priehyby w_{cal} prostého nosníka zaťaženého dvojicou síl v strede rozponu

Doba	Ohybová tuhosť	Sila	Priehyby
35 dní	$(EI)_{l,35} = 597,669 \text{ kN/m}^2$	$F_{l,35} = 3,695 \text{ kN}$	$w_{cal,l,35} = 4,791 \text{ mm}$
35 dní	$(EI)_{r,35} = 411,125 \text{ kN/m}^2$	$F_{r,35} = 16,59 \text{ kN}$	$w_{cal,r,35} = 25,184 \text{ mm}$
450 dní	$(EI)_{l,450} = 426,127 \text{ kN/m}^2$	$F_{l,450} = 3,695 \text{ kN}$	$w_{cal,l,450} = 6,719 \text{ mm}$
450 dní	$(EI)_{r,450} = 356,391 \text{ kN/m}^2$	$F_{r,450} = 16,59 \text{ kN}$	$w_{cal,r,450} = 29,052 \text{ mm}$

$$w_{cal} = \frac{5 \cdot g_{0k} \cdot L_{eff,exp}^4}{384 \cdot (EI)} + \frac{0,5 F \left(\frac{L_{eff,exp} - x}{2} \right)}{24 \cdot (EI)} \left[3 \cdot L_{eff,exp}^2 - 4 \left(\frac{L_{eff,exp} - x}{2} \right)^2 \right]$$

Obrázok 11: Očakávaný priebeh priehybov

Literatúra

[1] Hoffman, C.: Stand von Forschung und Entwicklung in der Schweiz. [Vortrag 9. Schweizer Betonforum]. Würmlingen, Schweiz : 01.07.2015

[2] Xiao, J. (2018). Erratum to: Recycled Aggregate Concrete Structures. In: Recycled Aggregate Concrete Structures. Springer Tracts in Civil Engineering . Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53987-3_16

*Lucia Ondrašínová*¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

UPLATNENIE FAKTORA EKVIVALENTNÉHO POŠKODENIA λ PRI POSÚDENÍ ŽELEZNIČNÝCH MOSTOV NA ÚNAVU

APPLICATION OF THE EQUIVALENT DAMAGE FACTOR λ IN THE FATIGUE ASSESSMENT OF RAILWAY BRIDGES

Abstract

In this paper is mentioning the basic informations about fatigue, which provides a knowledge for understanding of the principle and importance of using the equivalent damage factor in the assessment of fatigue details of railway bridges. In valid European standards, two assessment methods are mentioned. The damaged accumulation method and the method of equivalent stress range at constant amplitude. Both methods have certain advantages and disadvantages. If we want more accurate results for a specific detail, the damage accumulation method is suitable. However, the equivalent damage factor used in the equivalent stress range method is based on Palmgren-Miner's damage accumulation rule. A significant part of this paper deals with the conversion of the equivalent damage factor from standard fatigue trains to the LM 71 load model. The complexity of this factor is underappreciated and there is the possibility of creating a traffic scenarios according to different train load models, not only the 12 standard fatigue train types from the STN EN 1993-2 annex D, is a way to simplify assessments for bridges with similar operational loads.

Kľúčové slová / Key Words

železničné mosty, únava, prevádzkové zaťaženie, faktor ekvivalentného poškodenia

1. Úvod

Pri určovaní zostatkovej únavovej životnosti železničných mostov môžeme používať dve rôzne metódy. Základnou metódou je kumulácia poškodení, kde počítame s tým, že každý rozkmit napätia v priebehu prevádzky mosta vyvolá určité poškodenie úmerné počtu jeho výskytu. Z tejto metódy sa odvodil jednoduchší postup s použitím faktora ekvivalentného poškodenia. Tento faktor bol stanovený na základe mixu fiktívnych vlakových súprav, ktoré majú reprezentovať aj budúcu premávku na moste až po koniec jeho životnosti. Pri jestvujúcich mostoch so zostatkovou životnosťou pár rokov však takúto premávku neočakávame a posudzovať most s faktorom ekvivalentného poškodenia z [1] je rýchlejšie a jednoduchšie ale je tiež neadekvátne a nereprezentuje skutočné poškodenie mosta. V tejto publikácii sa venujem stručným predstavením únavy ocele (pozri lit. [2],[3],[4],[5]) jednotlivých metód dostupných pre posudzovanie únavy (pozri lit. [6],[7]) a popisaniu odvodenia faktora ekvivalentného poškodenia z metódy kumulácie poškodení (pozri lit. [8],[9]).

Únava konštrukčných materiálov je degračný proces nevratných zmien vlastností a stavu materiálu, vyvolaný jeho opakovaným mechanickým, tepelným alebo tepelnomechanickým zaťažovaním. V dôsledku opakovaného kolísania napätia v jednotlivých častiach konštrukcie

¹ Lucia Ondrašínová, Ing. , Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 8102 05 Bratislava

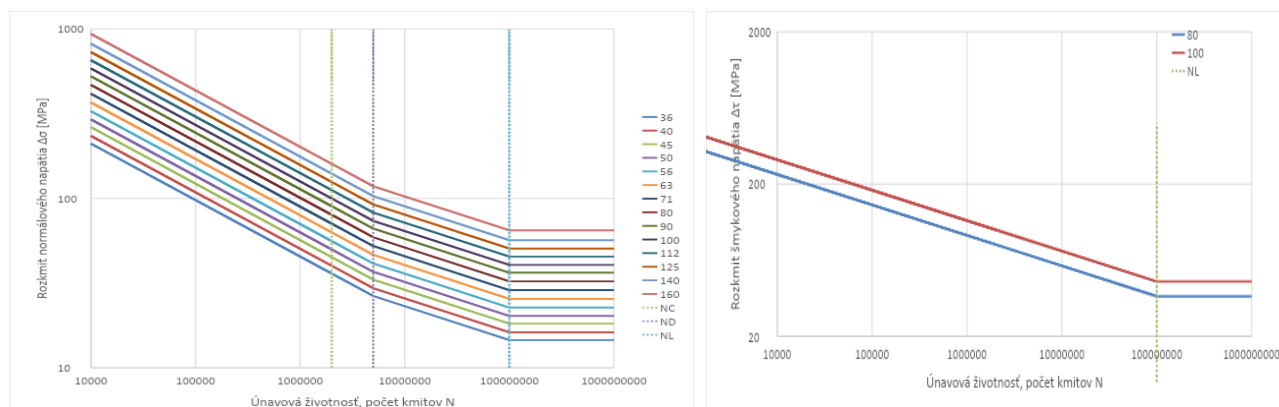
dochádza k iniciácii a šíreniu trhliny. Znamená to, že sa pri premennom namáhaní prvok poruší pri nižších napätiach ako pri jednorazovom namáhaní.

Železničné mosty sú za prevádzky cyklicky zaťažované pohybom vlakových súprav, ktoré vyvolávajú zmenu v histórii napätí počas celej životnosti konštrukcie.

Posúdenie na únavu železničných mostov sa má vykonať pre všetky prvky a časti mosta, ktoré sú zaťažené dopravou alebo sa môžu rozkmitať účinkom vetra a teda sú vystavené zmenám namáhaní.

Krivky únavovej pevnosti

Podľa kategórie detailu ($\Delta\sigma_c$) sa v STN EN 1993-1-9 [10] zadefinovalo 14 kriviek únavovej pevnosti pre normálové napätie a 2 pre šmykové napätie. Tieto krivky vyjadrujú závislosť počtu cyklov N do lomu pri danom rozkmit napätí $\Delta\sigma$.



Obr. 1 Krivky únavovej pevnosti pre normálové napätia (vľavo) a pre šmykové napätia (vpravo)

2. Možnosti posúdenia únavy podľa STN EN 1993-1-9[10], STN EN 1993-2[1]

Pre posúdenie únavy môžeme zaťaženie železničného mosta uvažovať buď ako zjednodušený model prechádzajúceho vlaku LM 71 so 4 nápravovými silami 250 kN a líniovým zaťažením 80kN/m' alebo pre presnejšie stanovenie prevádzkovej dopravy môžeme použiť prevádzkové zaťaženie podľa druhu prevádzky pre konkrétny prípad.

Pri použití zaťažovacieho modelu LM71 predpokladáme, že zmiešaná bežná prevádzka ponúkaná v STN EN 1993-2 príloha D primerane vystihuje reálnu dopravu na moste a nie je potrebná dynamická analýza. Ak je potrebná dynamická analýza alebo chceme posúdiť únavový detail presne podľa predpokladanej, resp. pri určení zostatkovej životnosti mosta reálnej dopravy na moste mali by sa použiť zaťažovacie modely prevádzkových vlakov a metódu kumulácie poškodení.

3. Dynamická analýza pri posudzovaní únavy

V prípadoch, kedy je pre konštrukciu mosta potrebná dynamická analýza sa musia splniť dodatočné podmienky pri posudzovaní mosta na únavu.

Kontrola únavy by mala zahŕňať rozkmit napätí vyvolaných kmitaním prvkov v dôsledku:

- Voľného kmitania od nápravových síl pohybujúcich sa veľkou rýchlosťou
- Dynamického účinku od pohybu osôb alebo zvierat pri rezonancii
- Dodatočných únavových napätí od dynamickej odozvy na zaťaženie dopravou pri rezonancii

Pri overení na únavu sa majú uvažovať série rýchlostí až po maximálnu nominálnu rýchlosť vlaku, pričom ak bežná prevádzková rýchlosť vlaku je blízka rezonančnej rýchlosti musí sa toto únavové namáhanie v dôsledku rezonancie zahrnúť do návrhu.

Dynamické účinky sa teda podľa toho či je alebo nie je potrebná dynamická analýza zahrnú do návrhu nasledovne:

- pri potrebe dynamickej analýzy: $(1+\varphi) \times$ (HSLM alebo RT)
 - bez potreby dynamickej analýzy: $(\phi) \times$ (LM 71)
- kde HSLM je zaťažovací model pre vysokorýchlostné trate
RT je zaťaženie od prevádzkových vlakov
LM 71 je zaťažovací model 71

3.1. Dynamický súčiniteľ ϕ

Pre železničné mosty sa podľa NA uvažuje s hodnotou ϕ_2 , ktorá je stanovená v [11] podľa náhradnej dĺžky L_ϕ . Odporúčané hodnoty L_ϕ nájdeme v tabuľke 6.2.

Dynamický súčiniteľ stanovíme nasledovne:

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\phi - 0,2}} + 0,82 \quad (1)$$

3.2. Dynamický súčiniteľ $1+\varphi$

Aby sa zohľadnil dynamický účinok prejazdu vlakov železničnej prevádzky konštrukciou, musia sa vnútorné sily stanovené zo statického zaťaženia prenásobiť dynamickým súčiniteľom $1+\varphi$.

Pre zohľadnenie priemerného účinku v priebehu 100 rokov životnosti sa pri hodnotení únavy železničných mostov má tento súčiniteľ vypočítať nasledovne:

pričom:

$$1 + \varphi = 1 + 0,5 \cdot (\varphi^I + 0,5 \cdot \varphi^{II}) \quad (2)$$

$$\varphi^I = \frac{K}{1 - K + K^4} \quad (3)$$

$$K = \frac{v}{160} \quad \dots \text{pre } L \leq 20 \text{ m} \quad (4)$$

$$K = \frac{v}{47,16 \cdot L^{0,408}} \quad \dots \text{pre } L > 20 \text{ m} \quad (5)$$

$$\varphi^{II} = 0,56 \cdot e^{-\frac{L^2}{100}} \quad (6)$$

v je maximálna rýchlosť vlaku [m/s]

L náhradná dĺžka L_ϕ [m]

4. Metóda rozkmitu ekvivalentného napätia pri konštantnej amplitúde

Táto metóda sa používa pri mostoch ktorých skutočná prevádzka zodpovedá prevádzkovému mixu, ktorý je definovaná v [1] a taktiež pre tieto mosty nie je potrebná dynamická analýza. Metóda sa zakladaná na výpočte ekvivalentného rozkmitu napätia pomocou faktora ekvivalentného poškodenia λ a všeobecného zaťažovacieho modelu 71 s použitím dynamického súčiniteľa Φ ale bez súčiniteľa klasifikácie zaťaženia α .

Podstatou je splnenie podmienky:

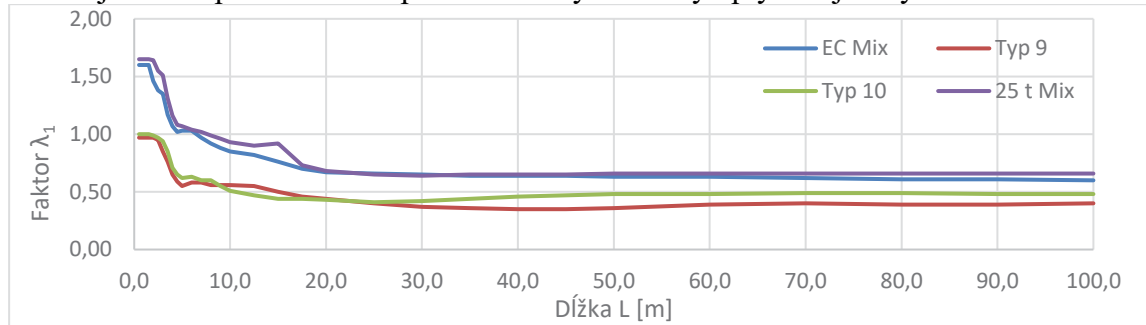
$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E2}}{\Delta\sigma_C} \leq 1 \quad (7)$$

$$\sigma_{E2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_{LM71} \quad (8)$$

kde $\Delta\sigma_{E2}$ je ekvivalentný rozkmit napätí
 Φ_2 dynamický súčiniteľ určený zo vzťahu (1)
 λ faktor ekvivalentného poškodenia určený zo vzťahu (9)
 $\Delta\sigma_{LM71}$ rozkmit napätia vyvolaný prejazdom zaťažovacieho modelu LM71

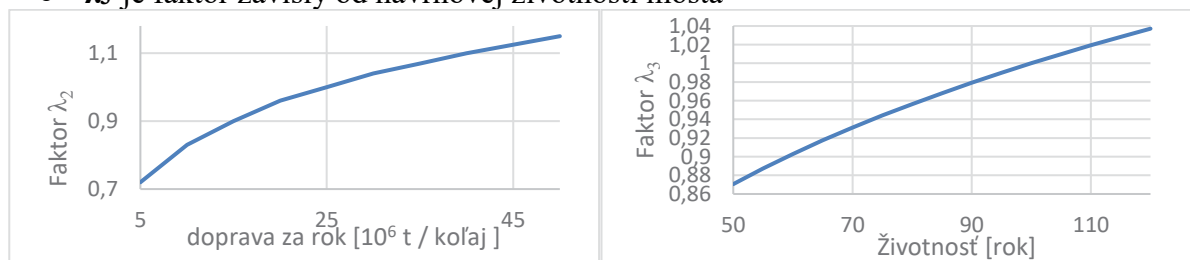
$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \leq \lambda_{max} \quad (9)$$

- λ_1 je faktor poškodenia dopravou závislý od dĺžky vplyvovej čiary



Obr. 2 Pribeh hodnôt faktora λ_1 pre rôzne typy prevádzky od dĺžky L

- λ_2 je faktor vyjadrujúci objem dopravy
- λ_3 je faktor závislý od návrhovej životnosti mosta



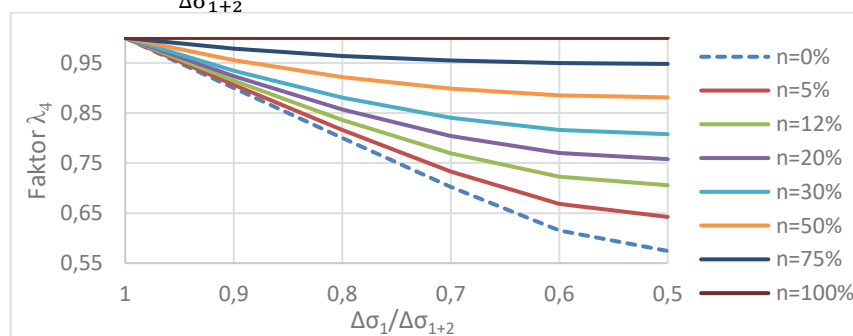
Obr. 3 Závislosť faktora λ_2 od objemu dopravy za rok (vľavo), Faktor λ_3 v závislosti od návrhovej životnosti mosta (vpravo)

- λ_4 je faktor, ktorý vyjadruje namáhanie nosného prvku viac ako jednou koľajou

$$\lambda_4 = \sqrt[5]{n + (1 - n) \cdot (a^5 + (1 - a)^5)} \quad (10)$$

kde n je podiel dopravy stretávajúcej sa na moste [%]
 a je podiel rozkmitu napätia na jednej koľaji ($\Delta\sigma_1$) ku rozkmitu napätia na ktorýchkoľvek dvoch koľajach ($\Delta\sigma_{1+2}$)

$$a = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{1+2}} \quad (11)$$



Obr. 4 Faktor λ_4 pre rôzne podiely stretávajúcej sa dopravy na moste

5. Metóda kumulácie poškodení

V metóde kumulácie poškodení sa počíta s viacerými rozkmitmi napätia $\Delta\sigma_i$ pri ich počte n_i za životnosť konštrukcie. Tieto rozkmity lepšie vystihujú účinok zaťaženia z dopravy na moste pri jeho skutočnej prevádzke, ktorú môžeme vystihnúť rôznymi typmi prevádzkových vlakov, z ktorých každý jeden prejazd mostom vyvolá iné rozkmity, ktoré započítame podľa príslušného počtu cyklov.

V [1] sú rozlíšené 3 kombinačné sledy prevádzok. Tieto kombinácie pozostávajú z 12-tich typov prevádzkových vlakov. Kombinačný sled prevádzkových vlakov s názvom obvyklá prevádzka pozostáva z 8-ich typov vlakov s nápravovými silami 70 kN do 225 kN. Táto prevádzka zahŕňa osobnú aj nákladnú dopravu. Počíta so 67-mi vlakmi za deň. Ťažká prevádzka obsahuje mix 4-och prevádzkových vlakov pre nákladnú dopravu s nápravovými silami 225 kN až 250 kN. Počet vlakov za deň pri tejto prevádzke je 51. Ľahká prevádzka je sled prevádzkových vlakov s nápravovými silami od 70 kN do 225 kN. Vyjadruje kombináciu ľahkých osobných vlakov prímestskej koľajovej dopravy s nákladnou dopravou.

V prípade potreby, ak je napríklad potrebná vyššia hodnota súčiniteľa α , sa môže vytvoriť iná konkrétna kombinácia prevádzky. Všetky tieto kombinácie vychádzajú z ročnej tonáže $25 \cdot 10^6$ ton prepravovanej po moste v každej koľaji.

Posúdenie únavy na základe kumulácie poškodení musí spĺňať túto podmienku:

- Poškodenie v priebehu návrhovej životnosti D_d musí byť menšie ako 1,0

Poškodenie D_d vypočítame sčítaním jednotlivých poškodení D_i pre jednotlivé rozkmity podľa podielu ich početnosti počas životnosti n_i a počtu cyklov do porušenia N_i

$$D_d = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{n_i}{N_i} \quad (12)$$

7. Stanovenie faktora ekvivalentného poškodenia λ_1

V [1] ponúkané faktory ekvivalentného poškodenia pre EC mix, Expresné vlaky a podzemné dráhy, koľajovú dopravu s nápravovým tlakom 25 t sú stanovené pomocou kumulácie poškodení od prislúchajúceho prevádzkového mixu / prevádzkových vlakov.

Rozkmity jednotlivých zaťažovacích blokov prevádzkových vlakov $\Delta\sigma_i$ pri ich počte n_i vyvolávajú v konštrukcii určité poškodenie. Všetky rozkmity $\Delta\sigma_i$ môžeme nahradiť jedným ekvivalentným rozkmitom $\Delta\sigma_E$ pri počte cyklov $n_E = \sum n_i$ a tento rozkmit vyvolá rovnaké poškodenie ako rozkmity $\Delta\sigma_i$. Pre ekvivalentný rozkmit napätia vieme vyčísliť rozkmit $\Delta\sigma_{E2}$ pri počte cyklov $N_C = 2 \cdot 10^6$:

$$\Delta\sigma_{E2} = \Delta\sigma_E \cdot \left(\frac{n_E}{N_C} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (14)$$

Na základe tejto úvahy vieme stanoviť faktora ekvivalentného poškodenia $\lambda_{1.0}$ pre každý prevádzkový vlak. Kombináciou vzťahu (14) a (8) teda môžeme odvodiť nasledovné:

$$\lambda_{1.0} \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_{LM71} = \left[N_T \cdot N_{DO} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} \frac{n_i \cdot ((1+\varphi) \cdot \Delta\sigma_i)^m}{N_C \cdot \Delta\sigma_C^m} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (15)$$

kde : N_T je počet prejazdov vlaku za jeden rok, pri dodržaní tonáže $25 \cdot 10^6$ ton / rok
 N_{DO} životnosť mosta vyjadrená v rokoch
 n_i počet rozkmitov $\Delta\sigma_i$ za jeden prejazd vlaku
 m je sklon Wöhlerovej únavovej krivky

$$\lambda_{1.0} = \left[\frac{N_T \cdot N_{DO}}{N_C} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} n_i \cdot \left(\frac{(1+\varphi) \cdot \Delta\sigma_i}{\Phi_2 \cdot \Delta\sigma_{LM71}} \right)^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

Keďže vyjadrujeme $\lambda_{1.0}$ nezávisle od konštrukcie môže vzťah upraviť bez použitia $\Delta\sigma$:

$$\lambda_{1,0} = \frac{(1+\varphi)}{\varphi_2} \cdot \left[\frac{1}{N_C} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} n_{i,\text{celk}} \cdot \left(\frac{\Delta M_i}{\Delta M_{LM71}} \right)^{m_1} \right]^{\frac{1}{m_1}} \quad (17)$$

$$n_{i,\text{celk}} = n_i \cdot N_T \cdot N_{D0} \quad (18)$$

kde : ΔM_i je i-ty rozkmit momentov od prejazdu prevádzkového vlaku
 ΔM_{LM71} je maximálny rozkmit momentov od prejazdu zaťažovacieho vlaku LM71

Vzťahy (14) až (18) platia pri konštantnom sklone únavovej krivky. Modifikovaná normovaná Wöhlerová krivka má po počet cyklov $N_D=5 \cdot 10^6$ sklon $m_1=3$, od N_D po $N_L=1 \cdot 10^8$ sklon $m_2=5$. Za N_L má krivka konštantný priebeh a predpokladáme, že rozkmity pod $\Delta\sigma_L$ prislúchajúce k N_L nespôsobia v konštrukcii poškodenie. Pri použití len jedného sklonu sa odporúča sklon $m_1=3$, pri ktorom sme na bezpečnej strane únavového posúdenia.

Na prepočet počtu cyklov $n_{\text{celk},j}$ od rozkmitu ΔM_j ležiaceho medzi ΔM_D a ΔM_L použijeme transformáciu z priamky so sklonom $m_2=5$ na priamku so sklonom $m_1=3$ pomocou ich priesečníka v bode $[N_D; \Delta\sigma_D]$.

$$n_{j,\text{celk},3} = n_{j,\text{celk},5}^{\frac{m_1}{m_2}} \cdot N_D^{\frac{m_1-m_2}{m_1}} \quad (19)$$

$$\lambda_{1,0} = \frac{(1+\varphi)}{\varphi_2} \cdot \left[\frac{1}{N_C} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_i} n_{i,\text{celk}} \cdot \left(\frac{\Delta M_i}{\Delta M_{LM71}} \right)^{m_1} + \sum_{j=1}^{n_j} n_{j,\text{celk},5}^{\frac{m_1}{m_2}} \cdot N_D^{\frac{m_1-m_2}{m_1}} \cdot \left(\frac{\Delta M_j}{\Delta M_{LM71}} \right)^{m_1} \right) \right]^{\frac{1}{m_1}} \quad (20)$$

Keďže vychádzame z presnej ročnej tonáže a stanovenej životnosti v rokoch vieme určiť počet cyklov daného rozkmitu n_i od začiatku po koniec životnosti. Je teda jasné či sa s daný rozkmit nachádza v oblasti pred N_D , medzi N_D a N_L alebo za N_L . Za predpokladu, že daný vlak spôsobí za životnosť konštrukcie poškodenie D menšie najvyššie rovné 1,0 uvažujeme všetky rozkmity len pod alebo presne na únavovej krivke.

V rámci výpočtu $\lambda_{1,0}$ pre konkrétne dĺžky vplyvovej čiary L a druh prevádzkového vlaku môžu nastať 3 rôzne prípady:

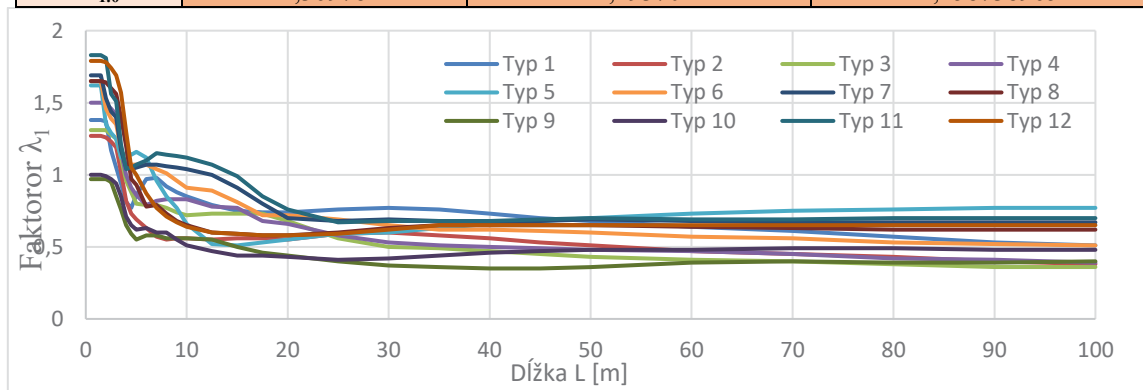
- **Všetky rozkmity** majú počet cyklov **za** N_L . Vtedy sa upraví početnosť vlakov / cyklov najväčšieho rozkmitu tak, aby $n_{i,\text{celk}}$ daného rozkmitu bol rovný N_L a s týmto počtom sa vypočíta $\lambda_{1,0}$ (viď Tabuľka 1, Typ 4)
- **Len jeden rozkmit** spadá spojím počtom cyklov $n_{i,\text{celk}}$ od oblasti **pred** N_L . V takom prípade vyčíslime $\lambda_{1,0}$ z tohto rozkmitu s počtom cyklov $n_{i,\text{celk}}$ (viď Tabuľka 1, Typ 1)
- **Viaceré rozkmity** ležia svojou početnosťou **pred** N_L . Najprv uvažujeme najväčší rozkmit s hodnotou $\Delta M_{1,\text{max}}$ a početnosťou n_1 ležiaci na únavovej krivke. Z pomeru počtu cyklov N_D, N_L a n_1 vyčíslime hodnoty ΔM_D a ΔM_L . Takýmto spôsobom určíme polohu ostatných ΔM_i v rámci únavovej krivky. Faktor ekvivalentného poškodenia od prejazdu daného vlaku vypočítame so započítaním najväčšieho rozkmitu a všetkých ostatných rozkmitov ležiacich nad ΔM_L . (viď Tabuľka 1, Typ 6)

$$\circ \Delta M_D = \frac{\Delta M_{1,\text{max}}}{\left(\frac{N_D}{n_1}\right)^{\frac{1}{m_1}}} = \frac{112,5}{\left(\frac{5 \cdot 10^6}{55\,904\,962}\right)^{\frac{1}{5}}} = 182,326 \quad (21)$$

$$\circ \Delta M_L = 0,549 \cdot \Delta M_D = 0,549 \cdot 182,326 = 100,148 \quad (22)$$

Tabuľka 1 Výpočet $\lambda_{1,0}$ pre 3 prevádzkové vlaky $L=2m$, životnosť 100 rokov, $\Delta M_{LM71}=125,9 kN.m$

prevádzkový vlak	Typ 1		Typ 4		Typ 6		
hmotnosť vlaku [t]	663		510		1431		
rýchlosť vlaku [m/s]	55,556		69,444		27,778		
N_T	37 707		49 020		17 470		
K	0,3472		0,4340		0,174		
φ^I	0,5203		0,7216		0,210		
φ^{II}	0,5380		0,5380		0,538		
$1+\varphi$	1,3947		1,4953		1,239		
Φ_2	1,67		1,67		1,67		
n_i	6	48	30	32	26,0	18	
ΔM_i [kN.m]	112,5	55	85	112,5	90,0	35	
$n_{i,celk}$	22 624 434	180 995 475	147 058 824	100 000 000	55 904 962	45 422 781	31 446 541
oblasť	medzi N_D a N_L	za N_L	za N_L	upravené	medzi N_D a N_L	medzi N_D a N_L pod ΔM_L	medzi N_D a N_L pod ΔM_L
$n_{3,i,celk}$	12 369 001			30 170 882	21 284 243		
$\lambda_{1,0}$	1,36978		1,49370		1,458738965		



Obr. 5 Priebeh faktora ekvivalentného poškodenia λ_1 pre prevádzkové typy vlakov 1-12

Po určení faktorov ekvivalentného poškodenia $\lambda_{1,0}$ pre jednotlivé vlaky môžeme určiť tento faktor aj pre prevádzkové mixy zložené z týchto vlakov podľa ich objemu dopravy za rok V_j k celkovému objemu dopravy za rok.

$$\lambda_1 = \sum_{j=1}^k \frac{V_j}{\sum_{j=1}^k V_j} \cdot (\lambda_{j,1.0})^{m_1} \quad (23)$$

8. Záver

Metódou kumulácie poškodení možno posúdiť únavové detaily železničných mostov presnejšie, máme možnosť zvoliť si prevádzkové zaťaženie podľa reálnej premávky. Pri určovaní zostatkovej životnosti železničných mostov nie je najvhodnejšie aby sme používali faktor ekvivalentného poškodenia λ_1 prebraného z normy, ktorá ho stanovuje na základe prevádzkových vlakov. Tieto prevádzkové vlaky nereprezentujú históriu ani súčasnosť zaťaženia na týchto mostoch, prevádzkové vlaky prílohy D [1] slúžia ako pomôcka na posúdenie detailu od dopravy, ktorá zahŕňa prevádzkové

zaťaženie na konci životnosti mosta navrhnutého v súčasnosti. Pre určenie zostatkovej životnosti jestvujúceho mosta je vhodné poznať históriu zaťaženia (vlakov premávajúcich na trase vedúcej cez most). Táto história zaťaženia je pre určitú skupinu mostov spoločná / podobná.

Ako bolo vyššie spomínané posúdenie kumuláciou poškodení je presnejšie a výstižnejšie, keďže je možné navoliť konkrétnu prevádzku pre daný úsek trasy. Táto metóda je však komplikovanejšia aj aj časovo náročnejšia. Prínos stanovenia faktora ekvivalentného poškodenia (z prevádzkových sledov zodpovedajúcich skutočnej premávke) je v skrátaní a spresnení posudkov na únavu. Výpočet tohto faktora je síce tiež zložitejší ale pri typizovaní mostov do určitej vekovej a zaťažovacej kategórie je znovu použiteľný a teda uľahčuje prácu s posudzovaním únavy.

Literatúra

- [1]. Norma STN EN 1993-2: Eurokód 3. Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 2: Oceľové mosty. Bratislava: SÚTN, 2007
- [2]. NUSSBAUMER, A., GÜNTHER, H.-P.: Grundlagen und Erläuterung der neuen Ermüdungsnachweise nach Eurocode 3, Stahlbau Kalender, Verlag Ernst&Sohn, 2006
- [3]. CULEK, B. : Reliability, lifetime and load-carrying capacity of steel railway bridges in relation to traffic route, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. 22 s.
- [4]. PANTĚLEJEV, L.: Únava kovových materiálů, Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, 2003. 31 s.
- [5]. FUSEK, M., ADÁMKOVÁ, L.: Únava materiálu, Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013, s. 74-79, SBN 978-80-248-3024-7
- [6]. ALBUQUERQUE, C. M.C.: Advanced methodologies for the assessment of the fatigue behaviour of railway bridges, Porto: FEUP, 2015.
- [7]. AL-EMRANI, M.; AYGÜL, M. : Fatigue design of steel and composite bridges, Goteborg Sweden: Chalmers University of Technology, 2014
- [8]. SCHMID, JOHANNES & LENER, GERHARD: Lastkollektive für Eisenbahnbrücken aus Messdaten: Teil 1: Systematische Untersuchungen zum Schadensäquivalenzfaktor λ 1 an Einfeldträgern. Stahlbau. 86. , 2017
- [9]. UNTERWEGER, H., TARAS, A., NOVAK, F.: Untersuchungen der Restlebensdauer genieteter Tragwerke, Abschlussbericht, Gratz : Technische Univezität Gratz ,Institut fur Stahlbau, 2013. 65 s.
- [10]. Norma STN EN 1993-1-9: Eurokód 3. Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 1-9: Únava. Bratislava: SÚTN, 2007
- [11]. Norma STN EN 1991-2: Eurokód 1. Zaťaženia konštrukcií. Časť 2: Zaťaženia mostnou dopravou. Bratislava: SÚTN, 2006

Ján Pecka¹

Študijný program: TKIS, ročník: druhý

PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA ZOSILNENIA ŠTÍHLÝCH ŽELEZOBETÓNOVÝCH STĽPOV APLIKÁCIOU CFRP MATERIÁLOV

PARAMETRIC STUDY OF STRENGTHENING SLENDER RC COLUMNS USING CFRP MATERIALS

Abstract

The requirement to strengthen concrete columns is relatively common. It may arise from the need for a repair of a structural failure, but also for an increase in the resistance resulting from increasing load. Progressive strengthening methods based on the application of CFRP materials are suitable when a minimum increase in the cross-section of the column is required. The parametric study presents the results of strengthening of the column by wrapping with CFRP sheet, and NSM application of CFRP strips. The increase in the resistance of the cross-section as well as the increase in the resistance of the slender column is reviewed. The results show the effect of preloading before strengthening and the number of confining layers and added reinforcement ratio.

Kľúčové slová / Key Words

zosilnenie štíhlych stĺpov; CFRP lamely; ovinutie; parametrická štúdia /
strengthening of slender columns, CFRP strips, confinement, parametric study

1. Úvod

Pri v súčasnej praxi bežnej potrebe zosilnenia stĺpov je na výber z viacerých metód zosilnenia. Okrem tradičných, existuje viacero progresívnych metód [1]. Článok sa venuje progresívnym metódam zosilnenia založených na aplikácii CFRP materiálov. Okrem menšej prácnosti je výhodou týchto metód minimálne zväčšenie prierezu stĺpa. Nevýhodou je nízka požiarne odolnosť a potreba ochrany pred mechanickým poškodením. Cieľom článku je demonštrovať možnosti zvýšenia odolnosti prierezu, ako aj štíhleho stĺpa po zohľadnení teórie II. rádu. Pri výpočtoch sa postupovalo podľa draftu novej generácie Eurokódu 2 (prEN 1992-1-1) [2]. Parametrická štúdia je spracovaná pre zosilnenie ovinutím CFRP tkaninou a pozdĺžnymi CFRP lamelami. Pri ovinutí je sledovaný nárast odolnosti v závislosti od počtu vrstiev ovinutia. Pri zosilnení CFRP lamelami bola zvolená aplikácia lamiel do drážok NSM metódou. Okrem počtu pridaných lamiel je analyzovaný nárast odolnosti ako len pre ťahové, tak aj pre ťahové a tlakové pôsobenie lamiel. Existujúce pretvorenia v čase zosilnenia boli zatiaľ zohľadnené len pri odolnosti prierezu stĺpa.

2. Metodika

Pre parametrickú štúdiu bola zvolená kombinácia namáhania stĺpa osovou silou a ohybovým momentom okolo osi menšej tuhosti. Pre interpretáciu výsledkov boli zvolené interakčné diagramy (ďalej len ID), ktoré možno považovať za najvhodnejšiu metódu pre zobrazenie odolnosti takto

¹ Ján Pecka, Ing. Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

namáhaných prvkov. Odolnosť stĺpa je počítaná na základe rovnováhy síl v priereze pre postupne sa meniace pretvorenia. Pretvorenia v tlaku sú obmedzené medzným pretvorením betónu v tlaku, pretvorenia v ťahu sú obmedzené medzným pomerným pretvorením CFRP lamiel.

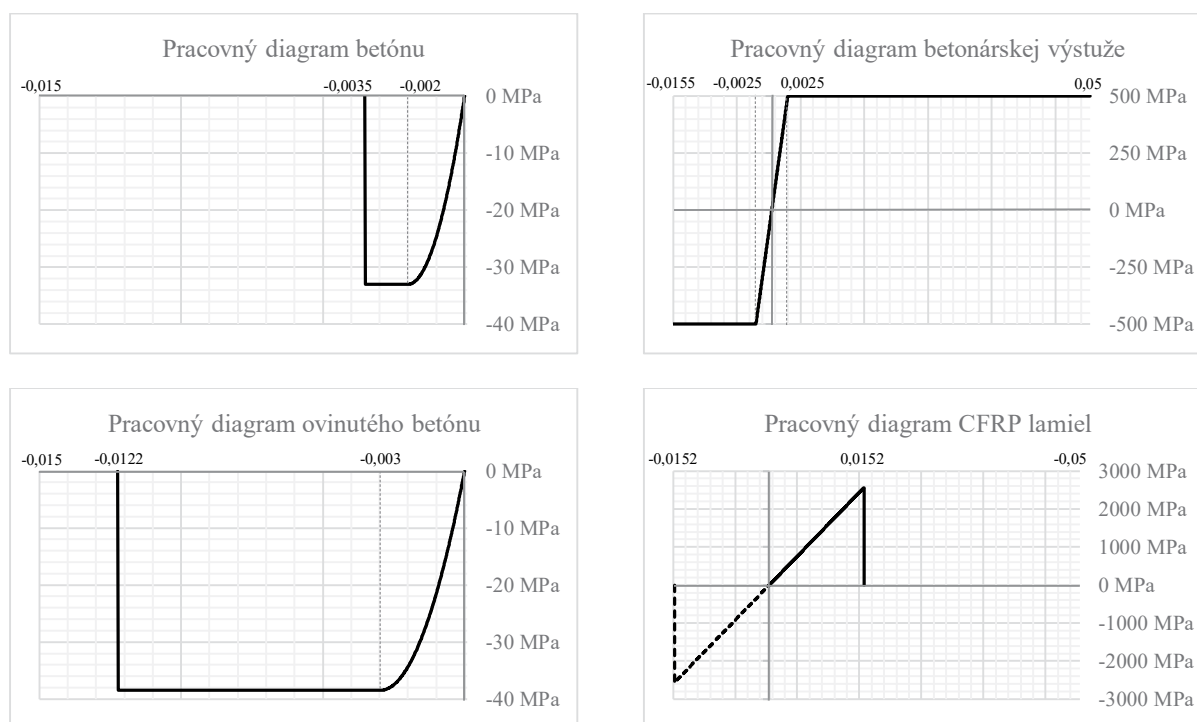
2.1 Materiálové charakteristiky

Z dôvodu presnejšieho zohľadnenia správania sa materiálov, boli zadefinované ich pracovné diagramy (Obrázok 1) na základe uvažovaných materiálových charakteristík uvedených v Tab. 1. Pre betón triedy C25/30 bol zadefinovaný parabolicko-obdĺžnikový pracovný diagram [3], bez ťahovej pevnosti. Tlaková pevnosť po dosiahnutí medzného pretvorenia klesá na nulu.

Tab. 1 Materiálové charakteristiky uvažované vo výpočtoch.

		Betón	Betonárska výstuž	CFRP lamely	CFRP tkanina
Tlaková pevnosť	[MPa]	33	500	2560	-
Ťahová pevnosť	[MPa]	-	500	2560	3900
Modul pružnosti	[GPa]	31	200	168	210
Medzné pretvorenie	[-]	3,5‰	5%	1,52%	1,86%

Pre betonársku výstuž s označením B500B je zadefinovaný bilineárny pracovný diagram s vodorovnou vetvou [3]. CFRP lamely, ako aj tkanina vykazujú lineárne elastické správanie až do porušenia. Pre CFRP lamely bola zadefinovaná dvojica pracovných diagramov. V prvom je v súlade s odporúčaním (prEN 1992-1-1) [2] uvažované len s ťahovým pôsobením lamiel. Druhý diagram uvažuje s pôsobením lamiel aj v tlaku. Pri zadefinovaní pracovného diagramu ovinutého betónu sa vychádzalo zo súčasne platného Eurokódu2 (EN 1992-1-1) [3]. Veľkosť priečného tlakového napätia vystupujúca vo vzťahoch bola spočítaná na základe modelu ovinutia (*Mander a i. 1988*) [4].



Obrázok 1: pracovné diagramy materiálov

2.2 Interakčný diagram stĺpa

Pri štíhlych stĺpoch je potrebné ID prierezu upraviť na ID stĺpa. Celkový návrhový moment v kritickom priereze stĺpa sa vypočíta, ak sa k momentu prvého rádu $M_{R,0}$ pripočíta moment druhého rádu M_{II} . Pre obojstranne klbovo podopretý stĺp je najväčšia prídavná deformácia a teda aj kritický prierez v strede výšky stĺpa. Pre zostrojenie ID stĺpa pre pôsobiacu koncovú silu N_R a ohybový moment prvého rádu $M_{R,0}$, je nutné z ID prierezu stĺpa odpočítať veľkosť momentu druhého rádu M_{II} prislúchajúceho ku konkrétnej tlakovej sile [5]. Tak dostaneme ID stĺpa ako množinu bodov definovaných usporiadanými dvojicami veličín $N_R - M_{R,0}$.

Súčasný Eurokód2 (EN 1992-1-1) [3] uvádza dve zjednodušené metódy analýzy účinkov druhého rádu. Jedná sa o metódu vychádzajúcu z nominálnej tuhosti a metódu vychádzajúcu z nominálnej krivosti. Porovnaniu týchto metód sa vo svojej práci venovali *de Araújo a Milton* (2017) [6]. Podľa ich zistení je metóda založená na nominálnej tuhosti príliš konzervatívna a nie je veľmi vhodná pre veľmi štíhle stĺpy. Pre analýzu účinkov druhého rádu bola zvolená metóda nominálnej krivosti podľa (prEN 1992-1-1) [2].

2.3 Zohľadnenie zaťaženia v čase zosilnenia

V praxi nedochádza k zosilňovaniu novej, nezaťaženej konštrukcie, ale existujúcej konštrukcie, ktorá má za sebou históriu zaťaženia. V momente zosilňovania je zaťažená na určitú úroveň svojej odolnosti, čomu zodpovedá konkrétny stav pretvorenia prierezu. Následne po zosilnení, možno v pridaných materiáloch uvažovať len s pretvoreniami, ktoré nastali po zosilnení. Vo výpočtoch je táto skutočnosť zohľadnená zatiaľ len pre odolnosť prierezu. V prvom kroku je vypočítaný ID prierezu. Následne je zvolený percentuálny podiel z výslednej odolnosti, pomocou ktorého sa vyčíslí vonkajšie zaťaženie pri ktorom je uvažované so zosilnením prierezu. Pre zadefinované vonkajšie zaťaženie je následne vypočítaný stav pretvorenia v priereze. Pre výpočet pretvorenia je použitá Newtonova metóda (metóda dotyčníc) [7]. Jedná sa o iteračnú numerickú metódu, pomocou ktorej je možné riešiť sústavu nelineárnych algebraických rovníc.

Spracovanie výpočtu založeného na postupnom zvyšovaní zaťaženia s využitím poznatkov, ktoré publikovali *Sadeghian a Fam* [8], *Jiang a Teng* [9]. ,by umožnilo zohľadnenie vplyvu pôsobiaceho zaťaženia v čase zosilňovania aj na odolnosť štíhleho stĺpa.

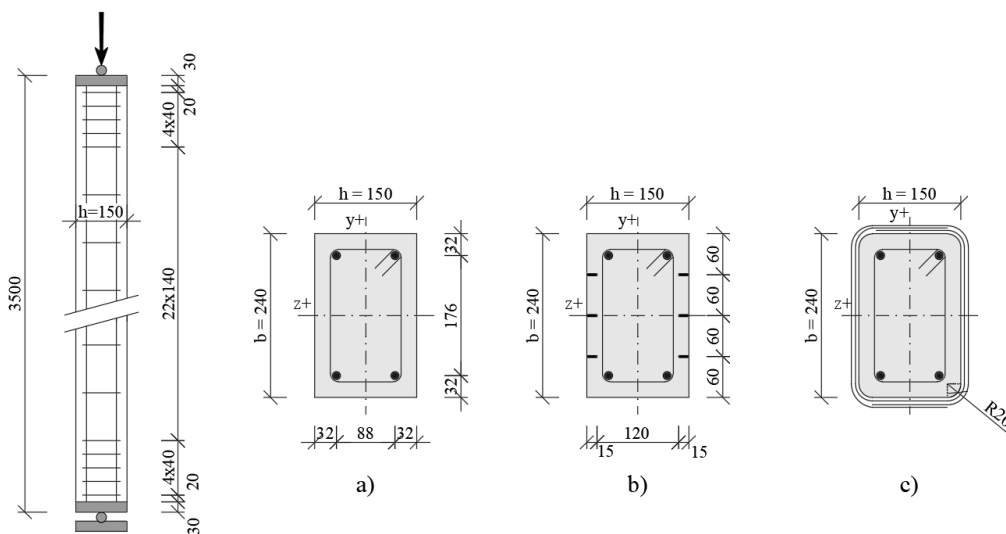
3. Parametrická štúdia

Parametrická štúdia je vypracovaná na základe vyššie uvedenej metodiky. Zameriava sa na progresívne metódy zosilnenia stĺpov. Pre účely štúdie bol zvolený referenčný stĺp s obdĺžnikovým prierezom s rozmermi 150 x 240mm. Dĺžka stĺpa je 3500mm. Štíhlosť stĺpa v smere menšej tuhosti určená podľa (prEN 1992-1-1) [2] $\lambda = 80,8$. Podopretie na oboch koncoch stĺpa je uvažované ako klbové. Stĺp je vystužený symetricky rozmiestnenou pozdĺžnou výstužou 2x2 \varnothing 12mm, priečna výstuž s priemerom \varnothing 6mm je rozmiestnená osovo po 140mm, na koncoch stĺpa zahustená po 40mm. Krytie priečnej výstuže je 20mm. Referenčný stĺp je znázornený spolu aj so schematickým znázornením spôsobov zosilnenia stĺpa na Obrázok 2.

Výsledky sú interpretované prostredníctvom ID prierezu a ID stĺpa. Z dôvodu jednoduchšej orientácie vo výsledkoch je každému hodnotenému variantu priradené skrátené označenie, ktoré nasleduje za označením či sa jedná o odolnosť prierezu (C-S) alebo odolnosť stĺpa (COL). Referenčný stĺp má označenie (REF).

Prvá analyzovaná metóda zosilnenia je zosilnenie stĺpa ovinutím. Pre účely štúdie bola zvolená CFRP tkanina aplikovaná kontinuálne bez medzier po celej výške stĺpa. Uvažované je so zaoblením hrán prierezu s polomerom $r = 20$ mm (Obrázok 2c). Hodnotené sú varianty s 1, 2 a 3-mi vrstvami

ovnutia prierezu tkaninou. Skrátene označenie $C1$ až $C3$ je odvodené z anglického *confinement - ovnutie*. Zvoleným variantom ovnutia zodpovedajú stredné hodnoty pevnosti betónu: $f_{cm,C1}=38,46\text{MPa}$; $f_{cm,C2}=41,58\text{MPa}$; $f_{cm,C3}=44,31\text{MPa}$ vypočítané podľa EC2.



Obrázok 2: geometria stĺpa, a) prierez referenčného stĺpa, b) prierez s CFRP lamelami aplikovanými NSM metódou, c) prierez ovnutý CFRP tkaninou.

Druhá analyzovaná metóda je zosilnenie stĺpa pridaním CFRP lamiel. Uvažované je s aplikáciou lamiel do drážok NSM metódou. Lamely sú rozmiestnené rovnomerne, symetricky pozdĺž dlhších strán prierezu (Obrázok 2b). Postupne sú hodnotené varianty s pridaním 2x1 až 2x4 pozdĺžnych CFRP lamiel s prierezom 1,5x10mm. Táto metóda zosilnenia bola spracovaná v dvoch verziách. Pri prvej verzii je uvažované len s ťahovým pôsobením lamiel. Skrátene označenie $S.T1$ až $S.T4$ je odvodené z anglických slov *strips - lamely* a *tensile - ťahový*. V druhej verzii je uvažované s pôsobením lamiel v ťahu, ako aj v tlaku. Skrátene označenie $S.TC1$ až $S.TC4$ je analogické k predošlému len doplnené o písmeno C zodpovedajúce *compressive - tlakový*.

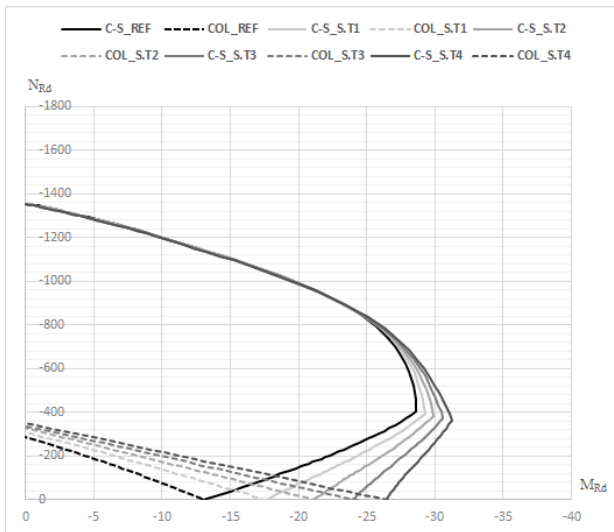
Posledná analýza je zameraná na skutočnosť, že pri zosilňovaní sa jedná o existujúcu konštrukciu, ktorej pretvorenia prierezu v momente aplikácie zosilnenia sú nenulové. Pre túto analýzu bolo zvolené zosilnenie aplikáciou 2x3 CFRP lamiel pôsobiacich len v ťahu NSM metódou. Uvažované je s aplikáciou zosilnenia pri zaťažení dosahujúcom určité percento z odolnosti prierezu bez zosilnenia. Zvolené boli nasledujúce percentá z odolnosti 0%; 20%; 40%; 60% a 80%. Skrátene označenie vychádza z označenia zosilnenia lamelami pôsobiacimi len v ťahu $S.T3$ s pridaním hodnoty zaťaženia pri aplikácii lamiel napr. $S.T3.20\%$.

4. Výsledky parametrickej štúdie

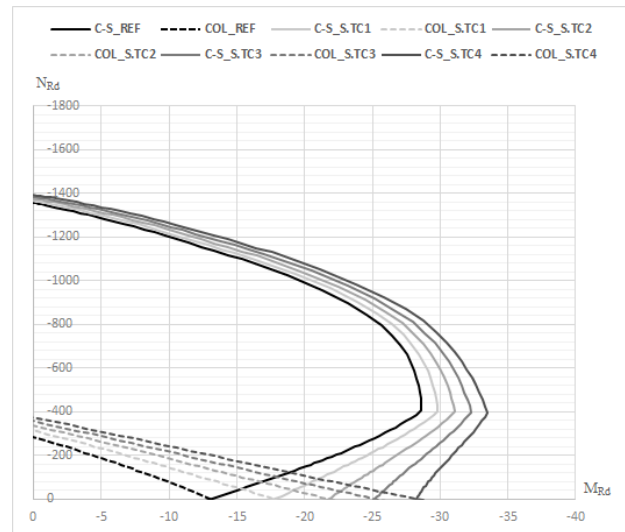
Vo všetkých analyzovaných prípadoch zosilnenia je možné pozorovať zvýšenie odolnosti prierezu. Pre rôzne metódy však dochádza k zvýšeniu odolnosti v rôznych častiach ID. Jednotlivé metódy dosahujú zosilnenie využívajúc rôzne princípy. V prípade pridania lamiel s uvažovaným pôsobením len v ťahu, narastá odolnosť prierezu v oblasti s prevažujúcim ohybovým namáhaním (Obrázok 3). Pridané pozdĺžne lamely fungujú ako prídavná pozdĺžna výstuž, zvyšujú ohybovú odolnosť. Ak je pre pridanie lamely uvažované s ich pôsobením v tlaku aj v ťahu, tak nárast odolnosti má charakter odsadenia pôvodnej krivky po celej dĺžke (Obrázok 4).

Pri odolnosti prierezu ovnutého stĺpa je možné sledovať nárast v časti s prevládajúcim tlakovým namáhaním (Obrázok 5). Je to spôsobené zvýšením tlakovej pevnosti betónu v dôsledku ovnutia. Po

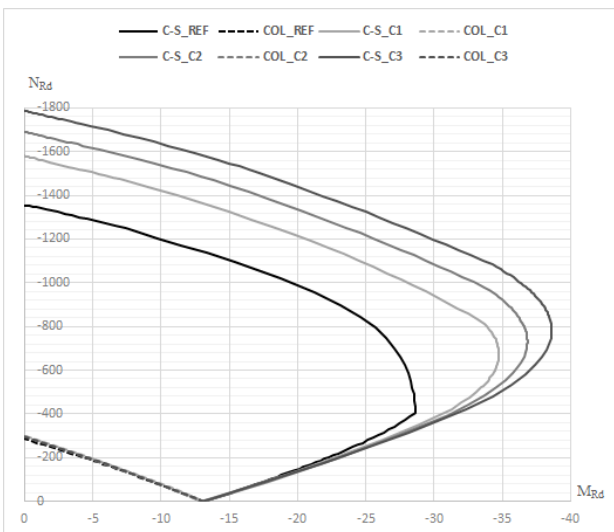
zohľadnení štíhlosti stĺpa a aplikácií teórie II. rádu na celkovú odolnosť stĺpa možno konštatovať, že aj keď vo všetkých analyzovaných prípadoch došlo k nárastu odolnosti prierezu, k významnému nárastu odolnosti stĺpa došlo len v prípadoch kedy bola zvýšená ohybová odolnosť prierezu.



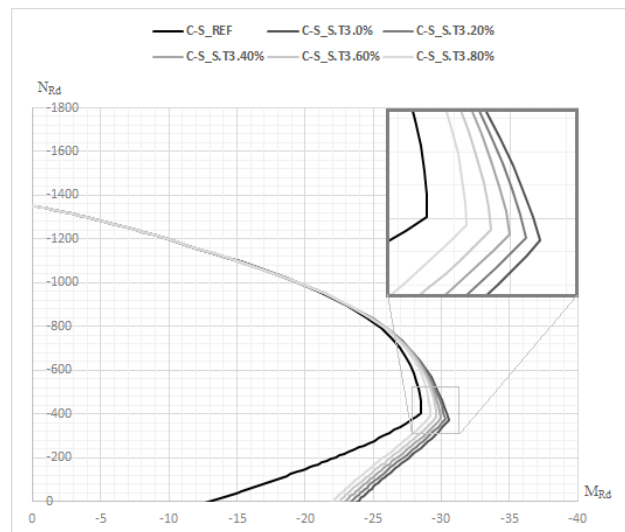
Obrázok 3: Pridanie CFRP lamiel s uvažovaným len ťahovým pôsobením.



Obrázok 4: Pridanie CFRP lamiel s uvažovaným ťahovým aj tlakovým pôsobením.



Obrázok 5: Zosilnenie ovínutím CFRP tkaninou.



Obrázok 6: Vplyv dosiahnutej odolnosti v čase pridania lamiel.

Tab. 2: Číselné porovnanie nárastu odolností po zosilnení stĺpa.

Označenie stĺpa	Odolnosť prierezu				Odolnosť stĺpa			
	N_{Rd} [kN]	%	M_{Rd} [kNm]	%	N_{Rd} [kN]	%	M_{Rd} [kNm]	%
Stĺp REF	-1354	-	-28,6	-	-279	-	-13,6	-
Stĺp S.T3	-1351	-0,2	-30,6	7,0	-336	20,4	-24,3	78,7
Stĺp S.TC3	-1381	2,0	-32,3	12,9	-344	23,3	-25,5	87,5
Stĺp S.T3.40%	-1351	-0,2	-30,0	4,9	-	-	-	-
Stĺp C3	-1786	31,9	-38,6	35,0	-291	4,3	-13,8	1,5

Na Obrázok 6 sú zobrazené ID prierezu stĺpa s pridanými 2x3 symetricky rozmiestnenými CFRP lamelami pôsobiacimi len v ťahu. S pridaním lamiel do prierezu je uvažované pri rôznej úrovni pôsobiaceho vonkajšieho zaťaženia. Čím je vyššia úroveň zaťaženia v čase aplikácie lamiel, tým je príspevok lamiel k odolnosti menší, pretože kým nastane porušenie prierezu, v lamelách sa dosiahnu menšie pretvorenia a nedochádza k ich plnému využitiu.

V Tab. 2 je číselne popísaný nárast odolnosti stĺpa pre vybrané vyšetrované prípady. Porovnávaný je nárast maximálnej tlakovej odolnosti v centrickom tlaku pre prierez ako aj štíhly stĺp. Nárast ohybovej odolnosti je pri priereze hodnotený cez nárast maximálnej absolútnej hodnoty ohybovej odolnosti. Pri štíhlom stĺpe je maximálna ohybová odolnosť zodpovedajúca čistému ohybu a zhoduje sa s ohybovou odolnosťou prierezu v čistom ohybe.

5. Záver

Parametrická štúdia preukázala, že pre štíhle stĺpy je možné dosiahnuť výraznejšie zvýšenie odolnosti pridaním pozdĺžnej výstuže, než zvýšením pevnosti betónu. Pri zvýšení strednej pevnosti betónu v tlaku o 34% došlo k nárastu odolnosti štíhleho stĺpa len o 4,3% zatiaľ čo nárast odolnosti prierezu bol skoro 32%. Príčinou je skutočnosť, že pre štíhle stĺpy je rozhodujúcim namáhaním ohybový moment v dôsledku teórie druhého rádu. Ovijanie stĺpa tkaninou, a teda zvyšovanie tlakovej pevnosti betónu možno efektívne využiť pri krátkych stĺpoch, kde ID prierezu približne zodpovedá ID stĺpa.

Zo štúdie vyplýva, že zosilnenie ovinutím sa na zvýšení odolnosti prierezu prejaví len do určitej excentricity. Približne od excentricity 0,07 m je vplyv zosilnenia ovinutím zanedbateľný (Obrázok 5). Naopak príspevok odolnosti lamiel pôsobiacich len v ťahu sa prejavuje v oblasti ID s prevládajúcim ohybovým namáhaním. Pri excentricite menšej ako 0,04 m je ID zosilneného prierezu približne zhodný s ID prierezu referenčného stĺpa (Obrázok 3).

Pri aplikácií CFRP lamiel pre varianty stĺpov S.T3 a S.TC3 (zosilnenie 2x3 lamelami) je nárast odolnosti štíhleho stĺpa v centrickom tlaku približne 20,5% respektíve 23%. Pri stĺpe S.TC3 bolo uvažované aj s tlakovým pôsobením lamiel. Pri pohľade na odolnosť prierezu je však príspevok lamiel k tlakovej odolnosti pomerne nízky. Je to spôsobené nižším pretvorením, ktoré sa v tlačných lamelách dosiahne. V prípade zohľadnenia existujúcich pretvorení v čase zosilňovania by bol príspevok ešte menej významný.

Cieľom do budúcnosti je spracovanie podrobnejšieho výpočtu všeobecnou metódou s postupným pridávaním zaťaženia so zohľadnením prídavnej deformácie v dôsledku štíhlosti stĺpov v každom kroku. Výpočet by mal zohľadniť existujúce pretvorenia štíhleho stĺpa v čase zosilnenia. Zároveň je cieľom presnejšie spočítanie krivosti, a tým presnejšie stanovenie odolnosti štíhleho stĺpa. Na základe presnejších výpočtov budú navrhnuté experimenty na overenie najúčinnnejšieho spôsobu zosilnenia štíhlych železobetónových stĺpov CFRP tkaninami a lamelami.

Podakovanie

Táto práca vznikla s podporou výskumného projektu VEGA č. VEGA 1/0522/20 "Nelineárna analýza betónových konštrukcií vystužených betonárskou, predpínacou výstužou a FRP".

Literatúra

- [1] TARIQ, S.R. et al.: Structural Behavior of RC Columns Improved by Different Strengthening Techniques. In: *Slovak Journal of Civil Engineering* . 2020. Vol. 28, no. 3, s. 20–28. doi: 10.2478/sjce-2020-0020
- [2] Final Version of PT1-draft prEN 1992-1-1 ver. 2021-01, work document N 1358 of CEN/TC250/SC 2, 2021, p.383.
- [3] Eurocode 2, Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.
- [4] TAN, K.H.: Strength Enhancement of Rectangular Reinforced Concrete Columns using Fiber-Reinforced Polymer. In: *Journal of Composites for Construction*. 2002. Vol. 175, no. August, s. 175–183. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(175).
- [5] GAJDOSOVA, K. - BILCIK, J.: Full-Scale Testing of CFRP-Strengthened Slender Reinforced Concrete Columns. In: *Journal of Composites for Construction* . 2013. Vol. 17, no. 2, s. 239–248. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000329.
- [6] ARAÚJO, J.M. DE: Comparative study of the simplified methods of Eurocode 2 for second order analysis of slender reinforced concrete columns. In: *Journal of Building Engineering* . 2017. Vol. 14, s. 55–60. doi: 10.1016/J.JOBE.2017.10.003.
- [7] CUHAK, M.: Nelineárna analýza betónových konštrukcií. Dvojosový ohyb s osovou silou v tlačných štíhlych prvkoch: dizertačná práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013.
- [8] SADEGHIAN, P. - FAM, A.: Strengthening Slender Reinforced Concrete Columns Using High-Modulus Bonded Longitudinal Reinforcement for Buckling Control. In: *Journal of Structural Engineering*. 2015. Vol. 141, no. 4, s. 04014127. doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001066.
- [9] JIANG, T. - TENG, J.G.: Behavior and Design of Slender FRP-Confined Circular RC Columns. In: *Journal of Composites for Construction*. 2013. Vol. 17, no. 4. doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000333

Jaroslav Prokop¹

Študijný program: D-TKeIS4, ročník: 2

EXPERIMENTÁLNE OVEROVANIE BETÓNOVÝCH VZORIEK VYSTUŽENÝCH RECYKLOVANÝMI OCEĽOVÝMI VLÁKNAMI

EXPERIMENTAL EXAMINATION OF CONCRETE SAMPLES REINFORCED WITH RECYCLED STEEL FIBERS

Abstract

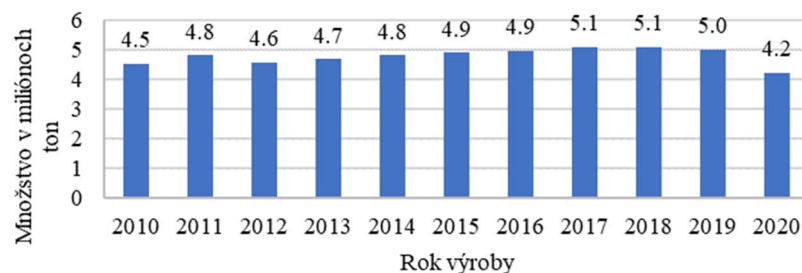
Nowadays is overload of vehicles caused by the transportation of people and subjects. This results in an enormous demand for tires that increases every year. The research aim of this research is to incorporate basic components of waste tires - recycled steel fiber (RSF) into the building industry. The work will examine the effect of RSF on improving the disadvantages of plain concrete. The research was carried out on separate RSFs, the output of which is geometric and mechanical characteristics, and on concrete samples reinforced with dispersed recycled steel fibers (RSFRC). The tests showed increased resistance in the splitting tension test, improved energy absorption, and toughness in samples with incorporated RSF. Concrete with integrated RSF is suitable for construction members where the ductile behavior of the structure is not required.

Kľúčové slová / Key Words

Štatistická analýza; recyklované oceľové vlákna; RSFRC; experiment; lomová energia.
Statistical analysis; recycled steel fibers; RSFRC; experiment; fracture energy.

1. Úvod

Akumulácia odpadových pneumatík na skládkach je celosvetovým problémom. Z obrázku 1 [1], ktorý zachytáva obdobie medzi rokmi 2010-2020 je zrejmé, že množstvo vyrobených pneumatík v štátoch EÚ má mierne stúpajúci trend. Z toho vyplýva, že na konci životného cyklu pneumatík bude potrebné daný odpad skládkovať resp. spracovať iným spôsobom. Množstvo pneumatík vyprodukované v roku 2020 na obrázku 1 je ovplyvnené pandemiou Covid-19.



Obrázok 1: Vývoj množstva vyrobených pneumatík medzi rokmi 2010-2020 [1]

Zahraniční výskumníci prezentujú vo svojich prácach súvislosti medzi geometrickými a pevnostnými parametrami RSF na výsledne vlastnosti čerstvého a zatvrdnutého RSFRC. Podľa [2] spôsobuje nepravidelný tvar vlákien ich zhukovanie, čím sa v konečnom dôsledku nedosiahne

¹ Jaroslav, Prokop, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

rovnomerná disperzia vlákien v betónovej matrici. V [3-5] sa uvádza, že s rastúcim množstvom vlákien v objemovej jednotke betónu sa zhoršuje spracovateľnosť čerstvého betónu určená metódou sadnutia kužeľa. V súvislosti so zlepšením pevnosti RSFRC v tlaku niektorí výskumníci zistili, že vlákna prispievajú k zvýšenej pevnosti RSFRC v tlaku, no v iných vedeckých prácach sa to nepotvrdilo. V práci [2] sa uvádza, že vyšší štíhlostný pomer RSF spôsobuje zvýšenie duktility a zlepšuje odozvu pre namáhanie ohybom. Podľa [6] pridanie vlákien nemalo vplyv na pevnosť RSFRC v tlaku ale za to vzrástla hodnota pevnosti v priečnom ťahu a pevnosti v ťahu za ohybu.

2. RSF

2.1. Všeobecná charakteristika

Medzi hlavné produkty, ktoré sa získavajú pri recyklovaní pneumatík patrí guma, oceľové vlákna a textilné vlákna. Recyklované oceľové vlákna sa vo všeobecnosti získavajú separovaním gumenej matrice pneumatík osobných a nákladných automobilov od ostatných komponentov tvoriace pneumatiku. Na separáciu oceľových vlákien sa používa mechanické oddeľovanie, termálny rozklad alebo kryogenický proces [2].

2.2. Štatistická analýza RSF z lokálneho spracovateľského podniku

Geometrické charakteristiky

V štatistickej analýze bola skúmaná vzorka náhodne vybraných 1050 RSF. V prípade každého vlákna zo štatistického súboru bola meraná dĺžka a priemer. Pod pojmom dĺžka RSF sa rozumie priama vzdialenosť medzi koncami vlákna. Dĺžka vlákien l_f bola meraná s pomocou digitálneho posuvného meradla s presnosťou 0,01 mm. Priemer vlákien d_f bol meraný na troch miestach vlákna (oba konce a stred vlákna). Priemer vlákien bol meraný pomocou digitálneho mikrometra s presnosťou 0,001 mm. Štíhlosť vlákna predstavuje pomer l_f/d_f . Všetky namerané dáta sa priebežne zapisovali do tabuľkového editora Microsoft Excel. Vzorka, ktorá bola podrobená meraniu z dôvodu určenia geometrických charakteristík je na obrázku 2.



Obrázok 2: Vzorka 1050 RSF

Štatistickou analýzou sa zistilo, že priemerná dĺžka RSF bola 12,38 mm s CoV 41,02%. Minimálna dĺžka vlákna bola 1,55 mm a maximálna dĺžka bola 59,13 mm. Priemerná hodnota priemeru RSF bola 0,241 mm s CoV 83,66%. Minimálny priemer vlákna bol 0,066 mm a maximálny priemer bol 1,882 mm. Posledná zaznamenaná geometrická charakteristika bol štíhlostný pomer RSF.

Priemerný štíhlostný pomer RSF bol 61,1 s CoV 42,70%. Zo vzorky RSF bol zistený minimálny štíhlostný pomer RSF 8,8 a maximálny štíhlostný pomer RSF 233,9.

Mechanické charakteristiky

Dôležitou mechanickou charakteristikou, ktorá má výrazný vplyv na správanie sa prvku po vzniku trhliny RSFRC je pevnosť RSF v ťahu. Skúška bola vykonaná s 52 RSF s dostatočnou dĺžkou na to, aby bolo vlákno možné spoľahlivo uchytiť v čeľustiach trhacieho zariadenia. Pri ťahovej skúške RSF bola zistená priemerná ťahová pevnosť RSF s hodnotou 2459 MPa s CoV 25,19%.

3. RSFRC

Referenčná vzorka bola vyrobená z prostého betónu bez pridaných RSF. V ostatných betónových vzorkách sa zvolili koncentrácie RSF 0,4%; 0,9%; 1,4 %; 1,9% a 2,4% z objemu vzorky. Na výrobu všetkých vzoriek bola použitá suchá betónová zmes Cemix Beton Basic 430. Na 1 kg suchej betónovej zmesi bolo pridaných 0,13 l vody. Po 3 minútach od spustenia miešania boli postupne pridané RSF a miešanie pokračovalo ďalších 10 minút. Po skončení miešania sa čerstvý betón uložil do foriem, v ktorých bol vopred aplikovaný oddebnovací olej. Po uplynutí 8 hodín od skončenia miešania sa vzorky oddebnili a boli uložené do ošetrovacej miestnosti, kde boli ponorené vo vode po dobu 7. dní. Po uplynutí tejto doby sa RSFRC vzorky z vody vybrali a dozrievali na vzduchu, pokiaľ nedosiahli vek 28 dní.

3.1. Experimentálne zisťovanie vlastností RSFRC

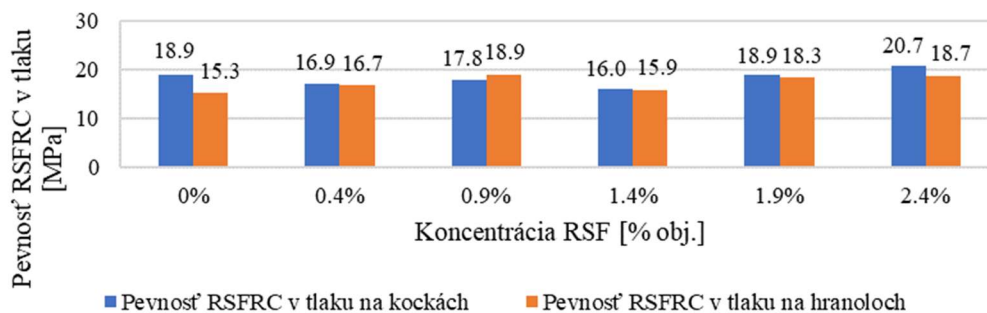
Pri experimentoch sa na vzorkách z RSFRC zisťovali parametre podľa tabuľky 1. Pri označovaní vzoriek platí, že prvé písmenné označenie určuje primárny parameter, ktorý sa bude z danej vzorky určovať. Ďalej nasleduje číselné označenie (X), ktorý hovorí o tom, koľko percent objemu RSF je vo vzorke. Posledné číslo (Y) označuje poradie danej vzorky v sérii.

Tabuľka 1: Druhy vzoriek a skúmané parametre v laboratórnom experimente

Zisťovaný parameter	Typ vzorky	Ozn. vzorky	Počet vzoriek
Kocková pevnosť v tlaku	Kocka 150 x 150 x 150 mm	CT-X-Y	3
Hranolová pevnosť v tlaku	Hranol 150 x 150 x 400 mm	EM-X-Y	3
Modul pružnosti	Hranol 150 x 150 x 400 mm		
Pevnosť v priečnom ťahu	Valec Ø150 mm, h=300 mm	TST-X-Y	3
F-CMOD	Hranol 150 x 150 x 400 mm	CMOD-X-Y	3

Pevnosť betónu v tlaku

Pevnosť RSFRC v tlaku na kockách bola určená podľa EN 12390-3:2019. Pevnosť betónu na hranoloch bola určená po stanovení modulu pružnosti betónu a po následnom odpojení LVDT snímačov zo skúšobnej zostavy. Rýchlosť zaťažovania na určenie pevnosti v tlaku RSFRC na hranoloch bola zhodná s rýchlosťou zaťažovania pre určenie modulu pružnosti RSFC. Z obrázku 3 je zrejmé, že použitie RSF čiastočne eliminuje vplyv subtilnosti vzorky hranola na pevnosť RSFRC v tlaku, pretože pomer pevnosti v tlaku pri kockových a hranolových vzorkách s pridanými RSF sa približuje 1,0.



Obrázok 3: Priemerné pevnosti v tlaku RSFRC podľa tvaru vzorky

Modul pružnosti

Modul pružnosti bol určený podľa EN 12390-13. Tabuľka 2 ukazuje podobný trend výsledkov ako v prípade pevnosti betónu v tlaku na kockách v obrázku 3. Z toho môžeme predpokladať, že modul pružnosti je v tomto prípade závislý na spracovateľnosti čerstvého betónu. Vo všeobecnosti možno konštatovať, že použitie RSF nemá výrazný vplyv na rast modulu pružnosti RSFRC.

Tabuľka 2: Priemerné moduly pružnosti RSFRC

Dávka RSF vo vzorke [% obj.]	0	0,4	0,9	1,4	1,9	2,4
Modul pružnosti [GPa]	19,8	20,7	20,3	19,2	21,5	23,0

Pevnosť betónu v priečnom ťahu

Pevnosť v priečnom ťahu na valcových vzorkách bola určená podľa vzťahu (1).

$$f_{sp} = \frac{2F_{max}}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (1)$$

kde:

- f_{sp} je pevnosť betónu v priečnom ťahu [MPa],
- F_{max} je maximálna sila, pri ktorej zlyhala vzorka v priečnom ťahu [N],
- l je dĺžka skúšobného valca [mm],
- d je priemer skúšobného valca [mm].

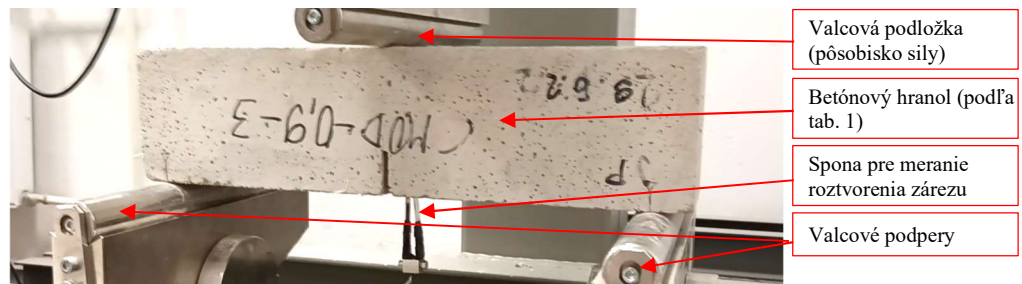
Z výsledkov v tabuľke 3 je možné konštatovať, že výsledné pevnosti sú v nepatrne rastúcom trende pri koncentráciách RSF od 0% po 1,9% vrátane. Výraznejší nárast pevnosti v priečnom ťahu bol zaznamenaný v prípade vzorky s koncentráciou RSF 2,4%.

Tabuľka 3: Priemerné pevnosti v priečnom ťahu RSFRC

Dávka RSF vo vzorke [% obj.]	0	0,4	0,9	1,4	1,9	2,4
Pevnosť v priečnom ťahu [MPa]	1,7	1,9	1,9	2,1	2,0	2,6

Lomová energia

Lomová energia G_F je celková energia, ktorú materiál absorbuje pri porušení. Iné definície uvádzajú, že lomová energia je energia, ktorá je potrebná na vytvorenie jednotkovej plochy trhliny [7]. Na zisťovanie lomovej energie vzoriek z RSFRC bola zvolená metóda F-CMOD. V tejto metóde bola použitá skúška trojbodovým ohybom s rýchlosťou CMOD podľa JCI-S-001-2003 [8]. Skúška bola uskutočnená na hranole s rozmermi podľa Tabuľka 1. V strede hranola bol vytvorený zárez s hĺbkou 30 mm. Skúšobná zostava pre určenie závislostí F-CMOD je uvedená na obrázku 4.



Obrázok 4: Skúšobná zostava pre zistenie závislosti F - $CMOD$ v RSFRC

Vzťahy pre určenie lomovej energie sú dané v JCI-S-001-2003:

$$G_F = \frac{0,75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (2)$$

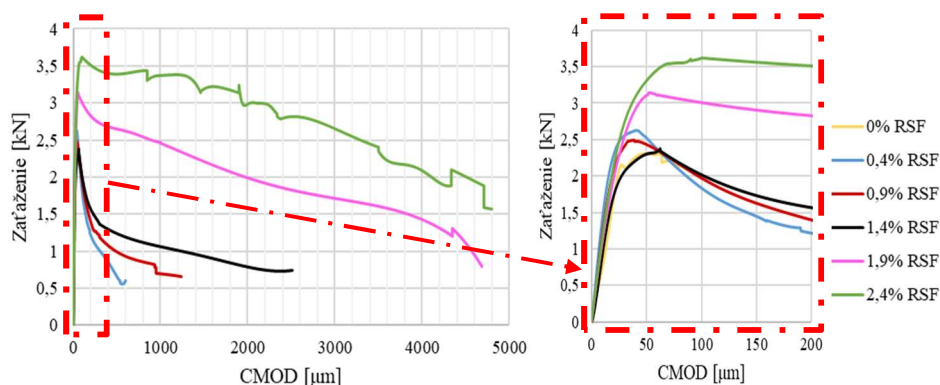
pričom vzťah pre určenie člena W_1 je znázornený v rovnici (3)

$$W_1 = 0,75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g * CMOD_c \quad (3)$$

kde:

- W_0 je lomová práca reprezentujúca plochu pod krivkou v závislosti F - $CMOD$ [N.mm],
- W_1 je práca vykonaná vlastnou tiažou prvku a roznášanou podložkou v mieste zaťaženia [N.mm],
- G_F je lomová energia [N/mm],
- A_{lig} je zostatková prierezová plocha vzorky v mieste zárezu [mm²],
- m_1 je hmotnosť vzorky [kg],
- S je efektívne rozpätie vzorky [mm],
- L je absolútna dĺžka vzorky [mm],
- m_2 je hmotnosť roznášanej podložky v mieste zaťaženia [kg],
- g je tiažové zrýchlenie [m/s²] ($g = 9,807 \text{ m/s}^2$),
- $CMOD_c$ je hodnota roztvorenia čela trhliny v záreze v okamihu kolapsu vzorky [mm].

Výsledky z trojbodovej zaťažovacej zostavy po spriemerovaní sú zobrazené na obrázku 5.



Obrázok 5: Závislosti F - $CMOD$ z trojbodovej zaťažovacej zostavy RSFRC so zárezom

Z výsledkov je možné pozorovať, že lomová energia sa zvyšovala vzostupne so zvyšovaním koncentrácie RSF. Toto úplne neplatilo pri maximálnej sile F_{peak} , kde je možné sledovať podobný trend ako v obrázku 3, kde sa zrejme prejavil pri pevnosti na kockách v prípade nižších koncentrácií RSF efekt zhoršenej spracovateľnosti čerstvého RSFRC. V tabuľke 4 sú prezentované stredné

hodnoty lomovej energie G_F a hodnoty maximálnej sily dosiahnutej pri skúške F_{peak} . pre jednotlivé koncentrácie RSF v betóne.

Tabuľka 4: Priemerné hodnoty vybraných parametrov zo skúšky *F-CMOD*

Dávka RSF vo vzorke [% obj.]	0	0,4	0,9	1,4	1,9	2,4
Maximálna sila F_{peak} [kN]	2,36	2,70	2,54	2,21	3,16	3,79
Lomová energia G_F [N/mm]	0,015	0,066	0,143	0,340	1,043	1,492

4. Záver

Tento článok opisoval základné parametre RSF a RSFRC, pričom možno na základe konfrontácie medzi meraniami autora v tomto článku a článkami ostatných výskumníkov uviesť nasledujúce odporúčania:

- zvýšenie štíhlosti RSF v štádiu ich produkcie (požiadavka na výrobcu RSF)
- použiť kamenivo väčšej frakcie z dôvodu zvýšenia lomovej energie
- na výrobu vzoriek v budúcnosti použiť betón vyššej pevnostnej triedy, a to z dôvodu skrátenia kotevných dĺžok RSF

Ďalšími cieľmi doktorandského štúdia bude vytvorenie materiálového modelu v nelineárnom FEM programe ATENA zo získaných dát v experimente. Po dosiahnutí tohto cieľa bude nasledovať návrh experimentu s aplikáciou RSF v konštrukčnom prvku. Z RSFRC je možné vyrobiť základy pre nenáročné konštrukcie, pojazďové plochy alebo rúry s rozptýlenou výstužou vo forme RSF.

5. PodĎakovanie

Táto práca vznikla s podporou Univerziténeho vedeckého parku STU Bratislava (ITMS: 26240220084).

Literatúra

- [1] ETRMA Report, Available on the Internet: <https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/09/elt-report-v9a-final.pdf>.
- [2] LIEW, K.M.; AKBAR, A.: The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. roč. 232. ISSN 09500618.
- [3] AIELLO, M.A., LEUZZI, F., CENTONZE, G., MAFFEZZOLI, A.: Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management*. 2009. roč 29, č 6, s. 1960-1970. ISSN 0956053X.
- [4] CENTONZE, G., LEONE, M., AIELLO, M.A.: Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. *Construction and Building Materials*. 2012. roč. 36, s. 46-57. ISSN 09500618.
- [5] PAPAKONSTANTINO, C.G., TOBOLSKI, M J.: Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*. 2006. roč. 36, č.9, s. 1686-1691. ISSN 00088846.
- [6] SENGUL, O.: Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2018. roč. 186, s. 1082-1091. ISSN 09500618.
- [7] LI, J., STEWART, M.G., MASIA, M.J.: Probabilistic modeling of unreinforced masonry walls subjected to lateral out-of-plane loading. *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures*. 2019. s. 91-140. ISBN 9780081024393.
- [8] Japan Concrete Institute Standard, Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam, JCI-S-001-2003.

Juraj Slavkov¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 3. ročník

VLASTNOSTI HORNINOVÉHO PROSTREDIA OVPLYVŇUJÚCE NÁVRH ENERGETICKÝCH GEOKONŠTRUKCIÍ

IMPACT OF SOIL PROPERTIES ON DESIGN OF ENERGY GEOSTRUCTURES

Abstract

In civil engineering energy geostructures as a green future and a response to carbon neutrality are applied quite often in the countries of Western Europe and North America. In Slovakia effective application must follow specialized engineering geological study. This study presents indicative determination of selected parameters of the soil environment in the country, which define the energy efficiency of the system in domestic conditions.

Kľúčové slová / Key Words

Prirodzená teplota podłożia, rýchlosť prúdenia podzemnej vody, tepelná vodivosť.

1. Energetické geokonštrukcie

Energetické geokonštrukcie sú nosné konštrukcie, ktorých primárnym účelom je prenos zaťaženia z hornej stavby do podłożia. Sekundárny účel týchto geokonštrukcií je využitie potenciálu geotermálnej energie, a teda fungujú ako geotermálne výmenníky tepla. Sú vhodné na vykurovanie a chladenie hornej stavby, ohrev vody, rozmrazovanie, ale aj ako podzemné úložisko termálnej energie. Štandardne tieto energetické geokonštrukcie pozostávajú z výstuže, výplňového materiálu (betónu) rozvodných potrubí a ich príslušných armatúr [1].

Energetické geokonštrukcie delíme na energetické pažiace konštrukcie, energetické podzemné steny, energetické tunely, energetické dopravné plochy a energetické pilóty (Obr.1). Najčastejšie sa z pomedzi energetických geokonštrukcií v stavebníctve využívajú energetické pilóty a to z dôvodu častejšej aplikácie aj bežných pilót oproti iným geotechnickým konštrukciám vhodným pre zisk geotermálnej energie [1].



Obrázok 1: Energetické pilóty a energetické dopravné plochy [1].

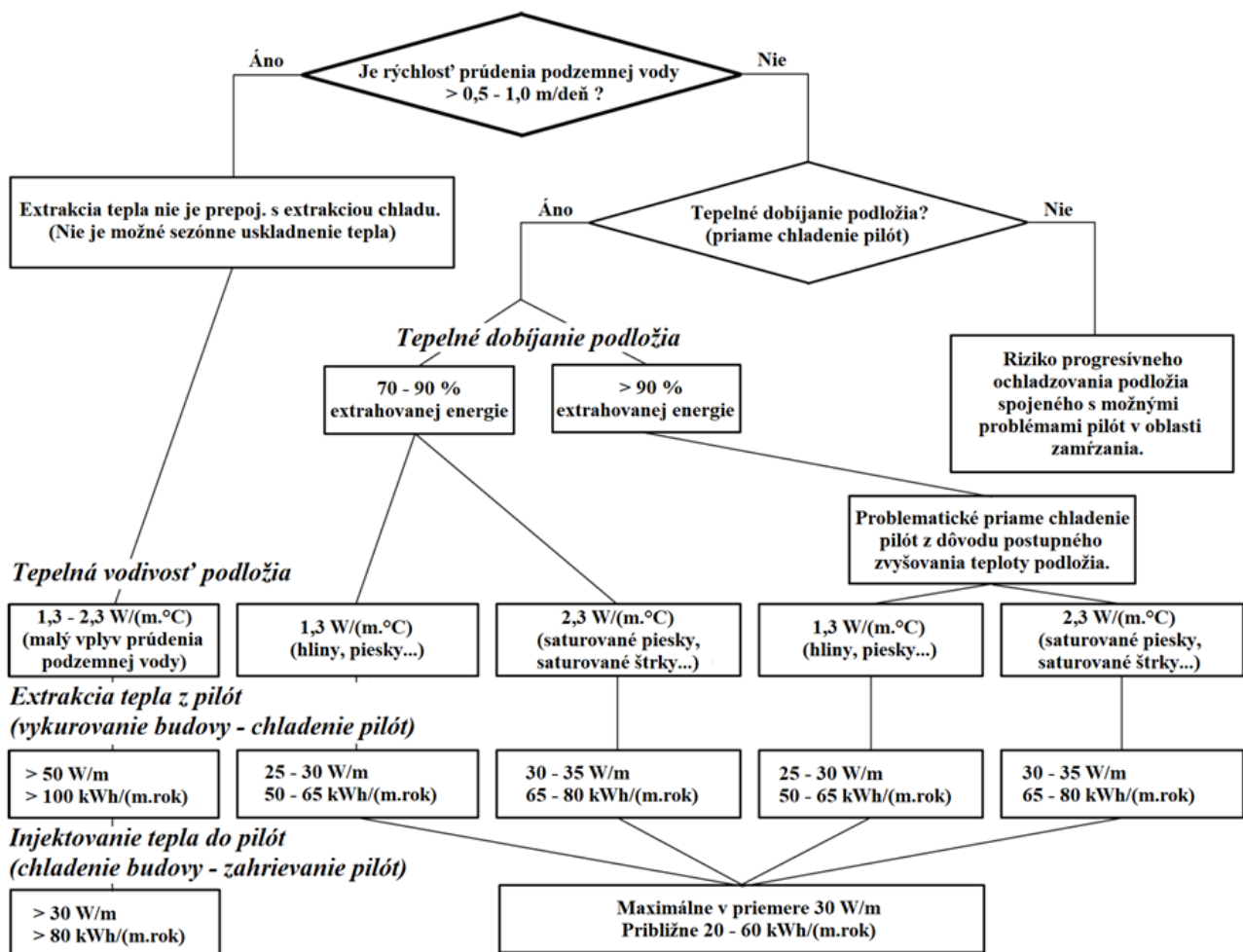
¹ Ing. Juraj Slavkov, Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava

2. Vybrané parametre horninového prostredia pre návrh energetických geokonštrukcií

Nasledujúce parametre horninového prostredia definujú vlastnosti geologického podložia z hľadiska energetickej využiteľnosti, a teda väčšieho alebo menšieho energetického potenciálu záujmového územia. Sú základom k určeniu výkonu konkrétneho energetického systému v konkrétnom území. Poznanie energetického potenciálu krajiny je dôležité k správne návrhu energetických geokonštrukcií z hľadiska energetického výkonu.

Inžinierskogeologický prieskum zameraný na dané parametre je potrebné realizovať v predprojektovej príprave, kedy je aj najjednoduchšia implementácia energetických geokonštrukcií. Z dôvodu ako už bolo spomenuté ich primárny účel je statický, a práve preto sa pomerne často uvažuje s energetickými konštrukciami dodatočne pred realizovaním stavebného diela, čo rozhodne nie je ideálny stav.

Na obr. 2 je znázornené, že rôzne hodnoty energetických vstupov nerozhodujú o možnosti realizácie a teda vhodnosti záujmového územia, ale o spôsobe a možnosti získavania a ukladania energie. Predchádzajúce tvrdenie si overíme na príklade rýchlosti prúdenia podzemnej vody v podloží. Ak je hodnota rýchlosti prúdenia podzemnej vody $>0,5-1,0$ m/deň, ovplyvňuje to možnosť sezónneho uskladnenia tepla a iba v malej miere množstvo extrahovaného tepla z konkrétnej energetickej geokonštrukcie [2].



Obrázok 2: Vplyv vstupných parametrov podložia na návrh energetických geokonštrukcií [2].

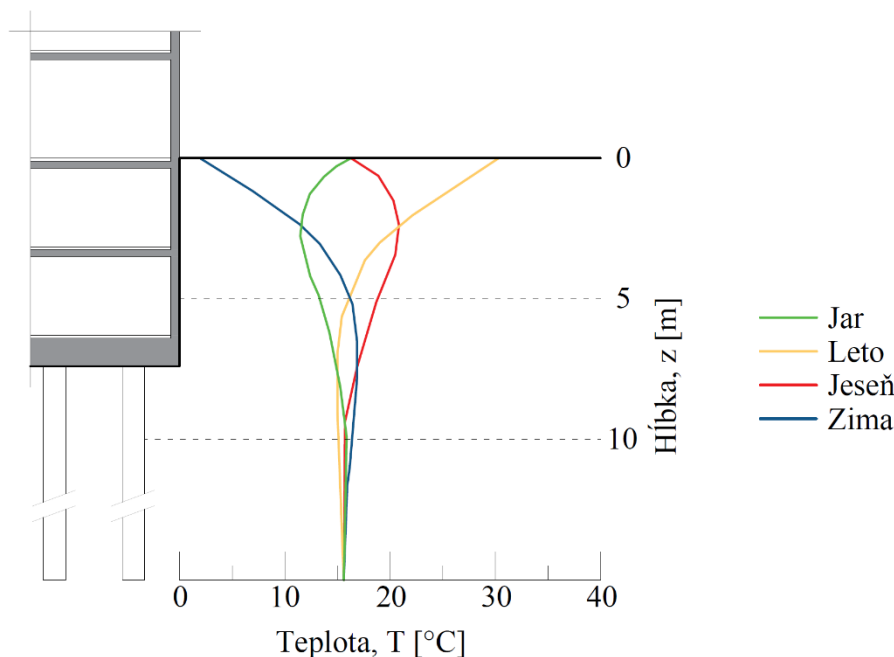
2.1 Prírodná teplota podložia

Prírodná teplota podložia (T_0) [°C] sa stanovuje in situ s použitím termočlánkov alebo pomocou matematických vzťahov, kde je prírodná teplota podložia funkciou teploty v čase a hĺbky. Vyššia hodnota pôsobí priaznivo na návrh energetických pilót, pretože znižuje riziko spojeného s progresívnym ochladzovaním podložia a tým zjednodušuje optimalizáciu celého geotermálneho systému [2].

Hodnota prirodzenej teploty podložia sa zväčšuje s narastajúcou hĺbkou a zároveň sa do určitej hĺbky mení aj v závislosti od striedania ročných období. Smerom od zemského povrchu sa jej hodnota priemerne zväčšuje o 30 °C na jeden kilometer a v jadre dosahuje hodnoty v rozmedzí 6000 až 7000 °C. Prírodná teplota podložia závisí predovšetkým od zloženia horninového podložia, tepelnej vodivosti, tektonickej aktivity a prúdenia podzemných vôd [3].

Avšak keďže energetické geokonštrukcie navrhujeme do úrovne desiatok metrov od zemského povrchu budú preto tieto konštrukcie ovplyvňované predovšetkým meteorologickými podmienkami v konkrétnom záujmovom území. Na základe obr. 3, ktorý vychádza z viacerých meraní v našom podnebnom pásme predpokladáme, že najväčšie zmeny teploty v podloží vznikajú do prvých 6 až 8 m pod úrovňou upraveného terénu.

Energetické geokonštrukcie a predovšetkým energetické pilóty sa navrhujú vo všeobecnosti v hĺbkach s minimálne jedným resp. dvoma podzemnými podlažiami, kde na základe obr. 3 predpokladáme konštantnú alebo iba v minimálnej miere meniacu sa hodnotu prirodzenej teploty podložia.



Obrázok 3: Graf zmeny teploty v závislosti od hĺbky a ročných období, upravené podľa [1].

2.2 Rýchlosť prúdenia podzemnej vody

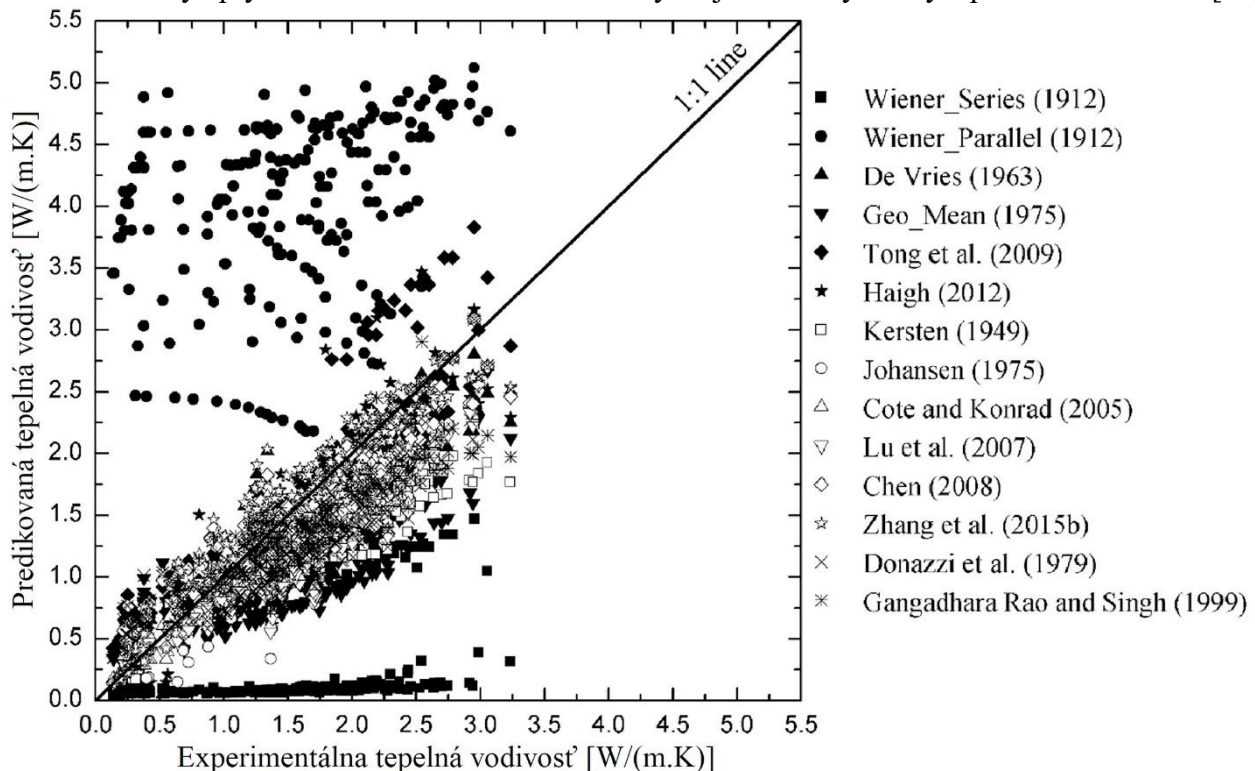
Pre návrh geotermálnych systémov je dôležité stanoviť rýchlosť prúdenia podzemnej vody (v_w) [m/deň]. Je definovaná ako pohyb vody v podloží [4]. Tento parameter podložia je veľmi dôležitý pre návrh geotermálnych systémov, ktoré sú súčasťou energetických geokonštrukcií. Ak je rýchlosť prúdenia podzemnej vody (v_w) v intervale 0,5-1,0 m/deň je možné sezónne uskladniť teplo v podloží. V opačnom prípade, teda mimo intervalu, hovoríme o nadlimitnej hodnote, ktorá sezónne uskladnenie tepla neumožňuje [2].

2.3 Tepelná vodivosť

Najvýznamnejšou charakteristikou podložia, potrebnou pre návrh energetických geokonštrukcií patrí tepelná vodivosť podložia (λ_{Soil}) [W/(m.K)]. Definujeme ju ako atribút udávajúci množstvo tepla kolmo prepúšťaného meranou plochou v danom teplotnom gradiente, teda schopnosť uskutočňovať vedenie tepla [4]. Je to kľúčový parameter, ktorý charakterizuje geotermálny potenciál podložia [1]. Závisí od mineralogického zloženia, objemovej hmotnosti v suchom stave, vlhkosti a zrnitosti [5].

Tepelnú vodivosť zamrznutej vzorky horniny možno vyjadriť iba približne, pretože sa voda s menšou tepelnou vodivosťou 0,57 W/(m.K) mení na ľad, ktorý má väčšiu tepelnú vodivosť 2,18 W/(m.K) [6]. Obsah minerálov v hornine, napríklad kremeňa, ktorý má tepelnú vodivosť 8 W/(m.K) má na celkovú tepelnú vodivosť výrazný vplyv [7]. Veľkosť a orientácia zŕn v prípade ílov a pieskov je podstatne odlišná, čo má výrazný vplyv na tepelnú vodivosť, ktorá je závislá od vzájomného fyzického kontaktu jednotlivých zŕn. Vyplnením vzduchových medzier v hornine vodou sa vytvorí vodný film, ktorý zlepšuje vzájomný fyzický kontakt jednotlivých zŕn a tým aj zvyšuje tepelnú vodivosť horniny. Zvyšovanie obsahu vody v hornine sa prejaví znížením tepelného odporu a zvýšením tepelnej vodivosti [8]. Zmeny tepelného odporu sú v íloch väčšie v porovnaní s pieskami a to z dôvodu veľkosti častíc a ich orientácie. Keďže fyzický kontakt častíc je v pieskoch malý aj malé množstvo vody ho môže zlepšiť [9].

V predbežnom návrhu je postačujúce, ak sa hodnoty tepelnej vodivosti prevezmú z príslušných diagramov, ktoré zohľadňujú obsah vody, hustotu nasýtenia a zrnitosť horniny. Prevzaté hodnoty predstavujú relatívnu presnosť oproti skutočnosti, avšak nikdy by nemali nahrádzať laboratórne a terénne skúšky [5]. Na základe laboratórneho experimentu zameraného na meranie tepelnej vodivosti devätnástich prírodných hornín sa podarilo nájsť empirický vzťah medzi tepelnou vodivosťou, vlhkosťou a objemovou hmotnosťou v suchom stave [10]. Na obr. 4 je možné vidieť rozdiel predikovaných modelov v porovnaní s experimentálnymi meraniami tepelnej vodivosti. Nižšie hodnoty tepelnej vodivosti predikovaných modelov sú spôsobené tým, že vo všeobecnosti neberú do úvahy vplyv kremeňa. Predikované modely majú dobré výsledky v pieskoch a štrkoch [11].



Obrázok 4: Porovnanie predikovaných a experimentálnych výsledkov tepelnej vodivosti [11].

Tepelnú vodivosť podložia stanovujeme v teréne alebo v laboratóriu pomocou špeciálnych meracích prístrojov. Prehľadné zobrazenie metód na určenie tepelnej vodivosti so špecifikáciou je uvedené v tab. 1. Na meranie tepelnej vodivosti skalných hornín a zemín sa používa metóda delenej tyče alebo metóda ihlovej sondy. Táto metóda je vhodná aj na stanovenie súčiniteľa teplotnej vodivosti (α_d) [m^2/s]. Zvolené metódy pre dané horninové prostredie ovplyvňujú presnosť nameraných hodnôt, pričom laboratórne metódy nezohľadňujú skutočné podmienky in-situ.

Najpresnejším spôsobom na meranie tepelnej vodivosti je in-situ metóda geotermálnej odozvy vo vrte (TRT). Táto metóda je založená na princípe injektáže alebo extrakcie tepla z vrtu, pričom sa sleduje stredná teplota vrtu. Systém pri meraní pozostáva z vrtu, potrubného systému, obehového čerpadla a chladiča respektíve ohrievača. Doba trvania testu je 50 až 72 hodín [12].

Tabuľka 1: Metódy stanovenia tepelnej vodivosti λ_{Soil} . [13]

Metóda	Vhodnosť pre		Špecifikácia metódy
	Zeminy	Skalné horniny	
Metóda viacerých sond	áno	áno	Terénna a laboratórna skúška
Metóda jednej sondy	áno	áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre jemnozrnné neporušené vzorky
Metóda delenej tyče		áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre hrubozrnné zeminy
Neustálené vedenie tepla (TPS)	áno	áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre skalné horniny, nutné zväžiť použitie pre zeminy
Geotermálna odozva vo vrte (TRT)	áno	áno	Terénna skúška
Teoretický výpočet (empirické korelácie)	áno	áno	Výpočet na základe minerálneho zloženia, pórovitosti a vlhkosti

V rámci výskumu sme v laboratóriu mechaniky zemín katedry geotechniky stanovili pre 6 vzoriek tepelnú vodivosť metódou jednej sondy. Meranie sa uskutočnilo použitím prístroja ISOMET 2114. ISOMET 2114 je prenosný systém na meranie vlastností prenosu tepla materiálov. Princíp merania zariadením je vo vysielaní impulzov tepelného toku do vzorky. Jedná sa o dynamickú metódu, ktorá výrazne skraca trvanie merania v porovnaní s inými metódami merania. Teplotný rozsah zariadenia s povrchovou sondou je od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozmedzí 0,04 až 6,0 [$\text{W}/(\text{m.K})$].

Vzorky zemín a skalných hornín boli podrobené trom meraniam pri dodržaní rovnakej teploty a vlhkosti vzorky a okolitého prostredia. Výsledná hodnota v tab. 2 je prímerom týchto troch meraní.

Výsledky merania tepelnej vodivosti v niektorých prípadoch len okrajovo korešponujú pre skalné horniny s údajmi v odbornej literatúre. To možno pripísať zvolenej laboratórnej metóde, ktorá je síce rýchla a cenovo dostupná, ale jej presnosť pri meraní je citlivá na zarovnanie povrchu vzorky a predovšetkým na nedostatky laboratórnych metód popísaných vyššie.

Tabuľka 2: Výsledky stanovenia tepelnej vodivosti λ_{Soil}

Druh horniny	λ_{Soil} [$\text{W}/(\text{m.K})$] (merania KGTE)	λ_{Soil} [$\text{W}/(\text{m.K})$] (Hoseinimighani, 2021)
Travertín	2,78	2,17
Piesok (suchý)	0,23	0,25
Pieskovec	0,94	1,60-2,10
Kryštalická vyvretá hornina	2,25	1,70-4,00
F6 CI so strednou plasticitou	1,75	1,80
F6 CL s nízkou plasticitou	1,40	1,30-2,00

3. Záver a diskusia

Energetické geokonštrukcie sú konštrukcie, ktorých účelom je využitie potenciálu geotermálnej energie, a teda fungujú ako geotermálne výmenníky tepla. Na ich efektívny návrh je dôležité poznať fyzikálne a mechanické vlastnosti horninového prostredia. Aj napriek tomu, že existujú viaceré laboratórne a predikčné metódy stanovenia týchto vlastností, najviac zohľadňujúce skutočnosť sú merania in-situ. Ako je uvedené na obr. 4, výsledky z predikčných metód a laboratórnych meraní vykazujú menšie hodnoty na rozdiel od výsledkov z terénnych meraní [11].

Vyššie hodnoty tepelnej vodivosti ovplyvňujú aj návrh energetických geokonštrukcií v zmysle efektívnejšieho návrhu tepelného čerpadla, nakoľko sa so zvyšujúcou tepelnou vodivosťou podložia zlepšuje vedenie tepla a tým aj výkon energetického systému [14].

Na základe týchto skutočností budem vo výskume používať na meranie tepelnej vodivosti terénnu skúšku geotermálnej odozvy vo vrte z dôvodu jej vysokej presnosti a vhodnosti použitia vzhľadom na typ horninového prostredia.

PodĎakovanie

Článok vznikol s podporou projektu VEGA 1/0745/21 vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV.

Literatúra

- [1] Laloui, L., Rotta Loria, A. F., 2020. *Analysis and Design of Energy Geostructures*, Academic Press, 1096 pages, ISBN 978-0-12-820623-2.
- [2] SIA 0190, 2005. Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührenden Betonbauteilen - Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb, SIA Zurich.
- [3] Williams, G. P., Gold L. W., 1977. 'Les Températures Du Sol'. Digeste De La Construction Au Canada, CBD-180F.
- [4] Durmeková, T., Wagner, P., a Frankovská, J., 2013. *Vlastnosti hornín a ich stanovenie v laboratóriu. 1. Skalné horniny*, Univerzita Komenského v Bratislave, 173 strán.
- [5] Brandl, H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*. 56(2), 81-122.
- [6] Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M. Thomas, H. R., 2000. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 4, No. 3, 213–265.
- [7] Nan Zhang, Zhaoyu Wang, 2017. Review of soil thermal conductivity and predictive models. *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 117, Pages 172-183, ISSN 1290-0729.
- [8] Hoseinimighani, H., Szendefy, J., 2021. Comparison of different methods for measuring thermal properties of soil: review on laboratory, in-situ and numerical modeling methods. *Energy*, 27, 31.
- [9] T. Zhang, G. Cai, S. Liu, A. J. Puppala, 2017. Investigation on thermal characteristics and prediction models of soils, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 106, pp. 1074–1086.
- [10] Kersten MS, 1949. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. Bulletin, No. 28. Minneapolis, MN: University of Minnesota Engineering Experiment Station.
- [11] N. Zhang and Z. Wang, 2017. Review of soil thermal conductivity and predictive models, *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 117, pp. 172–183.
- [12] Gehlin S. 2002. Thermal Response Test, Method Development and Evaluation. Doctoral Thesis 2002:39. Luleå University of Technology. Sweden.
- [13] prEN 1997-2 Geotechnical design - Ground properties 2022, 148 s.
- [14] Frankovská, J., 2020. Možnosti využitia horninového prostredia na energetické účely. In *Geotechnika 2020: sborník příspěvků 17. mezinárodní konference. Soláň, ČR, 17. - 18.9.2020*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

Michaela Štefanovičová¹

Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník 3

TEORETICKÁ ANALÝZA NOSNÍKOV VYSTUŽENÝCH GFRP NAMÁHANÝCH OHYBOM

THEORETICAL ANALYSIS OF THE BENDING BEHAVIOUR OF GFRP REINFORCED BEAMS

Abstract

This paper presents an analytical study of the bending behavior of continuous beams reinforced with locally accessible longitudinal Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) bars. The cross-section analysis of GFRP reinforced concrete (RC) member is based on the cross-section analysis of concrete member reinforced with conventional steel with application of special assumptions for GFRP RC. Due to the linear-elastic behavior up to the failure of the FRP materials, the ability of GFRP reinforcement to redistribute loads and moments in continuous beams is questionable. As the reinforcement configuration plays an important role in the moment redistribution, precise theoretical prediction of the bending and shear capacity is crucial.

Kľúčové slová / Key Words

teoretická analýza, GFRP; ohyb; spojité nosníky, ohybová únosnosť, redistribúcia ohybových momentov / theoretical analysis, GFRP, bending, continuous beams, moment redistribution

1. Úvod

Správanie proste podopretých betónových nosníkov vystužených GFRP výstužou bolo v posledných desaťročiach intenzívne skúmané, napr. na vyhodnotenie ohybovej odolnosti, vznik trhlín a možných spôsobov porušenia, ako aj na vyhodnotenie odozvy priehybu betónových nosníkov vystužených GFRP. Avšak len niekoľko štúdií skúmalo správanie spojitých nosníkov vystužených GFRP. Vzhľadom na lineárne elastické správanie FRP materiálov až do porušenia je schopnosť GFRP výstuže prerozdeľovať momenty v spojitých nosníkoch otázná. Podľa smerníc pre betónové prvky vystužené s FRP by sa nemalo uvažovať s prerozdeľením momentu v spojitých nosníkoch alebo iných staticky neurčitých konštrukciách [1]. Niektoré štúdie však naznačujú, že redistribúcia momentu v spojitom betónovom nosníku vystuženom GFRP je možná, ak je správne zvolená konfigurácia výstuže [2].

Štúdie na spojitých nosníkoch vystužených GFRP [2]–[4] potvrdili, že normy ACI 440.1R-06 a CSA S806-2 primerane dobre predpovedajú ich ohybovú únosnosť, ale podceňujú ich priehyby. Pri experimentálnych výskumoch El. Mogy, Habeeb, Ashour a kol., [2], [4] bolo pozorované, že nad strednou podperou spojitých nosníkov vystužených GFRP výstužou sa vytvorili široké trhliny, čo viedlo nakoniec k zmene statickej schémy zo spojitého nosníka na dva prosté nosníky. To môže mať negatívny vplyv na predikciu priehybov, ako aj na predikciu miesta porušenia. Experimentálne štúdie

¹ Michaela, Štefanovičová, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

El. Mogy, Habeeb, Ashour a kol. [2], [4] tiež odhalili, že prevystužený prierez v strede rozpätia prostých alebo spojitých GFRP nosníkov je kľúčovým faktorom pri kontrole vzniku a šírky trhlín, čím sa zvyšuje únosnosť a zároveň sa znižuje priehyb nosníkov. Na druhej strane nárast množstva výstuže nad strednou podperou spojitých betónových nosníkov vystužených GFRP výrazne neprispieva k zlepšeniu únosnosti alebo zmenšeniu priehybu.

Voľba vhodnej konfigurácie výstuže nadpodperového a medzipodperového prierezu nie je jednoduchá. V prípade zamedzenia porušenia drvením betónu je potrebné vziať do úvahy nasledujúce aspekty. Keď je spojitý nosník nadmerne vystužený GFRP prútmi v medzipodperovom priereze, ale nedostatočne vystužený v nadpodperovom priereze, môžu sa nad strednou podperou objaviť široké trhliny a spôsobiť porušenie súdržnosti GFRP výstuže a betónu pri hornom povrchu. Spojitý nosník sa v tomto prípade zmení na dva proste podopreté nosníky. V prípade prevystuženého prierezu v medzipodperovej aj nadpodperovej oblasti nosníka môže zvýšenie odolnosti v tlaku pri hornom povrchu viesť vo vyššom štádiu zaťaženia k vytvoreniu diagonálnych šmykových trhlín a spôsobiť drvenie betónu spojené s porušením v šmyku. Aby sa predišlo šmykovému porušeniu je potrebné rozostup a množstvo šmykovej výstuže navrhnuť s dostatočnou rezervou.

2. Predikcia ohybovej únosnosti

Ohybová únosnosť prvku vystuženého FRP sa určuje metódou analogickou k metóde stanovenia ohybovej únosnosti prvku vystuženého oceľovou výstužou. Únosnosť prvkov vystužených FRP je ovplyvnená niekoľkými dôležitými faktormi založenými na charakteristikách FRP výstuže, akými sú: súdržnosť FRP výstuže s betónom, nižší modul pružnosti FRP výstuže a nižšia šmyková únosnosť FRP výstuže [5].

Analýza prierezu prvku vystuženého GFRP vychádza z troch základných predpokladov prierezovej analýzy železobetónu: rovinné rezy zostávajú rovné v akomkoľvek štádiu zaťaženia, pevnosť betónu v ťahu sa zanedbáva a medzi betónom a výstužou existuje dokonalá súdržnosť, ktorá zabezpečuje deformačnú kompatibilitu pozdĺž rezu [6]. Problém je v tom, že dokonalú súdržnosť medzi GFRP výstužou a betónom je ťažké dosiahnuť, a preto horšia kvalita súdržnosti môže viesť k nesplneniu týchto predpokladov. Ďalší predpoklad aplikovaný špecificky na prvky vystužené GFRP je nasledovný: pevnosť v tlaku GFRP výstuže je zanedbaná a lineárne elastické správanie GFRP výstuže sa uvažuje až do porušenia. Podľa ACI 440.1R-15 [1] je pevnosť v tlaku GFRP výstuže 55 % pevnosti v ťahu a modul pružnosti FRP v tlaku je približne 80 % modulu pružnosti v ťahu tej istej výstuže. Znížený modul pružnosti tlačenej GFRP výstuže je podobný modulu pružnosti betónu, preto sa GFRP výstuž v tlačenej zóne zanedbáva, keďže výrazne nezvyšuje ohybovú únosnosť betónového prierezu.

Porušenie prvku vystuženého GFRP ohybom, môže nastať rozdrvením betónu v tlačenej zóne alebo pretrhnutím GFRP výstuže v ťahu. Tieto dva spôsoby porušenia rozdeľuje takzvaný balančný stupeň vystuženia ρ_{fb} . Keď je prierez vystužený balančným stupňom vystuženia ($\rho_f = \rho_{fb}$), dochádza k rozdrveniu betónu a pretrhnutiu GFRP výstuže súčasne. Ak je stupeň vystuženia nižší ako balančný ($\rho_f < \rho_{fb}$), k porušeniu dôjde pretrhnutím GFRP výstuže. Zatiaľ čo, ak je stupeň vystuženia vyšší ako balančný ($\rho_f > \rho_{fb}$), k porušeniu dôjde rozdrvením betónu. Pri navrhovaní betónových prvkov vystužených GFRP sa uprednostňuje spôsob porušenia rozdrvením betónu v tlačenej zóne. Tento spôsob porušenia sa v prvku vystuženom GFRP považuje za menej krehký spôsob porušenia, pretože drvený betón prvku vykazuje zvyškovú úroveň pevnosti počas porušenia, preto je vo väčšine noriem pre GFRP výstuže potrebný prevystužený betónový prierez [6].

Obrázok 1 predstavuje betónový prierez vystužený GFRP výstužou. Uvedená teoretická analýza sa neobmedzuje len na GFRP výstuž, betónový prierez môže byť vystužený aj inými typmi FRP výstuže. Na odhad ohybovej odolnosti prierezu vystuženého GFRP sa využíva kompatibilita

pretvorení a rovnováha síl. Predložená analýza predpokladá idealizovaný blokový diagram medzi napätím a pretvorením betónu podľa Eurokódu 2 [7] s aplikovaním spomenutých predpokladov pre návrh prvkov vystužených s FRP výstužou podľa publikácie CEB-FIB 2007 [6]. Z predpokladu, že rovinný prierez zostane rovinný pred aj po ohybe, pomer pretvorení betónu a GFRP výstuže podľa Obrázku 1 je nasledujúci:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_f}{d - x} \quad (1)$$

kde ε_f je pomerné pretvorenie GFRP výstuže, ε_c je pomerné pretvorenie tlačeneho betónu, x je poloha neutrálnej osi, d je efektívna výška prierezu vystuženého GFRP. Sila tlačenej zóny betónu F_c sa vypočíta nasledovne:

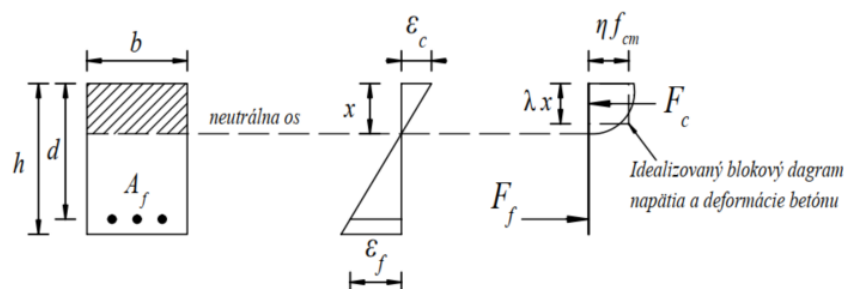
$$F_c = \eta \lambda f_{cm} b x \quad (2)$$

kde η je súčiniteľ zohľadňujúci pomer priemerného napätia v tlaku k pevnosti betónu f_{ck} , λ je súčiniteľ definujúci účinnú výšku tlačenej oblasti (x), f_{cm} je stredná hodnota pevnosti betónu v tlaku v čase 28 dní, f_{ck} je charakteristická pevnosť betónu v tlaku v čase 28 dní $f_{ck} = f_{cm} - 8$ (MPa), b šírka tlačenej zóny prvku a x je poloha neutrálnej osi. Za predpokladu, že vzťah napätia a pretvorenia GFRP výstuže je lineárny až do zlyhania, sila v GFRP výstuži je nasledovná:

$$F_f = A_f f_f = A_f E_f \varepsilon_f \quad (3)$$

kde F_f je sila v ťahanej výstuži, A_f je prierezová plocha výstuže, f_f je napätie vo výstuži, E_f je modul pružnosti GFRP výstuže. Silová podmienka GFRP vystuženého prierezu je nasledovná:

$$\eta \lambda f_{cm} b x = A_f E_f \varepsilon_f \quad (4)$$



Obrázok 1: Priebeh pretvorenia a napätia v priereze vystuženého GFRP výstužou

2.1 Balančné zlyhanie

Pri balančnom zlyhaní v ohybe sa drvenie betónu a pretrhnutie GFRP výstuže deje súčasne, $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,0035$ (drvenie betónu) a $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ (pretrhnutie GFRP výstuže v ťahu), kde ε_{cu} je medzné pretvorenie betónu a ε_{fu} je medzné pretvorenie GFRP výstuže. Poloha neutrálnej osi pre balančné zlyhanie x_b je potom:

$$x_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} d = \frac{0,0035}{0,0035 + \varepsilon_{fu}} d \quad (5)$$

Balančný stupeň vystuženia ρ_{fb} je ovplyvnený mechanickými vlastnosťami GFRP výstuže a betónu a je odvodený od silovej rovnováhy v priereze vystuženom GFRP, ako je znázornené na Obrázku 1.

$$\rho_{fb} = \frac{A_{fb}}{b + d} = \frac{\eta \lambda f_{cu} x_b}{f_{fu} d} \quad (6)$$

kde A_{fb} je prierezová plocha GFRP výstuže pre balančný stupeň vystuženia, f_{cu} je medzná pevnosť betónu v tlaku, f_{fu} je medzná pevnosť v ťahu GFRP výstuže, súčiniteľ η je pre $f_{ck} \leq 50$ MPa 1,0; pre

$50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$ $\eta = 1,0 - \left(\frac{f_{ck}-50}{200}\right)$, a súčiniteľ λ je pre $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ 0,8; pre $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$ $\lambda = 0,8 - \left(\frac{f_{ck}-50}{400}\right)$.

2.2 Zlyhanie drvením betónu

Podľa teoretických predpokladov, ak je stupeň vystuženia GFRP vyšší ako balančný stupeň vystuženia ($\rho_f > \rho_{fb}$), nastáva spôsob porušenia betónu drvením. Aj keď je možné teoretické vymedzenie spôsobu zlyhania betónových nosníkov, skutočný prvok nemusí zlyhať, ako sa predpokladá. Pripisuje sa to neistotám materiálových vlastností, predpokladom vykonaným v analýze, umiestneniu výstuže a rozmerom betónového prierezu. Napríklad, keď je pevnosť betónu vyššia ako očakávaná, prvok môže zlyhať roztrhnutým GFRP výstuže. Taktiež, ak medzné pomerné pretvorenie betónu prekročí v analýze predpokladaných 0,0035 prvok môže zlyhať roztrhnutím GFRP výstuže. Preto, aby sa predišlo možnému pretrhnutiu GFRP v dôsledku vyššie uvedených neistôt, stanovila sa minimálna hodnota stupňa vystuženia pre nosníky $1,5 \rho_{fb}$ [8].

V prípade zlyhania betónu drvením ($\rho_f > 1,5 \rho_{fb}$) je pomerné pretvorenie betónu $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,0035$. Súčiniteľ η je pre $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ 1,0; pre $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$ $\eta = 1,0 - \left(\frac{f_{ck}-50}{200}\right)$ a súčiniteľ λ je pre $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ 0,8; pre $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$ $\lambda = 0,8 - \left(\frac{f_{ck}-50}{400}\right)$. Neznáma poloha neutrálnej osi x sa vypočíta z rovnice (4) s použitím náhradnej hodnoty pretvorenia v GFRP výstuži ε_f z rovnice (1). Na riešenie kvadratickej rovnice (8) a získanie hodnoty polohy neutrálnej osi sa použije substitúcia

$$\eta = \frac{A_f E_f \varepsilon_{cu}}{\eta \lambda f_{cm} b d}.$$

$$\eta \lambda f_{cm} b x - A_f E_f \frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu} = 0 \quad (7)$$

$$\left(\frac{x}{d}\right)^2 + \frac{x}{d} \eta - \eta = 0 \quad (8)$$

$$x = d \frac{[-\eta + \sqrt{(\eta)^2 + 4\eta}]}{2} \quad (9)$$

Po stanovení polohy neutrálnej osi x sa z podmienky rovnováhy momentov k ťažisku prierezu vystuženého GFRP určí ohybová odolnosť prierezu:

$$M_f = \eta \lambda f_{cm} b x \left(d - \frac{\lambda x}{2}\right) \quad (10)$$

2.3 Zlyhanie roztrhnutím GFRP výstuže

V prípade zlyhania GFRP výstuže ($\rho_f < \rho_{fb}$) je pomerné pretvorenia GFRP výstuže $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$. Konečná hodnota medzného pretvorenia GFRP výstuže ε_{fu} závisí od typu GFRP výstuže a výrobcu a možno ju odhadnúť z rovnice:

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} \quad (11)$$

Zodpovedajúce pretvorenie betónu ε_c je nižšie ako $\varepsilon_{cu} = 0,0035$. Súčiniteľ η sa vypočíta z rovnice $\eta = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)^2$ kde ε_{c2} je pomerné pretvorenie betónu po dosiahnutí maximálnej pevnosti. Súčiniteľ λ je tak ako aj pre ostatné spôsoby zlyhania 0,8 pre $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ a $\lambda = 0,8 - \left(\frac{f_{ck}-50}{400}\right)$ pre $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$. Neznáma poloha neutrálnej osi x sa vypočíta z rovnováhy síl v priereze:

$$x = \frac{A_f E_f \varepsilon_{fu}}{\eta \lambda f_{cm} b} \quad (12)$$

Z podmienky rovnováhy momentov k ťažisku prierezu vystuženého GFRP sa ohybová odolnosť prierezu určí nasledovne:

$$M_f = A_f E_f \varepsilon_{fu} \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (13)$$

3. Predikcia šmykovej únosnosti

Aby sa predišlo šmykovému porušeniu nosníkov vystužených GFRP výstužou je potrebné navrhnuť priečnu šmykovú výstuž vo forme oceľových strmeňov, ktoré zabezpečia prenos ťahových síl cez šikmé šmykové trhliny. Šmyková odolnosť prvku je určená ako ťahová kapacita šmykovej výstuže (strmeňov) podľa Eurokódu 2 [7]:

$$V_{Rd,s} = f_{ywm} \frac{A_{sw}}{s} z \cot \theta \quad (14)$$

kde A_{sw} je prierezová plocha šmykovej výstuže, f_{ywm} je stredná hodnota medze klzu šmykovej výstuže, s je vzdialenosť strmeňov v pozdĺžnom smere.

4. Predikcia zaťaženia pri porušení

Predpokladané zaťaženie pri porušení F_{pre} v strede rozpätia proste podopretých betónových nosníkov sa vypočíta zo ohybovej odolnosti nosníka nasledovne:

$$F_{pre} = \frac{4 M_{fs}}{L} \quad (15)$$

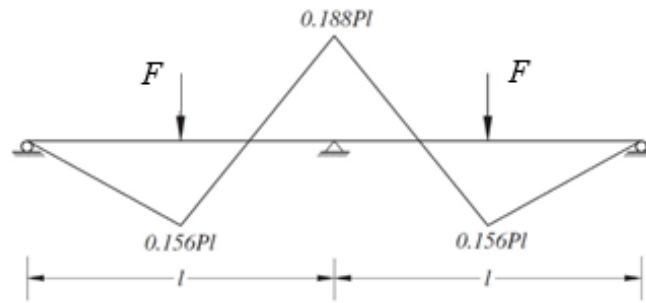
kde M_{fs} je moment odolnosti v strede rozpätia prostého nosníka, L je vzdialenosť medzi podperami.

Pri spojitých nosníkoch sa predpokladané zaťaženie môže určiť na základe plastického alebo elastického prerozdelenia momentov. V prípade ak nosník je duktilný, uvažuje sa so vznikom plastických kĺbov v strede rozpätia a nad strednou podperou. Predpokladané zaťaženie pri porušení sa vypočíta nasledovne:

$$F_{pre,pl} = \frac{2(M_{fs} + M_{fh})}{L} \quad (16)$$

kde M_{fs} je moment odolnosti medzi podperami spojitého nosníka, M_{fh} je moment odolnosti nad strednou podperou spojitého nosníka, L je vzdialenosť medzi podperami.

Pre krehký elastický materiál sa predpokladané zaťaženie $F_{pre,el}$ určí ako menšia hodnota vypočítaná buď z momentu odolnosti medzi podperami ($F_{pre,el} = \frac{M_{fs}}{0,156L}$) alebo z momentu odolnosti nad strednou podperou spojitého nosníka ($F_{pre,el} = \frac{M_{fh}}{0,188L}$), vid' Obrázok 2 [9].

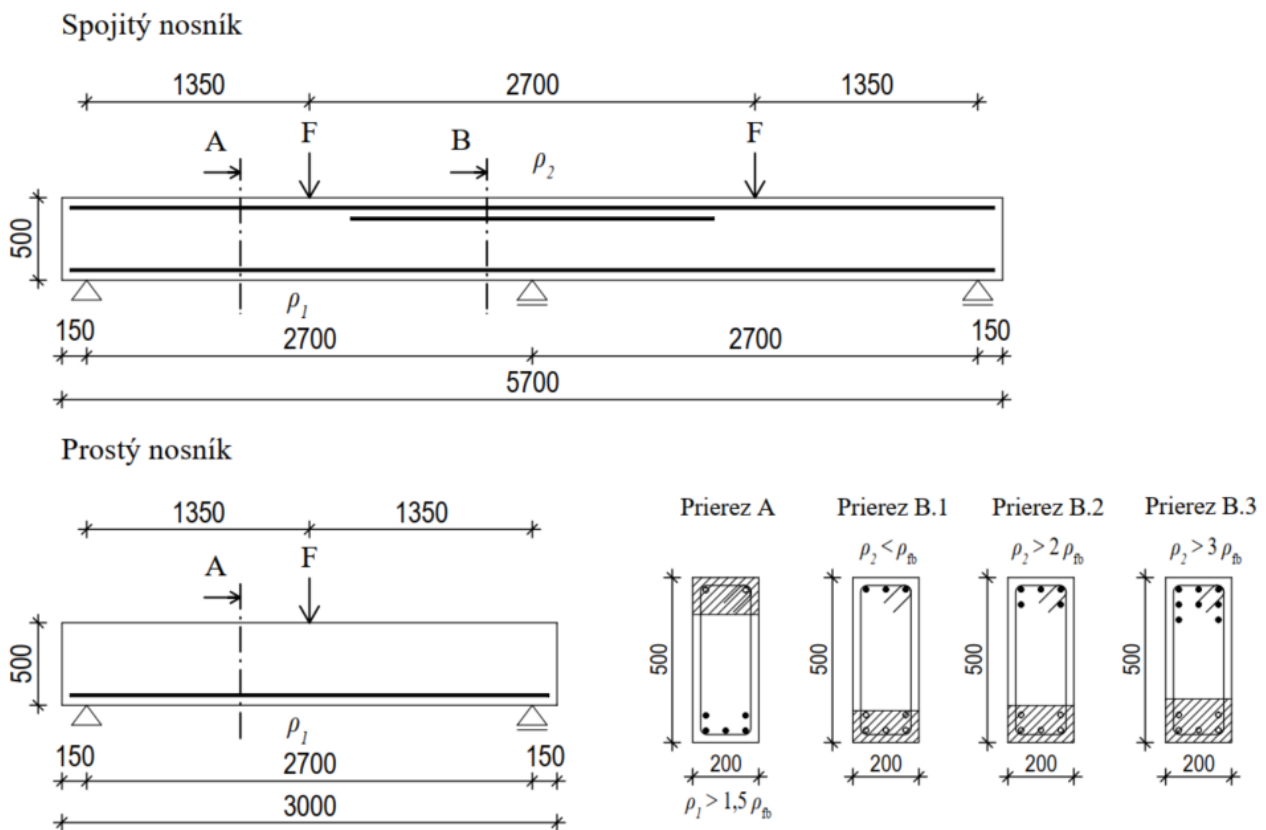


Obrázok 2 Redistribúcia elastického ohybového momentu za predpokladu konštantnej ohybovej tuhosti [9]

5. Teoretická analýza nosníkov vystužených GFRP

Tento článok je súčasťou pred-experimentálnej analýzy nosníkov vystužených GFRP namáhaných ohybom. Po odskúšaní vzoriek budú výsledky teoretickej analýzy porovnané s experimentálnymi výsledkami. Cieľom výskumu je sledovať vplyv stupňa vystuženia a vplyv súdržnosti na ohybovú odolnosť spojitých nosníkov vystužených GFRP výstužou.

Vzhľadom na závery z vyššie uvedených štúdií na spojitých nosníkoch boli stupne vystuženia pre betónové prierezy vystužené GFRP na analýzu zvolené nasledovne: stupeň vystuženia pri spodnom povrchu pre medzipodperový prierez ρ_1 má minimálnu hodnotu $1,5 \rho_{fb}$ vo všetkých nosníkoch (prierez A), stupeň vystuženia pri hornom povrchu pre nadpodperový prierez ρ_2 je raz zvolený ako pod-vystužený $\rho_2 < 1,5 \rho_{fb}$ (prierez B.1), potom ako pre-vystužený $\rho_2 > 2 \rho_{fb}$ (prierez B.2) a následne ako výrazne pre-vystužený $\rho_2 > 3 \rho_{fb}$ (prierez B.3), ako je znázornené na Obrázku 3.



Obrázok 3 Prierezy nosníkov

Na sledovanie vplyvu súdržnosti na ohybovú odolnosť a spôsob porušenia nosníkov boli zvolené GFRP výstuže od dvoch lokálnych výrobcov s rôznou povrchovou úpravou. Materiálové charakteristiky GFRP výstuže na analýzu boli zvolené na základe hodnôt deklarovaných výrobcami a sú zosumarizované v *Tabuľke 1*.

Tabuľka 1 Materiálové charakteristiky GFRP výstuže

GFRP výstuž	Priemer (mm)	Ťahová pevnosť f_{tu} (MPa)	Pretvorenie ε_{fu} (%)	Modul pružnosti E_f (GPa)
ovinutá (HW)	16	1000	0,018	55
opieskovaná (SC)	16	800	0,019	43

Trieda betónu bola uvažovaná C25/30, $f_{ck} = 25$ MPa a $f_{cm} = 33$ MPa. Na porovnanie boli analyzované aj nosníky vystužené oceľovou výstužou pevnosti B500B s rovnakou plochou vystuženia aká bola zvolená pre GFRP výstuž. Zvolené plochy výstuže, ktoré pri GFRP výstuži zodpovedajú drveniu betónu v prípade použitia oceľovej výstuže zodpovedajú zlyhaniu roztrhnutím výstuže. Vyplýva to z vysokej hodnoty pomerného pretvorenia GFRP výstuže ε_{fu} a s tým súvisiacou malou tlačnou zónou betónu x_b a teda nízkym balančným stupňom vystuženia ρ_{fb} .

Výsledky teoretickej analýzy nosníkov sú zosumarizované v *Tabuľke 2*. Predikcia ohybovej odolnosti prierezov je zobrazená graficky na *Obrázku 4* a predikcia zaťaženia pri porušení nosníkov je graficky zobrazená na *Obrázku 5*.

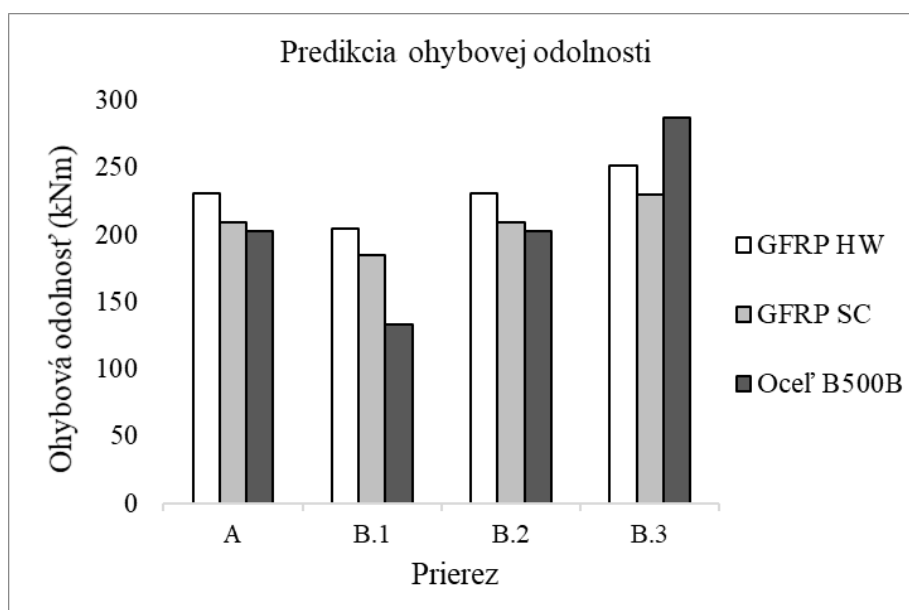
Tabuľka 2 Výsledky teoretickej analýzy nosníkov

Prierez	Typ výstuže	Balančný stupeň vystuženia ρ_{fb} (%)	Plocha ťahanej výstuže $A_{f,prov}$ (mm ²)	Stupeň vystuženia ťahanej výstuže ρ_f (%)	Ohybová odolnosť M_f (kNm)	Šmyková odolnosť $V_{Rd,s}$ (kN)	Zataženie pri porušení F_{pre} (kN)		
							prostý nosník	spojitý nosník plastický	spojitý nosník elastický
A	GFRP HW	0,53%	1005	1,14%	231	470	342		548
	GFRP SC	0,52%			210				498
	oceľ	3,08%			203				300
B.1	GFRP HW	0,53%	603	0,65%	205	508		498	403
	GFRP SC	0,52%			185			488	364
	oceľ	3,08%			133			399	
B.2	GFRP HW	0,53%	1005	1,14%	231	470		513	455
	GFRP SC	0,52%			210			466	413
	oceľ	3,08%			203			450	
B.3	GFRP HW	0,53%	1608	1,92%	251	432		528	495
	GFRP SC	0,52%			230			481	453
	oceľ	3,08%			287			513	

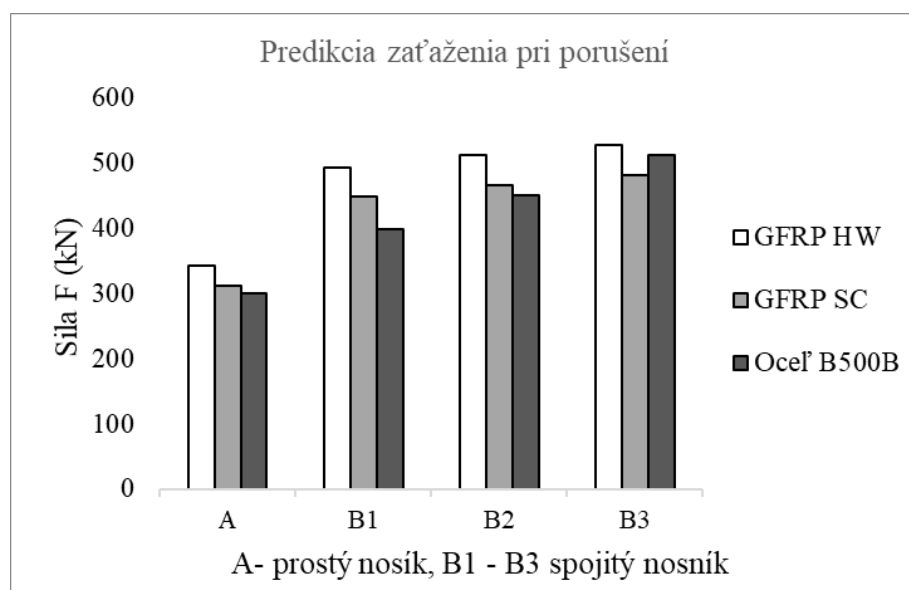
Z ohybovej odolnosti prierezov zobrazenej v *Tabuľke 2* na *Obrázku 4* bolo vypočítané predpokladané zaťaženie pri porušení pre prosté a spojité nosníky. V prípade prostých nosníkov, s výstužou zodpovedajúcou prierezu A, sa predpokladá vyššia ohybová odolnosť a teda aj vyššia hodnota zaťaženia pri porušení v prípade nosníkov vystužených GFRP výstužou v porovnaní s oceľovou výstužou B500B. Vyššie hodnoty odolnosti ovinutej GFRP výstuže (GFRP HW) v porovnaní s opieskovanou GFRP výstužou (GFRP SC) vyplývajú z materiálových charakteristík, vyššej ťahovej pevnosti f_{tu} a vyššieho modulu pružnosti E_f ovinutej GFRP výstuže (GFRP HW).

V prípade spojitých nosníkov vystužených GFRP výstužou závisí, či sa uvažuje s plastickým alebo elastickým prerozdelením momentov. Pri elastickom prerozdelení momentov je rozhodujúce zaťaženie určené z momentu odolnosti nad strednou podperou. Pri plastickom prerozdelení momentov je predpokladané zaťaženie vyššie ako pri elastickom prerozdelení o 19%, 11% a 6% pre nosníky B1, B2 a B3. S rastúcim stupňom vystuženia pri hornom povrchu sa rozdiel medzi hodnotami zaťaženia podľa plastického a elastického prerozdelenia znižuje. Aj keď GFRP výstuž má lineárne elastické materiálové charakteristiky, výsledky experimentálneho výskumu na spojitých nosníkoch vystužených GFRP ukazujú, že lepšia zhoda v predikcii zaťaženia je práve pri uvažovaní plastického prerozdelenia momentov [9], ktoré je graficky zobrazené na Obrázku 5.

Predikcia šmykovej odolnosti je zobrazená v *Tabuľke 2*. Vo výpočte sa uvažovalo s oceľovými strmeňmi s priemerom 8 mm a rozstupom 50 mm po celej dĺžke nosníkov. Množstvo šmykovej výstuže bolo zvolené tak, aby šmyková odolnosť nosníkov bola vyššia ako predpokladané šmykové zaťaženie, ktoré sa dá teoreticky určiť ako $\frac{1}{2} F_{pre}$.



Obrázok 4 Predikcia ohybovej odolnosti prierezov



Obrázok 5 Predikcia zaťaženia pri porušení nosníkov pri plastickom prerozdelení momentov

6. Závěry

Na základe teoretickej analýzy nosníkov vystužených GFRP a oceľovou výstužou možno skonštatovať tieto závery:

1. Vzhľadom na vysoké hodnoty pomerného pretvorenia GFRP výstuže ε_{fu} vychádza v prierezovej analýze GFRP vystuženého prierezu veľmi malá tlačaná zóna betónu a teda aj nízky balančný stupeň vystuženia. Z toho vyplýva, že plochy výstuže, ktoré pri GFRP vystuženom priereze zodpovedajú porušeniu drvením betónu môžu v priereze vystuženom oceľovou výstužou zodpovedať porušeniu roztrhnutím výstuže.
2. V prípade prostých nosníkov sa predpokladá vyššia ohybová odolnosť a vyššia hodnota zaťaženia pri porušení v prípade nosníkov vystužených GFRP výstužou v porovnaní s oceľovou výstužou B500B.
3. V prípade spojitých nosníkov vystužených GFRP výstužou hodnota zaťaženia pri porušení závisí od predpokladu plastického alebo elastického prerozdelenia momentov. Rozdiel medzi hodnotami zaťaženia vyplývajúceho z plastického a elastického prerozdelenia momentov je 6-19%. S rastúcim stupňom vystuženia pri hornom povrchu sa rozdiel medzi hodnotami zaťaženia podľa plastického a elastického prerozdelenia znižuje. Spôsob prerozdelenia momentov určí experimentálne odskúšanie vzoriek.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla s podporou výskumného projektu VEGA č. VEGA 1/0645/20 "Navrhovanie a zosilňovanie betónových konštrukcií na trvanlivosť".

Literatúra

- [1] ACI440 3R, "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures," *Am. Concr. Inst.*, pp. 1–40, 2004.
- [2] M. El-Mogy, A. El-Ragaby, and E. El-Salakawy, "Flexural Behavior of Continuous FRP-Reinforced Concrete Beams," *J. Compos. Constr.*, vol. 14, no. 6, pp. 669–680, 2010, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000140.
- [3] I. Fatih and A. F. Ashour, "Flexural performance of FRP reinforced concrete beams," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 5, pp. 1616–1625, 2012, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.12.012.
- [4] M. N. Habeeb and A. F. Ashour, "Flexural Behavior of Continuous GFRP Reinforced Concrete Beams," *J. Compos. Constr.*, vol. 12, no. 2, pp. 115–124, 2008, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:2(115).
- [5] K. Protchenko, P. Lešniak, E. Szmigiera, and M. Urbański, "New model for analytical predictions on the bending capacity of concrete elements reinforced with frp bars," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 3, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/ma14030693.
- [6] fib, *FRP reinforcement in RC structures*, no. September. 2007.
- [7] E. C. for Standardization, "EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings," 2005.
- [8] W. Xue, F. Peng, and Q. Zheng, "Design Equations for Flexural Capacity of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars," *J. Compos. Constr.*, vol. 20, no. 3, p. 04015069, 2016, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000630.
- [9] A. M. Araba and A. F. Ashour, "Flexural performance of hybrid GFRP-Steel reinforced concrete continuous beams," *Compos. Part B Eng.*, vol. 154, no. April, pp. 321–336, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.077.

Matej Šulík¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 2.

OBRYSOVÉ KRIVKY

VEHICLE TRACKING CURVES

Abstract

The aim of this work is to analyse the issue of the design of geometry of urban roads, roads and highways. The paper contains a summary of the principles of Slovak and American policies according to which the calculation for the design of tracking vehicle curves was developed. Since the time when Slovak codes, regarding to this issue, were written, the vehicles underwent design change. Because of this evolvement will be necessary to update relevant articles of Slovak codes.

Kľúčové slová / Key Words

Obrysové krivky; geometrický návrh; smerové oblúky; diferenciál

1. Úvod

Kľúčovými prvkami v geometrickom návrhu ciest, diaľnic a mestských komunikácií sú fyzikálne charakteristiky a proporcie vozidiel rôznych veľkostí využívajúcich dopravné komunikácie. Preto je vhodné preskúmať všetky typy vozidiel, stanoviť všeobecné skupiny vozidiel a vybrať vozidlá reprezentatívnych veľkostí v rámci každej triedy na návrhové využitie konštrukcie. Pri navrhovaní akéhokoľvek dopravného objektu by mal projektant zvážiť najväčšie vozidlo so špeciálnymi charakteristikami vhodnými pre konkrétne miesto. Pri určovaní kritických miest konštrukcie sú takýmito prvkami polomery.

2. Riešenie obrysových kriviek v slovenskej legislatíve

V našich podmienkach je problematika obrysových kriviek zahrnutá v normách [1], [2] a [3]. Konkrétne návrhové skupiny vozidiel sú však definované len v [3]. Táto norma definuje 3 skupiny vozidiel. Pre všetky podskupiny sú definované len orientačné parametre ako šírka, dĺžka, výška a rázvor. Prvá skupina sa delí na 2 podskupiny 01 a 02 (01 sú malé a stredné osobné automobily, 02 sú veľké osobné automobily a karavany). Druhá skupina má až 3 podskupiny N1, N2 a A (N1 sú malé a stredné nákladné automobily prípadne malé autobusy, N2 sú veľké nákladné automobily, A sú autobusy). Posledná tretia skupina sú ťahače, privesy, návesy, kĺbové autobusy, traktory a pod. tretia skupina nemá stanovené orientačné rozmery len maximálne prípustné rozmery. Poznámka v tabuľke prílohy 1 odkazuje projektanta na stanovenie rozmerov z predpokladanej skladby vozidiel.

3. Riešenie obrysových kriviek v americkej legislatíve

¹ Matej Šulík, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 812 43, Bratislava

Zásady Americkej asociácie štátnych úradov pre diaľnice a dopravu [4] stanovujú 4 triedy konštrukčných vozidiel:

- osobné automobily,
- autobusy,
- nákladné autá,
- rekreačné vozidlá.

Trieda osobných automobilov zahŕňa osobné autá všetkých veľkostí, športové/úžitkové vozidlá, dodávky a pick-upy. Autobusy zahŕňajú medzimestské a mestské autobusy vrátane kĺbových autobusov. Trieda nákladných vozidiel zahŕňa kombinácie ťahača a návesu prípadne ťahača a návesu s príviesmi. Medzi rekreačné vozidlá patria obytné automobily, autá s obytnými príviesmi, autá s príviesmi na člny. Táto zahraničná metodika má ale viac špecifikovaných podkategórií. V súčte ich je až 20 a majú individuálne viac orientačných parametrov než podskupiny v [3].

4. Sily a odpory pôsobiace na vozidlo

Pri výpočte obrysových kriviek je potrebné vziať do úvahy nasledovné sily a odpory pôsobiace na vozidlo.

Vonkajšie sily pôsobiace na vozidlo

Na motorové vozidlo môžu pôsobiť tieto vonkajšie sily:

- tiaž vozidla s nákladom,
- odstredivá sila,
- sila vetra,
- ťah na ťažné zariadenie (ojo) pri vozidle s príviesom, resp. návesom.

Odpory proti pohybu vozidla

Aby sa vozidlo uviedlo do pohybu, je nutné ťažnou silou vyvolanou motorom prekonať vonkajšie odpory proti pohybu vozidla. Ak uvážim samostatné vozidlo, môže sa jednať o prekonanie týchto odporov:

- odpor proti valeniu (valivé trenie),
- odpor proti vzduchu alebo prostredia,
- odpor z pozdĺžneho sklonu cesty,
- odpor zo zotrvačnosti vozidla pri jeho akcelerácii.

Hlavnými faktormi ovplyvňujúcimi výpočet minimálneho polomeru sú polomer otáčania stredovej osi R_1 , šírka rozchodu, rázvor, polomer otáčania vnútornej zadnej pneumatiky resp. karosérie R_B a polomer otáčania prednej vonkajšej pneumatiky resp. karosérie R_A . Pri návrhu ciest v intraviláne a rýchlosti vozidla do 15 km/h sa sily a odpory pôsobiace na vozidlo minimalizujú a môžeme ich tak zanedbať. Podľa [1] sa rozšírenie jazdného pruhu a prídavného pruhu v smerovom oblúku robí vtedy, keď je polomer kružnicového oblúka R menší ako 320 m a základná šírka pruhu v priamej časti je 3,50 m. Pri smerovo rozdelených cestných komunikáciách sa rozširuje iba pravý krajný jazdný pruh so základnou šírkou 3,50 m. V prípade návrhu ciest v extraviláne alebo vyššej návrhovej rýchlosti než 15 km/h kvôli zvýšeniu bezpečnosti premávky norma stanovuje rozšírenie empiricky stanovenou hodnotou (1), ktorá akoby nahrádza sily a odpory pôsobiace na vozidlo.

$$\frac{v^*}{10 \times \sqrt{R}} \quad (1)$$

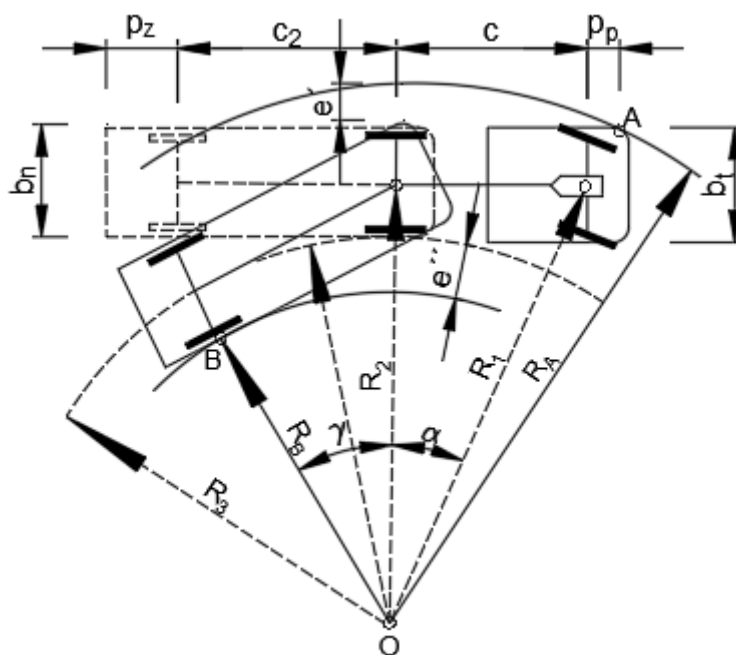
Kde:

R- polomer smerového oblúka [m]

v^* - rýchlosť predbiehajúceho vozidla alebo rýchlosť pri stretaní vozidla v opačnom smere [km/h]

5. Geometria pohybu vozidla v smerovom oblúku

Pod geometriou pohybu vozidla rozumieme spôsob, akým vozidlo prechádza v rámci šírky zaberaného jazdného pruhu, aký najmenší polomer dráhy potrebuje a akú stopu respektíve trajektóriu pri jazde vytvára. V priamej trase nepôsobia odstredivé sily a šírka zaberaného priestoru vozidlom zodpovedá šírke vozidla. Pri jazde v smerovom oblúku však vozidlo vplyvom vychýleného uhla, výchylných vlastností, rázvoru a od rozmerov návesov zaberá širší pruh, ako je šírka vozidla. Tieto faktory vplyvajú aj na minimálne polomery smerových oblúkov. Vozidlo sa v smerovom oblúku dostane takej polohy aby okamžitý stred jeho otáčania O bol v priesečníku s rovinami preloženými stredom kolies kolmo na povrch vozovky. Je totiž dôležité a nevyhnutné aby nedochádzalo k nežiaducemu šmyku kolies po povrchu vozovky. Deje sa tak vďaka odklonom prednej osi nápravy (maximálne o výchylný uhol α) oproti osi zadnej nápravy alebo odklonom predných kolies oproti pozdĺžnej rovine súmernosti (v pôdoryse pozdĺžna os súmernosti – P_{os}) vozidla. V prípade osobných automobilov, ľahkých či ťažkých nákladných vozidiel sa odkláňajú iba predné kolesa a náprava ostáva v kolmom smere na pozdĺžnu os súmernosti vozidla (pri záprahových vozidlách sa odkláňa celá náprava). Pri návesoch môže byť ich zadná náprava neriadená, čiže zostáva bez odklonu oproti vlastnej pozdĺžnej osi súmernosti (obrázok 1) alebo je riadená a odkláňa sa od vlastnej pozdĺžnej osi súmernosti návesu. Vzťahy (2 až 7) uvádzajú výpočet geometrických charakteristík prejazdu návesu smerovým oblúkom.



Obrázok 1: Schéma prejazdu návesu, zdroj: [6]

$$R_3 = c_2 \times \cot \gamma \quad (2)$$

$$R_3 = \sqrt{R_2^2 - c^2} \quad (3)$$

$$R_B = R_3 - \frac{b_n}{2} \quad (4)$$

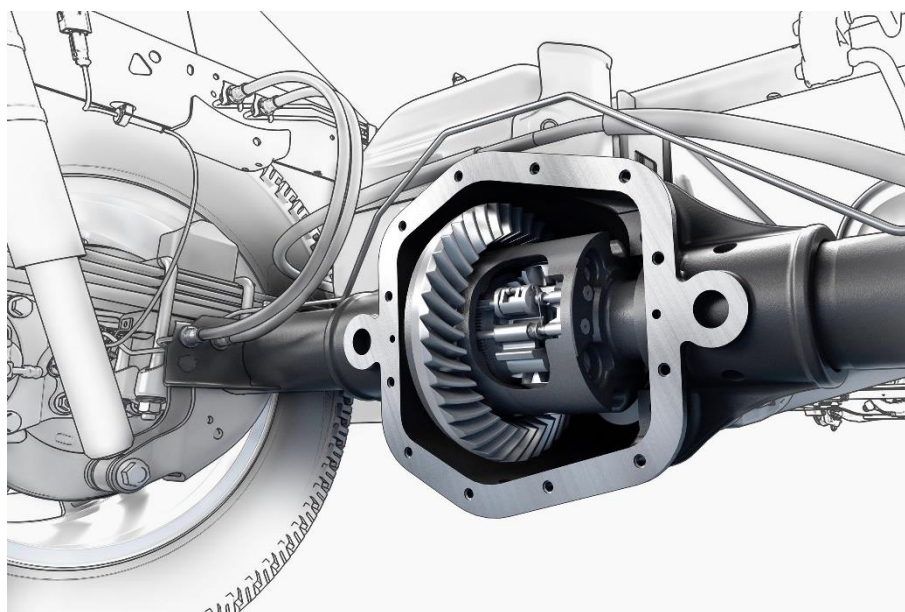
$$R_A = \sqrt{\left(R_2 + \frac{b_t}{2}\right)^2 + (c + p_p)^2} \quad (5)$$

$$e = e' + e'' = R_A - R_B - b_n \quad (6)$$

$$R_2 = c \times \cot \alpha \quad (7)$$

Pri súprave s príviesom, prípadne s príviesmi sa na príviesoch spravidla odkláňa ich os prednej nápravy oproti osi zadnej nápravy príviesu. Vozidlo pri jazde v oblúku aj pri pomalšej rýchlosti zaberá širší pruh ako pri jazde v priamom smere. Každé koleso hnanej nápravy vozidla vykonáva inú dráhu v smerovom oblúku.

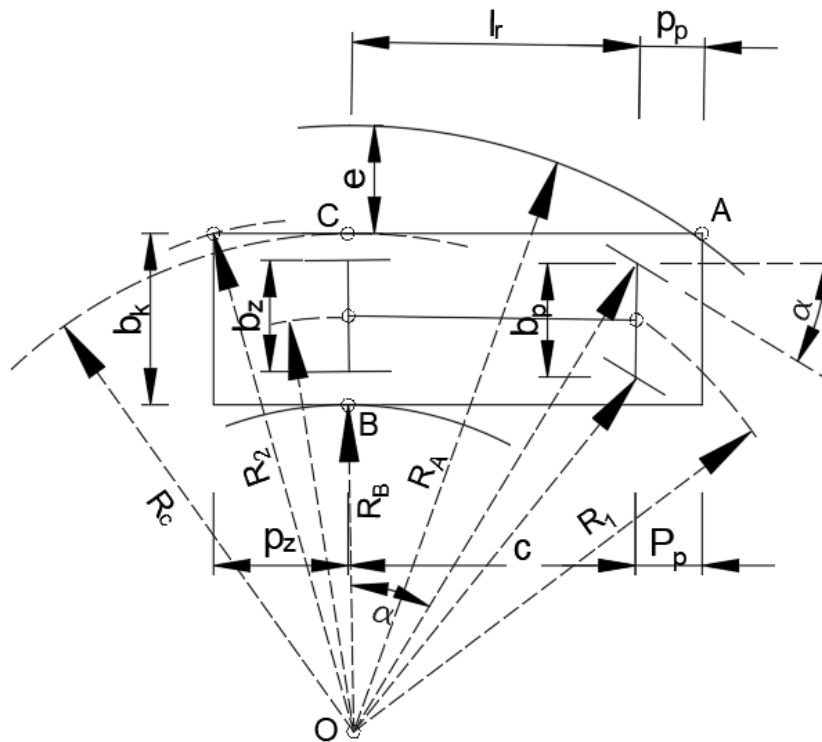
Ak by na hnanej náprave nebol diferenciál, dochádzalo by vždy k treniu jedného z kolies nápravy o povrch vozovky v smerových oblúkoch a za istých okolností by sa mohlo stať vozidlo neovládateľným. Diferenciál (obrázok 2) je prevodový mechanizmus s dvoma stupňami voľnosti, ktorý automaticky rozdeľuje otáčky a krútiaci moment na jednotlivé výstupné hriadele. Rozdelenie otáčok a momentov medzi výstupné hriadele sa deje na základe aktuálneho zaťaženia konštrukcie diferenciálu. Rôzne zaťaženie výstupných hriadeľov môže byť spôsobené napríklad rôznou dĺžkou dráhy kolies pri jazde v zákrute, kedy je vnútorné koleso pribrzďované a vonkajšie poháňané na vyššie otáčky. Tiež to môže byť spôsobené adhéznymi podmienkami (jedno koleso preklzuje) alebo rôznym zaťažením náprav. Podľa [5] majú klasické terénne automobily predný, zadný a medzinápravový diferenciál. Nestačí totiž vyrovnávať otáčky kolies na jednotlivých nápravách, ale tiež zarovnávať rozdelenie hnacej sily medzi obidve nápravy.



Obrázok 2 Detail diferenciálu, zdroj: [6]

Podľa [7] ide každé koleso po svojej dráhe v smerovom oblúku. Šírka pruhu, ktoré vozidlo zaberá, bude rozdiel medzi najväčším polomerom dráhy vonkajšieho kolesa, respektíve vonkajšieho kraja karosérie (bod A) a najmenším polomerom dráhy vnútorného kolesa, respektíve okraja karosérie (bod B). Rozdiel šírky A-B a šírky pruhu, ktorú zaberá vozidlo pri jazde v priamom smere je rozšírenie pruhu (e). Na obrázku (Obrázok 3) je schematicky znázornený prejazd smerovým oblúkom vzhľadom na špecifický typ vozidla s príslušnými vzťahmi na výpočet geometrických charakteristík (8 až 12). V tejto schéme je zaznačený minimálne polomer stredov jednotlivých náprav (na pozdĺžnej osi súmernosti), maximálny polomer R_A , minimálne polomery R_B a rozšírenia pruhu pri pomalej jazde

v smerovom oblúku e. Prejazd návesov a automobilových súprav si v smerovom oblúku spravidla nevyžaduje väčší polomer smerového oblúka ako ťahač alebo jedno vozidlo. Vyžaduje však primerané rozšírenie pruhu, s ktorým treba pri návrhu cestnej komunikácie uvažovať (v smerových oblúkoch a na križovatkách). Je dôležité poznamenať polohu s akou sa uvažovalo v schémach (obrázok 1, obrázok 3). Vozidlo získa až po prejazde určitej dráhy v stope nazývanej trajektória. Na tejto dráhe postupne mení polomer zakrivenej dráhy od $R=\infty$ v priamej až do $R=R_{\min}$ použitého v smerovom oblúku. Návrh trasy cestnej komunikácie s tým musí uvažovať.



Obrázok 3 Schéma prejazdu automobilu, zdroj: [6]

$$R_1 = \frac{c}{\sin \alpha} \quad (8)$$

$$R_2 = c \times \cot \alpha \quad (9)$$

$$R_A = \sqrt{\left(R_2 + \frac{b_k}{2}\right)^2 + (c + p_p)^2} \quad (10)$$

$$R_B = R_2 - \frac{b_k}{2} \quad (11)$$

$$e = R_A - R_B - b_k \quad (12)$$

6. Záver

Problémom slovenských noriem v problematike obrysových kriviek, je až priveľká voľnosť ponechaná projektantom. Norma by mala špecifikovať okrajové podmienky prísnejšie ako je to v tomto prípade. Dokazuje to aj skutočnosť, že zahraničná metodika [4] má 20 podskupín v porovnaní

s našimi piatimi resp. šiestimi. Táto benevolencia má za následok nevhodný návrh nových cestných komunikácií a prípadné kolízie. V súčasnosti existujú programy ako Vehicle Tracking od Autodesku. Tento program má rozsiahlu databázu vozidiel, z ktorých sa pri návrhu vyberie to kritické. Svedomité projektant teda nemá problém navrhnuť cestu s oblúkmi vyhovujúcimi na posúdenie obrysových kriviek. Avšak je podľa mňa potrebné do normy ukotviť viac podskupín s orientačnými rozmermi a prípady ich použitia aby sa viac predchádzalo zlým návrhom ciest.

Literatúra

- [1] STN 73 6101 - Projektovanie ciest a diaľnic, 1999
- [2] STN 73 6102 – Projektovanie križovatiek na pozemných komunikáciách, 2004
- [3] STN 73 6056 – Odstavné a parkovacie plochy cestných vozidiel, 1987
- [4] Kolektív autorov, A policy on Geometric Design of Highways and Streets, 2011 6. edícia, ISBN 987-1-56051-508-1
- [5] [https://sk.wikipedia.org/wiki/Diferenci%C3%A1l_\(automobil\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Diferenci%C3%A1l_(automobil))
- [6] carfax.eu
- [7] CHOCHOL, Š. a kolektív, Cesty a diaľnice I projektovanie, 1989, ISBN 80-05-00124-X

Jakub Takács¹

Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 4.

PREPOJENIE NÁVRHU MINIMÁLNEJ ŠÍRKY CHODNÍKA S FUNKČNÝMI ÚROVŇAMI

LINKING THE DESIGN OF THE MINIMUM SIDEWALK WIDTH WITH THE LOS

Abstract

Functional levels, denoted in English by the abbreviation LOS (level of service), express the quality of communication. Currently, we routinely use LOS assessment for urban roads, but relatively little for sidewalks. The functional level of the sidewalk expresses the quality provided to the pedestrian not only in one place, but during the entire movement from point A to point B. The current methodology in Slovakia uses only geometric parameters, which are categorized and replaced by coefficients. There are several methods abroad, each of which uses a different element as the authoritative one. The content of this work is the connection of individual measurable parameters, for which the definition of functional levels and subsequently the creation of a methodology for the design of sidewalks. Due to the extensiveness of the research, only an introduction to the methodology is presented in this article.

Kľúčové slová / Key Words

Funkčná úroveň; pešia doprava; šírka chodníka; verejný priestor

1. Súčasná metodika na Slovensku

Jedinou platnou metodikou na Slovensku, ktorá sa venuje výpočtu funkčných úrovní pešej dopravy, je slovenská technická norma STN 736110 Projektovanie miestnych komunikácií. V kapitole 6, kapacita miestnych komunikácií, sa určení kapacity pešej dopravy venuje niekoľko odstavcov. Z nich vyplýva len zadefinovanie maximálnej intenzity chodcov za hodinu na jeden pruh. A to nasledovne [1]:

Kapacita komunikácii pre chodcov sa stanovuje z týchto hodnôt:

- výkonnosť prvého a druhého pruhu dvojpruhového pásu alebo prvého pruhu viac ako dvojpruhového pásu sa rovná hodnote 900 chodcov/h;
- výkonnosť každého ďalšieho 0,75 m širokého pruhu pre chodcov viac ako dvojpruhového pásu sa rovná hodnote 800 chodcov/h.

Tieto kapacity platia pre chodníky, zároveň aj pre chodníky na mostoch, lávkach pre peších a v podchodoch. Ak sa popri chodníku nachádza obchod, výklad alebo iné zariadenie predpokladajúce zhromažďovanie stojacich chodcov, hodnoty sa upravujú nasledovne:

- prvého a druhého pruhu sa rovná hodnote 360 chodcov/h;
- každý ďalší pruh sa rovná hodnote 800 chodcov/h.

Samotný výpočet ovplyvňuje niekoľko parametrov. Ide o fyzikálne alebo geometrické charakteristiky. Problémom je, že tieto charakteristiky sa v samotnom výpočte zohľadňujú cez koeficienty, čo spôsobuje len nepatrný vplyv na samotný výpočet. Prvým parametrom je rýchlosť chodcov pri rôznych druhoch pohybu. Nevýhodou je nízky výber možností na určenie druhu pohybu

¹ Ing. Jakub Takács, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, katedra dopravných stavieb

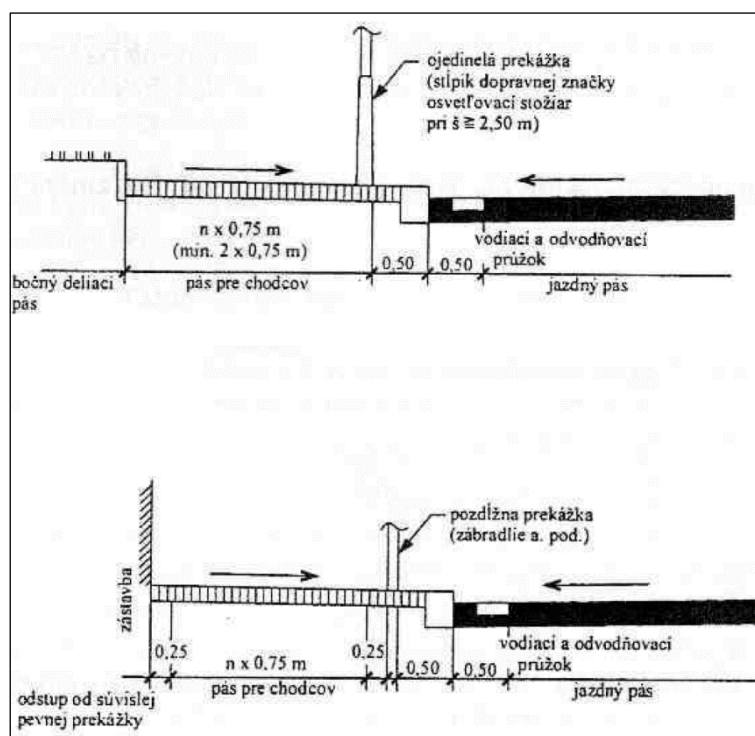
chodca. Výpočet uvažuje len so štyrmi možnosťami, a to zmiešaný pohyb, pohyb obyvateľov zóny, nákupy a voľný čas. Hodnoty im prislúchajúce vyobrazuje tabuľka 1 [1].

Tabuľka 1: Časové intervaly jazd.

Druh pohybu	Rýchlosť chodca v m/s	Rýchlosť chodca v km/h
Zmiešaný pohyb	1,34	4,824
Pohyb obyvateľov zóny	1,49	5,364
Nákupy	1,16	4,176
Voľný čas	1,10	3,96

Rýchlosť chodca nezávisí len od funkcie, ktorú chodec v území vykonáva, ale aj od vekovej štruktúry, pohlavia a zdravotnej spôsobilosti chodca. To sú všetko parametre, ktoré sa nedajú vopred kategorizovať. Preto vzniká otázka, či je práve rýchlosť jedným z dôležitých parametrov na určovanie funkčnej úrovne pešej dopravy. Rýchlosť sa často mení, napríklad pri meraní rýchlosti chodcov v Šali sme došli k priemernej rýchlosti chodca 4,1 km/h [2].

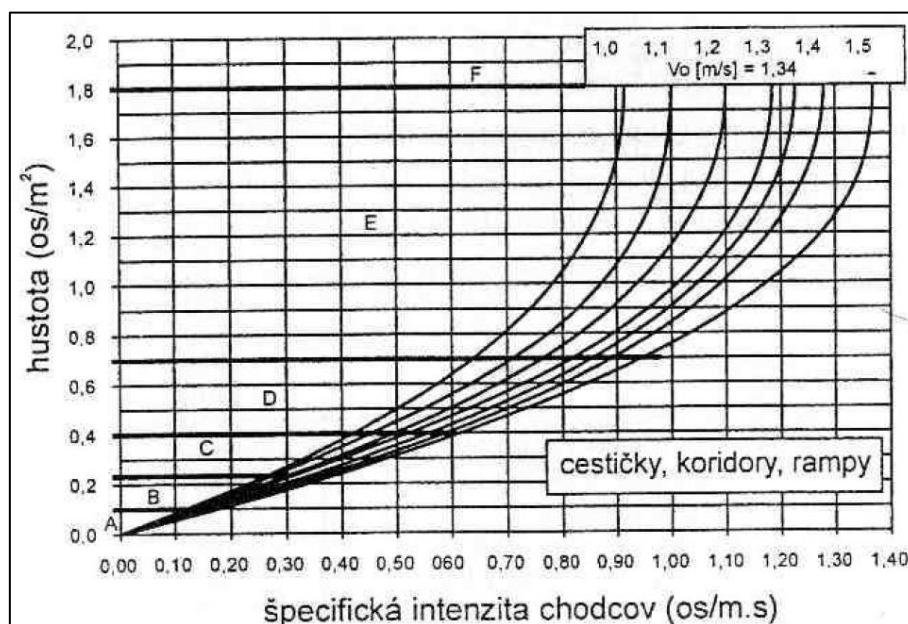
Samotná rýchlosť je v metodike ešte ovplyvňovaná pozdĺžnym sklonom. Ten je upravený len či chodník zostáva v rovine (od -5 do +5 %), alebo stúpa (od +5 do +10 %), alebo klesá (od -5 do -10 %). Koeficienty sú upravené tak, že pri stúpaní sa hodnota rýchlosti redukuje o 10 % a pri klesaní sa hodnota rýchlosti navyšuje o 5 %. Do výpočtu ešte vstupujú ďalšie koeficienty, zohľadňujúce smer pohybu (jednosmerný alebo obojsmerný) a bočný odstup od prekážky. Pri bočnom odstupe hodnoty uvádzané v norme v Prílohe D nekorešponujú s hodnotami uvádzanými v samotnej norme v kapitole 12.3.4 Chodníky. Obrázok 1 predstavuje základný rez komunikáciou pre peších a jej skladobné prvky. Tieto rozmery sú doplnené o odstupy 0,25 m pri pevnej (pozdĺžnej) prekážke, 0,60 m pri peších zónach alebo výkladoch a bezpečnostný odstup 0,50 m od vozovky.



Obrázok 1: Priečne usporiadanie chodníka [1].

Príloha D uvádza rozmery bezpečnostných odstupov v závislosti od prekážky. Pri vozovke uvažujú s rozmerom 0,35 m čo nekorešponduje s hodnotou 0,50 m z priečneho usporiadania. Od záhradných úprav, kvetov hodnotu 0,60 m, ale norma túto hodnotu nedefinuje a tento odstup sa nepoužíva. Pri

stene s výkladom hodnotu 1,0 m, kým norma uvádza hodnotu 0,6 m. Pri stene bez výčnelkov (môžeme to definovať ako pevnú – pozdĺžnu prekážku) hodnotu 0,5 m, kým norma definuje hodnotu 0,25 m. Ako môžeme vidieť, návrhové prvky pre pešie komunikácie nekorešponujú s hodnotami uvádzanými na posúdenie jej funkčnej úrovne. Následkom toho je pri výpočte funkčnej úrovne zle určená svetlá šírka chodníka, čo následne zle definuje jej ostatné parametre vo výpočte. Samotné funkčné úrovne sú vyobrazené v grafe na obrázku 2. Graf je daný hustotou (os/m²) na osi y a špecifickou intenzitou chodcov (os/m.s) na osi x.



Obrázok 2: Závislosť medzi stupňom kvality a hustotou dopravného prúdu chodcov na chodníku [1].

Hlavným nedostatok je skreslenie vstupných údajov, ktoré definujú funkčnú úroveň. Jednak rýchlosť, ktorá sa mení v závislosti od rôznych parametrov a zároveň hustotou, ktorú určuje šírka chodníka upravená o bezpečnostné odstup, ktoré nekorešponujú s návrhovými prvkami. Skreslenie hustoty je podstatné, pretože určenie svetlej šírky chodníka môže byť nepresné rádovo v desiatkach centimetroch. To vo výsledku znamená, že chodníku môže byť priradená nižšia hodnota funkčnej úrovne, kým v skutočnosti sa chodník zaraďuje do vyššej funkčnej úrovne. Ďalšie nedostatky sú obsiahnuté v kapitole 3 Návrh vzťahu funkčná úroveň – šírka chodníka.

2. Zahraničné metodiky

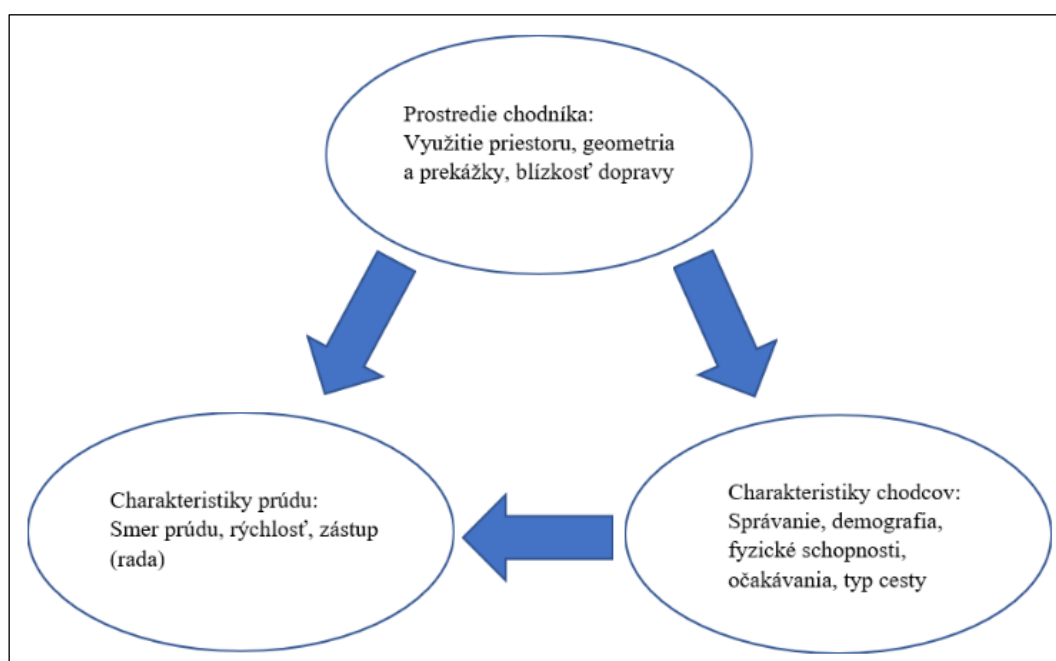
Kým na Slovensku máme metodiku, ktorá sa neaktualizovala už desiatky rokov, vo svete dominuje predovšetkým jedna metodika, na základe ktorej vznikajú ďalšie. Tvorí systémový základ, ktorý si jednotlivé krajiny upravujú podľa svojich stanovísk. Táto metodika pochádza zo Spojených štátov, kde je súčasťou Highway capacity manual (HCM) [3], ktorý napísal Transportation Research Board. Dokument sa podrobne venuje funkčným úrovňam automobilovej a pešej dopravy. Vychádza z rovnakých fyzikálno-geometrických predpokladov, určujúcich funkčné úrovne. A to priestor potrebný na osobu (m²/osob), intenzita – počet chodcov za 15 minút, ktorí prejdú efektívnou šírkou chodníka (osob/min/m), rýchlosť (m/s) a pomer intenzity a kapacity (v/c pomer). Hlavným nedostatkom v metodike je stanovenie intenzity. Kým pri vozidlách sa intenzita vypočíta počtom vozidiel za hodinu, ktoré prejdú jedným jazdným pruhom, tak pri chodcoch je to počet chodcov za 15 minút, ktorí prejdú efektívnou šírkou (udávanú v stopách). Vo výsledku dochádza ku nepresnosti

výpočtu pri chodcoch, pretože kým pri vozidlách sa počet vozidiel za hodinu predelí hodnotou 1 (jeden jazdný pruh), tak pri chodcoch sa počet chodcov za 15 minút predelí hodnotou efektívnej šírky chodníka. Pritom pri chodníku, rovnako ako pri komunikácii pre vozidlá, sú stanovené pruhy pre chodcov definované svetlou šírkou. Aj keď sa výpočet zaokrúhľuje na celé číslo, v praxi danou šírkou prejde vždy len presný počet osôb. To znamená, že efektívna šírka vo výpočte by mala byť rovnako definovaná počtom pruhov pre peších a nie jej merateľnou hodnotou. V tabuľke 2 môžeme vidieť jednotlivé hodnoty parametrov vzťahujúce sa funkčné úrovne.

Tabuľka 2: Kritériá parametrov LOS pre chodníky podľa [3].

LOS	Priestor (m ² /osob)	Intenzita (osob/min/m)	Rýchlosť (m/s)	v/c pomer
A	> 5,57	≤ 16	> 1,295	≤ 0,21
B	3,72 – 5,57	16 – 23	1,27 – 1,295	0,21 – 0,31
C	2,23 – 3,72	23 – 33	1,219 – 1,27	0,31 – 0,44
D	1,39 – 2,23	33 – 49	1,143 – 1,219	0,44 – 0,65
E	0,74 – 1,39	49 – 75	0,762 – 1,143	0,65 – 1,00
F	≤ 0,74	-	≤ 0,762	-

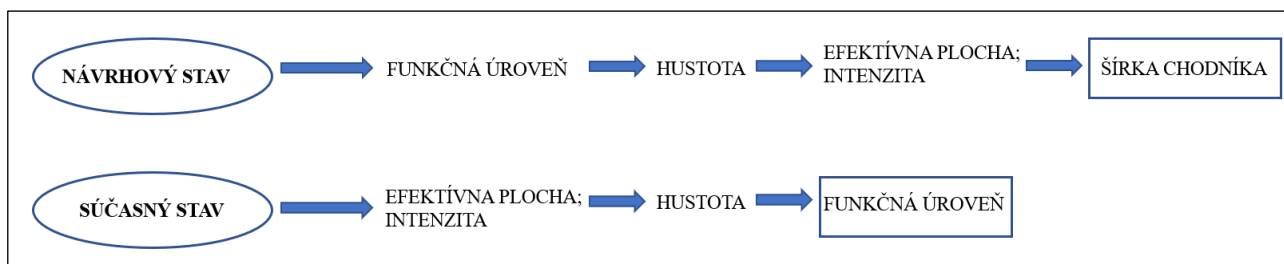
Hlavnou výhodou tejto metodiky je jej jednoduchosť a možnosť aplikácie vo všetkých častiach mesta alebo v rôznych mestách. Paradoxne, jednoduchosť metodiky je aj jej slabou stránkou. To znamená, že síce na určenie funkčných úrovní stačí zmerať základné fyzikálno-geometrické parametre na chodníku, ale zároveň tieto parametre sú definované bez hlbšieho skúmania. Napríklad stanovenie potrebného priestoru na osobu je stále definovaný ako štvorec v m². Niektoré metodiky si tento parameter upravili a miesto štvorcovej plochy, stanovili kruhovú plochu. V najnovších štúdiách sa uvažuje už s elipsovou alebo kvapôčkovou plochou. Rozdiel v stanovení potrebnej plochy nám značne mení výber funkčnej úrovne. Viac o vplyve výberu tvaru plochy je opísané nižšie v kapitole 3. Metodika neberie do úvahy parameter týkajúci sa správania a potreby chodca, ako je veková štruktúra, zdroj a cieľ cesty. Podľa [4] vplyva prostredie chodníka na charakteristiky chodcov a zároveň na charakteristiky prúdu (Obrázok 3).



Obrázok 3: Vplyv prostredia chodníka na charakteristiky prúdu a chodcov.

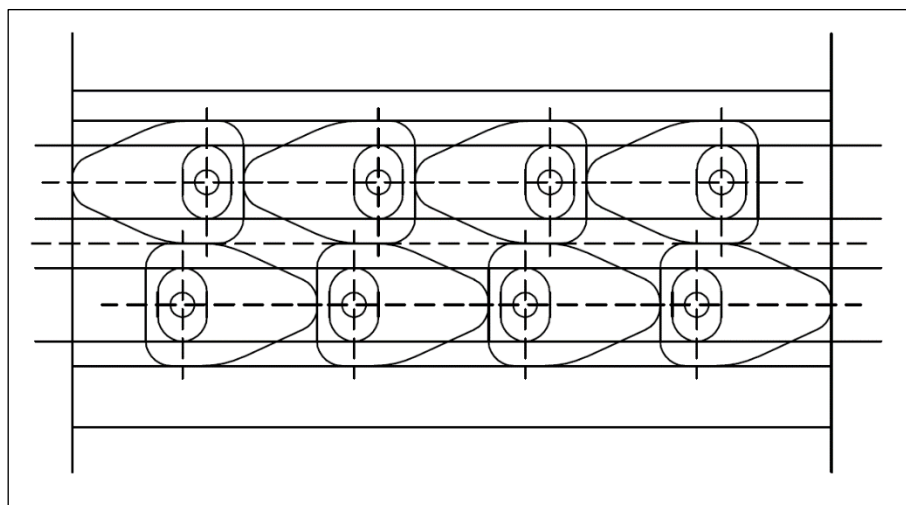
3. Návrh vzťahu funkčná úroveň – šírka chodníka

Aby malo stanovenie funkčnej úrovne pešej dopravy význam, musí nám zdefinovať požiadavky na priestor. To znamená, že nestačí len na základe existujúcich parametrov určiť kvalitu pešieho prúdu na chodníku, ale musíme vedieť stanoviť aj minimálne požadované parametre na chodník z návrhu funkčnej úrovne. Súčasná slovenská metodika obsiahnutá v prílohe D normy 73 6110 nekorešponduje s návrhovými prvkami v samotnej norme. Počet pruhov pre peších sa navrhuje podľa intenzity. Tento návrh automaticky dovoľuje vytvoriť len funkčnú úroveň A alebo B. Ak by sme chceli dosiahnuť funkčnú úroveň D, požiadavky normy na maximálnu intenzitu chodcov na jeden pruh nám to nedovolia. Napríklad, ak chceme navrhnuť chodník na funkčnú úroveň D pri intenzite 1800 chodcov za hodinu, čo činí 30 chodcov za minútu, tak podľa normy musíme navrhnuť tri pruhy. Prvý sa navrhuje pre intenzitu 900 chodcov za hodinu a každý ďalších pre 800 chodcov za hodinu. Môžeme odhadnúť, že chodci sa rozložia po pruhoch rovnomerne, to znamená, že na jeden pruh pripadne intenzita 600 chodcov za hodinu. Čiže, ak by sme takýto chodník posúdili, dostali by sme funkčnú úroveň A. Preto treba zdefinovať vzťah medzi funkčnou úrovňou a efektívnou šírkou chodníka. Návrh metódy pozostáva z dvoch spôsobov výpočtu (Obrázok 4).



Obrázok 4: Určenie vzťahu funkčná úroveň – šírka chodníka.

Vzťah vychádza z dvoch predpokladov – návrhový stav a súčasný stav. Pri súčasnom stave vychádzame z predpokladu, že poznáme efektívnu plochu a intenzitu (aj šírku chodníka), dopočítame hustotu a určíme funkčnú úroveň. Pri návrhovom stave vychádzame z požiadaviek na funkčnú úroveň, tá nám zase definuje hustotu, ktorá zase definuje intenzitu a efektívnu plochu. Z týchto fyzikálno-geometrických parametrov si odvodíme vzťah pre šírku chodníka. Teória vychádza z minimálnych požiadaviek na priestor, ktoré sú určené požadovaným priestorom chodcov a minimálnym priestorom chodcov. Požadovaný priestor chodca udáva aj metodika popísaná v kapitole dva, avšak tvar plochy sa stále uvažuje základný geometrický tvar – štvorec alebo kruh. Pre presnejšie zdefinovanie plochy je lepšie využiť komplikovanejší tvar, ktorý je daný priestorovo-psychologickými požiadavkami jedinca na zabezpečenie dostatočného pohodlia pri chôdzi na chodníku. Chodec kráčajúci po chodníku potrebuje najviac priestoru pred sebou. Jednak kvôli psychologickému pohodliu, aby necítil pocit nekomfortu ak by bol kráčajúci hneď za cudzím človekom, zároveň z hľadiska bezpečnosti, ak by chodec pred ním zastavil alebo zmenil smer, tak nech dokáže včas zaznamenať zmenu a zároveň z hľadiska zmeny smeru, aby mohol chodec bez problémov manévrovať. V priestore vedľa osoby, chodec nepotrebuje až taký veľký priestor ako pred sebou. Najmenší priestor chodec vníma za sebou. Tento tvar potrebného priestoru sa podobá na kvapku a podobný priestor navrhli aj v štúdií [5], kde sa venovali matematickému modelovaniu potrebného priestoru. Ak chceme zistiť efektívnu plochu, potrebujeme si urobiť výrez chodníka, kde umiestnime chodcov, pridáme im požadovaný priestor a z chodníka odrátame bezpečnostné odstupy (obrázok 5). Efektívna plocha chodníka nám slúži následne na výpočet hustoty a keď vložíme do výpočtu časovú jednotku, dostaneme hodnoty intenzity chodcov.



Obrázok 5: Základný rez chodníkom a vyobrazenie potrebných plôch.

Záver

Problémom súčasnej metodiky platnej na Slovensku, je jej skreslenie samotného posúdenia a nesúlad s návrhovou časťou normy. Rovnako aj niekoľko koeficientov, ktoré vstupujú do výpočtov ovplyvňujú jeho presnosť. Metodika sa roky nemenila a aj pri aktualizácii normy v roku 2022 došlo k celému jej preneseniu bez bližšieho skúmania, čo môže byť spôsobené tým, že sa v praxi používa len vo veľmi malom rozsahu na posudzovanie chodníkov či verejných priestorov. Zahraničné metodiky založené na základoch americkej metodiky spomenutej v kapitole 2 prechádzajú pravidelne aktualizáciou, čím spresňujú určovanie funkčných úrovní. Ich nevýhodou, rovnako ako aj pri slovenskej metodike, je neprepojenie s návrhovou časťou normy/predpisu na návrh minimálnych požiadaviek na priestorové a kapacitné parametre chodníka. Úvod do nového spôsobu zadefinovania určovania funkčných úrovní nespočíva vo vytváraní nových premenných, ale spočíva v nadviazaní a prepojení už existujúcich vzťahov, prípadne zadefinovanie iných fyzikálno-geometrických parametrov, ktoré sú merateľné a vieme ich aplikovať v už známych teóriách. V ďalšej časti výskumu sa zadefinuje presná potrebná plocha pre chodca daná prieskumom v teréne, stanoví sa jednotné parametre na určenie bezpečnostných odstupov a k nim sa určia tvary plôch pri ich obchádzaní. Záverom sa určia hodnoty pre stanovenie funkčných úrovní a vytvorí sa metodika na posúdenie funkčných úrovní a návrh priestorových parametrov chodníka (efektívna šírka, bezpečnostné odstupy, plocha). Po zadefinovaní parametrov pre bežný chodník sa zakomponujú kritické miesta na chodníku (zastávky MHD, nárožia, priechody pre peších) do výpočtu.

Literatúra

- [1] Slovenská technická norma STN 736110 Projektovanie miestnych komunikácií, 2004
- [2] Schlosser, T. a kol. Územný generel dopravy v meste Šaľa, Katedra dopravných stavieb SvF STU Bratislava, 2018
- [3] Transportation Research Board. Highway capacity manual, National Research Council, 2010
- [4] Bloomberg MR. New York city pedestrian level of service study: Phase I. Transportation division, USA 2006
- [5] E. Cepolina, F. Menichini, P. G. Rojas. Level of service of pedestrian facilities: Modelling human comfort perception in the evaluation of pedestrian behaviour patterns. Elsevier, 2018

Bahman Zarazvand¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

NUMERICKÉ MODELOVANIE PRESTUPU TEPLA V HORIZONTÁLNOH GSHP

NUMERICAL MODELLING OF HEAT TRANFERRING IN HORZINTAL GSHP

Abstract

The energy crisis and the increase in fossil fuels, especially in recent years, have led to the trend toward green renewable energy. Geothermal energy is the heat produced deep in the Earth's core and a renewable resource that can be harvested for human use. Over the past few decades, various techniques have been developed to extract geothermal heat from shallow to deep subsurface levels where the temperature is less affected by seasonal temperature variations. Absorbed thermal energy is transferred to the pump and after increasing the temperature, they are sent to the heating systems. Pipes can be installed in different shapes in the system and special attention must be taken to ensure that the best pipe shape is selected to result an effective system performance. The purpose of this paper is to employ numerical modeling to investigate the thermal performance of one of the most cost-effective and common pipe patterns in a closed-loop horizontal heat exchanger system, especially for family houses.

Keywords

Geothermal Heat Pump, Heat exchanger, Pipe configurations, , Numerical modeling.

I. Introduction

The issue of climate change and its related effects (increasing global temperature, extreme weather events, etc.) arises due to the emission of greenhouse gases into the atmosphere [1,2]. Therefore, renewable heating and cooling systems should be used to reduce the use of fossil fuels and their associated greenhouse gas emissions. One of these systems that has been developed in the last few decades is the geothermal energy system. The thermal energy available in the shallow surface of the earth, from 1 meter onwards to a depth of 200 meters, can be used for heating and cooling buildings in most parts of the world. This technology, also known as ground source heat pumps (GSHP), was first developed, and built by Robert Weber in 1940 [3].

Geothermal energy can be used in three different level; Low-grade ground-source can be used for heating or cooling with heat pump system and can be found from just a few meters below ground up to 200 meters. Medium- grade ground-source can be used for direct heating, and industrial processes and are found in depth of 200 -1000 meters below ground. High-grade ground sources obtain enough energy to generate electricity, geothermal power plants rely on heat that exists a few kilometers below the surface of the Earth [4].

The GSHP system, shown in Figure 1, is classified into three units [3], namely:

- the primary unit which consists of heat exchanging loops (pipes)
- the secondary unit consists of heating devices including; radiators, hot water storage tank, underfloor pipes and etc.

¹Ing. Bahman Zarazvand, Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, e-mail: Bahman.zarazvand@stuba.sk

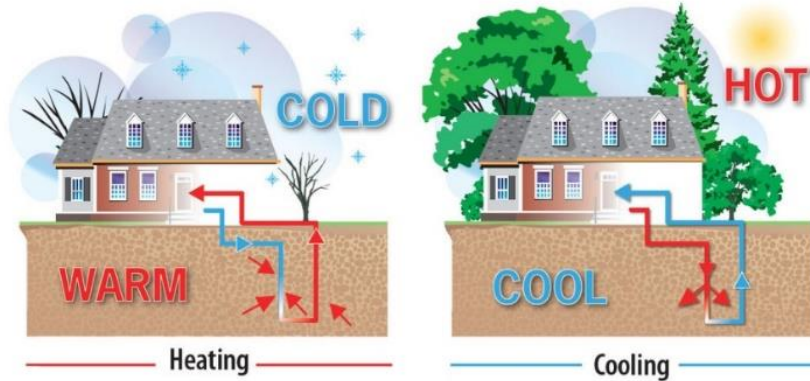


Figure 1: Ground source heat pumps (GSHP)

- the heat pump system

The primary unit consists of heat exchanger pipes containing water as fluid to provide the heat exchange between the subsurface and a heat pump. There are two main types of ground loop systems including; Open- Loop, and Closed-Loop Systems. The latter can be divided into two groups; vertical installed in boreholes (BHEs), and horizontal heat collectors. Several various factors such as climate condition, soil situation, free available land, and local installation costs determine which is best for the site [6]. Large commercial buildings often use vertical systems because the land area required for horizontal loops is not available as much as it is needed. Horizontal type of installation is generally most cost-effective for family houses, particularly for new construction where sufficient land is available because it requires trenches at least 1.5 meters deep [7], see Figure 2 [8].

Heat pump system is an electromechanical device that is used to raise/reduce the temperature of heat carrier fluid (HCF) to the desired temperature for space [9]. Its working mechanism is comparable to a refrigerator for cooling mode and in reverse order for heating mode, see Figure 3 [10].

Although the investment costs of installing a geothermal system can be several times higher than gas, oil, or air source system with the same heating capacity, the additional costs will be returned in the form of energy savings between 5 and 10 years (depending to the cost of energy and existing incentives from the government). The system life is estimated to be up to 24 years for internal components and 50 years for the ground loop. [11].

In heating mode, the heat pump delivers cold fluid to the inlet pipe of the primary unit. During the flow in the primary unit, it is heated by the underground ambient temperature. The outlet pipe brings

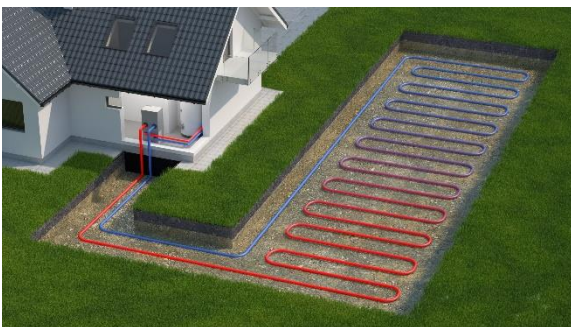


Figure 2: Main types of ground loop systems [8]

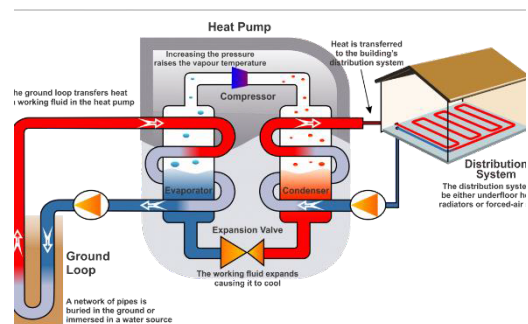


Figure 3: Main types of ground loop systems [10]

the warm fluid to the heat pump. Then the temperature of the fluid is increased and sent to the thermal devices. After extracting the thermal energy from the circulation in the heating devices, the cold fluid returns to the heat pump and supplies the inlet pipe again (a cycle will be complete). Assuming that the fluid properties are independent of temperature, a simple analytical solution to calculate the outlet pipe temperature can be written as Equation 1 [12].

$$T_{out} = T_{in} + \frac{P(t)}{\rho_f \cdot C_p \cdot \dot{V}} \quad \text{Equation 1}$$

T_{out} =the tempreture of outlet fluid in the pipe

T_{in} =the tempreture of intlet fluid in the pipe

ρ_f =density of fluid in the pipe

C_p =specific heat capacity of the fluid in the pipe

\dot{V} =the volumetric flow rate (1 lit/s) of the fluid in the pipe

$P(t)$ = the dynamic (time-dependent) heat extracted by the heat pump

The fluid flowing in the converter tube is assumed to be water. However, during winter, the ambient temperature above the surface may reach values below 0 °C. In practice, antifreeze (such as glycerol) is added to the water to reduce the minimum tolerable temperature of the fluid to -5°C [13].

If the room space has average insulation, 1 kWh of heat is required for every 10 cubic meters of room space [14]. Therefore, 30 kilowatt hours of energy is needed to heat 300 square meters of house space. While most of the energy is taken from the environment, the system requires additional power to run the compressor's electric motor, pumps, and fans. On average, one hour of heating pump work can produce about six-kilowatt hours of heat energy [15]. Therefore, to reach the daily heat demand of 30 kWh, the heat pump must work 5 hours a day. In other words, heat pumps usually do not work all day long, but the heat extraction process is active every day until the required heat is extracted. This assumption was verified in this article.

There are many patterns for the arrangement of heat collecting pipes on the subsurface, including: snake, snail and meander patterns [16]. This paper focuses on the modeling of the snake pattern for the heat exchanger pipes for analyzing outlet temperature, daily heat production and pump working status over time.

II. The model

Geometry and inputs

The three-dimensional model consisting of a 150-meter long heat exchanger pipe with a snake pattern, located at a depth of 4 meters below the ground with no underground water is simulated in FEM program of Comsol company. According to the temperature gradient, the temperature at the depth of 4 meters is equal to 11°C ± 0.5. Multiphysics and thermo-hydronechanical coupling was employed for simulation. The rest of the entries are summarized in Table 1.

Table 1:Input data

Description	Value
The gemoetry of control volume	15 × 20 × 6 m ³
Pipe diameter in soil	36 [mm]
The thick of the pipe	3.25 [mm]
Flowrate inside pipes	1 [l/s]
Heat exchange depth	4 [m]
Daily heat demand	1.08E8 [J]

Description	Value
Heat pump power	4 [kW]
Depth of heat exchanger	4 [m]
Temperature gradient	0.5 [K/m]
Daily temperature change at the surface	[-1,4]
Month	October
Soil density	17.42 [$\frac{kN}{m^3}$]
Soil heat capacity at constant pressure	1175 [$\frac{J}{kg.K}$]
Soil humidity	1
Soil thermal conductivity	1.5 [W/m.K]
Subsurface temperature gradient	0.5 K/m
Minimum allowed temperature for pipe fluid	-5[degC]=268.15 [degK]

Meshing

The meshing was chosen to be sufficiently fine to obtain accurate numerical results, see Figure 4.

Number of elements=86674

Mesh vertices=15080

The model couples heat transfer in soil with heat transfer in pipes in a two-day cycle. The Events interface is completely suited for handling the heater state. The heater is turned off if the daily heat demand is achieved and turned on again after 24 hours.

III. Results and discussion

The program uses several interpolation functions, which are based on rough estimations of local temperature variations. In this section, the result of the thermo-hydro analysis is summarized. Figure 5 shows the fluid temperature of the outlet over time after two days. the temperature in the pipes graph shows the fluid temperature in the pipe circuit. The important thing is that the fluid inside the pipes stays above a value of -5°C, so there will not be a freezing issue. Figure 6 shows the daily heat production graph which represents the heat production in time. As the heat pump stops when the daily heat demand is met, this graph periodically goes to zero unless the daily heat demand is not satisfied. In this case, a warning is displayed below the graph. Figure 7 shows the heater state graph which represents the heat pump activity. A value of 1 indicates that the heater is turned on, and a value of 0

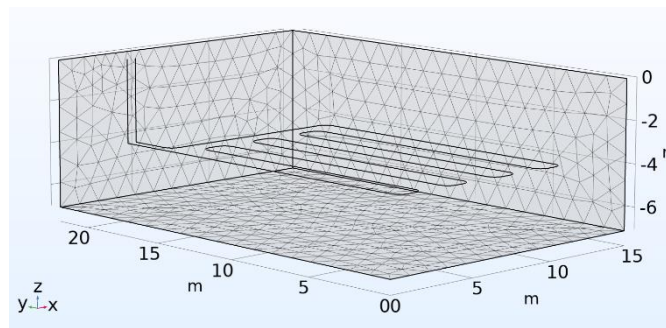


Figure 4: Mesh generation

indicates that the heater is turned off. The heater state controls the heat production as discussed before. Just after the daily requirement of 30 kWh, the production is stopped until the next day.

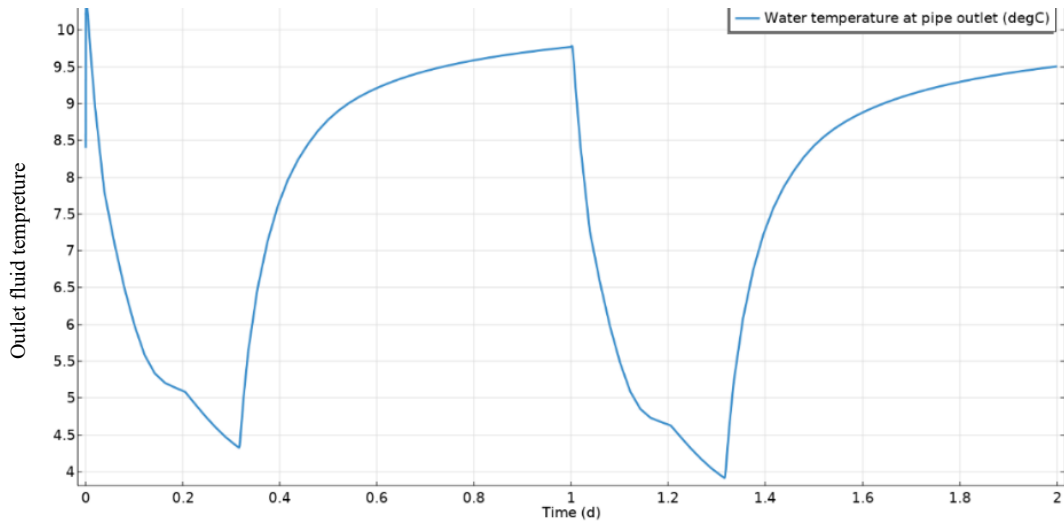


Figure 5: Outlet fluid temperatures over time

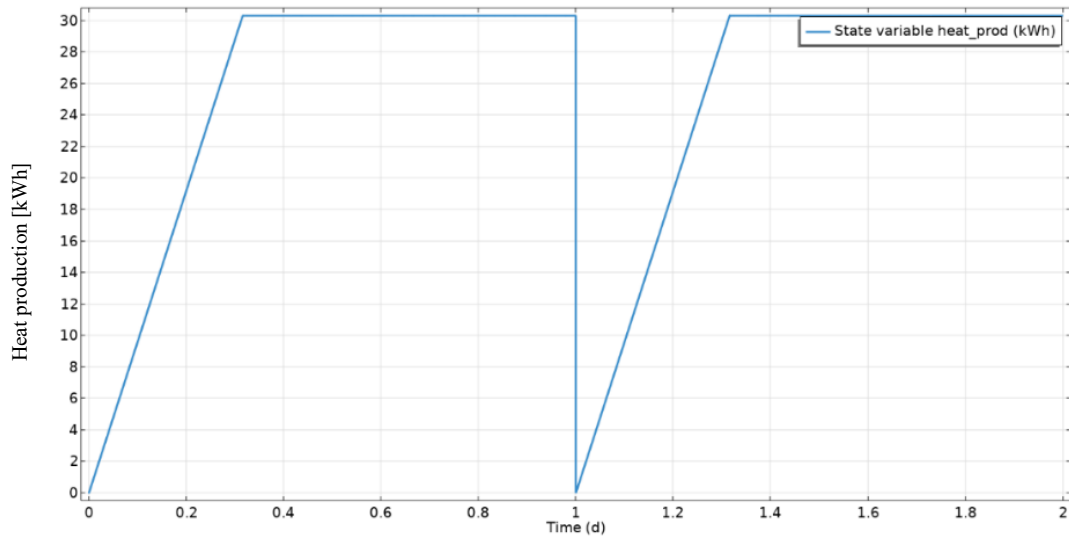


Figure 6: The daily heat production in time

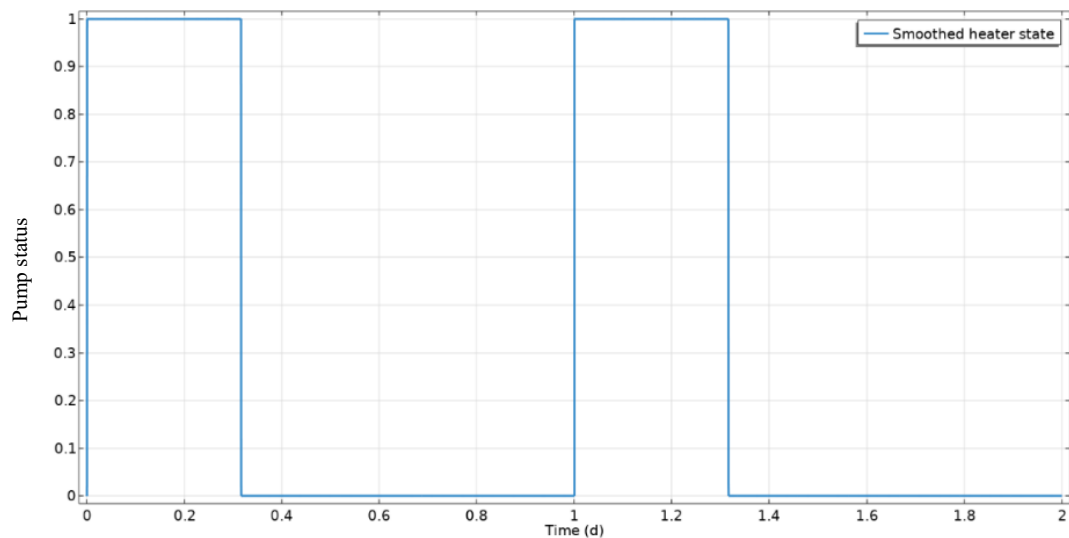


Figure 7: Pump state in time (value of 0 indicates that the pump is turned off while 1 indicates that the pump is turned on)

IV. Conclusion

1. The time required for heat production to reach the heat demand (30kWh) equals 0.3day=7.2h, which was more than our prediction (5h).
2. The heat energy extraction rate equals 4.17 kW which is less than our prediction of 6kW.
3. The pump works in cyclic mode, 7.2 hours on and 16.8 hours off (operate but with 1/10 speed).
4. During operation, the difference between inlet and outlet temperature is maximum, and vice versa, during the shutdown, the difference is minimum.
5. The heat extraction affects the temperature of the surrounding soil, which can be observed at the end of operation time of the second cycle (day 2) where the temperature drops to -4.5°C (0.5 degrees more than the first cycle).

V. References

- 1 Council Climate. Key Issues for the New Climate Agreement 2015:9.
- 2 UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. Paris Clim Chang Conf - Novemb 2015, COP 21 2015;21932:32. doi:FCCC/CP/2015/L.9/ Rev.1.
- 3 Akrouch GA. Energy piles in cooling dominated climates. Texas A&M University; 2014.
- 4 Brandl H. Energy piles for heating and cooling of buildings. In: Seventh Int. Conf. Exhib. Pilling Deep Found., 1998.
- 5 Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique 2006; 56:81–122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>.
- 6 Loveridge F, Powrie W. 2D thermal resistance of pile heat exchangers. Geothermics 2014; 50:122–35. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.015>.
- 7 AK. Sania, RM. Singha, T.Amisb, I. Cavarrettaa. A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews journal 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.008>.
- 8 <https://vittheating.com/geothermal>
- 9 Preene M, Powrie W. Ground energy systems: from analysis to geotechnical design. Géotechnique 2009; 59:261–71.
- 10 <https://blog.softinway.com/page/30/>
- 11 Skouby A. Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems Design and Installation Standards Edited By 2010.
- 12 L. Laloui, R. Loria. Analysis and Design of Energy Geostructures, Theoretical Essentials and Practical Application. Brain Romer 2020. ISBN: 978-0-12-820623-2.
- 13 L. Laloui L, M. Moreni. In-situ thermo-mechanical load test on a heat exchanger pile. In: Proc 4th Int Conf Deep Found Pract 1999:273–279.
- 14 K. Wittchen, S. Aggerholm. Calculation of building heating demand in EPIQR. DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00027-4
- 15 J.Nyers, A. Nyres. COP of Individual Heat Pump and Heating System using Heat Pump. Conference: 5th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources "EXPRES 2013",At: Subotica-Szabadka, SerbaiVolume: 1
- 16 Comsol, ReferenceManual

WATER RESOURCES ENGINEERING

Milica Aleksić¹

Water Resources Engineering, 4th year

IMPLEMENTATION OF SOIL MOISTURE SATELLITE DATA ON SELECTED CATCHMENT IN SLOVAKIA ON THE PROCESS OF HYDROLOGY MODELLING

IMPLEMENTÁCIA DÁT O VLNKOSTÍ PÔDY NA VYBRANÉ POVODIE SLOVENSKA V HYDROLOGYCKOM MODELOVANÍ

Abstract

This paper describes the implementation of the satellite product of soil moisture data for the Myjava river basin. Soil water index data appears as an additional input parameter in the process of hydrology modeling. Modeling is performed using two model variants: the TUW model and TUWdual in the environment of the R statistical software. For the performance of hydrology modeling, hydro-climate data and soil moisture values were used for the period from 2007 to 2019. For calibration and validation performance, data were divided into two terms: from 2007-2014 and 2015-2019. The model performance was evaluated through the Nash Sutcliffe indicator and the logarithmic Nash Sutcliffe indicator and volume error while using various weights on discharge.

Kľúčové slová / Key Words

Soil moisture data, ASCAT, TUW model, TUW dual, hydrology modeling, R

1. Introduction

Satellite data represents an increasingly helpful "tool" for many water-related study areas, such as weather forecasting, regional and global climate change, and drought monitoring. When it comes to hydrology modeling, increased efforts are being made to incorporate additional data, such as soil moisture, into the modeling process. [1] Not only are other data, such as soil moisture, beneficial for rainfall-runoff modeling, but also, they are beneficial, for example, for flood forecasting. The benefits of using the soil moisture data for calibrating process in hydrology modeling have been analyzed in [2]. This study was conducted on 213 Austrian catchments, where the potential of the soil water index dataset was evaluated. More specifically, the authors performed multiple objective calibrations of a conceptual hydrology model. Another study performed on chosen Austrian catchments was conducted in [3]. The authors used data from two layers in the soil - the skin layer and root zone for calibration of the chosen parameters in the TUW model. In this paper, the new satellite product of soil moisture data is being tested for hydrology modeling, but in the selected catchment located in Slovakia.

¹ Milica Aleksić, Ing., Faculty of Civil Engineering, SUT in Bratislava, Department of Land and Water Resources Management, Radlinského 11, block C, 12. floor., 810 05 Bratislava 1

2. Study area and a brief description of input data

The catchment chosen for this study - Myjava, is located in western Slovakia with an outlet at the Jablonica gauging station. The orientation of the catchment is southwest, and the area of the catchment is estimated to be 238.45 km². Elevation of the catchment varies from 206 - 792 m a.s.l. The mean annual precipitation varies from 650 to 700 mm/year. The mean annual air temperature varies from 7 to 11 °C. This area can be classified as a small to the medium-sized river basin. The river basin location and locations of the nearest water gauging, rainfall, and climatic stations are shown in Figure 1.

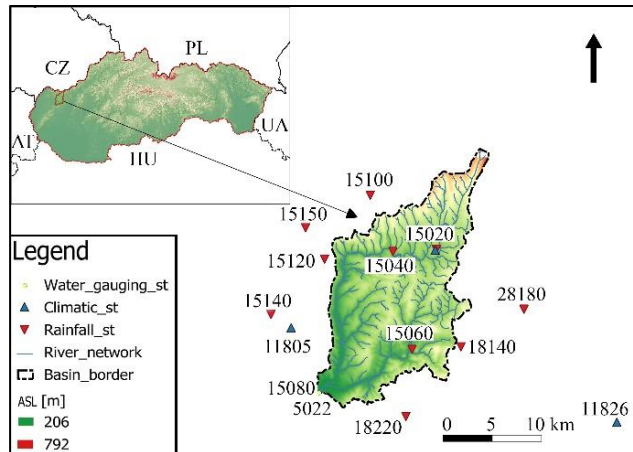
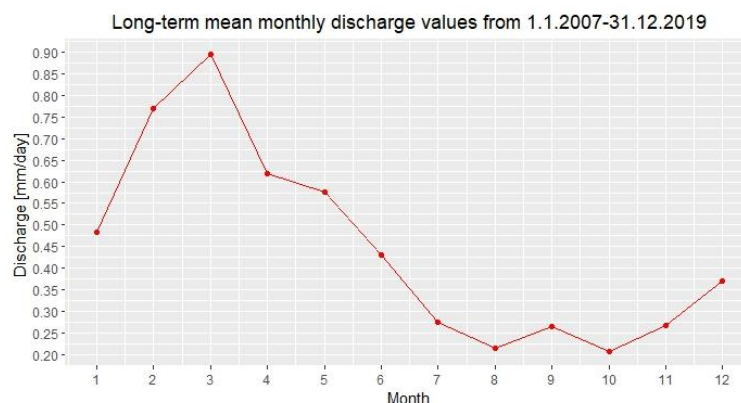


Figure 1: The location of the Myjava catchment together with labeled stations from which data were collected [4]

For the purpose of modeling, hydrometeorological, climatic, and data from water gauging station were used for the period from 2007 to 2019, namely: average daily flows Q [m³/s], daily precipitation totals P [mm], average daily values of air temperature T [°C] and potential evapotranspiration PET [mm]. The method used for calculating the precipitation in the catchment is IDW (Inverse Distance Weighting, [5]). Average daily air temperatures in the watershed were obtained using the temperature gradient method in an automated manner. It is a linear interpolation in which the average daily air temperature and the station's altitude correlate. Regarding elevation, either the mean or median elevation per catchment can be used. Potential evapotranspiration, characterized as evaporation from a free surface, assuming an unlimited water supply under the given conditions, is calculated using an empirical method, where it is necessary to know the glare index and use a digital elevation model (DEM). Additionally, the soil moisture data has been used for the same period from 2007 to 2019, expressed as a percentage. The graphs representing the average monthly values of the input data from 1.1.2007-31.12.2019 is shown in Figure 2.



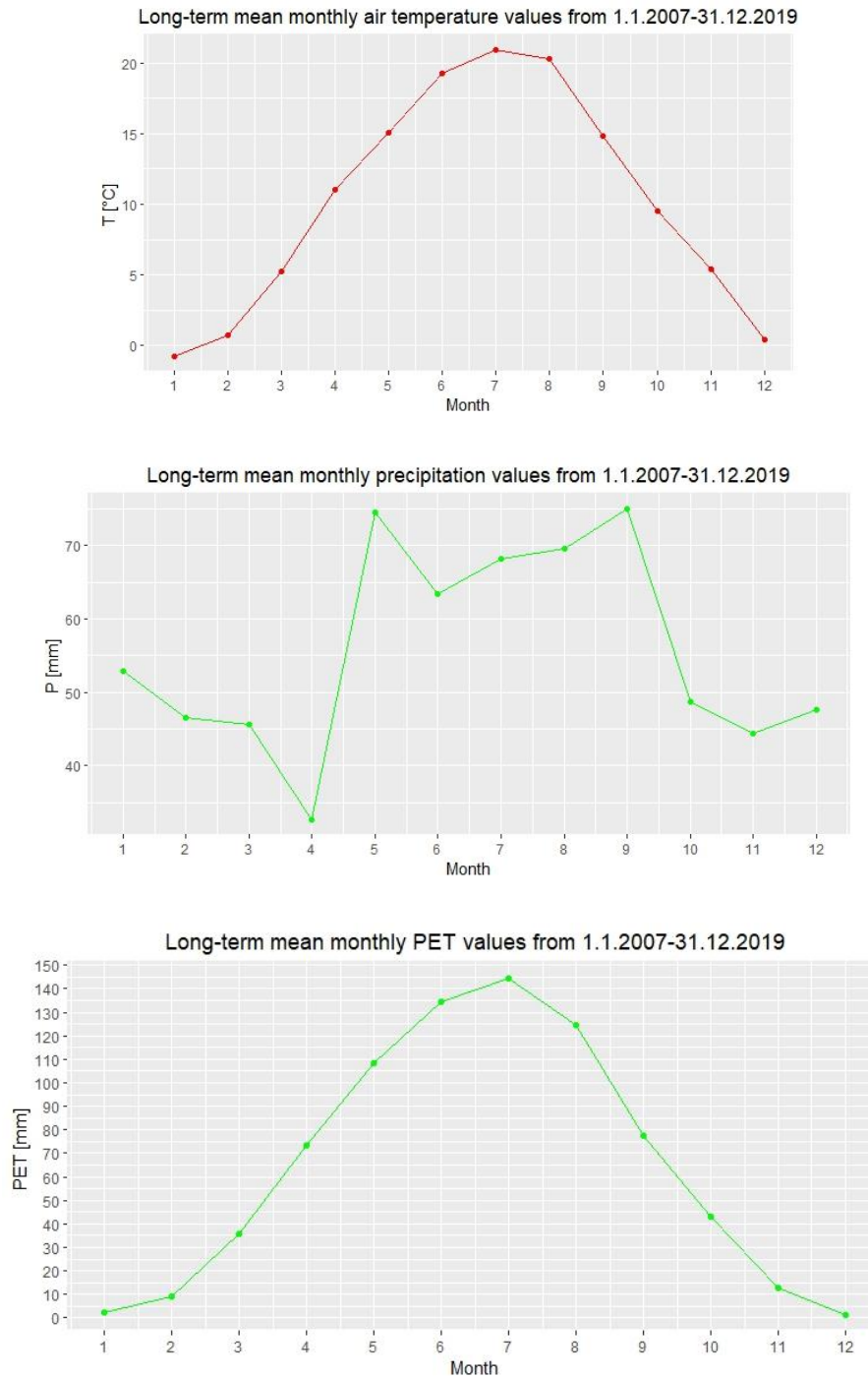


Figure 2: Long-term mean monthly values of input data from 1.1.2007-31.12.2019

2.1 Description of the soil moisture product

The soil moisture data (soil water index) used for modeling was provided by the department of Geodesy and Cartography at the University of Technology in Vienna. This product is named *ASCAT Direx Soil Water Index (SWI)*. The spatial resolution of the raster satellite image, which represents the soil moisture values, is 500x500 meters, and the temporal resolution is one day. More precisely, the netCDF (network Common Data Form) files were provided that store the soil

water index of the Myjava river basin location. These files are then opened in the geographical information system software QGIS (Quantum GIS [6]) as a raster image file where the values for the Myjava catchment have been extracted and exported as a text file. The average monthly values of soil moisture as input data from 1.1.2007-31.12.2019 are shown in Figure 3.

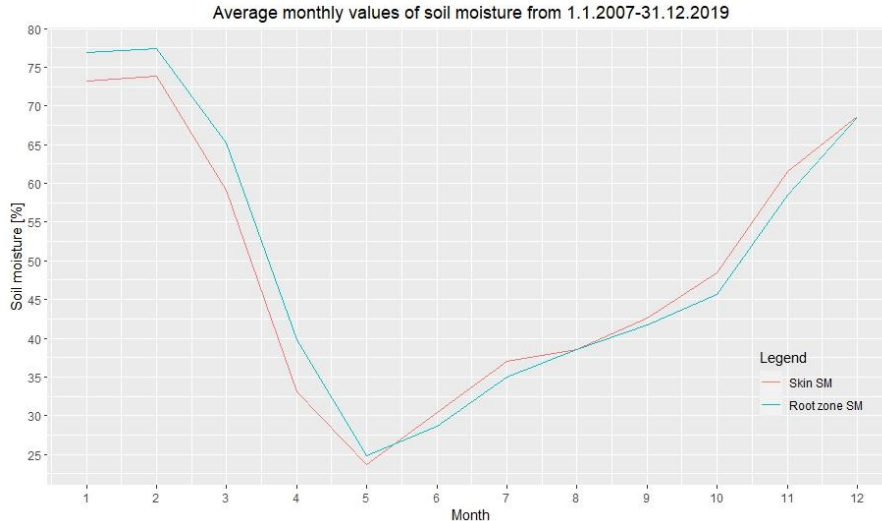


Figure 3: Average monthly values of soil moisture as input data from 1.1.2007-31.12.2019

3. Methodology and results

In the practical part of this study, the soil moisture data were used as additional input to hydrological HBV type of model, with two versions: the TUV model and the TUVdual version [7]. Both versions present the lumped hydrological model developed at the Vienna University of Technology for educational purposes. The TUV model is a lumped conceptual rainfall-runoff model, following the structure of the HBV model. TUVdual version represents lumped conceptual rainfall-runoff model with a dual representation of the soil layer developed at the TUV, following the design of the HBV model, as well [8]. In this paper, the model was used with a daily time step for all input data, but a shorter time step can also be used. All input and output data and model parameters are spatially constant for the whole catchment.

3.1 TUV model calibration and validation procedure

Before calibration of the TUV model, the average monthly values of all input data were calculated, including flow, precipitation, air temperature, potential evapotranspiration, skin moisture, and root zone. The average monthly values are graphically represented in Figure 2 and Figure 4. Then, the procedure of calibration and validation followed. For the calibration, the period from 1.1.2007 to 31.12.2014 was chosen, and the period from 1.1.2015 to 31.12.2019 was selected for the validation procedure. The aim of rainfall-runoff calibration is to determine the model parameters so that the best possible match between the measured and simulated flows in the final catchment profile is achieved. The optimization functions Nash-Sutcliffe [9] coefficient (NSE) and logarithmic Nash-Sutcliffe coefficient (log NSE) were used to optimize the parameters of the model. The NSE coefficient is better used for the simulation of higher flow waves, and log NSE is better used for the simulation of the lower ones. When it comes to modeling, several combinations of it were performed: The use of the TUV model without any data of soil water index (No SM), the TUV model in dual version with the soil water index for upper zone of the soil, approx. 3-5 cm of the soil depth (SM_001), the TUV model in dual version with the root zone soil moisture, approx. to 100 cm of the soil depth

(SM_010), and finally, the TUW model in dual version with both upper, and root zone soil water index (SM_001+ SM_010). The results are presented in Tables 1 and Table 2.

Table 1: Model performance values when soil moisture was not used as input data

	2007-2014	2015-2019
No SM	Calibration	Validation
NSE	0.69	0.58
log NSE	0.78	0.59
VE	-0.01	0.09

Table 2: Model performance values when various weights for discharge were used

2007-2014				2015-2019			
Qp (SM 001)	NSE	logNSE	VE	NSE	logNSE	VE	Correlation SM
0.9	0.70	0.69	-0.02	0.48	0.52	-0.01	0.69
0.8	0.68	0.65	0.11	0.22	0.24	0.35	0.82
0.7	0.70	0.66	0.07	0.37	0.28	0.23	0.80
0.6	0.68	0.66	0.08	0.17	0.26	0.30	0.83
0.5	0.68	0.65	0.09	0.27	0.25	0.30	0.82

2007-2014				2015-2019			
Qp (SM 010)	NSE	logNSE	VE	NSE	logNSE	VE	Correlation SM
0.9	0.69	0.75	-0.06	0.55	0.58	-0.04	0.77
0.8	0.70	0.70	0.07	0.59	0.54	0.14	0.79
0.7	0.68	0.68	0.12	0.30	0.24	0.34	0.85
0.6	0.67	0.66	0.06	0.39	0.30	0.21	0.86
0.5	0.68	0.65	0.04	0.34	0.31	0.19	0.86

2007-2014				2015-2019			
Qp (SM 001+SM 010)	NSE	logNSE	VE	NSE	logNSE	VE	Correlation SM
0.8	0.69	0.68	0.10	0.41	0.28	0.28	0.80
0.7	0.69	0.65	0.09	0.33	0.26	0.28	0.82
0.6	0.70	0.64	0.10	0.31	0.22	0.29	0.81
0.5	0.69	0.65	0.06	0.39	0.28	0.23	0.82

The model's success is evaluated as a result of combinations of the NSE and log NSE optimization functions, together with the volumetric error (VE). As the value of the combination of NSE and log NSE approaches 1, it indicates a better match between the observed and simulated flows. VE values less than 0 indicate an underestimation of flow volume, while VE values greater than 0 indicate an overestimation of flow volume.

4. Conclusion

In this paper, the new satellite product used *the ASCAT Direx Soil Water Index (SWI)*, which represents the soil moisture values for a specific location. The values used were extracted from

satellite images in QGIS software for the Myjava catchment in Slovakia. The satellite imagery has a spatial resolution of 500x500m and a temporal resolution of 1 day. The TUW and TUW dual versions were used for rainfall-runoff modeling. The calibration and validation of the model parameters were performed from the period from 1.1.2007 to 31.12.2014 for calibration and 1.1.2015 to 31.12.2019 for validation. The model performance indicators were analyzed through the various of weights which were assigned to discharge ranged from 0.5 to 0.9. And while correlation of the soil water index acquired satisfactory range of results (from 0.69 to 0.86), the other indicators did not match the success of previous mentioned correlation. The best values of NSE and logNSE model got in the calibration period 2007-2014 (from 0.64 to 0.75), but when it comes to validation period 2015-2019, these values dropped. The values are ranging between 0.17 (the case when the weight assigned to discharge Q_p was equal to 0.6, and the SM_001 was used), and the 0.59 (when $Q_p = 0.8$, and SM_010 was used). The volume error was giving better results when the $Q_p = 0.9$, and the SM_001, and SM_010 were used separately. On the other hand, when soil moisture data were combinedly used (SM_001+SM_010) in modelling, the volume error has worsened results up to 0.29. As the modelling was performed on only one catchment in Slovakia, it is planned use data from seven more Slovak catchments and compare them with each other.

Acknowledgment: This paper was supported by an APVV-19-0340 grant.

REFERENCES

- [1] KUBAN M., PARAJKA J., TONG R., GREIMEISTER-PFEIL I., M. VREUGDENHIL, SZOLGAY J., KOHNOVA S., HLAVCOVA K., SLEZIAK P, BRZIAK A. (2022). The effects of satellite soil moisture data on the parametrization of topsoil and root zone soil moisture in a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 70, no. 3, p. 295–307.
- [2] TONG R., PARAJKA J., SALENTINIG A., PFEIL I., KOMMA J., SZÉLES B., KUBÁŇ M., VALENT P., VREUGDENHIL M., WAGNER W., BLÖSCHL G. (2021). The value of ASCAT soil moisture and MODIS snow cover data for calibrating a conceptual hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 25, no. 3, p. 1389–1410.
- [3] KUBÁŇ, M., PARAJKA, J., TONG, R., PFEIL, I., VREUGDENHIL, M., SLEZIAK, P., ADAM, B., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S., HLAVČOVÁ, K. (2021). Incorporating Advanced Scatterometer Surface and Root Zone Soil Moisture Products into the Calibration of a Conceptual Semi-Distributed Hydrological Model. *Water*, vol. 13, no. 23, p. 1–19.
- [4] ALEKSIĆ M., SLEZIAK P., HLAVČOVÁ K. (2021). Parameterization of the rainfall-runoff model in changing climate. *Pollack Periodica*, vol. 16, no. 3, p. 64–69.
- [5] VALENT P., VR Calculating Areal Rainfall Using A More Efficient Idw Interpolation Algorithm. *International Journal of Engineering Research & Science*, vol. 1, no. 7, p. 9–17.
- [6] *Quantum GIS*. QGIS.
- [7] PARAJKA J., MERZ R., BLÖSCHL G. (2007). Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, vol. 21, no. 4, p. 435–446.
- [8] PARAJKA, J., NAEIMI V., BLÖSCHL G., KOMMA J. (2009). Matching ERS scatterometer based soil moisture patterns with simulations of a conceptual dual layer hydrologic model over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 13, no. 2, p. 259–271.
- [9] NASH, J., SUTCLIFFE, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.*, vol. 10.

Wael Almikaeel¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 2. ročník

HYDROLOGICKÁ PREDPOVEĎ SUCHA POMOCOU MODELU SVM

HYDROLOGICAL DROUGHT FORECASTING USING THE SVM MODEL

Abstract

Drought is one of many major concerns that may occur as a result of climate change, as it affects many aspects of the globe, including water resources. The Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI) Methodology is used in this contribution to measure hydrological drought in the Gidra River and classify dry, normal, and wet hydrological situations. Since the Support Vector Machine (SVM) model is rapidly being used in many areas, this study employed an SVM model to predict the hydrological drought in the Gidra River based on daily mean discharges in January, February, March, and April of the previous year. The study's findings reveal a high level of precision in forecasting the Gidra River's hydrological drought. Early assessment of the Gidra River's hydrological situation can be used to integrate water management for irrigation planning and drought prevention.

Keywords:

Drought; Drought Forecasting; Support Vector Machines; Water Bearing Coefficient.

1. Introduction

Drought is defined as a long period of dryness in the natural climatic cycle that can occur everywhere on the planet. Drought classification has historically arisen mostly from meteorological and hydrological studies in order to address agricultural and social implications [1]. As a result, droughts are typically classified into four basic categories: hydrological drought, soil moisture drought, meteorological drought, and socioeconomic drought [2]. Meteorological drought is usually followed by hydrological drought, which begins with a prolonged absence of precipitation as a result of atmospheric circulation. Precipitation shortfalls take longer to emerge in components of the hydrological system such as soil moisture, streamflow, groundwater, and reservoir levels. Reduced river discharges, below-normal groundwater levels, shrinking wetlands, and low water levels in lakes or reservoirs characterize the hydrological drought [2].

The Gidra River basin is situated above the village of Píla on the south-eastern slopes of the Little Carpathians in western Slovakia (Figure 1). Over 95% of the catchment area is forested [3]. These mountains are located in the southernmost part of the inner Carpathians, and their streams flow through the original beech forest ecosystem.

For the purpose of this study, the daily mean discharges over 58 years were provided by SHMI from the only gauging station called Píla, for the period 1961 – 2018. The dataset contains the date of discharge in the form of dd/mm/yyyy, the code of gauging stations according to the SHMI, the name of the stream/village, and daily mean discharges in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The hydrological index used in this research to assess the hydrological situation in the Gidra River is the Water Bearing Coefficient.

This index divides the hydrological condition of the river into three separate states (dry, normal, and wet). The objective of this study is to forecast or classify the river's hydrological situation regardless of the severity of the dry/wet periods, despite the fact that it measures the severity of dry and wet periods.

¹ Wael Almikaeel, Ing., Radlinského 11, 811 05 Bratislava

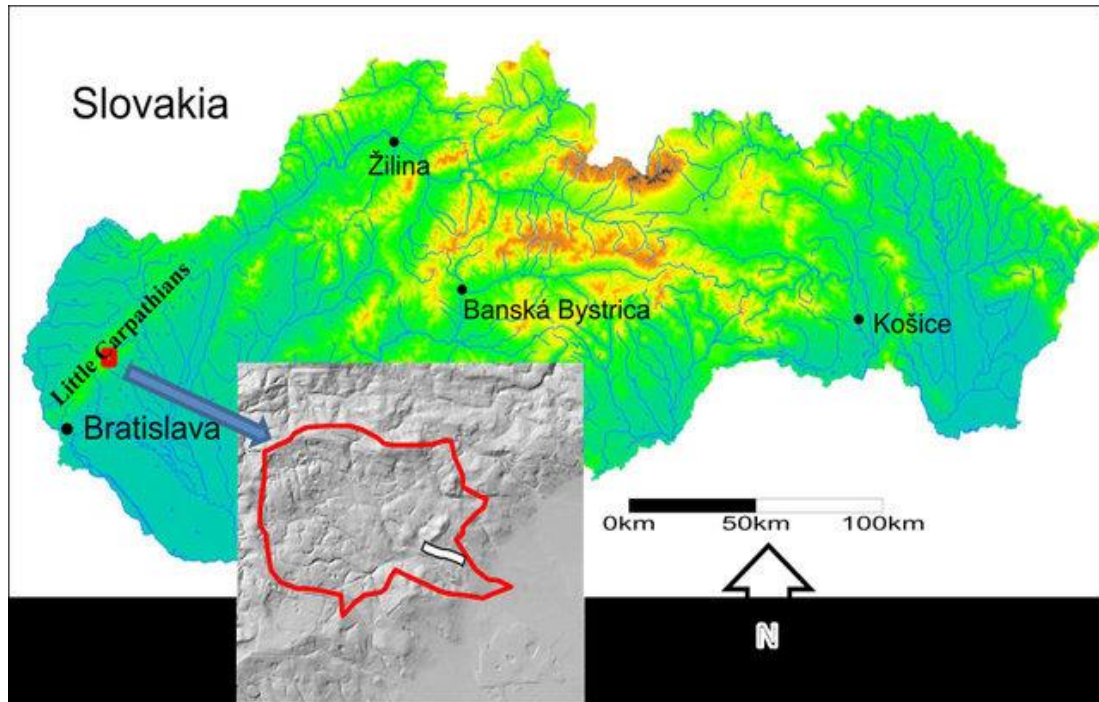


Figure 1: Positioning of the research area (upper Gidra river basin) inside the area of Slovakia. The white rectangle indicates the village Píla.

2. Methods

2.1 Drought Assessment

In order to compare the ratio of annual mean discharge to long-term mean discharge, standard values that reflect the normal, wet, and dry hydrological states of the river are used. The standard Water Bearing Coefficient values are found in Table 1. The standard intervals are broken down into additional subcategories to assess the severity of drought and wet years, as well as three primary categories to identify whether the year is dry, normal, or wet [4].

Table 1: Standard values of Water Bearing Coefficient [4].

Hydrological situation	Water Bearing Coefficient Values (%)
DRY	10 - 29
	30 - 49
	50 - 69
	70 - 89
NORMAL	90 - 110
WET	111 - 130
	131 - 150
	151 - 170
	171 - 180
	More

Table 2 shows the evaluation of the hydrological situation using the Water Bearing Coefficient for the period 2008-2018. The first column contains the year index, while the second column has only one value (long-term mean discharge $Q_{a1961-2000}$ designated according to SHMI standards), the third column contains values of annual mean discharge for each year in the study period, and the fourth column contains calculated values.

Table 2: Hydrological status of Gidra River using Water Bearing Coefficient values.

Year	Water Bearing Coefficient			Status
	$Q_{a1961-2000}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q_{avg} ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Q_{avg} / Q_a (%)	
2008	0.297	0.110	36.9	Dry
2009	0.297	0.372	125.4	Normal or wet
2010	0.297	0.553	186.3	Normal or wet
2011	0.297	0.379	127.5	Normal or wet
2012	0.297	0.151	50.7	Dry
2013	0.297	0.348	117.2	Normal or wet
2014	0.297	0.239	80.6	Dry
2015	0.297	0.304	102.2	Normal or wet
2016	0.297	0.220	74.2	Dry
2017	0.297	0.105	35.4	Dry
2018	0.297	0.149	50.2	Dry

2.2 Normal and dry years characterization

The data were divided into two separate parts. The first part consists of all daily and monthly mean discharges for dry years. The second part contains daily and monthly mean discharges of all wet and normal assessed years and starting from this point the notation for normal year refers to both normal and wet years. The visual comparison is conducted to order to find the major differences in monthly mean discharges between normal and dry-assessed years. Figure. 3 illustrates the differences in monthly mean discharges between normal and dry years.

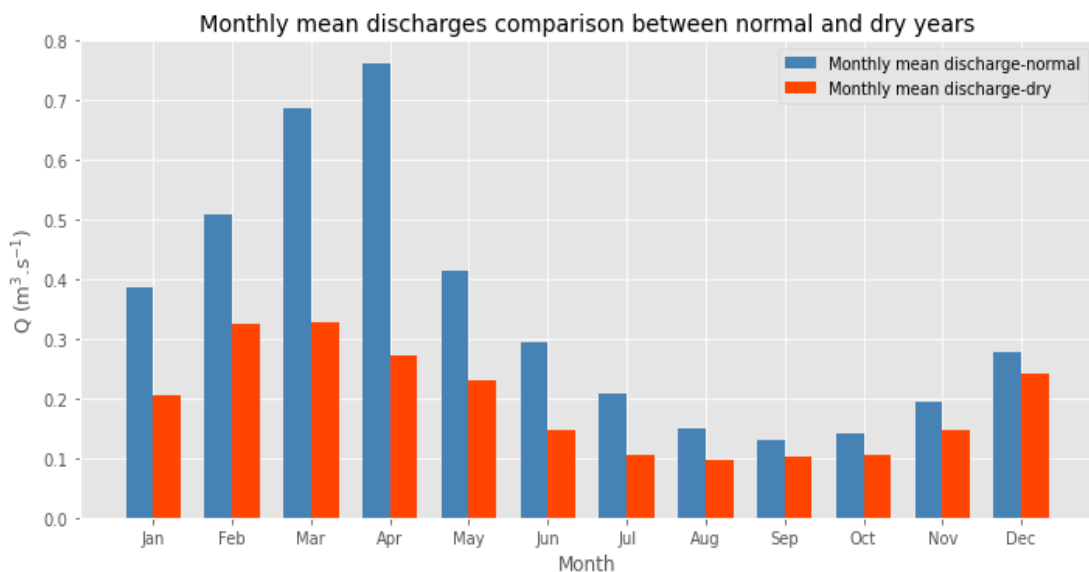


Figure 2: Monthly mean discharges for dry and normal years for the period 1961 – 2018.

Differences between monthly mean discharges in dry and normal years vary in their value each month. However, the value difference in the months of January, February, March, and April are the most significant, while the differences in mean discharges in the summer months are smaller in value. The monthly mean discharges show a similar pattern of changes for dry and normal assessed years as shown in Figure 2.

The first four months are the most important when comparing the magnitude of a series of monthly mean discharges between normal and dry years. This may imply that the hydrological condition of the Gidra River during the entire year is primarily determined by the mean discharge

values of the first four months. The most relevant value to evaluate the hydrological status in April may be the monthly mean discharge. The second useful value in this approach is the March monthly mean discharge.

By comparing the ranges of January (Figure. 3 (a)) mean discharges over 50% of mean discharges in normal years contain similar values as the mean discharges in dry years. However, more than 25% of discharges in normal years did not occur in any previous dry year.

In February (Figure. 3 (b)), the situation is different, and the rate of overlapping is even higher than what is observed in January. For a better understanding of monthly mean discharge distribution in normal and dry years, it is observed that 75% of mean discharges in dry years overlap with 50% of mean discharges in normal years.

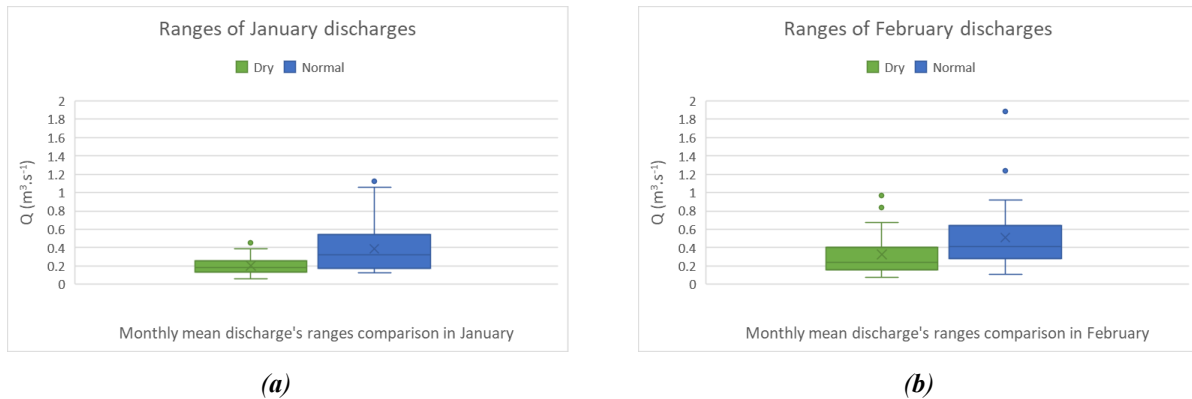


Figure 3: Range comparison in January (a) and February (b) for the monthly mean discharges.

In March (Figure. 4 (a)), over 90% of mean discharges in dry years are distributed in the range of $0 - 0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Less than 30 % of mean discharges in normal years are located also in the same range. More than 60% of mean discharge values in normal years have never occurred in any dry years, and more than 75% of mean discharges in dry years are overlapping with less than 25% of discharges values in normal years. The overlapping rate in mean discharges for normal and dry years is significant (around 30% excluding outliers) over the period between 1961 – 2018. This rate also provides valuable information in the drought assessment process. Which can be used as an input of a combination of multiple inputs which could be used for this purpose.

On the other hand, the ranges of mean discharge in April (Figure. 4 (b)) for both dry and normal years have a significant low overlapping rate. Over 95% of mean discharges in dry years are in the range of $0 - 0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Less than 30% of mean discharges in normal years are in the same range. Only one extreme value of mean discharges, which is classified as an outlier overlaps with 75% of mean discharges in normal years.

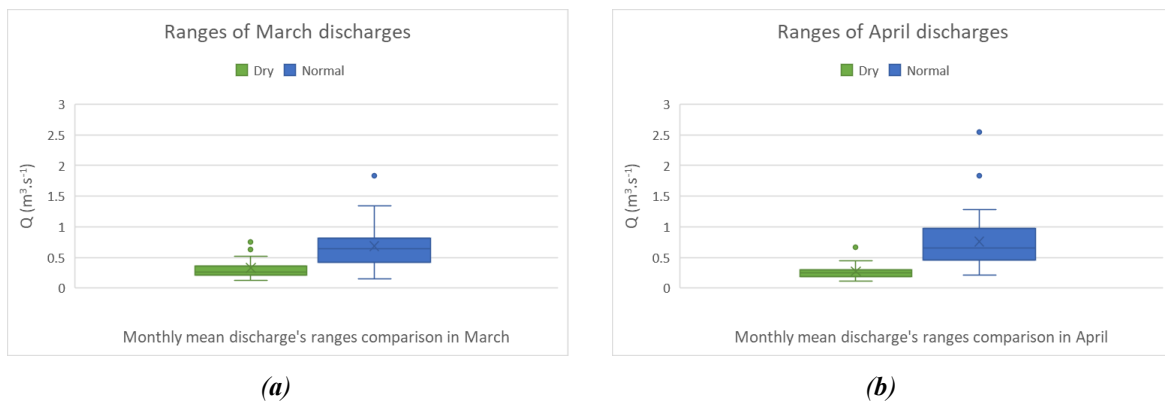


Figure 4: Range comparison in March (a) and April (b) for the monthly mean discharges.

3. Modelling

SVM is a popular machine learning algorithm to analyze data and recognize patterns. SVM performs classification by constructing an N-dimensional hyperplane (a plane generalized into N dimensions), which separates the data into two categories. They are used for classification and regression analysis, among other tasks [5].

The first step of the modelling process is splitting the data into two groups. The first group is for training the model. It contains daily mean discharge values of the first four months for 40 years in the period between 1961 – 2000 as well as the hydrological situation of Gidra River for every year over the same period. The training data set is used to feed the model with inputs about daily mean discharges and the resulting hydrological situation of each year, therefore, the model will be able to recognize an empirical pattern (N-dimensional hyperplane) [5] and to separate the values of the daily discharge into a dry and normal situation.

Afterwards, the model obtained a separable N-dimensional hyperplane, that can separate daily mean discharges into two classes; dry and normal. The obtained N-dimensional hyperplane should be applicable for the testing data set, that contains daily mean discharges of Gidra River over the validation period 2001 – 2018 without providing the hydrological situation of those years. The SVM model should generate results regarding the hydrological situation of Gidra River over the testing period using the separable N-dimensional hyperplane. The outcome is generated in the format “0” for dry hydrological status and “1” for normal hydrological status.

4. Results

The SVM model has been trained on the training data set to obtain the required parameters for accurate predictions of the hydrological situation of the Gidra River. The model shows accurate results predicting the hydrological situation of the training data set. The input of the testing data set was introduced to the models and the predicted hydrological situations (output) were compared with the real hydrological situations for the period 2001 – 2018. The confusion matrix is used in visualizing the accuracy of the model. As shown in Figure 5 the SVM model classified 11 years as dry years using only daily mean discharges of the first four months of each year.



Figure 1: Confusion matrix for testing the classification accuracy of the SVM model.

5. Conclusion

The results of the study provide useful information for any operation project of Gidra River to manage water distribution for agriculture or any other purposes, due to the number of water structures or abstractions along the river. The forecast of the hydrological status of the Gidra River of daily mean discharges of the first four months of the year can be immediately included in the changes of operation rules of water structures on Gidra to prevent it from drying out at the lower part of the stream.

Acknowledgements: The contribution was developed within the frame and based on the financial support of the APVV-19-0383 project “Natural and technical measures oriented to water retention in sub-mountain watersheds of Slovakia” as well as VEGA project No. 1/0728/21 “Analysis and prognosis of the impact of construction activities on groundwater in the urbanized territory”.

References

- [1] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: *Climate change and water adaptation issues*. Bratislava: European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2007, PP. 112. 3.
- [2] WOOD, E.; SHEFFIELD, J.: *The Science of Drought Drought: Past problems and future scenarios*. Hoboken: Taylor and Francis, London, United Kingdom, 2012, PP. 3 – 26.
- [3] Orfánus, T.; Jenčo, M.; Bebej, J.; Benko, M: *Simulation of the effects of forest roads on stormflow generation using GIS and 2D vadose zone hydrological model*. *Ekológia (Bratislava)* 2017, 36(1), PP. 25 – 39. 12
- [4] SVOBODA M.; FUCHS B.A.: *Handbook of Drought Indicators and Indices Integrated Drought Management Programme (IDMP)*. *World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP)*. Geneva, 2016, PP. 55.
- [5] SMOLA A.J., SCHÖLKOPF B, A.: A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*. *Statistics and Computing*, 2004, pp. 199–222. doi: 10.1023/b:stco.0000035301.49549.88.

*Miroslav Kandra*¹

Študijný program: VHI, ročník: 4.

MODELOVANIE VODNEJ BILANCIE DOLNÉHO HRONA: PROBLEMATIKA KVANTIFIKÁCIE ODTOKU ZO SUBPOVODÍ

MODELING OF THE WATER BALANCE OF THE LOWER HRON: THE PROBLEMATICS OF QUANTIFYING RUNOFF FROM SUB-BASINS

Abstract

In conventional models evaluating the water balance of basins, emphasis is placed on the ability of the model to work with a relatively sparse coverage of data defining hydrological, meteorological, geological and water management influences on the modeled basin. The model described and the methodology of its compilation focuses on the use of a dense network of monitoring stations and a large amount of available data, which are available for the territory of the Slovak Republic compared to the rest of the world. By focusing on details, it has potential to uncover the issue of runoff modeling, especially in sub-catchments affected by water management activities in combination with extreme hydrological phenomena. Currently, the primary goal is to distinguish the impact of these individual phenomena, to quantify individual parts of the water balance more accurately in micro-catchments, their impact on the total runoff into the sub-catchment, and thanks to this to be able to assess the water management impact more accurately on the water balance.

Kľúčové slová

WEAP, kvantifikácia odtoku, vodná bilancia.

1. Úvod

Doterajšie snahy o modelovanie prostredníctvom modelu WEAP prispeli k vyvodu predpokladu, na základe ktorého sa čiastočne mení smerovanie celého výskumu. Zatiaľ čo v zahraničí je modelovanie vodohospodárskej bilancie nástrojom kvantifikácie údajov o užívaní a manipulácie s vodou, ktoré nie sú dostupné, na Slovensku takéto modelovanie pôsobí samoučelne. Dôvodom je skutočnosť, že sú zdanlivo všetky hlavné vodohospodárske vplyvy predmetom nehlasovacej povinnosti vyplývajúcej zo zákona o vodách [1]. Pri vodohospodárskej bilancii množstva povrchových vôd uplynulého roka [2], ktorej formu taktiež ustanovuje vodný zákon a predmetné vyhlášky, modelovanie teda nemá účel.

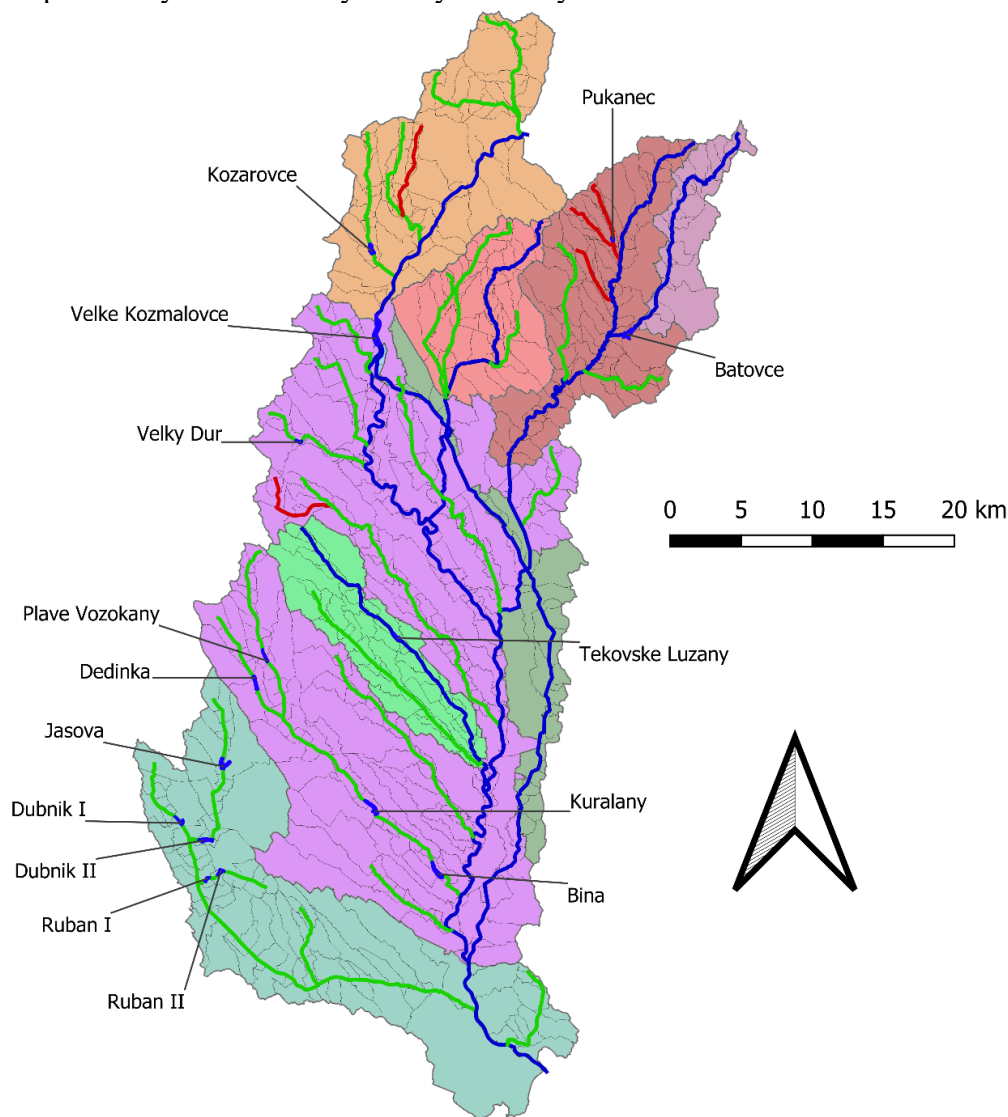
Keďže samotná vodohospodárska bilancia uplynulého roka SR by bola v mnohých krajinách považovaná už za podrobnú bilanciu, je aj vzhľadom na veľké a stále narastajúce množstvo dostupných údajov na Slovensku, zmysluplné smerovanie modelovania k podrobným bilanciám, kde je možné naplno využiť jeho potenciál.

¹ Miroslav Kandra, Ing.; Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta, Slovenska Technická Univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

Opisovaná problematika je parciálnou časťou modelu vodohospodárskej bilancie, vytvorenou v softvéri WEAP, v týždennom a mesačnom časovom kroku, s predpokladom pre modelovanie povrchových vôd s naviazaním na model podzemných vôd s primárnym zameraním na retrospektívnu analýzu scenárov a prípadným využitím pri výhľadových scenároch.

2. Modelované povodie a metodika

Povodie Modelovaná časť povodia rieky Hron, od vodomernej stanice Brehy (rkm 93,90) po bilančný profil VHB v ústí do Dunaja, bola rozdelená na 9 subpovodií, pričom uzáverovými profilmi týchto subpovodií boli vodomerne stanice aktívne počas celého modelovaného obdobia, teda od roku 2000 po rok 2019. Tieto subpovodia slúžili ako hlavné jednotky pre výpočet odtoku z jednotlivých subpovodií, sumarizácie bodových vplyvov na odtok (nádrže, prevody, pramene, odbery) a výpočet očisteného odtoku zo subpovodia, ktorý bol distribuovaný do jednotlivých odtokových bodov na modelovaných tokoch. Model je spracovaný v mesačnom časovom kroku, pričom po kompletnom zostavení bude prevedený do verzie s týždňovým časovým krokom.



Obrázok 1 Povodie dolného Hrona. Graficky rozlíšené jednotlivé subpovodia (9), líniovo mikropovodia (615) a toky vodomernej staníc (modrá čiara), toky vodných útvarov (zelená čiara) a toky s aktívnymi nádržami alebo odbermi povrchových vôd (červená čiara), vrátane odkazov a modelované nádrže.

Modelované sú toky spadajúce aspoň do jednej z 3 kategórií na základe podmienok, a to:

- Toky vodomerných staníc (6),
- Toky s aktívnymi nádržami alebo odbermi povrchových vôd (22),
- Toky, ktoré sú priamo útvarom povrchových vôd (31).

Celkovo spĺňalo tieto podmienky 36 tokov. Odtok zo subpovodí je distribuovaný po jednotlivých riečnych kilometroch týchto tokov, vytvárajúc celkovo 615 mikropovodí s rozsahom plochy od 0,01 do 47,56 km² a s priemernou plochou 2,66 km².

Podkladom pre vymedzenie Subpovodí a taktiež mikropovodí bol digitálny model terénu v rozlíšení 1x1 m [3].

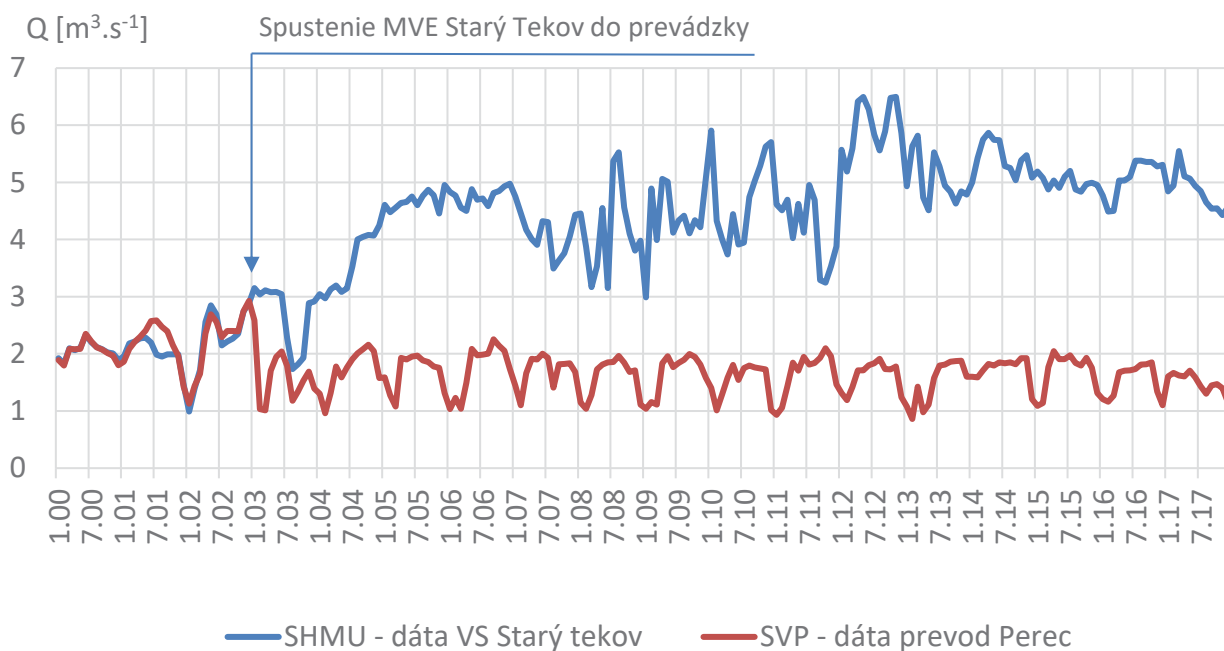
2.1 Metodika

Metodicky postup je výsledkom potreby postupne vyriešiť nezrovnalosti a problémy, ktoré takto podrobný model prináša. Základným predpokladom, ktorý vychádza už z predošlého modelovania, je distribúcia odtoku zo subpovodí tak, aby sa v profiloch vodomerných staníc modelovaný prietok rovnal nameranému prietoku. Pre upresnenie vplyvu nádrží na prítoky rieky Hron boli do modelu zapracované vodné nádrže kategórie III. a IV. s projektovaným zásobným objemom nad 100 000 m³ vrátane VN Bátovce a VN Veľké Kozmálovce. Súčasťou modelu je tak 15 nádrží s celkovým projektovaným zásobným objemom presahujúcim 6,4 mil. m³. Vzhľadom na zanesenosť objemu nádrží, pohybujúcu sa na odhadovanej úrovni minimálne 30-40 % bol výpočet zmien objemu nádrží implementovaný priamo do modelu prostredníctvom prepočtu z meraných hladín vzhľadom na krivky zatopených plôch a objemov, ktoré bude možné v rámci scenárov v neskorších fázach modelovania upravovať.

Pri spracovaní subpovodí na toku Hron, ktoré sú významne ovplyvnené prítokom z oblastí nad vodomernou stanicou Brehy, nejasnosti v kvantifikácii prevodov medzi riekou Hron a kanálom Perec a naviazania vodného stavu v rieke Hron na podzemné vody, je potrebná podrobná analýza, a následná implementácia do modelu.

3. Výsledky analýzy a diskusia

Prietok prevedený do kanála Perec definuje manipulačný poriadok VS Veľké Kozmálovce [4] v rozsahu od $MQ = 0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ po $Q_{\max} = 3,515 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, resp. $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pri výskyte ľadových úkazov na kanáli Perec je maximálny odber do Pereca max. $1,20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Z dostupných údajov denných meraní podľa Slovenského vodohospodárskeho podniku (SVP) bol tento prietok v rozsahu rokov 2000 – 2017 v priemere $1,72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tieto hodnoty sa čiastočne zhodujú s údajmi z vodomernej stanice Starý Tekov na kanáli Perec do roku 2003, odkedy bola VS Starý Tekov v správe Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) ovplyvnená vzduším MVE Starý Tekov (r.km 51,355). Priemerný denný rozdiel v týchto radoch do 30. októbra, 2003 bol $0,053 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, spôsobený najmä odklonom v mesiacoch júl – september v roku 2001. Od 1. novembra do konca roku 2017 bol priemerný denný rozdiel $3,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pričom VS Starý Tekov udávala prítoky až do $6,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Porovnanie po súčasnosť bude možné po doplnení časových radov, pričom je predpokladané priblíženie sa k hodnotám od SVP, keďže bola VS presunutá mimo vzniknutého vzdutia.



mi

Obrázok 2 Graf porovnania Prietoku vo VS Veľký Tekov SHMÚ a prevodu vody do Pereca podľa SVP

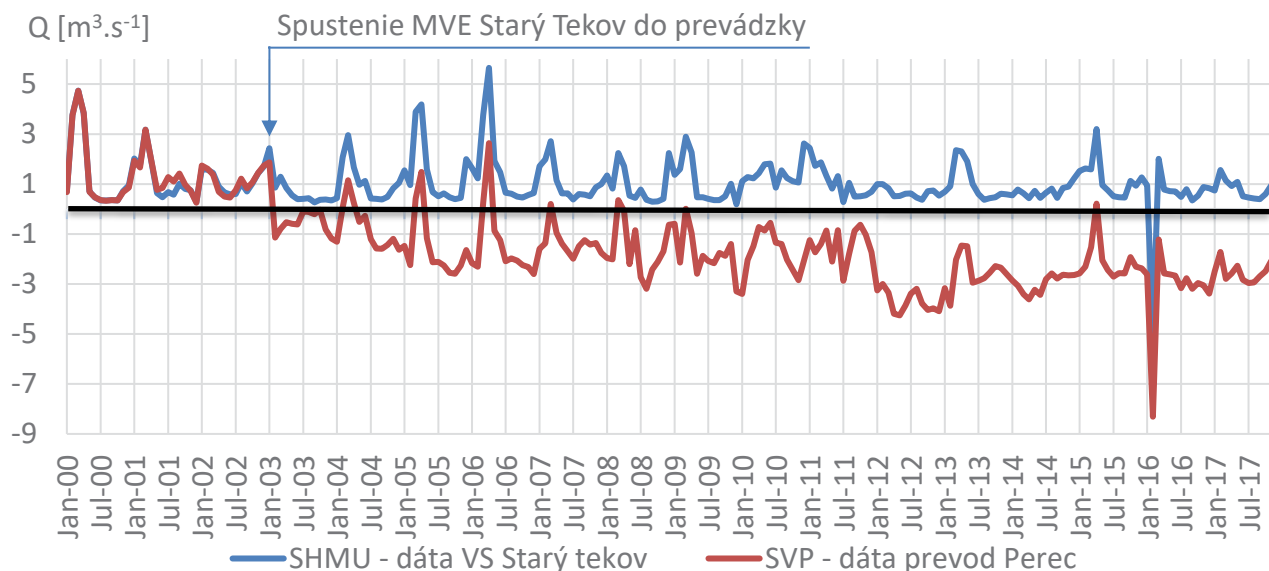
Zdrojom ďalších informácií je vodohospodársky spravodajca, podľa ktorého je prioritný odber vody do kanála cez odpad turbíny TG1 z malej vodnej elektrárne (MVE) a záložný odber, v prípade potreby odstaviť TG1, je cez odberný objekt situovaný nad MVE. Do Pereca sa vypúšťa regulované množstvo, max. do $Q = 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a to cez 3 výpusty DN 1 000 a prebytočný prietok odteká bočným priepadom cez otvor v deliacom pilieri späť do Hrona [5]. Uvedený rozdiel vo vypúšťanom regulovanom množstve $Q_{\max} = 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $Q_{\max} = 3,515 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, uvedenom v manipulačnom poriadku sťažuje otázku, ktorý rad prietokov použiť v modeli na definíciu prevodu do kanála Perec.

Pre porovnanie teda bol vypočítaný odtok zo subpovodia pre oba časové rady. Hodnoty boli očistené o vplyv VN Veľké Kozmálovce, VN Kozárovce a o vplyv odberu do jadrovej elektrárne Mochovce.

Graf na obrázku 3 zobrazujúci vypočítaný odtok zo subpovodia medzi VS Veľké Kozmálovce (r.km 73,10) a VS Brehy (r.km 93,90) je pri použití údajov od SVP možné vidieť od roku 2003 rast negatívnych hodnôt odtoku, oproti čomu pri použití údajov od SHMÚ, ktoré boli popísané ako chybné resp. ovplyvnené vzdutím, je možné pozorovať v celom časovom rade kladný odtok. Výnimkou, ktorá sa prejavuje výrazným skokom taktiež v prípade použitia údajov SVP je záporná hodnota vo februári 2016, kedy za celý mesiac február odtieklo podľa údajov z VS zo subpovodia o 12 mil. m³ vody menej ako doň prítieklo, pričom pravdepodobným vysvetlením sú z väčšej časti povodňové stavy na Hrone.

S predpokladom, že údaje od SVP definujú prevod do Pereca lepšie ako údaje od SHMÚ, sa nezhoduje skutočnosť, že v rokoch 2000 až 2002, kedy sa údaje od SVP a SHMU s menšími

odchýlkami zhodovali, je vypočítaný odtok zo subpovodia kladný v celom rozsahu, pričom tento stav v nasledujúcich rokoch pretrváva práve pri použití údajov od SHMÚ.



Obrázok 3 Graf porovnania vypočítaného odtoku pri použití údajov o Prietoku vo VS Veľký Tekov SHMÚ (modrá) a prevodu vody do Pereca podľa SVP (červená)

V scenári s použitím údajov od SHMÚ bol jediným mesiacom so záporným odtokom február v roku 2016. Tento skok je v oboch scenároch spôsobený vysokými vodnými stavmi na Hrone, pričom sa predpokladá, že nastali lokálne vybreženia medzi VS Brehy a VS Veľké Kozmálovce do inundačného územia, ktoré mali za následok oneskorenie odtoku alebo jeho pretransformovanie sa do infiltrácie do podzemných vôd.

4. Záver

Vysvetlenie nezrovnalosti na kanáli Perc prinesie konzultácia údajov s SVP a SHMÚ, rovnako ako doplnenie údajov od SVP a SHMÚ až po súčasnosť. Vo všeobecnosti sa pri modelovaní subpovodií, ako je práve predmetné subpovodie nad VS Veľké Kozmálovce, nedá na výpočet odtoku z pomeru zrážok k očistenému odtoku spoľahnúť. V časových krokoch s negatívnym vypočítaným odtokom by distribuovaný odtok do prítokov Hrona bol nulový. Keďže takéto prípady mohli nastať v prípade extrémneho sucha, no zároveň je potrebné presne určiť toky, na ktorých takýto stav mohol nastať, do modelu sa implementuje submodel, ktorý na úrovni odtokových bodov v riečnych kilometroch modelovaných tokov počíta hydrologickú bilanciu jednotlivých mikropovodií. Vypočítaný odtok zo subpovodia vstupuje do submodelu v daných odtokových bodoch ako aproximácia pre výpočet jednotlivých prvkov hydrologickej bilancie. Zostatok zásoby vody v mikropovodií je spätne distribuovaný do odtoku a infiltrácie do podzemných vôd na základe odtokovo-infiltračných charakteristík jednotlivých mikropovodií tak, aby sa vo výsledku namodelovaný prietok vo VS rovnal nameranému prietoku, pričom budú pre jednotlivé mikropovodia kvantifikované všetky primárne zložky hydrologickej bilancie.

Literatúra

- [1] Zákon č. 364/2004 Z. z. ZÁKON z 13. mája 2004 o vodách a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov (vodný zákon).
- [2] SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, 2020. *Vodohospodárska bilancia množstva povrchových vôd za rok 2019*. Shmu.sk [online]. © 2019 Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava. Posledná zmena 28.12.2020 19:15 [cit. 2022-10-10]. Dostupné z: <http://www.shmu.sk/sk/?page=1834>
- [3] ÚGKK SR, 2022. digitálny model reliéfu (DMR 5.0). Dostupné z: <https://www.geoportal.sk/sk/zbgis/lis-dmr/>
- [4] SVP š. p., Odštepny závod Banská Bystrica, 2011: Manipulačný poriadok vodnej stavby Veľké Kozmálovce.
- [5] Vodohospodársky spravodajca, dvojmesačník pre vodné hospodárstvo a životné prostredie / ročník 61, Vydavateľ: Združenie zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve na Slovensku, Partizánska cesta 69, 974 98 Banská Bystrica, IČO: 30 841 721, tel.: 048/41 48 742, www.zzvvh.sk ISSN: 0322-886X.

Anna Liová¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 2. ročník

ANALÝZA PARAMETROV PRIETOKOVÝCH VĹN A ZOSTROJENIE KONTROLNÝCH VĹN PRE POSUDZOVANIE BEZPEČNOSTI NÁDRŽÍ

ANALYSIS OF DISCHARGE WAVES PARAMETERS AND CONSTRUCTION OF CONTROL WAVES FOR RESERVOIR SAFETY ASSESSMENT

Abstract

As a part of the safety assessment of water structures and dams during flood loads, it is required that each water structure is assessed for critical loads. This critical load represents the control flood wave. The contribution is the analysis of characteristics and parameters of discharge waves, which serve as inputs to determine the control flood wave. From the analyzed discharge time series, a group of annual peak discharges and three seasonal groups will be created. In each group, we separate the peak flow discharge waves. The T-year maximum discharge is determined by statistical processing of the maximum peak flows. Volume of control wave was derived from a joint probability distribution, that was constructed for pairs of peak flows and their associated volumes by Copula functions. The analysis results serve as inputs in constructing a set of control flood waves.

Kľúčové slová

prietokové vlny; separácia vĺn; nádrž Horné Orešany

1. Úvod

Vodné stavby na tokoch sú súčasťou našej spoločnosti a prinášajú jej určité úžitky, ako napríklad zníženie povodňových prietokov, nadlepšenie minimálnych prietokov, zásobovanie obyvateľstva pitnou vodou, zásobovanie priemyslu a poľnohospodárstva úžitkovou vodou, výroba elektrickej energie, plavba, rybolov či rekreácia. Na druhej strane ale predstavujú aj možné nebezpečenstvo v prípade havárie pre obyvateľov žijúcich na území pod vodnou stavbou. Preto je veľmi dôležitým krokom vodnú stavbu vhodne navrhnuť a následne počas jej prevádzky správne posudzovať jej bezpečnosť. Jedným z hydrologických podkladov pri návrhu či posudzovaní bezpečnosti vodných stavieb počas povodňového zaťaženia je kontrolná povodňová vlna. Tá je definovaná ako teoretická prietoková vlna určená kulmináčnym prietokom so zvolenou pravdepodobnosťou prekročenia, časovým priebehom a objemom s prislúchajúcou pravdepodobnosťou [1]

V bežnej hydrologickej praxi sú pre dimenzovanie často postačujúce len kulmináčne prietoky. V niektorých prípadoch je však potrebné použiť charakteristiky celej prietokovej vlny, ktorú môžeme nazvať aj návrhová povodňová vlna, ktorá je vyjadrená s určitou štatistickou významnosťou, pravdepodobnosťou dosiahnutia alebo prekročenia. Pre kompletnú definíciu návrhovej vlny je nutné poznať nasledovné charakteristiky: 1) kulmináčny prietok, 2) objem alebo trvanie vlny, 3) tvar vlny. Odhad prvých dvoch charakteristik je tradičnou úlohou v hydrológii, avšak väčšina metód na ich určenie je súčasťou jednorozmernej frekvenčnej analýzy. Nevýhodou môže byť určovanie

¹ Anna Liová, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

hydrologických veličín, najčastejšie prietokov, s vysokou dobou opakovania, ktorá je mimo rozsahu dostupných historických pozorovaní [2]. Charakteristiky návrhovej vlny nemožno však opísať pomocou jednej premennej, ale musia byť popísané súborom vzájomne závislých premenných, zvyčajne pozostávajú z kulminačného prietoku, objemu a trvania vlny [3]. To znamená, že jednorozmerný prístup frekvenčnej analýzy nemožno využiť a je potrebné využiť viacrozmerný prístup na zohľadnenie závislostí medzi kulminačným prietokom vlny a objemom vlny, alebo kulminačným prietokom a trvaním vlny, a to pomocou teórie kopúl [4][5][6].

Tretou charakteristikou, ktorú je potrebné určiť, je tvar vlny. Ten je často odlišný nielen medzi povodiami, ale závisí aj od jednotlivých povodňových udalostí vrátane procesov, ktoré určujú typ povodne a od hydroklimatických faktorov, ktoré ich ovplyvňujú, ako napríklad úhrn zrážok na povodie, vlhkosť pôdy v povodí i iné [7][8]. Pri určovaní tvaru dôraz kladie na dôležitosť analýzy jednotlivých typov povodní, ako napríklad krátke a intenzívne „bleskové“ povodne, povodne z krátkodobých dažďov, dlhodobých dažďov a taktiež povodne z topenia snehu [8]. Autori uvádzajú, že výber tvaru na základe typu povodne je výhodný aj zo štatistického hľadiska, pretože sa eliminuje miešanie typovo rôznych povodňových udalostí. Taktiež tento prístup výberu pomáha identifikovať rozličné typy povodňového rizika, ako napríklad vysoké kulminačné prietoky v lete a veľké objemy vln v jarnom období, podľa čoho môže byť upravená a navrhnutá protipovodňová ochrana v povodí [9][10].

2. Opis územia a vstupné údaje

V práci sme sa zamerali na spracovanie metodiky pre konštrukciu kontrolnej povodňovej vlny pre konkrétne vodné dielo na Slovensku, a to pre vodnú stavbu Horné Orešany. Podľa výšky škôd, ktoré by nastali náhlym uvoľnením zadržovaných a vzdúvaných vôd, je vodná stavba zaradená do II. kategórie vodných stavieb. Heterogénna priehrada je vybudovaná na toku Parná, v rkm 25,00. Tok Parná je pravostranným prítokom toku Trnávka, celková dĺžka toku je približne 38,5 km. Pramení na území Malých Karpát v nadmorskej výške 560 m n. m. Plocha povodia v profile koruny hrádze je 45,59 km².

Pri spracovaní metodiky slúžil ako vstupný údaj časový rad prietokov, ako doplnujúce údaje slúžili úhrny zrážok a taktiež teplota vzduchu. Zdrojom údajov o prietokoch boli merania z vodomernej stanice SHMÚ – 5250 Horné Orešany – Parná. Konkrétne boli pri návrhu použité hodinové prietoky Q_h [m³.s⁻¹] za obdobie 1.11.1988 – 31.12.2019 a kulminačné prietoky Q_{kul} [m³.s⁻¹] za obdobie 1.11.1988 – 31.12.2019. Údaje o úhrne zrážok boli použité zo zrážkomernej stanice SHMÚ, Dolné Orešany, a to priemerný denný úhrn zrážok za obdobie 1.11.1988 – 31.12.2013. Údaje o teplotách vzduchu boli použité z klimatologickej stanice SHMÚ, Modra-Piesok; a to priemerné denné teploty vzduchu za obdobie 1.11.1988 – 31.12.2013.

3. Metodika práce

3.1 Výber prietokových vln na základe ich výskytu v roku

Jednou z charakteristík, ktoré definujú kontrolnú, návrhovú vlnu je jej tvar. Ako bolo spomínané v úvode, pri určení tvaru návrhovej vlny by mali byť zohľadnené typy povodní a procesy, na základe ktorých vznikli. V skúmanom časovom prietokovom rade sa vlny výrazne líšili nielen trvaním, ale taktiež aj tvarom a objemom, preto boli vlny analyzované a rozdelené v štyroch kategóriách, a to:

- Maximálne sezónne kulminačné prietoky za obdobie 1989–2019, apríl až máj – jarná sezóna,
- Maximálne sezónne kulminačné prietoky za obdobie 1989–2019, jún až október – letná sezóna,

- Maximálne sezónne kulminačné prietoky za obdobie 1989–2019, november až marec – zimná sezóna.
- Maximálne ročné kulminačné prietoky Q_{kul} za obdobie 1989–2019.

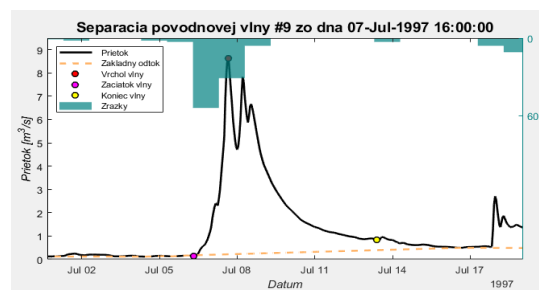
Výskyt jarných prietokových vln býva spojený s topením snehu, prípadne kombináciou topenia snehu a dažďa. Podobná príčina vzniku vln môže nastať aj v zimnom období. Preto majú vlny dlhšie trvanie a väčšie objemy na rozdiel od letných prietokových vln, ktoré vznikajú najčastejšie z búrkových udalostí. Letné sú tvarovo štíhlejšie s kratšou dobou trvania.

Dôležitým rokom je zvoliť metóda výberu, označenia, jednotlivých povodňových udalostí, ktoré vstupujú do štatistickej analýzy. Poznáme rôzne spôsoby výberu dát, ako príklad najčastejšie využívaných môžeme uviesť metódu AM (annual maximum), kedy sú skúmané len ročné maximálne prietoky a metódu POT (peak over threshold). Spôsob, akým bude výberový súbor dát zhotovený ovplyvňuje najmä jeho veľkosť, čo môže pri štatistickom spracovaní viesť k odlišným výsledným charakteristikám návrhovej vlny [11]. V tejto práci sme vybrali vlny s maximálnym prietokom v danej kategórii vln.

3.2 Separácia prietokových vln

Prietokovú vlnu charakterizujeme ako prechodné zväčšenie, kulmináciu a následný pokles prietokov, z čoho vychádza postup, ktorý bol použitý pri výbere a separácii jednotlivých povodňových vln. Separácie týchto vln ako aj výpočet základného odtoku boli spracované metódami v programe FloodSep [12].

Separácia bola založená na vyčlenení základného odtoku, pričom začiatok a koniec prietokovej vlny bol určovaný subjektívne. V ďalšom kroku sme k prietokovému radu pridali aj údaje o zrážkach a teplote vzduchu, pomocou ktorých bolo možné korektnejšie vyčleniť základný odtok a teda aj začiatok a koniec prietokovej vlny.



Obrázok 1: Príklad separácie prietokovej vlny

3.3 Výber reprezentatívneho tvaru vlny

Tvar vlny použitý pri návrhu kontrolnej povodňovej vlny bol určený pomocou metód naprogramovaných v programe FloodSep. V prvom kroku boli vyselektované prietokové vlny zjednodušené a zoškálované do intervalu $<0,1>$. Zjednodušenie povodňových hydrogramov spočíva v tom, že viacmodálne prietokové hydrogramy sú transformované na jednomodálne. Zo súboru zoškálovaných vln bol v druhom kroku zostrojený tzv. reprezentatívny hydrogram. Pri zostrojovaní kontrolných povodňových vln je dôležitý parameter percentil, ktorý ovplyvňuje tvar reprezentatívneho hydrogramu. V práci bol použitý 50% percentil.

3.4 Frekvenčná analýza prietokov a objemov

Návrhový N-ročný prietok bol odvodený štatistickým spracovaním maximálnych kulminačných ročných prietokov ako aj maximálnych kulminačných prietokov v danej sezóne za vybrané obdobie.

Odhad týchto hodnôt a s ním súvisiaci výber teoretického rozdelenia pravdepodobnosti a metódy odhadu parametrov teoretického rozdelenia pravdepodobnosti bol uskutočnený podľa metodiky DVWK. Pre jednotlivé skupiny boli vybrané nasledovné rozdelenia a metódy určujúce parametre:

- Jarná sezóna – 3-parametrické logaritmicke-normálne rozdelenie (LN3), metóda maximálnej vierohodnosti;
- Letná sezóna generalizované extrémálne rozdelenie (GEV), metóda maximálnej vierohodnosti;
- Zimná sezóna – 3-parametrické rozdelenie Pearson (P3), metóda pravdepodobnosťou vážených momentov;
- Qan,max – 3-parametrické rozdelenie log-Pearson (LP3), metóda momentov.

Pre dvojice kulminačných prietokov a k nim prislúchajúcich objemov bola zostrojená dvojrozmerná združená pravdepodobnosť prekročenia pomocou kopule. Výsledkom je podmienená pravdepodobnosť prekročenia objemu k danému kulminačnému prietoku. V práci boli použité nasledovné typy kopúl, zvolené pomocou najmenšej vzdialenosti:

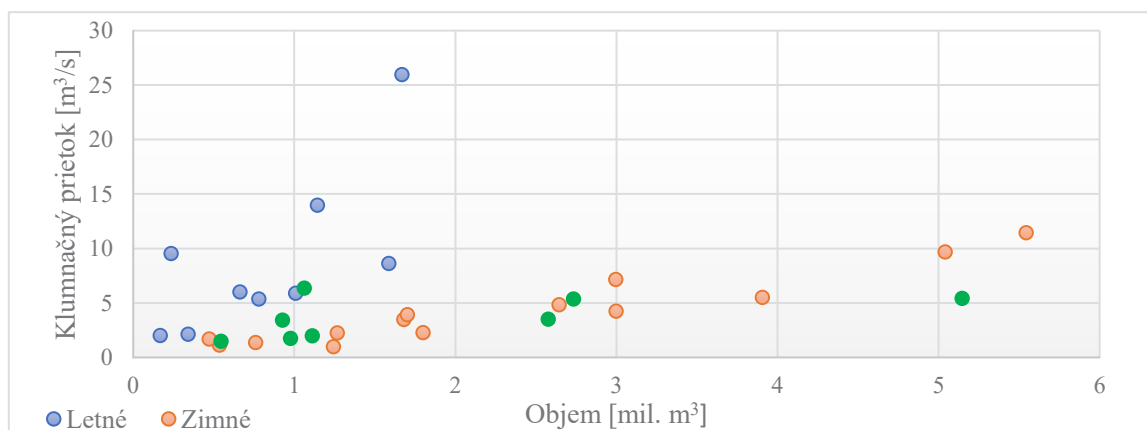
- Jarná sezóna – Frank kopula;
- Letná sezóna – Gumbel kopula;
- Zimná sezóna – Gumbel kopula;
- Qan,max – T kopula.

Pre potreby tejto práce sme použili k danému prietoku s pravdepodobnosťou prekročenia 0,01 podmienenú pravdepodobnosť prekročenia objemu 0,5.

4. Výsledky práce

4.1 Výsledky separácie prietokových vln

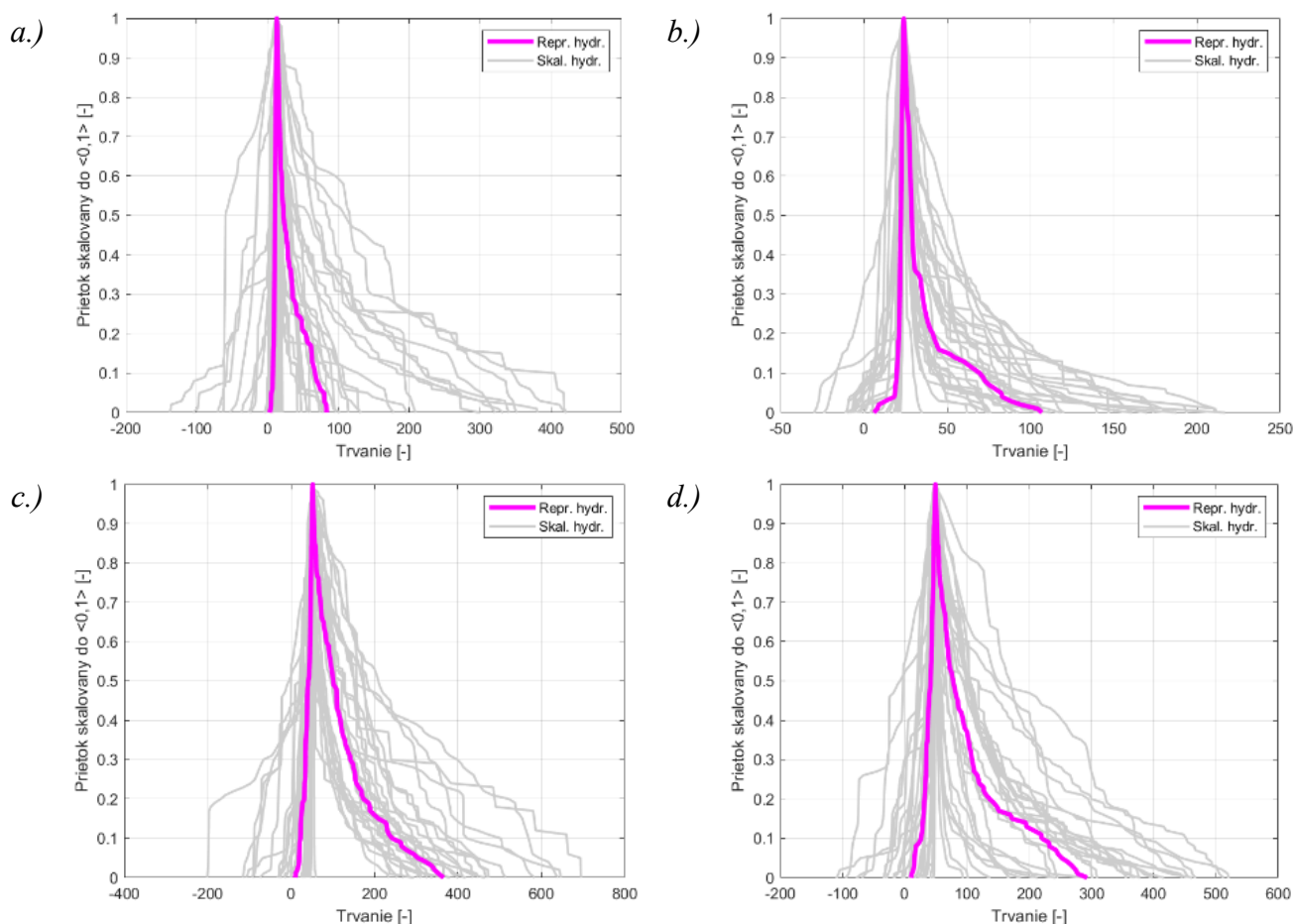
Dôležitou súčasťou práce bola typizácia jednotlivých povodňových udalostí, ktoré vstupujú do štatistickej analýzy a ich následná separácia. Výsledky separácie prietokových vln v skupine maximálnych ročných kulminačných prietokov sú zobrazené na obrázku 2, ktorý zobrazuje závislosť medzi objemami a kulminačnými prietokmi. Na grafe môžeme vidieť, že rozloženie vln je nehomogénne a pozostáva z viacerých typov vln. Kým zimné a jarné vlny sa radia k vlnám s väčšími objemami a nižšími kulminačnými prietokmi, letné vlny vystupujú mimo tento trend a sú charakteristické vyššími prietokmi a menšími objemami, teda aj kratším trvaním. Toto prerozdelenie prietokových vln ukazuje na skutočnosť, že výber vln v jednotlivých sezónach bol vhodným postupom riešenia a malo by sa zohľadniť pri návrhu kontrolnej povodňovej vlny.



Obrázok 2: Vzťah medzi kulminačným prietokom a objemom odseparovaných vln v skupine maximálnych ročných prietokov

4.2 Reprezentatívny tvar kontrolnej vlny

Ako už bolo spomenuté v metodike príspevku, pri určovaní tvaru vlny sme zo zoškálovaných vln určili ich reprezentatívny tvar s hodnotou percentilu 50%. Na obrázku 3 sú zobrazené zaškálované odseparované vlny v jednotlivých skupinách, pričom zvýraznený tvar predstavuje reprezentatívny hydrogram určený pomocou percentilu.



Obrázok 3: Reprezentatívny tvar zo zoškálovaných vln pre: a.) skupinu jarnej sezóny, b.) skupinu letnej sezóny, c.) skupinu zimnej sezóny, d.) skupinu maximálnych ročných prietokov

V ďalšom kroku sme zhotovili vyhladený reprezentatívny hydrogram pomocou Gaussovej zloženej funkcie. Reprezentatívny hydrogram je výstupom z programu Floodsep a definuje tvar návrhovej vlny, ktorý je potrebný pre správne určenie kontrolných povodňových vln.

4.3 Zostrojenie kontrolných vln

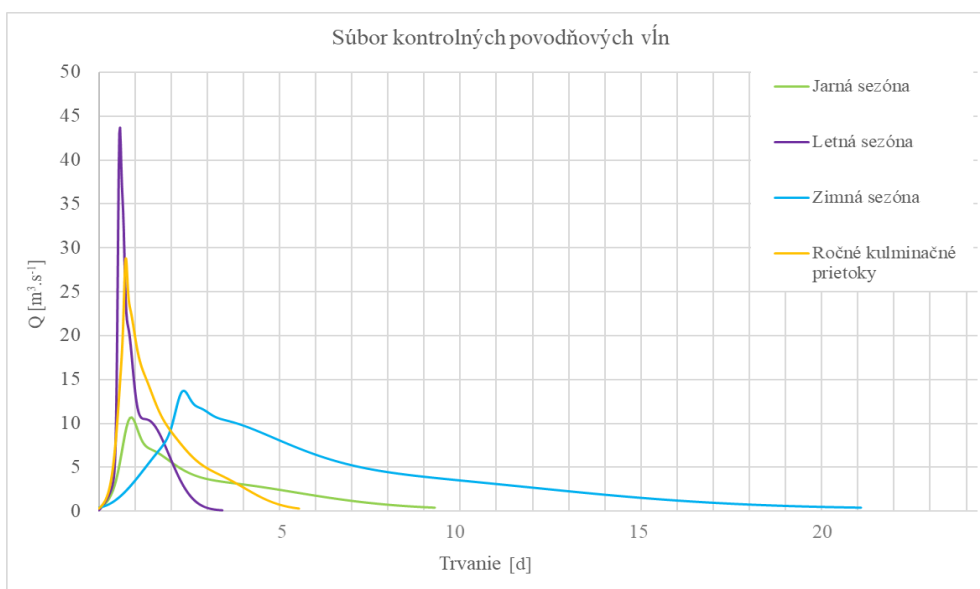
Pri zostrojení kontrolnej povodňovej vlny bolo potrebné poznať hodnoty kulmináčného prietoku so zvolenou pravdepodobnosťou prekročenia, k nemu objem s prislúchajúcou pravdepodobnosťou a časový priebeh vlny. V príspevku boli pri návrhu použité:

- 100-ročný kulmináčny prietok, respektíve prietok s pravdepodobnosťou dosiahnutia alebo prekročenia 0.01,
- podmienená pravdepodobnosť prekročenia objemov 0.5

- časový priebeh vlny, ktorý dostaneme priradením podmieneného objemu k tvaru vlny, pričom používame tvary s percentilom 50%.
- Hodnoty definujúce kontrolné povodňové vlny sú zhrnuté v tabuľke 1, súbor vln je zobrazený na obrázku 4.

Tabuľka 1: Charakteristiky kontrolných povodňových vln pre jednotlivé skupiny

Skupina	Q_{100} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	V [mil. m^3]	t_c [d]
Qmax	28.80	3.253	132.8
Jarná	10.69	2.405	222.9
Letná	43.70	2.271	82.0
Zimná	13.72	7.109	506.0



Obrázok 4: Súbor kontrolných povodňových vln

5. Záver

V príspevku sme sa zaoberali návrhom a zostrojením súboru kontrolných povodňových vln, ktoré predstavujú kritické zaťaženie vodných diel počas povodňového zaťaženia. Návrh týchto kontrolných vln bol realizovaný na základe analýzy vzťahu medzi kulmináciou, objemom a tvarom povodňových vln. Problematika bola spracovaná pre tok Parná, pre profil hrádze vodnej nádrže Horné Orešany. V nasledujúcej časti stručne zhrnieme zistenia a výsledky. Keďže sa prietokové vlny výrazne líšili v priebehu roka svojím tvarom, bolo nutné analyzovať jednotlivé prietokové vlny v skupinách, a to v skupine ročných kulminačných prietokov a v 3 sezónnych skupinách- jarnej, letnej a zimnej. Ďalším krokom bola separácia jednotlivých prietokových vln. Pri separácii bolo dôležité pre korektné určenie začiatku a konca jednotlivých prietokových vln zohľadniť klimatické pomery, teda zrážky a teploty vzduchu. Výsledkom separácie bol objem a trvanie jednotlivých prietokových vln. Pomocou odseparovaných prietokových vln boli zostrojené reprezentatívne tvary kontrolných vln. Pre zostrojenie kontrolných vln sme použili tvar vlny s percentilom 50% v každej skupine.

Štatistickým spracovaním kulminačných prietokov pre jednotlivé skupiny boli určené N-ročné prietoky pre viaceré N-ročnosti. Pri riešení bol použitý prietok s pravdepodobnosťou prekročenia 0.01, respektíve 100-ročný prietok.

Vzťahy medzi kulminačnými prietokmi a objemami jednotlivých odseparovaných vln boli analyzované a na základe tejto analýzy bola pre dvojice kulminačných prietokov a k nim prislúchajúcich objemov zostrojená dvojrozmerná združená pravdepodobnosť prekročenia. V príspevku bola použitá podmienenú pravdepodobnosť prekročenia objemu k danému 100-ročnému prietoku 0,5. Výsledkom práce sú kontrolné vlny s určenými návrhovými veličinami, ktoré môžu byť použité pri posúdení bezpečnosti vodného diela.

Literatúra

- [1] MINISTERSTVO ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SLOVENSKEJ REPUBLIKY: Metodický pokyn generálneho riaditeľa sekcie vôd Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky k posudzovaniu bezpečnosti priehrad a odkalísk počas povodňového zaťaženia v rámci technicko-bezpečnostného dohľadu. Bratislava, 2020. 13 s.
- [2] PAQUET, E.: Synthetic hydrograph generation by hydrological donors, *Hydrological Sciences Journal*. 2019, 64, 5, pp.570–586. DOI: 10.1080/02626667.2019.1593418
- [3] BRUNNER, M.I., SEIBERT, J., FAVRE, A.-C.: Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation, *WIRES Water*. 2016, 3, 6, pp. 819–833. DOI: 10.1002/wat2.1173
- [4] GRÄLER, B., BERG, M.J. van den, VANDENBERGHE, S., PETROSELLI, A., GRIMALDI, S., BAETS, B.D., VERHOEST, N.E.C.: Multivariate return periods in hydrology: a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation, *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, 17, 4, pp. 1281–1296. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-17-1281-2013>
- [5] SALVADORI, G., DE MICHELE, C.: Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events, *Water Resources Research*. 2004, 40, 12, DOI:10.1029/2004WR003133
- [6] SZOLGAY, J., GAÁL, L., BACIGÁL, T., KOHNOVÁ, S., HLAVČOVÁ, K., VÝLETA, R., PARAJKA, J., BLÖSCHL, G.: A regional comparative analysis of empirical and theoretical flood peak-volume relationships, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2016, 64, 4, pp. 367–381. DOI: 10.1515/johh-2016-0042
- [7] BRUNNER, M.I., VIVIROLI, D., SIKORSKA, A.E., VANNIER, O., FAVRE, A.-C., SEIBERT, J.: Flood type specific construction of synthetic design hydrographs, *Water Resources Research*. 2017, 53, 2, pp. 1390–1406. DOI: 10.1002/2016WR019535
- [8] MERZ, R., BLÖSCHL, G.: A process typology of regional floods, *Water Resources Research*. 2003, 39, 12 DOI:<https://doi.org/10.1029/2002WR001952>
- [9] GAÁL, L., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S., HLAVČOVÁ, K., PARAJKA, J., VIGLIONE, A., MERZ, R., BLÖSCHL, G.: Dependence between flood peaks and volumes: a case study on climate and hydrological controls, *Hydrological Sciences Journal*. 2015, 60, 6, pp. 968–984. DOI: 10.1080/02626667.2014.951361
- [10] MERZ, R., BLÖSCHL, G.: Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information, *Water Resources Research*. 2008, 44, 8 DOI: 10.1029/2007WR006744
- [11] BRUNNER, M.I., SIKORSKA, A.E., FURRER, R., FAVRE, A.-C. (2018b): Uncertainty Assessment of Synthetic Design Hydrographs for Gauged and Ungauged Catchments, *Water Resources Research*, 54, 3, pp. 1493–1512. DOI: 10.1002/2017WR021129
- [12] VALENT, P.: FloodSep: užívateľská príručka, 2019, SvF STU v Bratislave

Jakub Mydla¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 4. ročník

NÁVRH RETENČNÝCH PRIESTOROV V POVODIACH ULIČKY A UBLIANKY

DESIGN OF RETENTION SPACES IN THE ULIČKA AND UBLIANKA RIVER BASINS

Abstract

Based on morphological and hydrological data, a hydrodynamic model of water flow was created in the HEC-RAS program. The model simulated a 100-year discharge in the basins of the Ulička and Ublianka streams. After calibration, elements were added to the model whose task was to transform the flood discharge. To transform the flood wave, detention and multi-purpose reservoirs were introduced which could improve the flow in the riverbeds in drought period. The proposed measures managed to reduce the maximum discharge by approximately 10%.

Kľúčové slová

Hydrodynamické modelovanie; transformácia povodne; HEC-RAS; retenčný priestor

1. Úvod

V rámci dizertačného projektu v akademickom roku 2021/2022 som sa zapodieval úlohou, ktorá súvisí s návrhom retenčných priestorov v povodí horného Uhu, konkrétne v povodiach tokov Ublianka a Ulička. Cieľom štúdie bolo transformovať povodňový prietok v profiloch Slovensko-Ukrajinskej hranice, nakoľko oba potoky odtekajú na Ukrajinu, kde ústia do Uhu.

Na modelovanie hydrodynamického odtoku v povodí skúmaných tokov bol použitý dvojdimenzionálny softvér HEC-RAS 2D. Bola aplikovaná metóda implicitného riešenia, ktorá umožňuje väčšie výpočtové časové kroky a zároveň zabezpečuje vyšší stupeň stability a robustnosti výpočtu (oproti explicitným možnostiam riešenia) a v porovnaní s tradičnými metódami konečných rozdielov a konečných prvkov. Pri rešpektovaní určitých zjednodušení a výpočtových predpokladov bol zostavený hydrodynamický výpočtový model odtoku, ktorý bol na základe dodaných hydrologických a morfológických podkladov nakalibrovaný a následne použitý na výpočty pri návrhu viacerých variantov opatrení na zadržanie vody v krajine s následným vyhodnotením ich účinnosti [1].

2. Popis územia

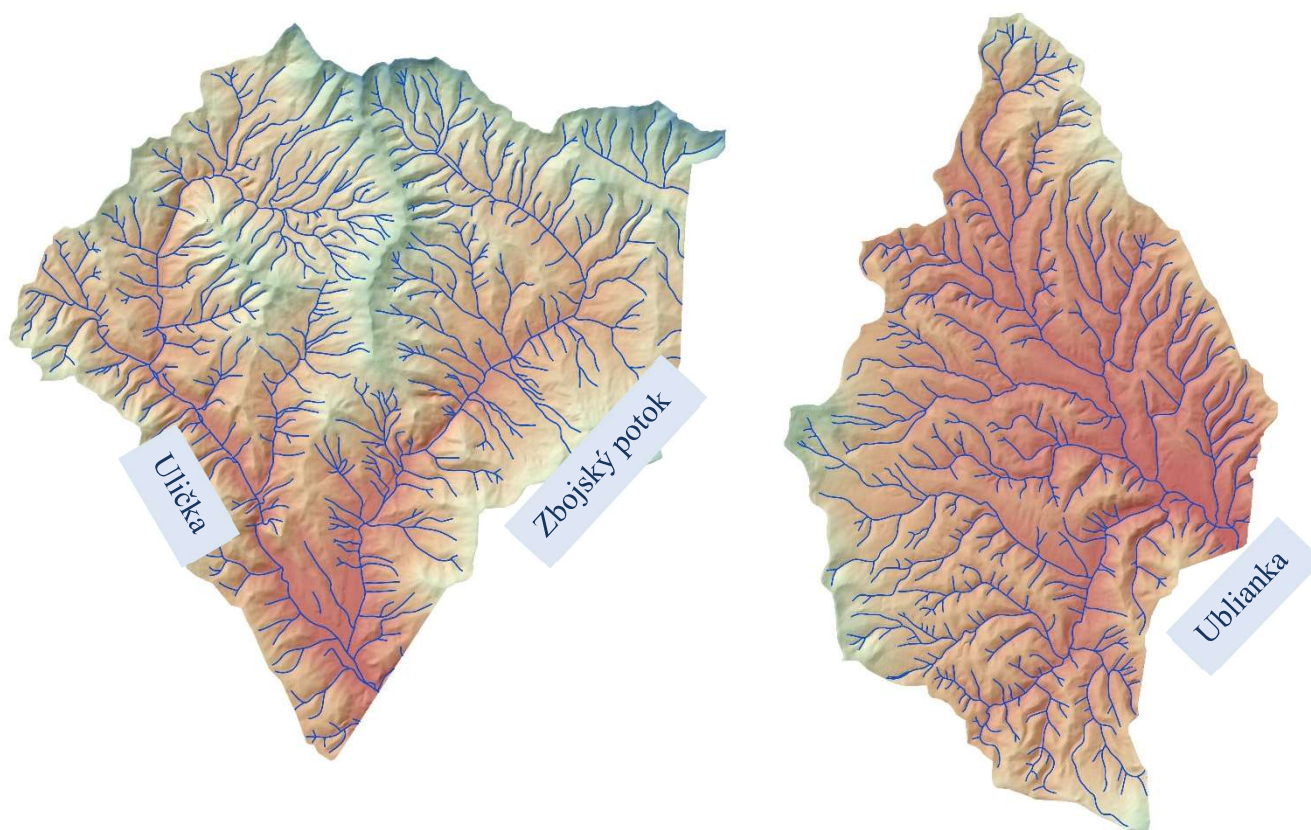
Modelovaná oblasť sa nachádza v severovýchodnej časti Slovenska v okrese Snina. V severnej časti záujmového územia sa nachádza povodie Uličky, ktorá pri obci Ulič opúšťa Slovensko a tvorí pravostranný prítok Uhu. Ulička tečie paralelne so Zbojským potokom, ktorý je jej najvýznamnejší prítok, dokonca sú plochou povodia na sútoku porovnateľné (plocha povodia Uličky pri sútoku je cca

¹ Jakub Mydla, Ing., Radlinského 11, 811 05 Bratislava

98 km² a jej ľavostranný prítok - Zbojský potok má povodie veľké 96 km²). Oba toky majú perovitý tvar povodia, vyznačujú sa bystrinným charakterom a tečú juhovýchodným smerom. Geologickú skladbu územia tvorí prevažne flyš. Táto oblasť sa vyznačuje výraznou lesnatosťou s riedkym osídlením s nízkou výmerou poľnohospodársky využívannej pôdy [2].

Povodie Ublianky má skôr vejárovitý tvar s jemnou asymetriou a veľkosťou sa približuje k Uličke (celková plocha povodia Uličky na území SR je 206 km², Ublianka má 194 km²). Jej najvýznamnejším prítokom je Stežná, ktorá tvorí spomínanú asymetrickosť. Ublianka podobne ako Ulička tiež odteká na Ukrajinu, kde po približne 6 km vteká do Uhu. Geologická skladba je v tomto povodí o niečo pestrejšia, okrem flyšov je tu zastúpenie kvartérov a v západnej časti aj neovulkánov. Aj morfológia je rozdielna. Miernejšie svahy tvoria vhodné prostredie na poľnohospodárske využitie pôdy, resp. na lúky či pasienky [2].

Rôznorodosť tvaru povodia aj rozdielnu morfológiu môžeme vidieť na obrázku 1, kde naľavo je zobrazené povodie Uličky a vpravo Ublianky. V oblasti záujmového územia sa rozprestiera Národný park (NP) Poloniny (predovšetkým v povodí rieky Ulička) a v západnom okraji povodia Ublianka zasahuje časť Chránenej krajinskej oblasti (CHKO) Vihorlat [2].



Obrázok 1 Povodia Uličky a Ublianky

3. Terénna obhliadka územia

Obhliadka skúmaného územia bola vykonaná v septembri 2021 a slúžila na oboznámenie sa s prostredím povodia horného Uhu. Počas rekognoskácie terénu boli zaznamenané existujúce opatrenia, úpravy na tokoch a boli predbežne vytipované lokality umiestnenia vodozadržných opatrení. Na obrázku 2 a) je zobrazený pevný prah na Zbojskom potoku v obci Ulič a na obrázku 2 b) je zobrazený neudržiavaný polder (prehrádzka) na toku Tapovec nad obcou Klenová.



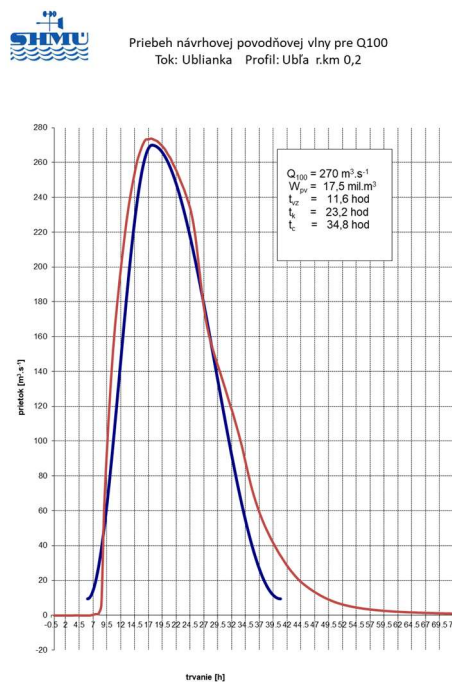
Obrázok 2 Existujúce opatrenia na Zbojskom potoku (a) a na toku Tapovec (b)

4. Postup modelovania

Program HEC-RAS v novších verziách obsahuje možnosť modelovania povrchového odtoku na základe zrážok (tzv. rain on grid). Jedná sa samozrejme o 2D model, do ktorého sa dá zrážková epizóda zadať ako okrajová podmienka. Tieto sa potom premietajú priamo do buniek 2D siete [3].

Dôvodom použitia tohto nástroja bol aj fakt, že je možné v tom istom modeli navrhovať aj opatrenia, akými sú napríklad vodozádržné opatrenia, poldre alebo nádrže. Takéto modelovanie je vhodné použiť najmä ak je modelovaná oblasť dostatočne veľká a zrážka je významnou zložkou, ktorá vytvára povodeň. Naopak, modelovanie nemá veľký zmysel v oblasti existujúceho veľkého toku, kde povodeň pritečie z územia ďaleko nad modelovanou oblasťou, čo nie je náš prípad [4].

Ďalším krokom riešenia bola kalibrácia zostaveného modelu. Cieľom kalibrácie modelu bolo kvantifikovať presnosť matematického modelu a nastavenia jednotlivých parametrov a porovnať ich s návrhovou povodňovou vlnou v hraničných profiloch tokov Ublianka a Ulička podľa hydrologických údajov poskytnutých od Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ), či je modelovanie dostatočne presné na to, aby sa dalo použiť ako relevantný modelovací nástroj.

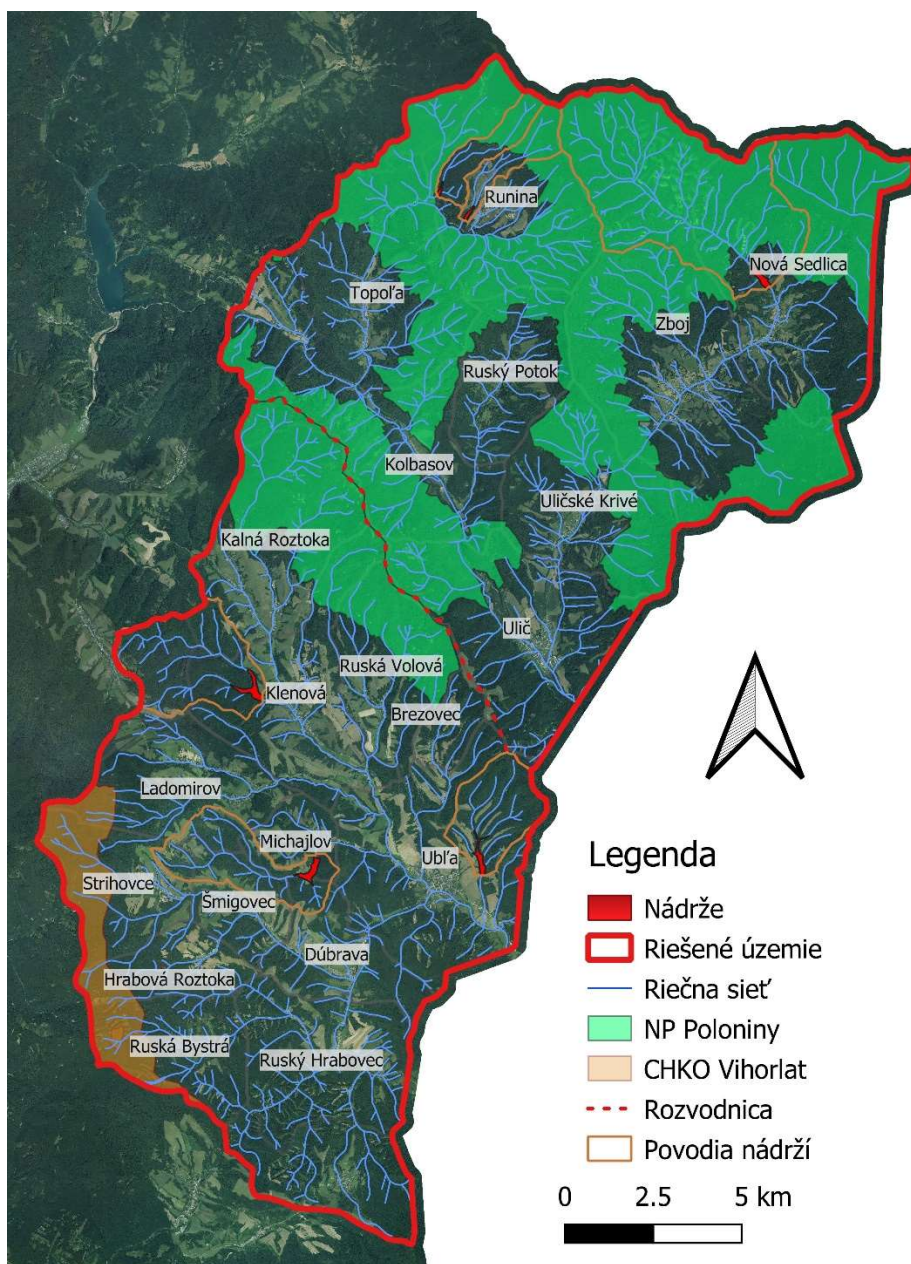


Obrázok 3 Hydrogram návrhového storočného prietoku na toku Ublianka

Kalibrácia teda spočívala najmä v zmene zrážky ako okrajovej podmienky, ale pre získanie čo najpresnejších výsledkov bolo kalibrované aj nastavenie simulácie (numerická schéma, rozlíšenie siete a parametre existujúcich objektov). Vo fáze kalibrácie bola vyvinutá aj správna metóda prírastku časového kroku a limity na zabezpečenie stability výpočtu a spoľahlivosti výsledkov. Kalibráciu si môžeme overiť na obrázku 3, kde červená čiara predstavuje návrhovú povodeň poskytnutú od SHMÚ a modrá čiara reprezentuje simuláciu v programe HEC-RAS.

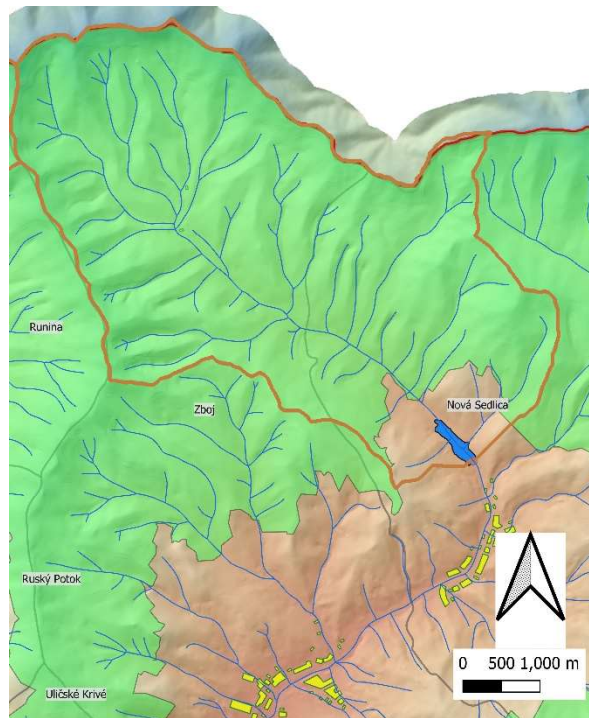
5. Návrh vodozádržných opatrení

Na sploštenie povodňovej vlny boli navrhnuté opatrenia ako tvorba poldrov, ale aj viacúčelových malých vodných nádrží. Bolo navrhnutých viacero variantov, ktoré sa od seba odlišovali počtom a umiestnením poldrov a nádrží.

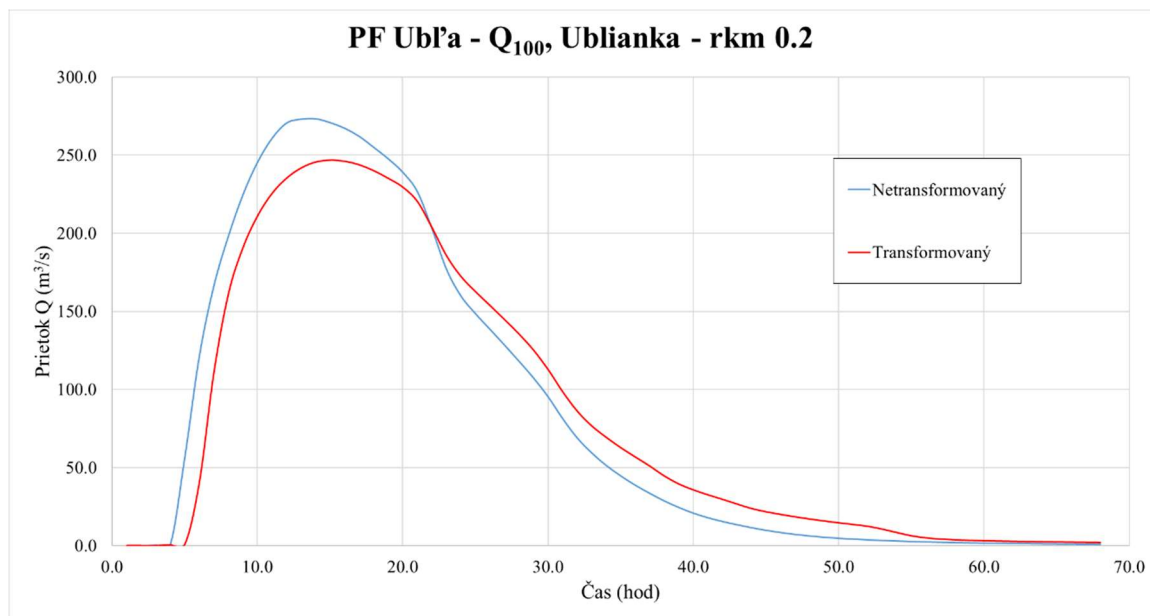


Obrázok 4 Jeden z návrhov riešenia umiestnenia vodozádržných opatrení (iba nádrže)

Na obrázku 4 je jeden z návrhov umiestnenia viacúčelových nádrží, ktorý bol v ďalšom procese optimalizovaný. Umiestnenie poldrov a nádrží bolo limitované viacerými faktormi, ako napríklad sídelné oblasti, dopravná infraštruktúra, vhodné morfológické podmienky, ale aj územie národného parku. Vhodné umiestnenie vodozádržných opatrení s prihliadaním na spomenuté faktory bola pomerne náročná úloha a to obzvlášť pre povodie Uličky, kde územie národného parku pokrýva viac ako 55% povodia. Presné určenie zadržaného objemu sťažovali aj poskytnuté morfológické podklady, ktoré boli založené na rastrovom formáte s veľkosťou bunky 10x10 m. Poldre a nádrže boli umiestňované tak, aby aj pri menších výškach hrádzi dokázali zabezpečiť dostatočne veľký zásobný objem a zároveň, aby zachytávali dosť veľké povodie. Na obrázku 5 je detailnejšie zobrazenie umiestnenia viacúčelovej nádrže nad obcou Nová Sedlica.



Obrázok 5 Detail umiestnenia nádrže Nová Sedlica



Obrázok 6 Hydrogram transformovaného a netransformovaného prietoku na toku Ublianka

6. Záver

Cieľom predkladaného príspevku bolo znížiť povodňové prietoky v hraničných profiloch tokov Ublianka a Ulička. Pri tvorení štúdie vzniklo viacero variantov riešení, ktoré sa od seba odlišovali nielen umiestnením a počtom opatrení, ale aj ich samotným typom. Konečný návrh pozostával z 12 poldrov, ktoré mali spolu objem 3,3 mil. m³ a z 3 viacúčelových nádrží, ktoré mali celkový objem 2,3 mil. m³. Na toku Ublianka sa podarilo navrhnutými opatreniami transformovať 100-ročný prietok na 90% z pôvodnej kulminácie, hydrogram je znázornený na obrázku 6. Na toku Ulička má kulminačný prietok po transformácií približne 92% z pôvodnej hodnoty. Dosiachnutie väčšieho sploštenia je v daných podmienkach veľmi náročné priam až nemožné, bez výraznejších zásahov do krajiny ako napríklad prekládka existujúcich komunikácií. Avšak simuláciou bol preukázaný výrazný účinok poldrov a nádrží vo vrchnejších častiach povodia, kde bolo dosiahnuté v niektorých prípadoch aj viac ako 50% sploštenie kulminačných prietokov.

PodĎakovanie: Tento článok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-383 „Prírodné a technické opatrenia zamerané na retenciu vody v podhorských povodiach Slovenska“.

Literatúra

- [1] JANÍK, A.: *Optimalizácia protipovodňovej ochrany v povodí rieky*. Bratislava: SvF, STU 2019, dizertačná práca, 135 s.
- [2] ŠOLTÉSZ, A., ORFÁNUS, M., MYDLA, J.: *FLOOD UZH – štúdia návrhu retenčných priestorov v povodí horného Uhu: záverečná správa*. Bratislava: Stavebná fakulta STU v Bratislave, 2022, 63 s.
- [3] U.S. HEC-RAS RIVER Analysis System, User's Manual, Version 6.0.2021. Davis: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources
- [4] GARCIA, M., JUAN, A., BEDIENT, P.: Integrating Reservoir Operations and Flood Modeling with HEC-RAS 2D. *Water*. 2020, Vol. 12, Issue 8.

Maksim Portnov¹

Water Resources Engineering, 2nd year

RAINWATER IN THE CONTEXT OF MODERN URBAN INFRASTRUCTURE AND THE IMPACT ON THE RECIPIENT

DAŽĎOVÉ VODY V KONTEXTE MODERNEJ MESTSKEJ INFRAŠTRUKTÚRY A VPLYV NA RECIPIENT

Abstract

Urban infrastructure continues to grow every day. The amount of paved area in the city is increasing, in connection with this, the amount of surface water that accumulates on the surface is increasing due to the insufficient amount of green areas where water can go. This creates a large load on the sewer network during heavy rainfall. Since our planet is facing climate change, it is often observed that precipitation stops for quite a long time, which leads to drought. However, after a long drought, rainfall is higher than normal, and we are seeing a situation where excess surface water is mixed with wastewater in the sewer network and affects the recipient. The task is to solve the problem with a multiple increase rainwater in the sewerage network and reduce the impact of relief waters on the recipient.

Key Words

Combined sewer overflow; relief waters; surface runoff.

1. Introduction

As resilience becomes a high priority for metropolitan areas and governments, rainwater management solutions are in skyrocketing demand. Growing interest in green infrastructure, runoff management technology, and low-impact design is helping to mitigate flooding and pollution challenges, but without deliberate changes in land use and development, those solutions are inadequate.

Reducing hardened, impervious surfaces and accurately design drainage of urban spaces, in combination with the use of pervious roads, penetrable concrete and water passing pavements helps to enhance the infiltration of storm water in underlying surface, reducing runoff into sewerage systems and urban spaces, attenuating flood peaks, reducing the urban pollution load in run-off), as well as reduce the risk of damages due to drainage system failure by flooding facilitating groundwater recharge [1,2].

Sustainable Urban Drainage are made up of one or more structures built to manage surface water runoff; they tend to mimic natural drainage. It often incorporate soil and vegetation in structures that are usually impermeable.

The uptake and passage through soil and vegetation reduces runoff velocity and improves water quality. Surface permeability in urban areas can be increased by using permeable paving where appropriate, e.g. footpaths, car-parking areas, access roads [3-5]. This reducing surface runoff and

¹ Maksim Portnov, Mgr., Faculty of Civil Engineering STU in Bratislava, Department of Sanitary and Environmental Engineering, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

increasing groundwater recharge. Measures for rainwater utilization for non-potable uses and design of urban public spaces can help meet water efficiency targets and improve environmental quality.

2. Urban infrastructure and its change

The current trend is the migration of residents from rural settlements to cities, which has a great impact on the development and growth of urbanization and urban infrastructure. Extensive built-up areas with paved surfaces such as sidewalks, paved roads, roofs, parking lots are emerging, which will replace vegetated areas.

Rainwater harvesting and management is nothing new. In fact, this technique has been used for thousands of years in many parts of the globe to capture and store rainwater in the pores of soil or for human use. Growing water scarcity, climate change, rapid urbanisation, and increased demand for water, are once again making this ancient technology a viable option for cities [6].

The removal of vegetation and the treatment of impervious surfaces leads to a decrease in water infiltration into the soil and, as a result, to an increase in surface runoff, which negatively affects the load on the sewer network and subsequently leads to an increase in the flow of water and the load on combined sewer overflow (CSO) [7,8].

Each new asphalted area disrupts the natural state and poor management of the area and has a negative impact on the hydrological parameters of the urbanized area. Combined sewer overflow belong to the most important and at the same time to the most complex objects on the sewer network from the hydraulic, hygienic and structural point of view, while these individual aspects are mutually influencing and closely related. The health engineering issue of relief chambers is related to the overall conceptual solution of sewer networks, to the subsequent design of wastewater treatment technology, and to issues of recipient cleanliness

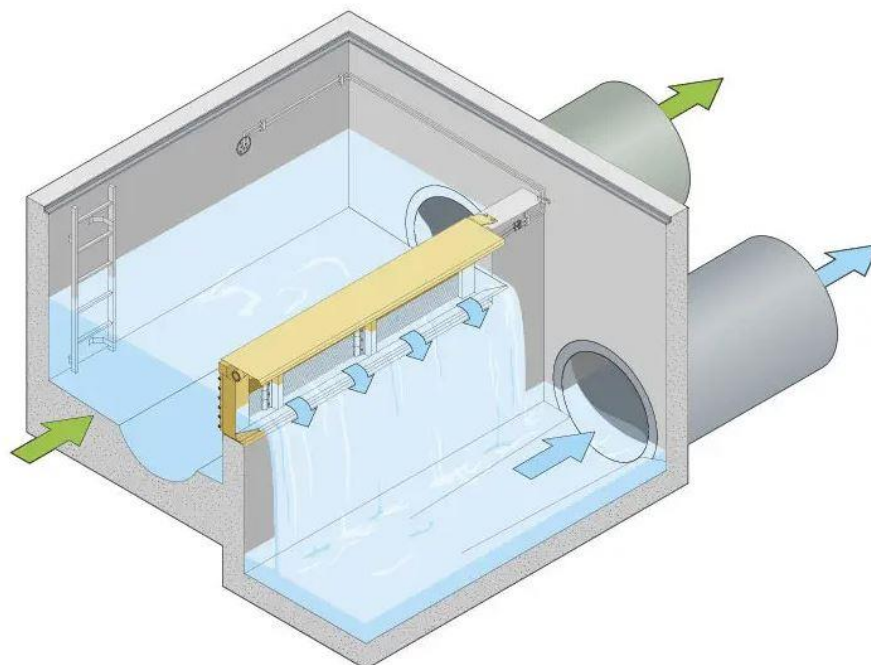


Figure 1: Sectional internal view of a traditional combined sewer overflow (CSO)

The potential for rainwater harvesting and management to reduce water consumption, alleviate stormwater runoff and provide drinking water, has largely been neglected in the modern era. In part, this is due to local context, such as seasonal variability in rainfall, costs of storage, treatment and

retrofitting water systems, as well as policy and institutional barriers [9]. Add to this short-sighted water management policies that rely on the overexploitation of river water or groundwater.

The main challenge when designing a new paved site is determining an effective method of treating surface runoff. The usual method of dealing with rainwater in the urban area was based on the principle of the fastest draining of rainwater from paved areas by channelling it into a single sewer, through which the water is drained to treatment plants, from where it is drained to the waterways of the sources.

However, this concept proved to be insufficient over time. As a result of climate change, situations arise when sewer networks are no longer able to fulfil their function [10]. Currently, attention is being paid to the creation of measures close to nature, the aim of which is not to divert, but to capture rainwater in cities.

These measures comprehensively solve the problem of microclimate change in cities:

- support evaporation;
- temperature reduction;
- subsidization and restoration of groundwater;
- enable the reduction of rain flow in the sewer network.



Figure 2: Accumulation tank for surface waters

Draining rainwater into a separate rainwater system is a good way to solve the problem, as it reduces the load on the sewer network and relief chambers. During heavy rainfall, harmful chemicals and substances do not enter the watercourse sources, and therefore the quality of the water before entering the watercourse sources does not decrease.

Urbanized areas such as asphalt roads, parking lots and buildings represent a significant proportion of impervious surfaces, which in some parts of the city can exceed 70%. Worldwide, there are more than 500,000 km² of paved surfaces, which not only do not support the natural absorption of rainwater [11]. Extreme precipitation events, which are a manifestation of climate change, cause considerable damage to the infrastructure of urbanized areas and the environment.

The unified sewer network and its objects are not able to withstand the load of extreme rains in all cases, and therefore it would be advisable to monitor their condition in the future and look for a solution to protect them or strengthen or develop their structure. The most important factor in assessing the impact of extreme precipitation on sewer network objects is the behaviour of wastewater flow [9]. Sewer network objects are designed based on established empirical relationships. Currently, there is an opportunity to use modern computing procedures for dimensioning, but also for assessing existing objects.

3. Combined sewer overflow decision

Combined sewer systems were never designed to handle all of the water during wet weather flows and a number of overflow events were expected; however, growth of urban centers as well as an increase in extreme rainfall events have exacerbated CSO events. The carrying capacity of combined sewer systems is too often exceeded during periods of rainfall or snowmelt, causing a combined sewer overflow at relief points throughout these systems. These overflow points can't simply be plugged, because they prevent wastewater backups in basements, flooding onto streets, and overloading of wastewater treatment facilities.

In order to meet these goals, communities employ a variety of creative approaches such as retrofitting stormwater basins, disconnecting impervious surfaces, and improving infiltration of stormwater with green infrastructure. In many areas, low impact development design, which increases the amount of stormwater that soaks into the ground, is being used to limit runoff from new development [12,13]. In addition to having a plan for addressing water quantity, communities must also develop long-term plans for dealing with water quality problems caused by CSOs, such as increasing the capacity of wastewater treatment plants, separating wastewater from stormwater, and other strategies for eliminating or minimizing CSO discharges.

Even with all minimum control measures in place, it's not possible to eliminate all CSO events quickly. Communities in Pennsylvania have been making upgrades to improve and repair their combined sewer systems over time, but the capacity of every drainage network and wastewater treatment plant is often exceeded because of the historic increase in impervious surfaces and larger and more frequent storms that cause an increased volume of stormwater runoff [14]. While the responsibility for addressing CSO problems falls on the communities that are operating the systems, we can all help lessen the impact of stormwater runoff by doing simple things like installing rain barrels, creating rain gardens, and disconnecting our downspouts from the stormwater systems in our communities.

Conclusion

In conclusion, it is important to clarify that the sewer network and all elements adjacent to it. The correct system of rainwater accumulation in urban infrastructure, together with a well-designed sewerage network, is a guarantee that less harmful substances and pollution will enter the recipient, including from relief waters.

Acknowledgments:

This work was supported by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, Youth and Sports of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences within the project VEGA 1/0574/19, co-funded by the Slovak Research and Development Agency under contract No. APVV-18-0203.

References:

[1] ANGRILL S., PETIT-BOIX A., MORALES-PINZÓN T., JOSA A., RIERADEVALL J., GABARRELL X.: Urban rainwater runoff quantity and quality – A potential endogenous resource in cities. *Journal of Environmental Management*, year: 15 March 2017, Volume.189, pp.14-21.

- [2] LABUDOVÁ, L., TURŇA, M., NEJEDLÍK, P. Drought monitoring in Slovakia. Towards climatic services. Slovakia. 2015, s. 3.
- [3] Butler D., Davies J. W.: Urban Drainage. ISBN 0-203-84905-1. Spon Press is an imprint of the Taylor & Francis Group. 2 Park Square. Milton Park. Abingdon. Oxon 2011.
- [4] TALL, A., PAVELKOVÁ, D. Predpokladaný vplyv klimatických zmien na hladinu podzemnej vody na východoslovenskej nížine. Acta Hydrologica Slovaca. 2010, roč. 11, č. 1, s. 162-166.
- [5] URCIKÁN P., RUSNÁK D.: Stokovanie a čistenie odpadových vôd: Stokovanie I. Navrhovanie stokových sietí. Bratislava: STU v Bratislave, 2011.
- [6] RUSNÁK, DUŠAN. Posudzovanie odľahčovacích objektov podľa legislatívnych predpisov a technických noriem. In: Rekonštrukcie stokových sietí a čistiarní odpadových vôd - zborník prednášok a posterov 6. bienálnej konferencie s medzinárodnou účasťou, Podbanské, 21.-23.10.2009. - : Výskumný ústav vodného hospodárstva, 2009. - S. 311-320
- [7] POLLERT, J. Ecological aspect in combined sewer overflows chamber design. Water Practice & Technology, Vol. 8, No 3-4, 2013
- [8] DANIHLÍK, R., TRIZNA, M. Vplyv klimatickej zmeny na režim odtoku vo vybraných povodiach Slovenska. Geografický časopis. 2005, roč. 57, č. 1, s. 71-91.
- [9] HRUDKA, J. 2017 Analýza dosadzovacích nádrží pomocou matematického modelovania [elektronický zdroj]. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017. CD-ROM, 112 s.
- [10] ČERVEŇANSKÁ, M., ŠOLTÉSZ, A., BAROKOVÁ, D., JANÍK, A.: Evaluation of Water Management in Regions Affected by Water Structure Construction and Operation. In "Ovidius" University Annals – Constanta, Year XVIII – Issue 18, Series: Civil Engineering. Constanta, Romania, 2016, pp. 17-24. ISSN 1584-5990.
- [11] SLEZIAK, P., HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., PARAJKA, J., DUETHMAN, D., DANKO, M.: Factors controlling alterations in the performance of a runoff model in changing climate conditions. 2018, J.Hydrol.Hydromech., 66, , 4, 381-392. doi:10.2478/johh-2018-0031.
- [12] Arditoglou A., Voutsas D. 2010. Partitioning of endocrine disrupting compounds in inland waters and wastewaters discharged into the coastal area of Thessaloniki, Northern Greece. Environmental and Science Pollution Research 17. p. 529 – 538.
- [13] JENÍČEK, M.: Apliation of the NASIM model for the simulation of the rainfall-runoff conditions in Čierna vody catchment. Diploma thesis in Charles University, Praha, 2005.
- [14] HRUDKA, J. ČERVEŇANSKÁ, M., RUSNÁK, D., STANKO, Š., Analysis of surface runoff and effectiveness of sewerage network in the urban area. In SGEM 2018. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Volume 18. Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems: conference proceedings. Albena, Bulgaria, 2 July - 8 July 2018. 1. vyd. Sofia: STEF 92 Technology, 2018, S. 39-45.

Gergely Rózsa¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, ročník: 4.

VYUŽITIE CIRKULÁRNEJ EKONOMIKY PRI TECHNOLOGII ČISTENIA KOMUNÁLNYCH ODPADOVÝCH VÔD NA DOSIAHNUTIE ENERGETICKEJ A UHLÍKOVEJ NEUTRALITY

USE OF CIRCULAR ECONOMY IN MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGY TO ACHIEVE ENERGY AND CARBON NEUTRALITY

Abstract

Conventional biological processes for treating municipal wastewater are facing increasing challenges as the design philosophy based on biological oxidation deviates from the circular economy principle. Therefore, this article discusses how the circular economy should change municipal wastewater treatment technology toward energy and carbon neutrality. Municipal wastewater is a regenerative source of fresh water, energy, and mineral nutrients rather than waste. This will lead to a paradigm shift in municipal wastewater engineering from simple treatment to recovery and reuse of multiple resources to a synergistic solution to the nexus of water, energy, resources, and greenhouse gases in an environmentally and economically sustainable manner.

Kľúčové slová / Key Words

recirkulácia odpadových vôd, cirkulárna ekonomika, energetická neutralita, uhlíková neutralita.

1. Úvod

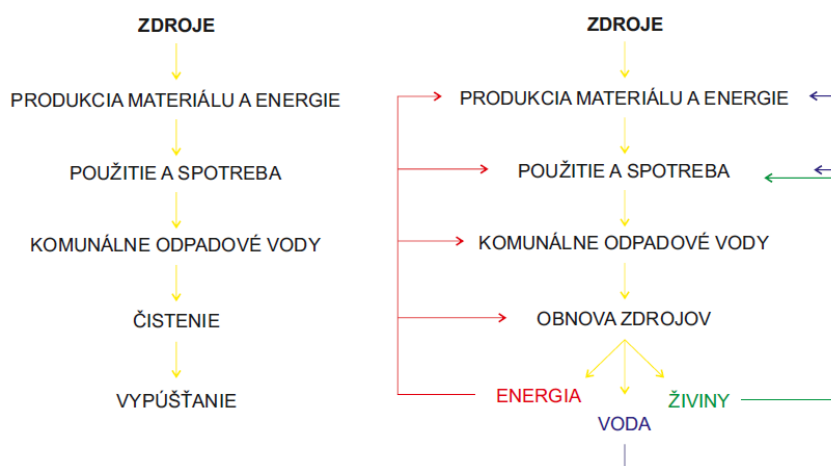
Najčastejšie využitie biologické procesy na čistenie komunálnych odpadových vôd čelia čoraz väčším výzvam, pretože filozofia návrhu založená na biologickej oxidácii sa odchyľuje od princípu obehového hospodárstva, ako napríklad vysokou spotrebou energie; obrovským množstvom produkcie aktivovaného kalu; emisiou skleníkových plynov a nevyužitím obnoviteľných zdrojov energie [1]. Ako uvádzajú rôzne štúdie, 3 % celosvetovej elektriny sa spotrebovalo pri spracovaní odpadových vôd z konvenčnými technológiami v čistiarnach odpadových vôd (ČOV) pre mestá a obce, pritom celosvetové priemyselné odpadových vody by tiež mohli v rokoch 2005 až 2030 prispieť k emisiám [2]. Približne 4,6 – 5,2 % celkových globálnych emisií skleníkových plynov iných ako CO₂ boli z priemyselných odpadových vôd [2]. V celosvetovom meradle sa ročne vyprodukovalo približne 360 miliárd kubických metrov komunálnych odpadových vôd s typickou koncentráciou amónneho dusíka 40 mg/l. Je však nešťastné, že väčšina amoniaku v komunálnych odpadových vodách sa v súčasných komunálnych ČOV biologicky premieňa na plynný dusík. Hoci na trhu je dostupných mnoho rôznych procesov biologického odstraňovania dusíka, všetky zdieľajú spoločný princíp premeny amónia v odpadovej vode na plynný dusík, čím sa regenerácia dusíka je takmer neuskutočniteľné [3]. Je zrejmé, že máme nedostatok informácií na riešenie tejto dilemy, ktorá sa vyskytuje pri čistení komunálnych odpadových vôd. V skutočnosti by sme mali zmeniť vnímanie komunálnej odpadovej vody z odpadu na regeneračný zdroj sladkej vody, energie a nerastov, aby sme boli v súlade s obehovým hospodárstvom. Preto sa tento článok pokúša ilustrovať, ako obehové

¹ Gergely Rózsa, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

hospodárstvo mení návrh, prevádzku a riadenie procesov čistenia komunálnych odpadových vôd smerom k energetickej a uhlíkovej neutralite.

2. Metodika

Je potrebné poznamenať, že súčasné ČOV boli primárne navrhnuté a prevádzkované s koncepciou lineárnej ekonomiky (t. j. vezmite-spotrebuje-likvidujte), s primárnym cieľom produkovať kvalitnú odpadovú vodu, ale bez začlenenia energie a zhodnocovania zdrojov. To je proti základnej myšlienke obehového hospodárstva. V skutočnosti by sa obehové hospodárstvo malo implementovať ako hlavná hnacia sila v budúcom hospodárení s komunálnymi odpadovými vodami s cieľom maximalizovať obnovu vody, energie a zdrojov smerom k udržateľnosti miest. Obr. 1 ilustruje nakladanie s komunálnymi odpadovými vodami pri scenároch lineárnych a obehových ekonomík. Je zrejmé, že na rozdiel od lineárneho modelu vezmite, spotrebuje a likvidujte, obehové hospodárstvo s regeneratívnym charakterom je nevyhnutné na postupné oddeľovanie rastu priemyslu odpadových vôd od spotreby obmedzených prírodných zdrojov.



Obr. 1 - Nakladanie s komunálnymi odpadovými vodami: lineárna ekonomika (vľavo) versus obehová ekonomika (vpravo) – autor.

V súčasnosti je získavanie amónneho dusíka z komunálnych odpadových vôd s nízkou koncentráciou amónneho dusíka 40 mg/l spochybnené jeho ekonomickou a environmentálnou udržateľnosťou. Na druhej strane, pri neustálom napätí zásob sladkej vody v dôsledku globálneho nedostatku vody, populácie a ekonomického rastu sa dopyt po nekonvenčných vodných zdrojoch, ako je opätovné využitie regenerovanej odpadovej vody, považoval za riešenie, ktoré pomôže riešiť súčasnú situáciu [4]. Recirkulácia komunálnych odpadových vôd na kvalitnú vodu má rastúci trend, no jej potenciál zostáva do značnej miery nevyužitý, napr. obnova zdrojov ešte nebola zapracovaná. Základnou otázkou pri riešení problémov týkajúcich sa nedostatku vody je teda v prípade potreby premena všetkej komunálnej odpadovej vody na pitnú. V skutočnosti sa takáto filozofia do určitej miery odchyľuje od myšlienky obehového hospodárstva, podľa ktorého by sa súvislosť medzi vodou, energiou a zdrojmi mala riešiť holisticky pri nakladaní s komunálnymi odpadovými vodami, čo umožňuje maximalizovať ich ekonomické, environmentálne a sociálne hodnoty. Argumentovalo sa, že rekultivácia komunálnych odpadových vôd by mala byť riadená potrebou, aby sa vodné zdroje spravovali cirkulárnejším spôsobom, a nie premieňanie všetkých na pitnú vodu, najmä v krajinách s rôznymi potrebami zásobovania vodou, napr.: voda na poľnohospodárske zavlažovanie, dopĺňanie

vodonosných vrstiev, mestské záhradníctvo a ekologizácia [5]. Opätovné použitie regenerovanej vody by malo byť v súlade s dodatočnými smernicami a nariadeniami na ochranu životného prostredia [6]. Napríklad rozpustné ťažké kovy môžu predstavovať problém pri opätovnom použití regenerovanej komunálnej odpadovej vody. Preto sa odporúča, aby recirkulácia komunálnych odpadových vôd mala dostatočný priestor umožňujúci výrobu a opätovné použitie rôznych druhov regenerovanej vody podľa skutočných potrieb. Toto je spôsob, ako spomaliť vyčerpanie prírodnej sladkej vody [7].

3. Kalové hospodárstvo ako zdroj energie

Prebytočný kal je určite dôležitým zdrojom energie, ktorý sa má regenerovať prostredníctvom anaeróbnej digestie. Množstvo prebytočného kalu však do značnej miery závisí od koncentrácií organických látok; v niektorých prípadoch sú zdroje uhlíka nedostatočné a sotva pokrývajú potreby odstraňovania živín, a preto produkovaný nadbytočný kal často nestačí na výrobu rovnakého množstva energie na uspokojenie uhlíkovo neutrálnej prevádzky ČOV. V skutočnosti majú anaeróbne vyhnívacie zariadenia vo všeobecnosti nadbytočné kapacity (asi 20 % v Nemecku), ktoré by mohli byť k dispozícii na vyhnívanie spolu s prebytočným kalom. Prípadové štúdie v Rakúsku naznačujú, že využitie existujúcej vodnej infraštruktúry pridaním organického odpadu (organická frakcia komunálneho odpadu) do anaeróbných digesterov by skutočne mohlo podstatne zlepšiť energetickú bilanciu ČOV, čo by malo za následok „1 þ1 > 2“. výroby bioplynu a redukcie pevných látok. Výsledky ukazujú, že prídanie organického kosubstrátu až do 94 % zaťaženia organického kalu malo za následok strojnásobenie produkcie bioplynu a že pri pridaní organického kosubstrátu do 25 % nebol pozorovaný žiadny významný nárast produkcie koláčov a iba bolo zistené menšie zvýšenie uvoľňovania amoniaku o približne 20 % [7]. Prípadové štúdie plne preukázali spoločné trávenie na maximalizáciu synergie ako krok smerom k energetickej účinnosti a v konečnom dôsledku k uhlíkovej neutralite [8].

Na druhej strane by sa tepelná energia v odpadovej vode mohla premeniť na teplo, aby sa vyrovnal energetický deficit smerom k uhlíkovej neutralite. Hodnotiacia štúdia energetickej bilancie ČOV odhaľuje, že anaeróbna digestia prebytočného kalu poskytuje len približne 50 % celkového množstva spotreby energie. Štúdie ďalej naznačujú, že vodné tepelné čerpadlá by mohli efektívne premieňať tepelnú energiu obsiahnutú v odpadovej vode na vykurovanie ČOV a susedných budov, ktoré by mohli poskytnúť čistú elektrickú ekvivalent. Celkovo by teda zdroje organickej a tepelnej energie mohli účinne poskytnúť dostatok elektrickej energie, aby sa priblížila k svojmu cieľu, pokiaľ ide o uhlíkovo neutrálnu operáciu [8].

Ako je uvedené vyššie, spoločné vyhnívanie prebytočného kalu s externými tuhými/kvapalnými organickými látkami je potenciálnym prístupom k uhlíkovej neutralite. Okrem toho, široko používané ko-substrátové vyhnívanie iných organických látok ako prebytočného kalu by tiež mohlo poskytnúť dobrý odkaz na kodigestiu prebytočného kalu s externými organickými látkami. V niektorých extrémnych štúdiách bol CO₂ testovaný aj na stimuláciu produkcie metánu pri trávení, čo v skutočnosti spája produkciu metánu so zachytávaním uhlíka. Skúmanie na skúšobnom zariadení ukázalo, že vysokú produkciu metánu bolo možné dosiahnuť pridaním koncentrovaných externých organických odpadov do komunálnych vyhnívacích nádrží, pri prijateľne vyšších úrovniach organickej záťaže vo vyhnívacích nádržiach a s nižšími retenčnými časmi, čo umožňuje efektívnu implementáciu kombinovanej výroby tepla a elektriny. Výsledky ukazujú, že produkcia bioplynu výrazne vzrástla a bola pozorovaná ďalšia degradácia prebytočného kalu medzi 1,1 a 30,7 % a že produkcia bioplynu aj metánu bola veľmi blízko cieľovým úrovniam potrebným na odstránenie energetického deficitu. Okrem toho spoločné vyhnívanie malo za následok kvalitu odpadovej vody podobnú kvalite kontrolného vyhnívacieho zariadenia napájaného iba prebytočným kalom, čo naznačuje, že spoločné vyhnívanie nemalo žiadne nepriaznivé účinky [8].

4. Diskusia

Ako už bolo spomenuté vyššie, uhlíková neutralita sa často označuje svojou úzkou definíciou: energetická neutralita. Na klimatickej stupnici však existujú rôzne názory. Nakladanie s komunálnymi odpadovými vodami šetrnými ku klíme zahŕňa aj hospodárenie rôznymi typmi vôd a vedľajších produktov. Či je možné dosiahnuť uhlíkovú neutralitu, závisí nielen od skutočnej čistej výroby elektriny, ale aj od typu nahradenej elektriny: čím čistejšia je marginálna elektrina, tým ťažšie je kompenzovať priame emisie, ktoré môžu byť značné v závislosti od stability biologického procesu [7].

Zlepšenie energetickej bilancie ČOV s cieľom dosiahnuť uhlíkovú neutralitu môže byť prínosom pre životné prostredie v dôsledku zníženia emisií uhlíka. Je však potrebné preskúmať aj širšie hospodárske, environmentálne a spoločenské vplyvy, keďže udržateľnosť je komplexný, viacrozmerný koncept zahŕňajúci tieto faktory a/alebo ukazovatele. V tomto ohľade „uhlíková neutralita“ alebo „energetická neutralita“ nevyhnutne neznamena udržateľnú prevádzku, pretože sa týka iba jedného prvku udržateľnosti a implementácia nízkouhlíkových riešení môže mať neúmyselné škodlivé účinky na iné aspekty.

5. Záver

Z vyššie uvedenej diskusie vyplýva, že zmena paradigmy je nevyhnutná na dosiahnutie pokroku v oblasti trvalo udržateľného hospodárenia s vodou, energiou a zdrojmi poháňaného obehovým hospodárstvom, v rámci ktorého by sa komunálne odpadové vody mali považovať za regeneračný zdroj vody, energie a živín, a nie za záväzok. V skutočnosti by sa v budúcom rámci hospodárenia s komunálnymi odpadovými vodami mali podporovať a implementovať zásady obehového hospodárstva, aby sa podporilo opätovné využívanie zdrojov a zhodnocovanie z komunálnych odpadových vôd. Je zrejmé, že budúci rozvoj miest si vyžaduje technológie, ktoré dokážu minimalizovať spotrebu prírodných zdrojov dodržiavaním princípov obehového hospodárstva. Obnova zdrojov z komunálnych odpadových vôd vo forme opätovne použiteľnej vody, energie a živín jasne ukazuje vysoko atraktívny environmentálny a ekonomický prínos, ktorý prispieva k trvalej udržateľnosti miest s rastúcou populáciou. Treba si tiež uvedomiť, že hlavnou výhodou princípov obehového hospodárstva v nakladaní s komunálnymi odpadovými vodami je zhodnocovanie zdrojov a ich opätovné použitie, ktoré umožňuje transformovať čistenie komunálnych odpadových vôd z nákladnej služby na službu, ktorá je sebestačná a šetrná k životnému prostrediu a zároveň pridáva hodnotu ekonomike. Koncept obehového hospodárstva by preto mala slúžiť ako hlavná hnacia sila pri vývoji budúcej technológie na čistenie komunálnych odpadových vôd a zároveň poskytovať jedinečnú príležitosť na riešenie komplexného prepojenia vody, energie, zdrojov a zmeny klímy smerom k energetickej a uhlíkovej neutralite.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-18-0203“ a na základe podpory Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV s označením VEGA 1/0574/19 a 1/0727/20.

Literatúra

- [1] Zhang. X. Zhang. M. Liu. H. Gu. J. Liu. Y. Environmental sustainability: a pressing challenge to biological sewage treatment processes, *Curr. Opin. in Environmental Science & Health* 12 (2019) 1–5.
- [2] Lu. L.u. Guest. J.S. Peters. C.A. Zhu. X. Rau. G.H. Ren. Z.J. Wastewater treatment for carbon capture and utilization, *Nat. Sustain.* 1 (12) (2018) 750–758.
- [3] Zhang. X. Liu. Y. Circular economy-driven ammonium recovery from municipal wastewater: State of the art, challenges and solutions forward, *Bioresour. Technol.* 334 (2021), 125231.
- [4] Lee. Y. Tao. G. Lay. W. Lin. L. Kwok. Y. Koh. K. Towards energy self-sufficient water reclamation plants, *J. PUB Technol. Review*, London, 2013.
- [5] Foglia. A. Andreola. C. Cipolletta. G. Radini. S. Akyol. Ç. Eusebi. A.L. Stanchev. P. Katsou. E. Fatone. F. Comparative life cycle environmental and economic assessment of anaerobic membrane bioreactor and disinfection for reclaimed water reuse in agricultural irrigation: a case study in Italy, *J. Cleaner Prod.* 293 (2021)
- [6] Vojtěchovská Šrámková. M. Diaz-Sosa. V. Wanner. J. Experimental verification of tertiary treatment process in achieving effluent quality required by wastewater reuse standards, *J. Water Process Eng.* 22 (2018) 41–45.
- [7] Zhang. X. Liu. Y. Circular economy is game-changing municipal wastewater treatment technology towards energy and carbon neutrality, *Chemical Engineering Journal* 429 (2022) 132114
- [8] Editorial. Carbon neutrality: An ultimate goal towards sustainable wastewater treatment plants, *Water Research* 87 (2015) 413e415

Zuzana Sabová¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, ročník: tretí

VYHODNOTENIE ZMIEN VYBRANÝCH CHARAKTERISTÍK MINIMÁLNYCH PRIEMERNÝCH DENNÝCH PRIETOKOV DO BUDÚCNOSTI VO VYBRANÝCH POVODIACH NA SLOVENSKU

EVALUATION OF CHANGES IN SELECTED CHARACTERISTICS OF MINIMUM MEAN DAILY DISCHARGES IN SELECTED BASINS OF SLOVEKIA TO THE FUTURE

Abstract

The study focuses on the analysis of the occurrence of the minimum mean daily discharges, *m*-daily minimum discharges and baseflow index in the selected gauging stations, i.e., Nitra – Nitrianska Streda (No. 6730), Laborec – Humenné (No. 9230), Topľa – Hanušovce nad Topľou (No. 9500) by 2100. Observed data, modelled data by the HBV model and simulated data according to the KNMI and MPI climate scenarios were used in the analysis. The analysis was performed using the Indicators of Hydrologic Alteration software. The results show a shift in the occurrence of the minimum discharge is visible one month later in studied gauging stations according to both climate scenarios to the future. For the *m*-daily minimum discharges and the baseflow index, their decrease applies until the year 2100.

Kľúčové slová / Key Words

Výskyt minimálnych priemerných denných prietokov / the occurrence of the minimum mean daily discharges; minimálny prietok / the minimum discharge; klimatické scenáre KNMI a MPI / the KNMI and MPI climate scenarios; sucho / drought; baseflow index / index základného odtoku

1. Úvod

Sucho je prirodzený jav, ktorý vyplýva z nedostatku zrážok počas dlhšej doby na danom území. Deficit zrážok môže napokon viesť k extrémne nízkym prietokom, ktoré majú ekonomický, spoločenský a environmentálny vplyv [1]. Nízke prietoky negatívne ovplyvňujú ekosystém riek, dostupnosť vody pre priemysel, obyvateľstvo a poľnohospodárstvo, pri väčších vodných tokoch aj lodnú dopravu. Výskyt minimálnych prietokov a jeho budúce zmeny môžu byť spôsobené aj zmenou klímy v dôsledku výskytu dlhších období sucha, vzniku častejších vln horúčav alebo znižovaním snehovej pokrývky. Veľkosť a trvanie nízkych prietokov v rozdielnych geografických regiónoch sa líši a poukazuje na mnoho rozdielov, akými sú klimatické, krajinné a antropogénne faktory (zrážky, teplota vzduchu, potenciálna evapotranspirácia, geológia podložia, pôdne vlastnosti, topografia, využívanie pôdy) [2].

Očakáva sa, že zmena klímy spôsobí zmeny v hydrologickom cykle v celej Európe. Projekcie budúcich zmien teplôt vzduchu vykazujú výrazné otepľovanie pre všetky emisné scenáre v Európe. Pre južnú Európu sa predpokladá zníženie nízkych prietokov a pre severnú Európu ich zvýšenie [3]. S narastajúcim množstvom dôkazov o globálnom otepľovaní a jeho vplyve na hydrologický cyklus sa vynára otázka, ako sa bude výskyt sucha a minimálnych prietokov riek meniť do budúcnosti [1]. Pre identifikáciu zmien hydrologického režimu sa používajú v súčasnosti rôzne metódy a prístupy. Pre hydrologické charakteristiky, ktoré popisujú sucho, sa metódy zameriavajú na vyhodnotenie *m*-denných prietokov, priemerných minimálnych prietokov, minimálnych ročných a mesačných prietokov s prislúchajúcim dátumom výskytu [4].

¹ Zuzana, Sabová, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

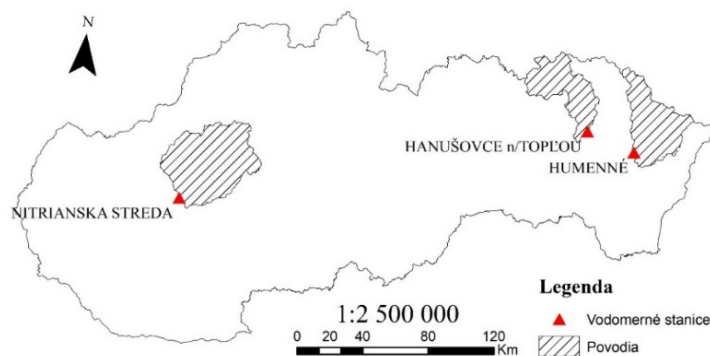
Problematike sucha a výskytom minimálnych prietokov sa venovali viacerí autori, ktorí sa zamerali na regionalizáciu nízkych prietokov použitím troch indexov sezónnosti (histogram sezónnosti, index cyklickej sezónnosti, pomer sezónnosti) [5]. Pre územie holandsko-nemeckej hranice a povodia rieky Rýn skúmali vo svojej práci vplyv zmeny klímy na sezónnosť nízkych prietokov [6]. V Taliansku sa regionalizácii nízkych prietokov [7]. V Kanade riešili autori charakteristiky nízkych prietokov pre 51 vodomerných staníc, ktoré boli zo 6 rôznych oblastí. Výsledky štúdie odhaľujú rôznorodosť procesov, ktoré ovplyvňujú nízke prietoky [8]. Viaceré štúdie autorov na Slovensku boli zamerané na problematiku hydrologických extrémov a ich modelovaniu a predpovedaniu [9] a vývoja hydrologického režimu slovenských riek [4]. Problematikou *m*-denných prietokov na Slovensku sa zaoberal Slovenský hydrometeorologický ústav [10]

Príspevok sa zaoberá vyhodnotením zmien vybraných charakteristík minimálnych prietokov, ako je výskyt minimálnych priemerných denných prietokov, *m*-denné minimálne prietoky a baseflow index vo vybraných vodomerných staniaciach na Slovensku do budúcnosti pomocou simulovaných dát hydrologickým modelom s použitím dvoch klimatických scenárov.

2. Vstupné dáta a použitá metóda

Klimatické scenáre slúžia na vyjadrenie alternatívneho vývoja klímy do budúcnosti s určitou pravdepodobnosťou pri platnosti konkrétnych emisných scenárov SRES. V predkladanom príspevku sa štúdia zaoberá prognózou zmien charakteristík minimálnych prietokov pomocou regionálnych klimatických modelov KNMI a MPI, ktoré sú založené na okrajových podmienkach z výstupov globálneho modelu ECHAM5 a reprezentujú integráciu dynamických rovníc atmosféricko-oceánskych cirkulačných systémov [11].

V štúdiu sa použili štyri druhy dát priemerných denných prietokových radov, ktoré tvoria pozorované dáta (OBS) poskytnuté Slovenským hydrometeorologickým ústavom (SHMÚ) a nesú v sebe informácie o reálnom stave denných prietokov z vybraných vodomerných staníc. Ďalšou skupinou dát sú modelované dáta (MODEL HBV), ktoré vznikli použitím zrážkovo-odtokového modelu HBV. Pomocou nakalibrovaných parametrov modelu HBV z historického obdobia 1981-2010 sa s použitím klimatických údajov z klimatických scenárov KNMI a MPI namodelovali simulované priemerné denné hodnoty prietoky (KNMI a MPI) v sledovaných profiloch. Všetky skupiny dostupných dát denných prietokov sa analyzovali v období 1981-2100, ktoré bolo rozdelené na štyri 30-ročia: 1.1.1981-31.10.2010, 1.11.2010-31.10.2040, 1.11.2040-31.10.2070 a 1.11.2070-31.10.2100. Na dosiahnutie vyhodnotenia zmien výskytu minimálnych priemerných denných prietokov, *m*-denných prietokoch a baseflow indexu (BFI) vo vybraných vodomerných staniaciach sa použil program IHA (The Indicators of Hydrologic Alteration). BFI (index základného odtoku) je pomocou IHA programu definovaný podielom 7-denného minimálneho prietoku a priemerného ročného prietoku [12]. Vybranými vodomernými stanicami sú: Nitra – Nitrianska Streda (6730), Laborec – Humenné (9230), Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500) (Obrázok 1).



Obrázok 1: Lokalizácia vybraných vodomerných staníc na Slovensku

3. Výsledky práce

Príspevok sa zaoberal analýzou zmien hydrologických charakteristík výskytu minimálneho priemerného denného prietoku, m -denných minimálnych prietokov a baseflow indexu. V nasledujúcich podkapitolách sú spísané vyhodnotenia výsledkov analýz.

Výsledky analýzy zmien výskytu minimálneho priemerného denného prietoku

Prvou analyzovanou charakteristikou je výskyt minimálneho priemerného denného prietoku a jeho zmena do budúcnosti, ktorého výsledky sú znázornené pomocou Burnovho vektora (Obrázok 2). Pre vodomernú stanicu Nitra – Nitrianska Streda (6730) je posun výskytu minimálneho priemerného denného prietoku podľa simulovaných dát oboch klimatických scenárov KNMI a MPI zo septembra (OBS dáta) na november do roku 2070 a do roku 2100 na október.

Vo vodomernej stanici Laborec – Humenné (9230) je výskyt minimálneho priemerného denného prietoku zaznamenaný v mesiaci september, pričom modelované dáta HBV modelu poukazujú na výskyt minimálneho prietoku v novembri. Podľa simulovaných dát podľa klimatického scenára KNMI sa v danej vodomernej stanici bude vyskytovať minimálny priemerný denný prietok do roku 2070 v novembri a do roku 2100 v októbri. Simulované dáta podľa klimatického scenára MPI do roku 2100 nepredpokladajú zmenu vo výskyte minimálneho priemerného denného prietoku a ostane v mesiaci november.

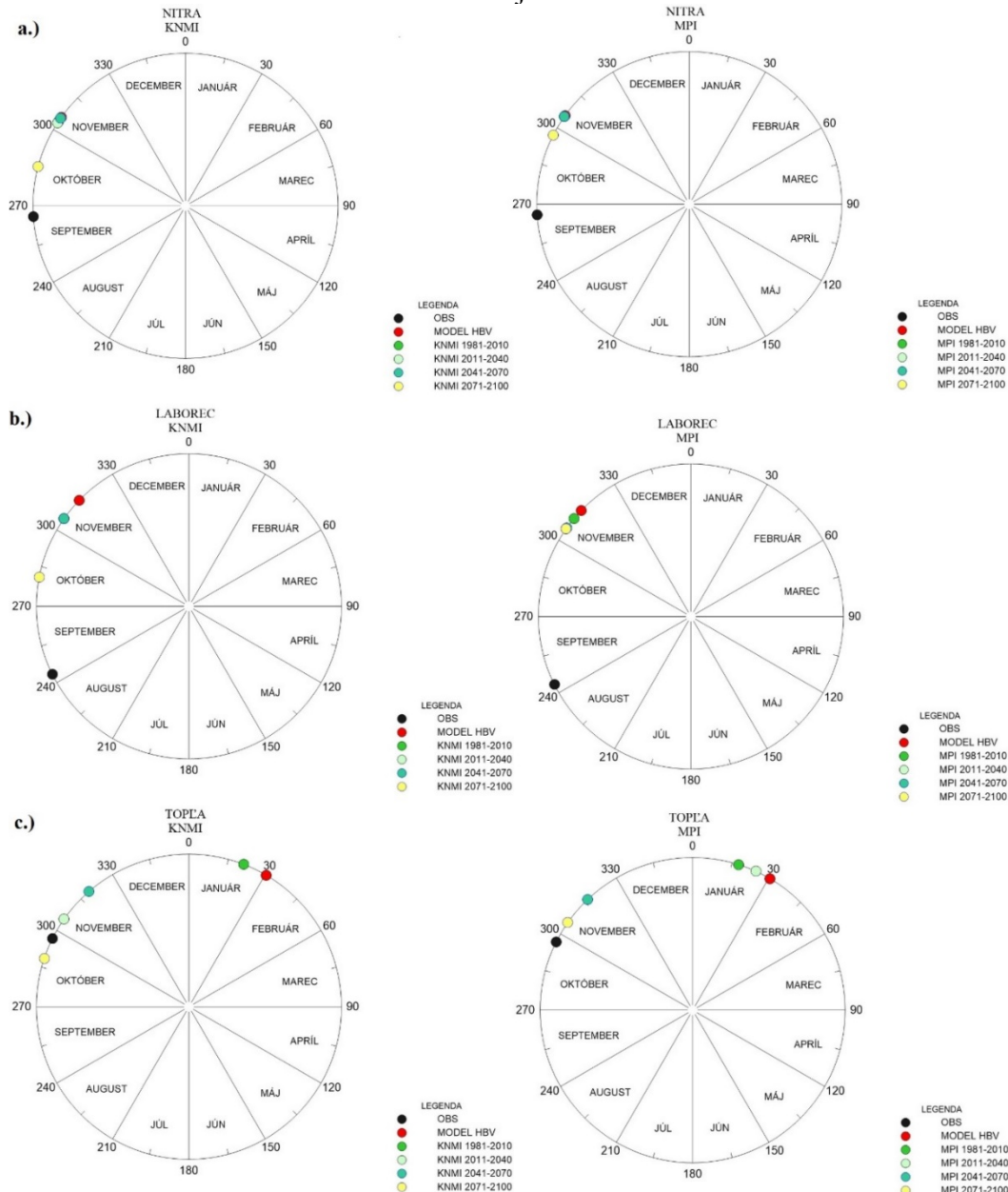
Poslednou skúmanou vodomernou stanicou je Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500), v ktorej sú najvýraznejšie zmeny výskytu minimálneho priemerného denného prietoku. Pozorované dáta v časovej perióde 1981-2010 poukazujú na výskyt minimálneho priemerného denného prietoku v mesiaci október. Modelované dáta HBV modelom evidujú jeho výskyt v mesiaci január. Zmeny výskytu minimálneho priemerného denného prietoku pre simulované dáta podľa klimatického scenára KNMI sú nasledovné: v rokoch 1981-2010 je v januári, do roku 2070 presun na november a do roku 2100 v októbri. Pre simulované dáta podľa klimatického scenára MPI sa výskyt minimálneho priemerného denného prietoku eviduje v januári do roku 2040 a do roku 2100 v novembri.

Výsledky analýzy zmien m -denných minimálnych prietokov

V Tabuľke 1 sú prezentované výsledky analýz zmien m -denných minimálnych prietokov pre riešené vodomerné stanice. Vo vodomernej stanici Nitra – Nitrianska Streda (6730) sa pri porovnaní výsledkov pre MODEL HBV a OBS dát prišlo na to, že MODEL HBV nadhodnocuje reálne priemerné denné prietoky. Podľa simulovaných dát klimatického scenára KNMI platí pokles hodnôt 1-denné, 3-denného a 7-denného minimálneho prietoku do roku 2100. 30-denné a 90-denné minimálne prietoky podľa modelovaných dát podľa klimatického scenára KNMI tendenciu do časovej periódy 2011-2040 rásť a do roku 2100 klesnúť. Simulované dáta podľa klimatického scenára MPI predpokladajú pokles 1-denného minimálneho prietoku do roku 2100. Ostatné m -denné minimálne prietoky podľa spomínaného klimatického scenára rastú výslednými hodnotami do obdobia 2011-2040, a do roku 2100 klesajú.

Modelované dáta HBV modelom nadhodnocujú OBS dáta aj vo vodomernej stanici Laborec – Humenné (9230), okrem hydrologickej charakteristiky 90-denného minimálneho prietoku. Pre 1-denné, 3-denné a 7-denné minimum platí podľa modelovaných dát klimatického scenára KNMI pokles ich výsledných hodnôt do roku 2070 a ich slabý nárast v poslednej skúmanej perióde do roku 2100. Pre 30-denné minimálne prietoky je pre dáta podľa klimatický scenár KNMI viditeľný nárast ich hodnôt do roku 2040, pokles do roku 2070 a opätovný nárast do roku 2100. Podľa simulovaných dát oboch klimatických scenárov platí rovnaký priebeh pre 90-denné minimálne prietoky a tento priebeh naznačuje ich pokles do roku 2100. Podľa dát podľa klimatického scenára MPI je pre všetky ostatné m -denné minimálne prietoky nasledovný priebeh: bez zmeny do roku 2040 a následný pokles do roku 2100.

Pre vodomernú stanicu Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500) modelované dáta HBV modelom nadhodnocujú OBS dáta pri charakteristikách 1-denné, 3-denné a 7-denné minimum. Pre simulované dáta podľa klimatického scenára KNMI je priebeh 1-denného, 3-denného, 7-denného a 30-denného minimálneho prietoku nasledovný: rast do roku 2040, pokles do roku 2070 a opäť rast do roku 2100; pri 90-denných minimálnych prietokoch je vidieť rast ich hodnôt do roku 2100. Simulované dáta podľa klimatického scenára MPI majú pri *m*-denných minimálnych prietokoch tendenciu rastu do roku 2070 a do roku 2100 klesajú.



Obrázok 2: Výskyt minimálnych priemerných denných prietokov pre: a.) vodomernú stanicu Nitra – Nitrianska Streda (6730); b.) Laborec – Humenné (9230); c.) Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500) do roku 2100 podľa dát klimatického scenára KNMI (vľavo) a MPI (vpravo)

Výsledky analýzy zmien baseflow indexu (BFI)

Pre charakteristiku BFI platí, že z riešených vodomerných staníc má najmenší rozdiel medzi dátami HBV modelu a OBS dátami vodomerná stanica Nitra – Nitrianska Streda (6730). Vo všetkých vodomerných staniách hodnoty BFI klesajú do roku 2100 podľa oboch klimatických scenárov.

Najpriaznivejšiu prognózu priebehu BFI má do budúcnosti vodomerná stanica Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500), v ktorej hodnoty BFI podľa simulovaných dát podľa klimatického scenára MPI narastú do roku 2100 (Tabuľka 2). Výsledné hodnoty simulovaných dát podľa klimatického scenára MPI prezentujú vyššie hodnoty BFI ako simulované dáta podľa klimatického scenára KNMI.

Tabuľka 1: Výsledky *m*-denných minimálnych prietokov pre vodomernú stanicu pre vodomernú stanicu Nitra – Nitrianska Streda (6730), Laborec – Humenné (9230) a Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500) do roku 2100 podľa klimatických scenárov KNMI a MPI

		OBS	MODEL HBV	KNMI	MPI	KNMI	MPI	KNMI	MPI	KNMI	MPI
		1981-2010				2011-2040		2041-2070		2071-2100	
Nitra - Nitrianska Streda (6730)	1-denné minimum	3.92	4.40	4.02	4.58	3.95	4.51	3.75	4.49	3.50	4.18
	3-denné minimum	4.05	4.44	4.04	4.64	3.97	4.71	3.79	4.53	3.52	4.22
	7-denné minimum	4.22	4.50	4.12	4.78	4.04	5.00	3.84	4.64	3.57	4.31
	30-denné minimum	4.76	5.11	4.56	5.38	4.70	5.51	4.52	5.43	4.38	4.79
	90-denné minimum	6.08	6.35	5.79	7.07	5.94	7.11	5.80	6.89	5.17	5.85
Laborec - Humenné (9230)	1-denné minimum	1.50	2.19	1.85	2.07	1.64	2.08	1.44	1.76	1.50	1.56
	3-denné minimum	1.53	2.22	1.86	2.08	1.65	2.1	1.44	1.96	1.51	1.58
	7-denné minimum	1.69	2.26	1.88	2.14	1.72	2.14	1.47	2.03	1.53	1.59
	30-denné minimum	2.24	2.61	2.07	2.49	2.13	2.47	1.74	2.46	1.80	1.81
	90-denné minimum	3.84	3.81	3.79	4.28	3.57	3.75	2.60	3.39	2.37	2.38
Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500)	1-denné minimum	1.37	1.60	1.41	1.53	1.65	1.70	1.42	1.86	1.59	1.33
	3-denné minimum	1.50	1.61	1.42	1.54	1.66	1.72	1.43	1.89	1.60	1.35
	7-denné minimum	1.55	1.65	1.44	1.57	1.68	1.76	1.45	1.93	1.62	1.42
	30-denné minimum	1.89	1.88	1.58	1.76	1.89	1.99	1.55	2.09	1.92	1.65
	90-denné minimum	2.88	2.53	2.26	2.39	2.38	2.69	2.48	2.88	2.60	2.47

Tabuľka 2: Výsledky baseflow indexu pre vybrané vodomerné stanice

	OBS	MODE L HBV	KNMI	MPI	KNMI	MPI	KNMI	MPI	KNMI	MPI
	1981-2010				2011-2040		2041-2070		2071-2100	
Nitra - Nitrianska Streda (6730)	0.32	0.30	0.24	0.29	0.23	0.24	0.21	0.23	0.18	0.21
Laborec - Humenné (9230)	0.14	0.20	0.17	0.18	0.16	0.17	0.14	0.17	0.11	0.12
Topľa - Hanušovce nad Topľou (9500)	0.22	0.30	0.23	0.25	0.26	0.26	0.25	0.27	0.21	0.24

4. Diskusia a záver

Príspevok sa zaoberal zmenou výskytu minimálneho priemerného denného prietoku, *m*-denných minimálnych prietokov a BFI vo vybraných povodiach na území Slovenska podľa klimatických scenárov do roku 2100. Vybranými vodomernými stanicami boli Nitra – Nitrianska Streda (6730), Laborec – Humenné (9230), Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500).

Výsledky štúdie poukázali na posun výskytu minimálneho priemerného denného prietoku zo septembra na október pre vodomernú stanicu Nitra – Nitrianska Streda (6730), zo septembra na október (dáta podľa klimatického scenára KNMI) a november (dáta podľa klimatického scenára

MPI) pre vodomernú stanicu Laborec – Humenné (9230), z októbra na november pre vodomernú stanicu Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500) pre dáta podľa klimatického scenára MPI. Vo všeobecnosti je viditeľný posun výskytu minimálneho priemerného denného prietoku o mesiac neskôr vo väčšine riešených vodomerných staníc. Pre vybrané vodomerné stanice sa predpokladá, že do toku 2100 klesnú ich m -denné minimálne prietoky. Najvýraznejšie zmeny sa evidujú pri hydrologickej charakteristike 90-denného minimálneho prietoku vo vodomernej stanici Nitra – Nitrianska Streda (6730) kde je viditeľný pokles jeho hodnoty prietoku o 18,6 % pre dáta podľa klimatického scenára KNMI a pokles o 7,9 % pre dáta podľa klimatického scenára MPI. Pre vodomernú stanicu Laborec – Humenné (9230) je pokles 90-denného minimálneho prietoku o 37,8 % pre dáta podľa klimatického scenára KNMI a pre dáta podľa klimatického scenára MPI je pokles o 37,5 %. Pre hydrologickú charakteristiku BFI sa podľa výsledkov predpokladá pokles danej charakteristiky. Výnimku tvorí vodomerná stanica Topľa – Hanušovce nad Topľou (9500), kde hodnoty BFI narastú do budúca pre dáta podľa klimatického scenára MPI.

Sucho patrí medzi globálny problém, ktorý ovplyvňuje celý svet. Medzi jeho vplyvy patria najmä ekonomické výkyvy, problémy s celosvetovou migráciou obyvateľstva, nedostatočné množstvo potravín, či lesné požiare [4]. Existuje ďalšie množstvo dôsledkov sucha, ktoré ovplyvňujú život na Zemi. Pre hydrológiu je potreba študovať hydrologické charakteristiky, medzi ktoré patrí aj výskyt minimálnych prietokov, kedy je nutné zabezpečiť rezervy vody v krajine.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu a výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV 20-0374 a projektom VEGA 1/0632/19.

Literatúra

- [1] FEYEN, L., DANKERS, R. Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *Journal of Geophysical Research*. 2009, roč. 114, D17116, s. 17, doi: 10.1029/2008JD011438.
- [2] FLORIANCIC, M. G., BERGHUIJS, W. R., MOLNAR, P., KIRCHNER, J. W. Seasonality and Drivers of Low Flows Across Europe and the United States. *Water Resources Research*. 2021, roč. 57, e2019WR026928, doi: <https://doi.org/10.1029/2019WR026928>.
- [3] MARX, A., KUMAR, R., THOBER, S., RAKOVEC, O., WANDERS, N., ZINK, M., WOOD, E. F., PAN, M., SHEFFIELD, J., SAMANIEGO, L. Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3°C. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018, roč. 22, s. 1017-1032, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-22-1017-2018>.
- [4] POÓROVÁ, J., ŠKODA, P., DANÁČOVÁ, Z., ŠIMOR, V. Vývoj hydrologického režimu slovenských riek. *Životné prostredie*. 2013, roč. 47, č. 3, s. 144-147.
- [5] LAAHA, G., BLÖSCHL, G. Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*. 2006, roč. 20, s. 3851-3878, doi: 10.1002/hyp.6161.
- [6] DEMIREL, M. C., BOOIJ, M. J., HOEKSTRA, A. Y. : Impacts of climate change on the seasonality of low flows in 134 catchments in the River Rhine basin using an ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, roč. 17, s. 4241-4257, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-17-4241-2013>.
- [7] VEZZA, P., COMOGLIO, C., ROSSO, M., VIGLIONE, A. Low Flows Regionalization in North-Western Italy. *Water Resources Management*. 2010, roč. 24, s. 4049-4074, doi:10.1007/s11269-010-9647-3.
- [8] BURN, D. H., BUTTLE, J. M., CAISSIE, D., MACCULLOCH, G., SPENCE, CH., STAHL, K. The Processes, Patterns and Impacts of Low Flows Across Canada. *Canadian Water Resources Journal*. 2008, roč. 33, č. 2, s. 107-124, doi:10.4296/cwrj3302107.
- [9] DANÁČOVÁ, Z., BLAŠKOVIČOVÁ, L., LOVÁSOVÁ, E., POÓROVÁ, J., ŠIMOR, V., ŠKODA, P. Hydrologické extrémny: modelovanie a predpovedanie. *Acta Hydrologica Slovaca*, 2015, roč. 16, č. 1, s. 13-22.
- [10] SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Spracovanie hydrologických charakteristík. M-denné prietoky na Slovenských tokoch. 2005. Bratislava, s. 105.
- [11] MINDAŠ, J., HOLÉCY, J., ŠKVARENINA, J. Modelovanie dopadu globálnych zmien klímy na neurčitost' vývoja biodiverzity a štruktúry ekosystémových služieb lesa. *Životné prostredie*. 2017, roč. 51, č. 1, s. 14-20.

[12] THE NATURE CONSERVANCY. Indicators of Hydrologic Alteration. Version 7.1. User's Manual, 2009, s. 81.

Marek Šutúš¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 4. ročník

POROVNANIE VARIANTOV PREPADOVEJ HRANY V ODLAĤOVACEJ KOMORE POMOCOU CFD SIMULÁCIÍ

COMPARISON OF VARIANTS OF THE OVERFLOW EDGE IN THE COMBINED SEWER OVERFLOW USING CFD SIMULATIONS ABSTRACT

A typical object of combined sewer systems are combined sewer overflows (CSO), which are used to regulate the flow of rainwater. They are used to divide the flow going to the wastewater treatment plant (WWTP) and the water that flows into the recipient. As these waters discharged into the recipient are partially polluted by various contaminants, they represent an ecological threat. Therefore, CFD modeling and assessment of their functionality was performed on these chambers. The current state and a modification that should improve hydraulic conditions and overall functionality were compared.

Kľúčové slová / Key Words

odľahčovacia komora, kanalizácia, vodné znečistenie / combined sewer overflow, sewerage, water pollution

1. Úvod

Dĺžka stokovej siete v meste Trnava je 111,2 km. Stoková sieť je jednotná a preto sa nej nachádzajú odľahčovacie komory. Počet komôr na sieti je 22. [1]. V súčasnosti sú zaznamenané sťažnosti občanov na silný zápach po dažďoch v recipiente Trnávka, ktorý je pravdepodobne spôsobený súčasným stavom vysokého počtu odľahčení. Na základe Nariadenia o dobrom stave vôd [2] je potrebné vykonať odborné posúdenie stokovej siete, aj sa na nej nachádza viac ako 10 odľahčovacích komôr. Ako už bolo spomenuté vyššie, v sieti je ich 22.

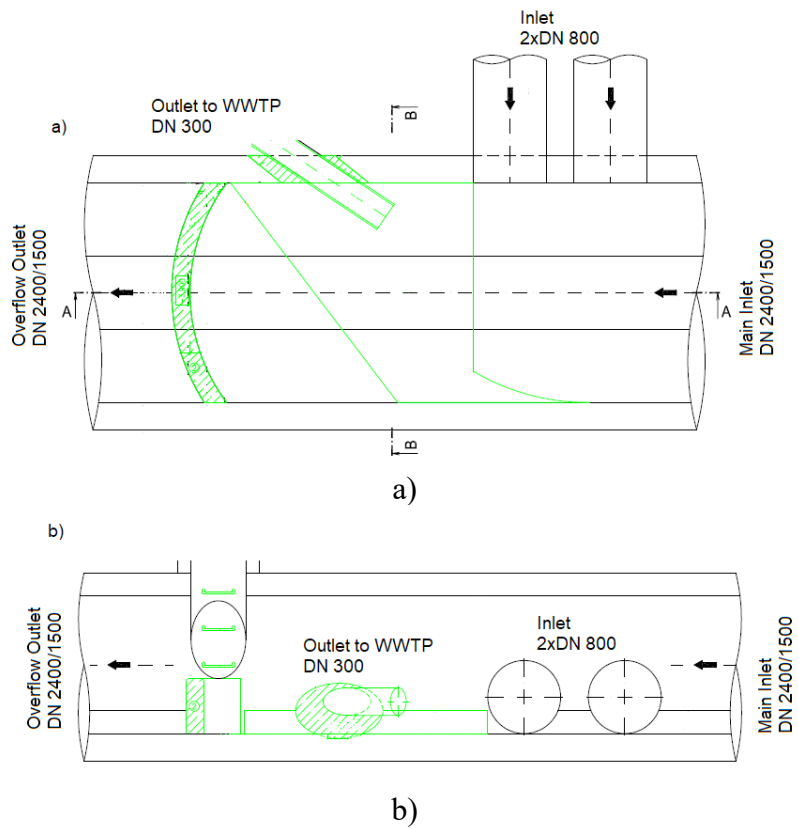
Problematika vypúšťania odľahčovacích vôd je rozšírená celosvetovo. Skupiny vedcov v Taliansku, Španielsku a Nórsku skúmajú problémy s posudzovaním odľahčovacích komôr ako aj jednotných stokových sústav. Využívajú metodiku hodnotenia za pomoci numerických modelov [3-5].

2. CFD modelovanie

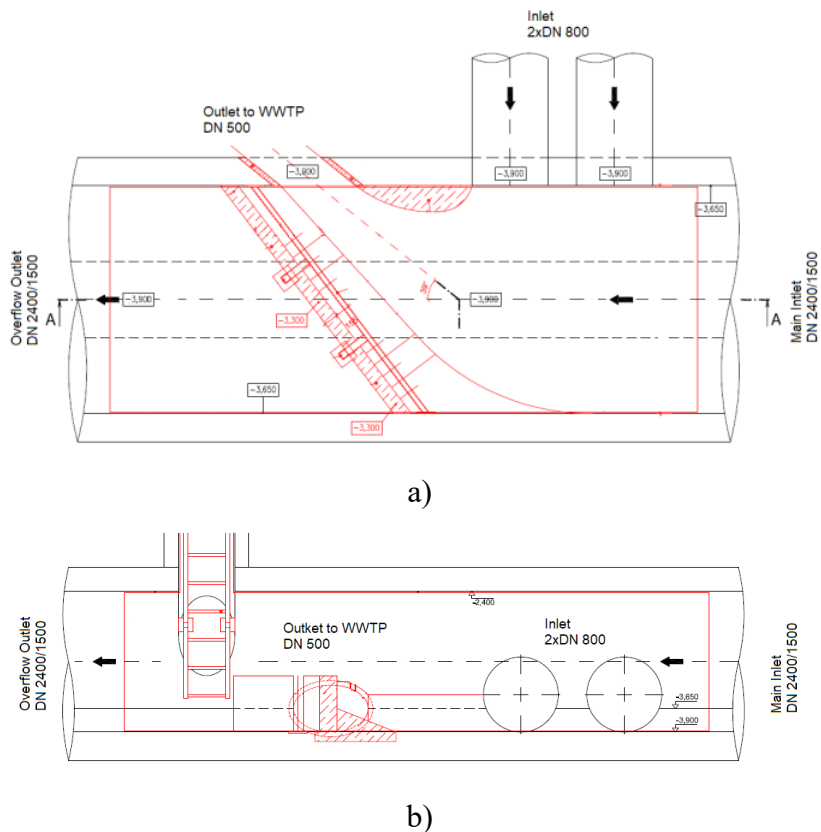
Na základe posúdenia na počet odľahčení a zmiešavací pomer bola zvolená komora č. 12. Táto odľahčovacia komora sa nachádza v severnej časti mesta Trnava, v zelenom páse na križovatke ciest Rybníková a Hornopotočná, pred Mestskou športovou halou. GPS koordináty komory sú 48° 22' 55,9" S, 17° 35' 11,3" V. Výtok je vyústený do približne 400 metrov kolmým smerom do blízkeho recipientu Trnávka.

Z predchádzajúcich výsledkov simulácií, kde boli porovnávané výšky prepadovej hrany a typ prepadovej hrany sa nezmenil, bolo usúdené že by bola vhodná zmena typu prepadovej hrany. Preto sa v tejto simulácii porovnávali súčasný stav a stav možnej rekonštrukcie. Na Obr. 1 a Obr. 2 je možné vidieť súčasný stav a možnú modifikáciu. Základné parametre sú zhrnuté v Tab. 1.

Marek Šutúš, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava



Obr. 1 Súčasný stav odľahčovacej komory, a) pôdorys, b) pozdĺžny rez



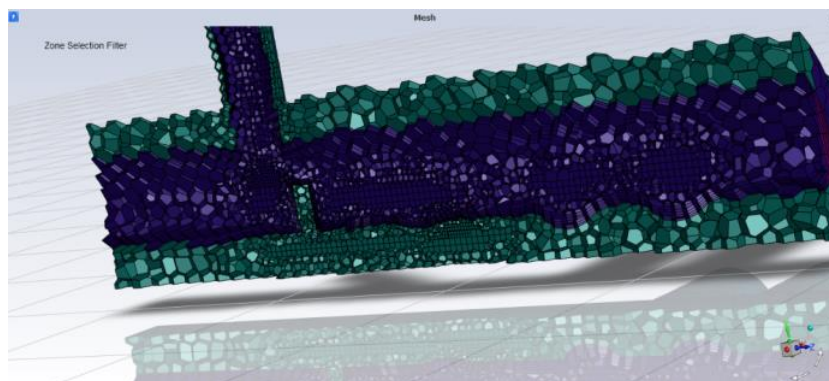
Obr. 2 Modifikácia odľahčovacej komory, a) pôdorys, b) pozdĺžny rez

Tab.1. Základné parametre odľahčovacej komory

	Súčasný stav	Modifikácia
Priemer hlavného prítoky	DN 2400/1500	DN 2400/1500
Priemer bočných prítokov	2x DN 800	2x DN 800
Priemer odtoku na ČOV	DN 300	DN 500
Priemer odtoku do recipientu	DN 2400/1500	DN 2400/1500
Výška prepadovej hrany	600 mm	600 mm

2.1 Odľahčovacia komora

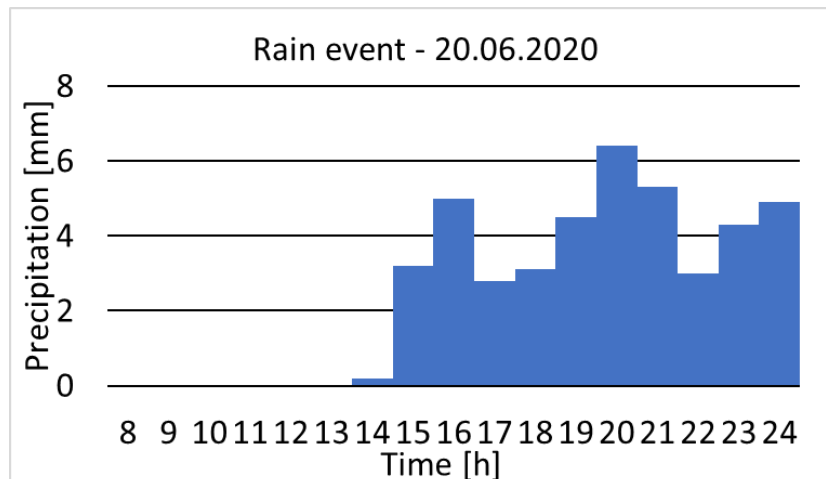
Softvér Ansys Fluent bol použitý na vytvorenie CFD simulácií. Najprv bol vytvorený 3D model a následne výpočtová sieť. Tento softvér ponúka možnosť automatického vytvorenia a optimalizáciu výpočtovej siete. Ako typ výpočtovej siete bol zvolený moderný poly-hexcore, ktorý je zobrazený na Obr. 3. Tieto simulácie nachádzajú široké využitie v oblastiach hydraulického výskumu [6,7].



Obr. 3 Poly-hexcore výpočtová sieť

2.2 Vstupné hodnoty simulácií

Ako vstupné údaje do simulácií boli použité výsledky simulácie zrážkovej udalosti v softvéri MIKE URBAN 2020+. Z výsledkov boli použité rýchlosť prúdenia v potrubí a prítoky. Bola simulovaná dažďová udalosť z 20 Júna 2020, ktorej priebeh je zobrazený na Obr. 4.



Obr. 4 Pribeh zrážok

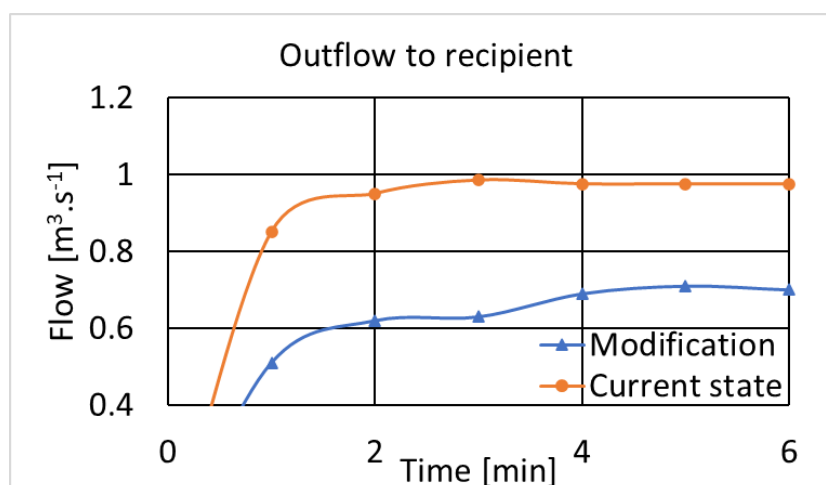
V Tab. 2 sú zhrnuté okrajové podmienky a vstupné hodnoty. Na simuláciu bol vybraný úsek z najväčším prietokom a rýchlosťami, kvôli vysokým nárokom na čas a výpočtovú silu.

Tab.2. Základné parametre odľahčovacej komory

Velocity inlet	Max. velocity	0.59 m.s ⁻¹
	Max. height	0.928 m
Pressure-outlet-recipient		DN 2400/1500
Wall (roughness)		0.0015 m
Interior (volume)	Phase 1	air
	Phase 2	water

3. Výsledky

Súčasný stavebný stav odľahčovacej komory č. 12 je nevyhovujúci. Uložením odtoku škrtiacej stoky smerujúcej na ČOV nad úroveň dna prítokovej stoky, dochádza v oblasti komory k spätnému vzdutiu, nepriaznivým turbulenciám a sedimentácii. Z výsledkov simulácií zhrnutých na Obr. 5, je vidieť že množstvo odľahčovanej vody do recipientu sa znížilo o približne 30%.



Obr. 5 Odtok do recipientu

Počet odľahčení za rok a zmiešavací pomer pre súčasný stav a modifikáciu boli porovnané v Tab. 3.

Tab.3. Základné parametre odľahčovacej komory

	Zmiešavací pomer	Počet odľahčení za rok
Súčasný stav	2.8	63.6
Modifikácia	10.6	14.2

4. Záver

Cieľom práce bolo porovnať dve varianty odľahčovacej komory na simulácii dažďa z 20.06.2020 v Trnave. Porovnal sa súčasný stav a stavebná úprava. V navrhovanej úprave sa zmenila konštrukcia prepadovej hrany a škrtiacej stoky odvádzajúcej odtok do ČOV. V súčasnom stave bol odtok na ČOV absolútne nevyhovujúci a spôsoboval sedimentáciu a vzdutie. Pri súčasnom stave komora nevyhovuje na hodnoty zmiešavacieho pomeru a počet odľahčení za rok podľa platnej legislatívy. Minimálny limit zmiešavacieho pomeru je nastavený na 1:4. Počet odľahčení za rok by mal byť maximálne 15 prípadov za rok. Z výpočtov možno vyvodit' prekročenie limitov. Úpravou škrtiaceho odtoku na ČOV sa zníži prietok a aj počet odľahčení. Zmiešavací pomer sa zvýši na vyhovujúcu hodnotu, čo je environmentálne prospešné a legislatívna požiadavka bude splnená.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja Ministerstva školstva mládeže a športu a Slovenskej akadémie vied na základe zmluvy č. APVV-18-0203, č. VEGA1/0727/20 a č. VEGA 1/0574/19.

Použité zdroje

- [1] Butler D., Davies J. W.: *Urban Drainage*. ISBN 0-203-84905-1. Spon Press is an imprint of the Taylor & Francis Group. 2 Park Square. Milton Park. Abingdon. Oxon 2011.
- [2] <https://www.trnava.sk/sk/clanok/technicka-infrastruktura>, 19.04.2021, 10:00.
- [3] Nariadenie vlády č. 269/2010, Nariadenie vlády Slovenskej republiky ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd.
- [4] Trnavská vodárenská spoločnosť, a.s., 2015, Rekonštrukcia odľahčovacích komôr – Technické správy.

Matúš Tomaščík¹

Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, II. ročník

VYUŽITIE MODELU USLE2D PRI HODNOTENÍ ERÓZNEJ OHROZENOSTI ÚZEMIA POMOCOU USLE V PROSTREDÍ GIS.

USE OF THE USLE2D MODEL IN THE ASSESSMENT OF EROSION RISK OF THE BASIN WITH USING USLE IN THE ArcMap ENVIRONMENT.

Abstract

The contribution is focused on the model evaluation of the erosion risk of the area using the Universal Soil Loss Equation (USLE) using the USLE2D mathematical model. This model primarily calculates the LS topographic factor, i.e. one of the USLE input parameters. At the same time, the contribution is devoted to the impact of the resolution of the Digital Elevation Model (DEM), entering USLE2D, which entered the model in resolutions of 0.25x0.25m, 1x1m and 10x10m. The LS topographic factor has been modelled in several algorithms. This experimental catchment, approximately 30ha in size, is located in western Slovakia in the cadastre of the town of Myjava, part of Turá Lúka. The area is characterized by loamy soil and is used agriculturally. In the experimental catchment, there is currently a stabilized erosion pothole, approximately 300m long with a width of 2 to 4m, a maximum depth of 1.5m and an average slope of 9%.

Kľúčové slová / Key Words

USLE; topografický faktor; DEM; modelové hodnotenie; erózia pôdy

1. Úvod

Starostlivosť o pôdu by mala byť celospoločenským záujmom s výraznou politickou podporou jej ochrany a využívania, na čo dlhodobo upozorňuje aj svetová a európska charta o pôde. Potreba ochrany pôdy je náročný prebiehajúci proces. Na Slovensku máme Zákon č. 220/2004 Z.z. o ochrane a využívaní poľnohospodárskej pôdy, ktorý ustanovuje aj ochranu vlastností a funkcií poľnohospodárskej pôdy a zabezpečenie jej trvalo udržateľného obhospodarovania a poľnohospodárskeho využívania, ochranu environmentálnych funkcií poľnohospodárskej pôdy. Za degradáciou pôdy, vznik a existenciu erózných procesov pôdy je spolupôsobenie prírodných faktorov a zásahu človeka. A práve orná pôda predstavuje najzraniteľnejší typ poľnohospodárskej pôdy, ktorý je vystavený silnému tlaku degradačných procesov.

Medzi najčastejšie využívanú metódu na výpočet priemernej ročnej straty pôdy z pozemku patrí „Univerzálna rovnica straty pôdy“ podľa Wischmeiera a Smitha (1978) (funkcia 6 erózných faktorov). Jej limity a obmedzenia, ktoré vyplývajú z jednoduchej štruktúry modelu, sa vedci snažili zmierniť jej modifikáciou RUSLE (Renard et al., 1997), USPED alebo USLE 2D [10]. Model USLE-2D prináša inováciu o priestorovo - premenlivý kombinovaný topografický faktor dĺžky a sklonu svahu LS.

Cieľom tohto príspevku bolo vyhodnotenie vplyvu výberu metódy výpočtu topografického faktora LS pomocou USLE-2D a vplyv rozlíšenia priestorových údajov (rastrová štruktúra modelu)

¹ Matúš Tomaščík, Ing. – Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

na príklade modelovaného svahu Turá Lúka (Myjavská pahorkatina). Výsledky modelovania straty pôdy sú dôležité pri návrhu manažmentu ohrozených území, riešenie protieróznych opatrení a na určenie predikcie eróznno-transportných procesov.

2. Metodika a údaje

Pre identifikáciu významných faktorov podporujúce vznik vodnej erózie a určenie priemernej ročnej straty pôdy bol vybraný poľnohospodársky využívaný svah v mestskej časti Turá Lúka-Myjava, ktorého priemerný sklon je stanovený na hodnotu 6° (ArcMap), s plochou 30 ha. V prvom kroku bola určená rozvodnica k záverečnému bodu určený v najnižšom bode predmetného svahu, čím sa ohraničilo malé experimentálne povodie. Vyčlenenie povodia bolo robené v programe ArcMap pomocou ArcToolboxu – Spatial Analyst tools – Hydrology (fill dem – flow direction – flow accumulation – pour – snap pour – watershed). Výsledkom bol .shp súbor (shapefile), malého experimentálneho povodia stanovený na základe hydrologických charakteristík posudzovaného územia.

Pre toto povodie boli následne stanovené jednotlivé erózne faktory vstupujúce do „Univerzálnej rovnice straty pôdy“, USLE (1). V tabuľke č. 1 sú definované hodnoty vstupných parametrov – faktorov rovnice USLE. Mapa K faktoru (faktor erodovateľnosti/náchylnosti pôdy na vodnú eróziu) bola určená na základe typu pôdnej jednotky (georeferencovanie pôdnej mapy z portálu: <https://portal.vupop.sk/portal/apps/webappviewer/index.html?id=d89cff7c70424117ae01ddba7499d3ad> [9]).

Tabuľka.1 – Popis vstupných parametrov (faktorov) Univerzálnej rovnice straty pôdy (USLE).

Faktor	Popis	Hodnoty		Jednotky
R	Myjava - ID stanice: 15020 - faktor vypočítaný podľa pôvodnej metodiky z minútových údajov: od roku 1995 do 2009 (letné mesiace)	59.9		[MJ ⁻¹ .ha.cm.h ⁻¹]
K	Mapa - plochy rozdelené na základy typu pôdnej jednotky	BPEJ	K faktor	[t.ha ⁻¹ .rok ⁻¹]
		0793672	0.3	
		0787413	0.39	
		0787232	0.39	
		0872212	0..25	
C	Mapa s informáciou o vegetačnom kryte (v tomto prípade)	Pšenica 0.12 Viacročná tráva 0.005		[-]
P	Bez vplyvu protieróznych opatrení	1		[-]
LS	Topografický faktor v rôznych rozlíšeniach (10x10m, 1x1m, 0.25x0.25)	Rozlíšenie DMR / Autor		[-]
		10x10m	McCool a kol. [2] [3] Wischmeier a Smith [7]	
		1x1m	McCool a kol. [2] [3] Govers [1]	
			Nearing [4]	
			0.25x0.25m	McCool a kol. [2] [3]

V ďalšom kroku sa stanovil LS faktor (topografický faktor) v prostredí modelu USLE2D. Kombinovaný faktor LS sa odvodzuje pre erózne uzavreté parcely na základe rastrového digitálneho modelu reliéfu (DMR). V tejto časti boli porovnávané výsledky nielen algoritmov výpočtu LS faktora, ale aj vplyv rozlíšenia vstupného DMR.

Raster „parcel“ rozčleňuje územie na čiastkové plochy vložím bariér, teda hraníc medzi čiastkovými plochami, ktoré pôsobia ako prekážky pre plošný povrchový odtok a dochádza tak k prerušeniu odtoku. Tým sa znižuje faktor L dĺžky svahu a dĺžka odtokovej dráhy. Topografický faktor LS je v modeli USLE2D zvlášť počítaný pre každý rastrový element. Zdrojová plocha rastrového elementu nahradzuje teda dĺžku odtokovej dráhy [7].

Referenčným rozlíšením DMR pri tomto modelovaní, kde bola zároveň skúmaná variabilita vyprodukovaných výsledkov, v závislosti od zvoleného algoritmu výpočtu, bolo rozlíšenie bunky rastra 1x1m. Vybrané algoritmy výpočtu LS faktora boli algoritmus podľa Wischmeiera & Smitha [8], algoritmus podľa McCool a kol. [2] [3], algoritmus podľa Goversa [1] a algoritmus podľa Nearinga [4]. Z dôvodu obmedzeného rozsahu príspevku sú uvedené zdrojové odkazy na rovnice pre jednotlivé algoritmy.

Priemerná ročná strata pôdy (G) sa v Univerzálnej rovnici straty (USLE) pôdy určuje ako funkcia šiestich resp. piatich erózných faktorov, ako:

$$G = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

G - Priemerná ročná strata pôdy [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$]

K - Faktor erodovateľnosti pôdy [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$]

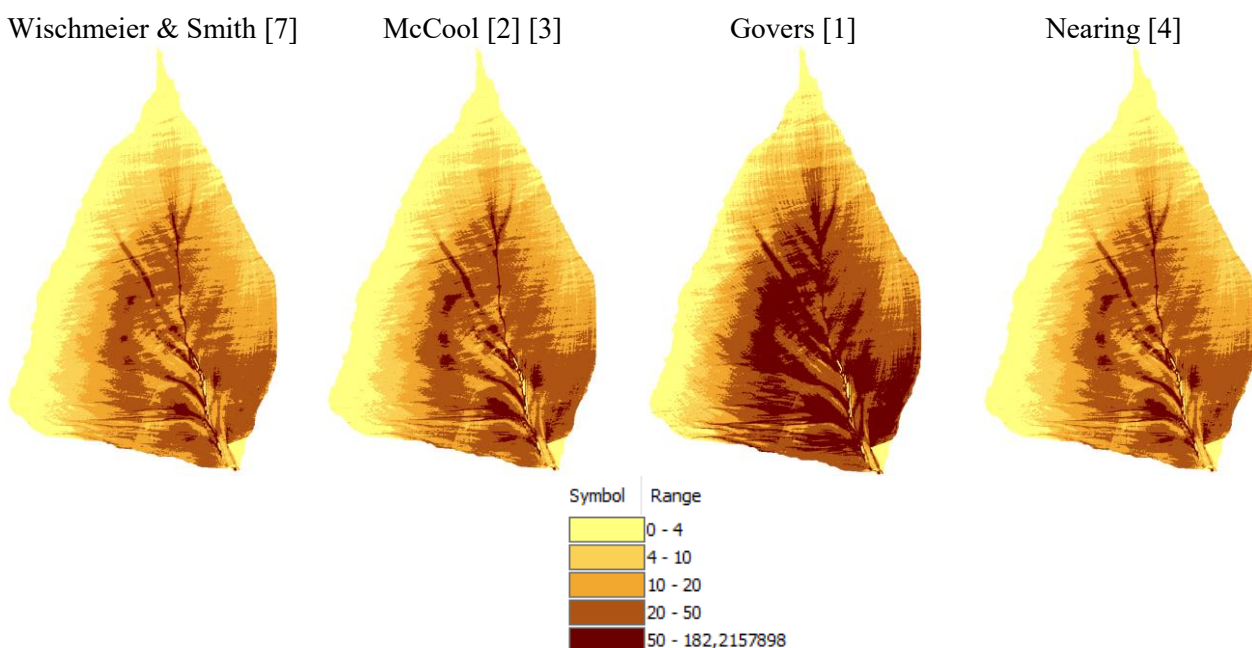
C - Faktor ochranného vplyvu vegetácie [-]

R - Faktor intenzity dažďa [$MJ^{-1} \cdot ha \cdot cm \cdot h^{-1}$]

LS - Topografický faktor dĺžky a sklonu [-]

P - Faktor vplyvu protierózných opatrení [-]

Na obrázku č. 1 sú uvedené grafické výstupy stanovnej priemernej ročnej strata pôdy v $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ prostredníctvom USLE a v tabuľke č. 2 sú jej číselne vyhodnotenia, pre rozlíšenie DMR 1x1m.



Obrázok 1. Priemerná ročná strata pôdy, pre rozlíšenie DMR 1x1m.

Tabuľka 2 – Prehľad stanovenia priemernej ročnej straty pôdy G [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$], kde $P=1$

Metóda LS faktora	LS [-]	R [$MJ^{-1} \cdot ha \cdot cm \cdot h^{-1}$]	K [-]	C [-]	G [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$]
Wischmeier & Smith [7]	6,48	59.9	0,35	0.12 0.005	16.18
McCool a kol. [2] [3]	7,36	59.9	0,35	0.12 0.005	18.38
Govers [1]	13,88	59.9	0,35	0.12 0.005	34.65
Nearing [4]	7,01	59.9	0,35	0.12 0.005	17.52

Z výsledkov vyplýva, že najvyššie hodnoty LS faktora sa získali podľa algoritmu Goversa [1], ostatné hodnoty boli veľmi podobné a to aj v miestach plošného, aj sústredného odtoku. Naopak, Algoritmus podľa Goversa [1] vykázal značne vyššie hodnoty topografického faktora LS a to najmä v oblastiach sústreďovania povrchového odtoku. Výsledky priemernej ročnej straty pôdy pri počítaní LS topografického faktora týmto algoritmom, môžu byť teda použité ako extrémny (krajný) prípad zastúpenia tohto faktora v erózných modeloch a následne výskytu erózneho odnosu v danom území [6].

V ďalšej časti príspevku budú prezentované výsledky modelovanej priemernej ročnej straty pôdy na malom experimentálnom povodí vzhľadom na veľkosť rastra DMR. Konkrétne bolo použité DMR 0.25×0.25 m a 10×10 m (Tabuľka 1). To znamená, že bola znovu prepočítaná rovnica USLE, so vstupmi prispôbenými danému rozlíšeniu, pričom LS topografický faktor bol počítaný len podľa algoritmu McCoola a kol. [2] [3]. Dôvodom výberu algoritmu je objektívna vhodnosť použitia výpočtu pre oblasť západného Slovenska, na čo poukazuje aj štúdia: „Prevencia a odstraňovanie dôsledkov erózie pôdy, budovanie ekostabilizačných prvkov v krajine a rozvoj vybraných prvkov zelenej infraštruktúry pre ochranu a koordinované riadenie prírodne významných cezhraničných území“ [7].

Počas modelovania bol však identifikovaný fakt, že rozhranie modelu USLE2D nebolo schopné počítať LS topografický faktor v tak vysokom rozlíšení DMR, ako je rozlíšenie 0.25×0.25 m. Z toho dôvodu bolo potrebné vypočítať faktory L a S ako samostatné parametre vstupujúce do Univerzálnej rovnice straty pôdy. Avšak, aby bolo možné porovnať dosiahnuté výsledky, museli byť tieto faktory počítané pomocou vzťahov (2), (3), (4) a (5), ktoré sú použité v samotnom algoritme, v akom počíta aj model USLE2D, teda podľa algoritmu McCoola a kol. [2] [3].

$$L_{(x,y)} = \frac{(A_{(x,y),in} + D^2)^{(m+1)} - A_{(x,y),in}^{(m+1)}}{f_{(x,y)}^m \cdot D^{(m+2)} \cdot 22,13^m} \quad (2)$$

kde: $L_{(x,y)}$ – faktor L pre danú bunku v súradniciach X, Y (-),

D – rozlíšenie bunky rastra (m),

$A_{(x,y),in}$ – celková prispievajúca (zdrojová) plocha na vstupe do bunky (m^2),

m – exponent pre výpočet faktora L zohľadňujúci sklon svahu je definovaný:

ak l_s je nad 5%	$m = 0.5$
ak l_s je 3 až 5%	$m = 0.4$
ak l_s je 1 až 3%	$m = 0.3$
ak l_s je do 1%	$m = 0.2$

$f_{(x,y)}$ – korekčný faktor ($=\sin \alpha_{x,y} + \cos \alpha_{x,y}$) (v prípade odtoku v 8 možných smeroch, t.j. D8 Single Flow nadobúda korekčný faktor hodnotu 1 pre odtok v kardinálnom smere, resp hodnotu 1,41 pre odtok v diagonálnom smere),
 α – orientácia bunky voči svetovým stranám ($^{\circ}$).

McCool a kol. [2] [3] stanovili sadu vzťahov na výpočet S – faktora a to diferencovane, v závislosti od dĺžky svahu a sklonu svahu:

Pre svahy dlhšie ako 4m a sklon $< 9\%$

$$S = 10,8 \cdot \sin \varnothing + 0,03 \quad (3)$$

Pre svahy dlhšie ako 4m a sklon $\geq 9\%$

$$S = 16,8 \cdot \sin \varnothing - 0,03 \quad (4)$$

Pre svahy kratšie ako 4m

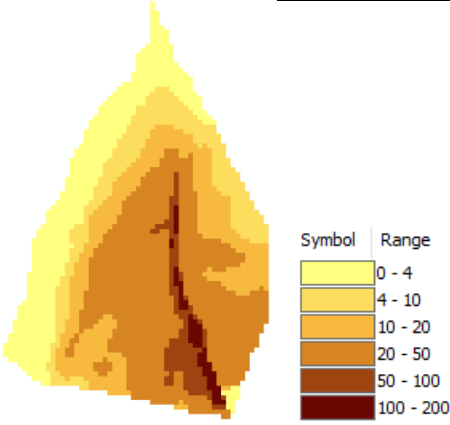
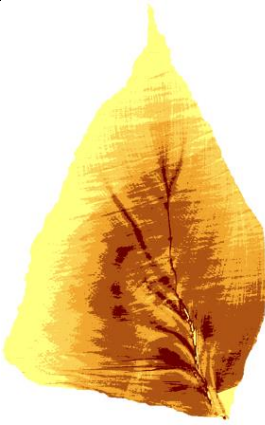

$$S = 3,0 \cdot (\sin \varnothing)^{0,8} + 0,56 \quad (5)$$

kde: S – hodnoty sklonu svahu (-)
 \varnothing – uhol sklonu svahu ($^{\circ}$)

Na použitie stupňov ako vstupov do goniometrických funkcií (sin, cos, tg), musia byť prevedené do radiánov (vyplýva to z mapovej algebry prostredia ArcGIS). Samotná konvencia môže byť uskutočnená vynásobením s hodnotou $\pi/180$ [6].

V nasledujúcej tabuľke č. 3 je porovnanie všetkých rozlíšení DMR pri výpočte USLE,

Tabuľka 3. Porovnanie $G [t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}]$ podľa USLE, pre algoritmus LS faktor podľa McCoola a kol.. [2] [3]

 <p>Symbol Range</p> <table border="1"> <tr><td>Lightest yellow</td><td>0 - 4</td></tr> <tr><td>Yellow</td><td>4 - 10</td></tr> <tr><td>Orange</td><td>10 - 20</td></tr> <tr><td>Dark orange</td><td>20 - 50</td></tr> <tr><td>Brown</td><td>50 - 100</td></tr> <tr><td>Dark brown</td><td>100 - 200</td></tr> </table>	Lightest yellow	0 - 4	Yellow	4 - 10	Orange	10 - 20	Dark orange	20 - 50	Brown	50 - 100	Dark brown	100 - 200		
Lightest yellow	0 - 4													
Yellow	4 - 10													
Orange	10 - 20													
Dark orange	20 - 50													
Brown	50 - 100													
Dark brown	100 - 200													
<p>Rozlíšenie rastra 10 m x 10m $G = 22.16 t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$</p>	<p>Rozlíšenie rastra 1m x 1m $G = 18.38 t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$</p>	<p>Rozlíšenie rastra 0.25m x 0.25 m $G = 36.74 t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$</p>												

3. Diskusia a závery

Na vybranom území svahu Myjavskej pahorkatiny bol urobený odhad vodnej erózie pôdy z vyčleneného malého experimentálneho povodia. Pre výpočet straty pôdy boli použité dva jednoduché modely – Univerzálna rovnica straty pôdy a model USLE 2D s algoritmi výpočtu LS podľa viacerých autorov.

Na základe dosiahnutých výsledkov USLE, resp. USLE2D v prostredí softvérov ArcMap, sa dospelo k záveru, že pre modelovanie priemernej ročnej straty pôdy v malom území nie je efektívne používať DEM v príliš vysokom (0.25x0.25m), ale ani v relatívne nízkom rozlíšení (10x10m) vzhľadom na veľkosť povodia (30 ha). V prípade rozlíšenia DEM 0.25x0.25m sú výsledky nadhodnotené, naopak pri použití DEM 10x10m, bolo množstvo transportovanej pôdy skreslené, pretože nebol zachytený komplikovanejší reliéf tvorby erózných rýh hlavne v jeho strednej časti a hornej časti svahu. Pre toto pilotné povodie sa ukázalo ako vhodné modelovanie vodnej erózie v rozlíšení DEM 1x1m. Záverom možno konštatovať, že sa podarilo preukázať vplyv rozlíšenia DEM a porovnal sa aj topografický faktor LS, ktorý má podstatný vplyv na samotný výpočet priemernej ročnej straty pôdy.

Pod'akovanie

Článok bol vytvorený a podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0374 a grantom VEGA č. 1/0632/19.

Literatúra

- [1] Govers, G. 1991. Rill erosion on arable land in Central Belgium – Rates, Control and Predictability. In: Catena, vol. 18, 1991, no. 2, p. 133 – 155.
- [2] McCool, D. K. et al. 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. In: Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 30, 1987, no. 5. p. 1387 – 1396.
- [3] McCool, D. K. et al. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. In: Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 32, 1989, no. 5. p. 1571 – 1576.
- [4] Nearing, M. A. 1997. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. In: Soil Science Society of America Journal, vol. 61, 1997, no. 3, p. 917 – 919.
- [5] Renard, K. a kol.: Predicting Soil Erosion by Water: a Guide to Conservation Plannin with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agricultural Handbook. 1997, č. 703, s. 404. ISBN 0-16-048938-5.
- [6] Šinka, K., Muchová, Z., Konc, L. 2015. Geografické informačné systémy v priestorovom plánovaní. Nitra: SPU v Nitre, 2015. 325 s. ISBN 978-80-552-1444-3.
- [7] Výleta. R. a kol. (2019): Prevencia a odstraňovanie dôsledkov erózie pôdy, budovanie ekostabilizačných prvkov v krajine a rozvoj vybraných prvkov zelenej infraštruktúry pre ochranu a koordinované riadenie prírodne významných cezhraničných území., Štúdia cezhraničného projektu Interreg V-A SK-CZ, ITMS 304021C996, obec Vrbovce, 200 s.
- [8] Wishmeier, W. H. – Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbook, no. 537. Washington D. C. : U. S. Department of Agriculture, 1978. 58 p.
- [9] <https://portal.vupop.sk/portal/apps/webappviewer>
- [10] Van Oost, K., Govers, G. (2000): Usle2D Katholieke Universiteit Leuven Information provider: Physical and Regional Geography Research Group [online].

Patrik Václavik¹

Vodohospodárske inžinierstvo, 3. ročník

MOŽNOSTI POSÚDENIA ÚČINNOSTI INJEKČNEJ CLONY V PODLOŽÍ PRIEHRADY NOSICE Z HĽADISKA NAJNOVŠÍCH POZNATKOV

POSSIBILITIES OF REASSESSMENTS THE EFFICIENCY OF THE INJECTION SCREEN IN THE BEDROCK OF THE NOSICE DAM WITH REGARDS TO THE LATEST KNOWLEDGE

Abstract

The main purpose of this article is to prepare materials for further research of the Curtain Grouting (CG) and its interaction with the different materials in the bedrock of the Nosice dam. Based on the results of Water Pressure Tests (WPT) and uplift pressure measurements on the water structure itself. Uplift pressure on the water part of the carrier will serve as values for model calibration. Based on the results of the water pressure tests, the coefficients of filtration under the individual blocks of the waterworks were calculated. From the water loss on the floor, I calculated the filtration coefficients according to three authors, namely Moye, Hoek-Brye and Dupuit, for our analysis the coefficient with the highest permeability will be used in order to be on the side of safety. Numerical modeling – Finite Element Method (FEM) will be used to find the optimal depth of the curtain grouting.

Kľúčové slová / Key Words

Priehrada; podložie; vodné tlakové skúšky; piezometrická výška; vztlak

1. Úvod

Vodná stavba Nosice bola postavená v povojnovom období medzi rokmi 1949 až 1958 na hornom toku Váhu na riečnom kilometri v 207,70. Primárnym účelom vodného diela je využívanie hydroenergetického potenciálu a produkcia špičkovej elektrickej energie. Ďalšími účelmi vodného diela je denné a týždenné vyrovnávanie prietokov pre hydroenergetické vodné stavby, umiestnené pod nádržou Nosice, buď priamo na Váhu, alebo jeho derivačných kanáloch. Okrem toho sa nádrž synchronnou manipuláciou v nadväznosti na vyššie položené diela podieľa na čiastočnej redukcii povodňových prietokov a vyrovnávaní zvýšených prietokov počas špičkovej prevádzky kaskády Hričov – Mikšová – Považská Bystrica. Súčasne nadlepšuje odbery vôd pre rozsiahlu priemyselnú výrobu v priľahlom území a perspektívne zapadá do konceptu vodnej cesty na Váhu. [1].

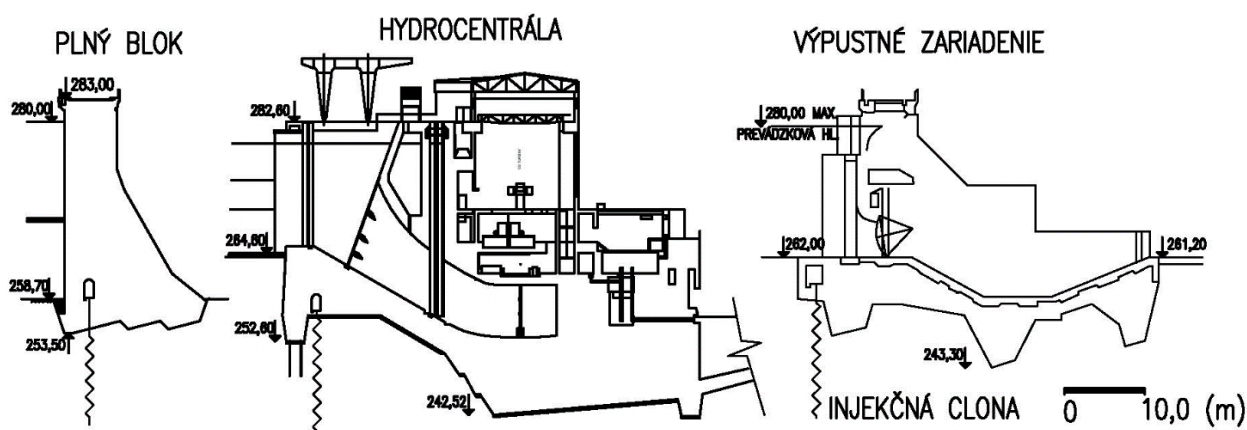
Betónová gravitačná priehrada, vysoká 31,5 m nad základovou škárou, v korune dlhá 501,68 m pozostáva z 34 blokov. Z nich je 23 blokov plných gravitačných (jeden z blokov je pripravený tak, aby sa k nemu mohol pribetónovať lodný výťah). V piatich blokoch v strede údolia sú výpustné zariadenia a v troch blokoch na ľavej strane údolia sú vtoky na vodnú elektrárňu (obr. 1, 2). Pod nimi sa nachádza podpriehradová vodná elektrárňu. V extrémne zložitej geologickej skladbe prostredia, tvorenej horninami karpatského flyša, v striedajúcich sa zlepenoch, ílovcoch a pieskovcoch, bol mimoriadne elegantne a na danú dobu veľmi progresívne vyriešený výpustný objekt nádrže. Skladá sa z piatich dolných výpustov, ktoré sú hradené segmentmi 4,8 x 14 m. Nad

¹ Patrik, Václavik, Ing., Katedra geotechniky, Stavebné fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, e-mail: patrik.vaclavik@stuba.sk

nimi sa nachádza železobetónová hradiaca konštrukcia, vysoká 9,7 m, na ktorej je päť polí bezpečnostných priepadov, hradených klapkami šírky 3,5 x 17,30 m. Zväčšenie širok priepadových polí sa dosiahlo zúžením pilierov. Segmenty a klapky sa ovládajú zo strojovne, ktorá sa nachádza v medziľahlej železobetónovej hradiacej konštrukcii. Kombinácia dolných výpustov hradených segmentmi a bezpečnostných priepadov hradených klapkami umožňuje prepúšťanie povodňových prietokov a max. prevádzkovej hladine (279,60 m n.m.) $3559 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} + 1070 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Stabilita takto navrhnutej extrémne vyľahčenej konštrukcie sa mala prvý krát v Strednej Európe zabezpečiť kotvením do podlažia (Bednárová a kol., 2010) [2].



Obrázok 1: Pohľad na výpustné bloky zariadenia [foto: archív VVB]



Obrázok 2: Schémy priečných profilov priehrady Nosice

1.1 Geologické pomery v prihradnom profile

V mieste priehrady, na rozhraní Javorníkov a Strážovského pohoria, má údolná niva šírku 320 m [3]. Územie je veľmi členité, rozbrázdnené množstvom údolí. Svahy okolitých kopcov sú veľmi príkre, často skalnaté a zalesnené, hlavne vo vrcholových partiách.

Geologický profil prihradného miesta spadá do bradlového pásma, ktoré sa vyznačuje zložitou tektonickou skladbou. V oblasti pravého údolného svahu sa nachádzajú súvrstvia slienitých ílovcov

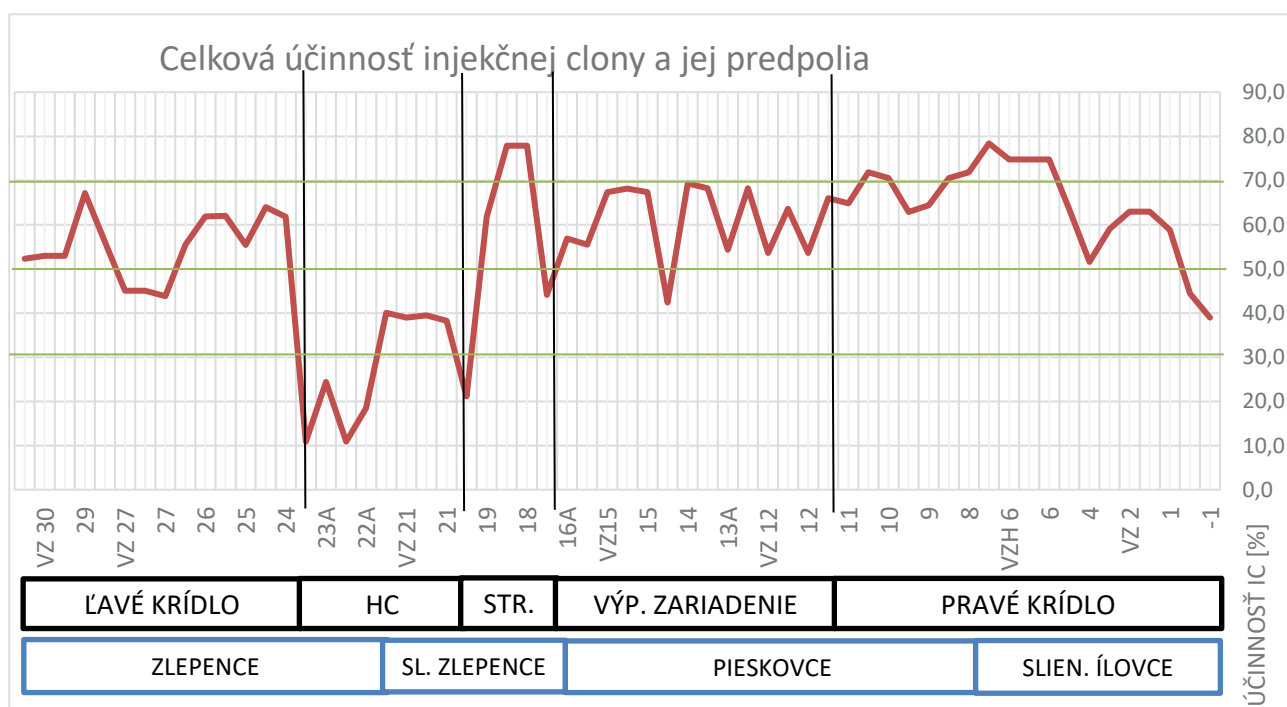
s vložkami pieskocov. Smerom do údolia prevládajú masívne, jemné až stredne zrnité hutné pieskovce, značne rozpukané. V podloží vodnej elektrárne sa nachádzajú súvrstvia slienitých ílovcov a zlepcov, ktoré siahajú až do ľavého údolného svahu. Pieskovce a zlepenca sú vplyvom tektonických porúch značne porušené a priepustnejšie, ako slienité ílovce.

Povrchové pokryvné vrstvy paleogénu tvoria v údolnej nive štrkovité náplavy Váhu mocnosti až 15 m, pri povrchu ílovité. Aluviálne náplavy sú na povrchu prekryté 1 a 2 m hrubými vrstvami hĺn. Na pravom brehu údolia sa nachádza niekoľkoketová vrstva silne zaílovaných štrkov, na povrchu prekrytých sprašovými hlinami a hlinitými suťami. Aj napriek starostlivému inžiniersko-geologickému a hydrogeologickému prieskumu (135 prieskumných vrtov s celkovou dĺžkou 4000 m), ktorý predchádzal výstavbe priehrady, sa pri jej zakladaní zistil výskyt minerálnych vôd s vysokým obsahom viazaného i voľného oxidu uhličitého. Tento fakt vyvolal zmenu v technológii zakladania priehrady. Prameň minerálnych vôd sa zachytil a stal sa impulzom pre založenie známych kúpeľov Nimnica na pravom svahu nádrže Nosice. [4]

2. Vztlaky v podloží priehrady

Meranie vztlakov pred a za injekčnou clonou slúži ku kontrole účinnosti injekčnej clony a súčasne k hodnoteniu bezpečnosti vodného diela a sledovaniu jeho správania sa v čase. Na VS Nosice bol v roku 1972 obnovený vztlakomerný systém, ktorý zaznamenáva hodnoty vztlakov na úrovni základovej škáry (DNH - návodná strana, DVH - vzdušná strana), a v hĺbke 8 – 10 m pod základovou škárou (spodný horizont, DNS - návodná strana, DVS - vzdušná strana). Vztlakomerný systém bol v roku 1993 doplnený o 11 vztlakomerných vrtov zabudovaných do injekčnej clony. Merania realizujú zamestnanci SVP, š. p. (Správa povodia stredného Váhu I. Púchov) raz za týždeň, a to odčítaním hodnôt z manometrov. Koncom roku 2014 boli do vrtov na vzdušnej strane v blokoch č. 17 až č. 23 (22 vrtov + 3 vrty, ktoré sú zabudované do injekčnej clony) nainštalované automatizované snímače.

Pre ilustráciu je na obr. 3 dokumentovaný vývoj účinnosti injekčnej clony a jej predpolia pod priehradou za rok 2019, ktorá je ustálená aj v dlhšom časovom horizonte.



Obrázok.3: Vývoj účinnosti IC v oblasti základovej škáry [2]

Pre výpočet celkovej účinnosti platí rovnica:

$$U_{C+p} = \Delta h / \Delta H * 100 \quad [\%] \quad (1)$$

kde:

U_{C+p} - Účinnosť clony+ predpolia [%]

Δh - rozdiel hladiny vody v nádrži a vztaku na vzdušnej strane IC [m]

ΔH -rozdiel hladiny vody v nádrži a koryte pod priehradou [m]

Z vývoja účinnosti v podloží priehrady je vidieť, že napriek jej rovnakým parametrom sa jej hodnoty líšia. Príčinou rozdielných vztakových pomerov a následne účinnosti IC je geologická skladba podložia. Interakcia injekčnej clony s geologickým prostredím je rozhodujúcim faktorom spoľahlivého posudzovania funkcie injekčnej clony. Nemalou mierou sa však na tom môže podieľať aj samotný tvar a rozmery základovej škáry blokov priehrady. K overeniu nastolenej hypotézy možno využiť metódu numerického modelovania.

3 Účinnosť injekčnej clony vo väzbe na jej interakciu s geologickým prostredím

Numerickým modelovaním, v súčinnosti s výsledkami meraní parametrov filtračného pohybu podzemných a priesakových vôd v podloží priehrad, možno prispieť k miere spoľahlivosti posudzovania účinnosti injekčných clôn. Základom riešenia je poznanie predpokladaných a v in situ nameraných hodnôt vztakov.

Predpokladaný priebeh vztakov v podloží priehrady možno stanoviť metódou konečných prvkov (MKP). Vstupnými parametrami sú koeficienty filtrácie horninového prostredia, vyplývajúce z vodných tlakových skúšok.

Koeficient filtrácie možno z výstupov VTS určiť podľa rôznych autorov: [7]

Moye:

$$k_f = \frac{Q}{L \cdot P} \cdot \frac{1 + \ln \frac{L}{2r}}{2\pi} \quad (2)$$

pričom platí:

Q-zistená strata vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)

L-dĺžka skúšanej etáže (m)

P-skúšobný tlak, nahradený výškou vodného stĺpca (m)

r-polomer vrtu (m)

k_f -koeficient filtrácie ($m \cdot s^{-1}$)

Hoek – Bray

$$k_f = \frac{Q \cdot \ln \frac{2L\sqrt{\lambda}}{d}}{2\pi \cdot L \cdot P} \quad (3)$$

pri výpočte priepustnosti skalného podložia zohľadňuje i prípadnú anizotropiu prostredia:

Q-zistená strata vody pri VTS $cm^3 \cdot s^{-1}$

L-dĺžka skúšanej etáže (cm)

P-skúšobný tlak, nahradený výškou vodného stĺpca (cm)

d-priemer vrtu (cm)

λ -anizotropia prostredia ($\lambda = k_{fx} / k_{fy}$)

k_f -súčiniteľ filtrácie ($cm \cdot s^{-1}$)

Dupuit:

$$k_f = \frac{Q \cdot \ln \frac{R}{r}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot P} \quad (4)$$

Q-zistená strata vody ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

L-dĺžka skúšanej etáže (m)

r-polomer vrtu (m)

P-skúšobný tlak, nahradený výškou vodného stĺpca (m)

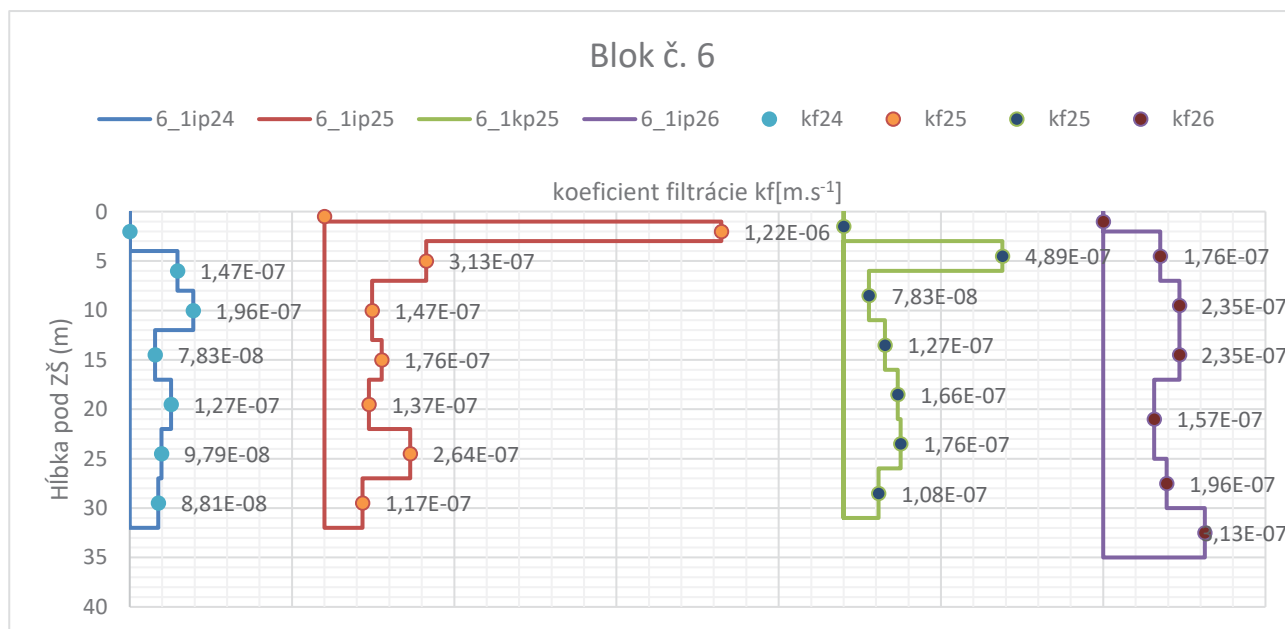
R-dosah zvýšenia hladiny, $(R/r)=40$

ξ -koeficient podľa Verigina

k_f -koeficient filtrácie ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Takto vypočítané koeficienty filtrácie pod každým blokom priehrady predstavujú vstupné parametre numerického riešenia MKP (metóda konečných prvkov). Pre ilustráciu sú na Obr. 4 dokumentované koeficienty filtrácie horninového prostredia pod plným gravitačným blokom v pravostrannej oblasti telesa priehrady (blok č.6). Z troch vypočítaných hodnôt koeficientov filtrácie (Moye, Hoek-Bray, Dupuit) je v grafe zohľadnená najnepriaznivejšia hodnota, aby sa výsledky numerického modelovania nachádzali na strane bezpečnosti.

Takto získané výsledky koeficientov filtrácie predstavujú vstup pre tvorbu numerického modelu k potrebe skúmania vplyvu heterogenity prostredia na vývoj vztlakov v podloží priehrady Nosice, resp. jej účinnosti. Podstata metódy skúmania spočíva v parametrickej štúdií, pomocou ktorej možno analyzovať vplyv geologického prostredia na vývoj vztlakov v podloží priehrady pri rôznych parametroch injekčnej clony. Finálnym produktom takéhoto riešenia je optimalizácia parametrov injekčnej clony a jej porovnanie so skutočnými parametrami.



Obrázok 4: Koeficienty filtrácie vypočítané na základe výsledkov VTS pre jednotlivé etáže

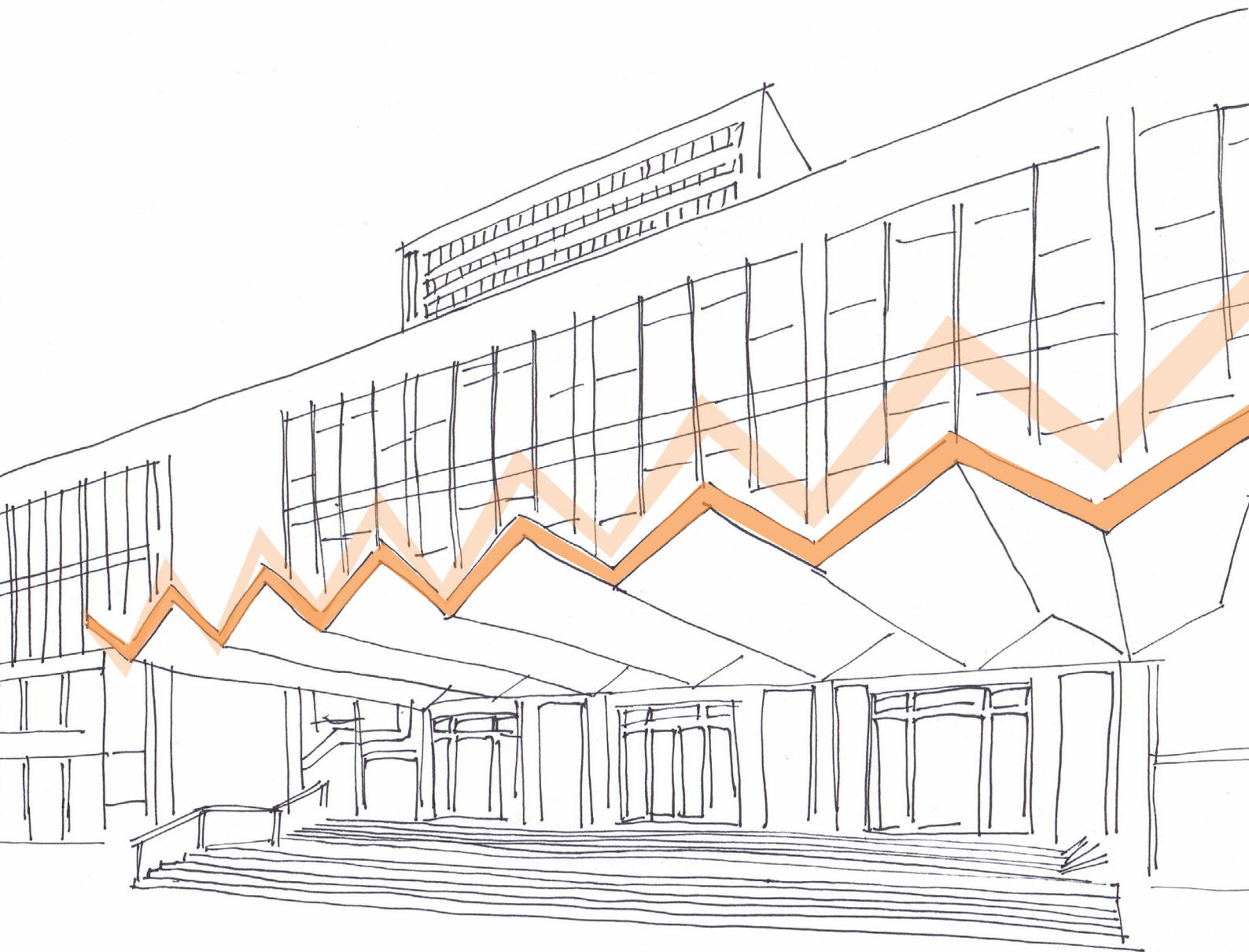
4 Závěry

Priehrady, viac ako ktorékoľvek iné inžinierske diela, sú v širokom spektre závislé na variabilite prírodných faktorov – hydrológii, hydrogeológii, geológii a i. Ich prevádzka vyžaduje, vzhľadom na posudzovanie ich bezpečnosti, monitorovanie parametrov správania sa týchto konštrukcií. Výsledkom monitoringu sú rozsiahle dátové súbory týchto meraní, ktoré môžu vhodne poslúžiť pri

analyzovaní rôznych anomálií v správaní sa priehrad počas prevádzky, ale tiež pri overovaní ich bezpečnosti z hľadiska najnovších poznatkov. Do súboru faktorov, od ktorých závisí bezpečnosť priehrad patria protipriesakové opatrenia. Dostupné výsledky meraní in situ v kombinácii s numerickým modelovaním tvoria hodnotné podmienky k skvalitneniu posudzovania bezpečnosti týchto stavieb. Súčasne treba poznamenať, že miera spoľahlivosti numerického modelovania MKP je determinovaná spoľahlivosťou vstupných údajov – poznania geologickej skladby podložia.

Literatúra

- [1] Bednárová, E. Lukáč, M. Minárik, M. Bakaljarová, M. Lipták, B. Miščík, M. Panenka, P. Stoličný, J. *Priehradné staviteľstvo na Slovensku: Originality. Milníky. Zaujímavosti.* Bratislava : KUSKUS,s.r.o., 2010. ISBN 978-80-970428-0-6.
- [2] Vodohospodárska výstavba, štátny podnik. *Súhrnná etapová správa o TBD za obdobie doterajšej existencie,* Žilina 2020
- [3] Rak, R., VD Nosice – oprava vztlakomerného a odľahčovacieho systému. Žilina, IGHP 1972
- [4] Sýkora, T. *Vztlaky v podloží priehrady Nosice a ich špecifiká,* Bratislava 1999
- [5] *VD DOBŠINÁ priehrada vo Vlčej Doline inž. geolog. prieskum.* s.l. : IGHP n. p. závod Žilina, 1978.
- [6] Václavik, P. *Prehodnotenie parametrov injekčnej clony na vodnom diele Vlčia Dolina.* Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2020.
- [7] Lukáč, M. Bednárová, E. . *Nádrže a priehrady: Navrhovanie a prevádzka.* STU v Bratislave, 2001. ISBN 80-227-1518-2.



ISBN 978-80-227-5251-0

www.svf.stuba.sk