



SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering

34th 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 23th 2024, Bratislava, Slovakia

SPEKTRUM
STU

© Slovak University of Technology in Bratislava,
Faculty of Civil Engineering, 2024



Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave
vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU, Mýtna 30, 811 07 Bratislava v roku 2024

Zostavila a graficky upravila Zuzana Haššová
Na titulnej strane fasáda bloku C budovy Stavebnej fakulty, foto Tatiana Zatková

Publikácia neprešla korektúrou.

Prvé vydanie
506 strán

ISBN 978-80-227-5461-3

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 2024 was the thirty-fourth 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. Eliška Kučová, PhD.
Ing. Andrej Bartók, PhD.	doc. Ing. Peter Kyrinovič, PhD.
prof. Ing. Viktor Borzovič, PhD.	Ing. Martin Magura, PhD.
Ing. Ján Brodniansky, PhD.	Mgr. Nataliia Mahas, PhD.
doc. Ing. Peter Buday, PhD.	prof. RNDr. Radko Mesiar, DrSc.
prof. Ing. Milan Čistý, PhD.	Ing. Nora Naddourová, PhD.
Ing. Jakub Čurpek, PhD.	doc. Mgr. Martin Ondrášik, PhD.
doc. Ing. Michaela Danáčová, PhD.	doc. Ing. Martin Orfánus, PhD.
prof. Ing. Ľudovít Fillo, PhD.	Ing. Adela Palková, PhD.
Ing. Michal Franek, PhD.	Ing. Juraj Papčo, PhD.
Ing. Alena Golian-Struhárová, PhD.	Ing. Anna Predajnianska, PhD.
prof. Ing. Jaroslav Halvonik, PhD.	Ing. Robert Provazník, PhD.
Ing. Peter Hanuliak, PhD.	doc. Ing. Ivan Slávik, PhD.
Ing. Richard Honti, PhD.	Ing. Miloš Slivanský, PhD.
Ing. Jaroslav Hrudka, PhD.	doc. Ing. Róbert Sonnenschein, PhD.
doc. Ing. Ľuboš Hruštinec, PhD.	Ing. Adam Šeliga, PhD.
doc. Ing. Vojtech Chmelík, PhD.	Ing. Martin Šimko, PhD.
Ing. Gergö Ibolyan	prof. RNDr. Ivona Škultétyová, PhD.
doc. Ing. Rastislav Ingeli, PhD.	Ing. Patrik Šťastný, PhD.
doc. Ing. Oľga Ivánková, PhD.	Ing. Peter Valent, MSc., PhD.
prof. Ing. Silvia Kohnová, PhD.	doc. Ing. Roman Výleta, PhD.
doc. Ing. Daniela Koudelková, PhD.	Ing. Réka Wittmanová, PhD.
Ing. Martin Kubáň, PhD.	Ing. Michal Žeravý, PhD.

THE SCIENTIFIC BOARD

prof. Ing. Jana Frankovská, PhD.

prof. Ing. Boris Bielek, PhD.

prof. Ing. Alojz Kopáček, PhD.

prof. Ing. Milan Čistý, PhD.

prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc.

prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.

prof. Ing. Silvia Kohnová, 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

<i>Matúš Ďubek</i>	
O ZOVŠEOBECNENIACH ATANASSOVOVÝCH INTUICIONISTICKÝCH MNOŽÍN	12
<i>Juraj Kalafut</i>	
PÁR POZNÁMOK K MODELOM BIPOLÁRNEHO SPRÁVANIA	18
<i>Katarína Lacková, Peter Frolkovič</i>	
KOMPAKTNÉ SCHÉMY S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM PRE RIEŠENIE HAMILTON-JACOBI ROVNICE	24
<i>Soňa Zajícova</i>	
RHEOLOGY, RELAXATION AND RETARDATION TIMES OF CHOSEN VISCOELASTIC MODELS	32
<i>Dagmar Žáková</i>	
NUMERICAL EXPERIMENTS USING A SECOND ORDER ACCURATE COMPACT IMPLICIT NUMERICAL SCHEME FOR HYPERBOLIC CONSERVATION LAWS IN TWO DIMENSIONS	40

BUILDING TECHNOLOGY

<i>Anton Bershadskyi</i>	
NOVEL FUNCTIONAL GEOPOLYMERS BASED ON ALUMINOSILICATES: APPLICABILITY IN CIVIL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROTECTION	49
<i>Adam Hopocký</i>	
INOVATÍVNE METÓDY OŠETROVANIA BETÓNU PRE ZVÝŠENIE ŽIVOTNOSTI STAVEBNÝCH KONŠTURKCIÍ	57
<i>Artem Chystiakov</i>	
USING OF MIXED RECYCLED AGGREGATES FOR CONCRETE PRODUCTION	62
<i>Hajizah Azmi Siregar, Daniel Urban</i>	
ON THE SOUND ABSORPTION MEASUREMENT METHODS APPLICABLE FOR THE BIO-BASED MATERIALS	70

Milan Švolík

VPLYV TECHNICKÉHO STAVU PODPIER NA VEĽKOSŤ DODATOČNÉHO ZAŤAŽENIA
PRI FIXÁCIÍ

78

GEODESY AND CARTOGRAPHY

Ján Brindza

KINEMATICKÝ ZBER PRIESTOROVÝCH ÚDAJOV PRE TVORBU 3D MODELOV BUDOV

88

Lukáš Kubica

VPLYV DIGITÁLNEHO VÝŠKOVÉHO MODELU POVRCHU NA GEOLOKÁCIU PRIRODZENÝCH
TRVALÝCH ODRÁŽAČOV

95

Aset Madiev

A SCAN-VS-BIM APPROACH FOR PLANAR OBJECTS

103

Laura Pénzešová

VERTIKÁLNE POSUNY A TIAŽOVÉ ZRÝCHLENIE - KOLOKAČNÉ STANICE IGETS-GNSS

109

LANDSCAPING

Barbora Považanová

VYUŽITIE MODELOV STROJOVÉHO UČENIA PRI URČOVANÍ VODNEJ HODNOTY SNEHOVEJ
POKRÝVKY

117

Miriám Zaťovičová

VPLYV ORIENTÁCIE ULÍC NA POVRCHOVÉ TEPLoty AKO INDIKÁTOR MESTSKÝCH
TEPELNÝCH OSTROVOV

126

THEORY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY OF BUILDINGS

Lucia Hrnčárová

VPLYV VYUŽITIA ODPADOVÉHO TEPLA Z KANALIZÁCIE NA ENERGETICKÝ CERTIFIKÁT
RODINNÉHO DOMU

137

Veronika Mučková, Daniel Kalús

VÝSKUM A VÝVOJ FASÁDY S AKTÍVNOU TEPELNOU OCHRANOU

145

Martin Sokol

EXPERIMENTÁLNE MERANIE ODPAROVANIA VODY Z VODNÉHO UZÁVERU ZÁPACHOVEJ
UZÁVIERKY S VYUŽITÍM 3D TLAČE

153

Tomáš Strenk

METODIKA MERANIA VNÚTORNÝCH PRIESTOROV OBYTNÝCH BUDOV POMOCOU
LOKÁLNYCH VZDUCHOTECHNICKÝCH JEDNOTIEK 161

Angelika Václavová, Michal Krajčík

NÁSTROJE NA VÝPOČET ÚSPORY ENERGIE A UHLÍKOVEJ STOPY PRI OBNOVE BUDOV 168

THEORY AND STRUCTURES OF BUILDINGS

Lubomír Adamec

ŠTÚDIA POROVNANIA TROCH TYPOV ZASKLENÍ V RÁMCI PREHRIEVANIA BUDOV
V SIMULAČNOM PROGRAME VOLTRA 177

Alžbeta Danková

POSÚDENIE EXPERIMENTÁLNEJ DVOJITEJ TRANSPARENTNEJ FASÁDY Z HĽADISKA
DOSTUPNOSTI DENNÉHO SVETLA 184

Peter Dúbravka

ANALÝZA ALTERNATÍV UMIESTNENIA HYGIENICKÉHO ZÁZEMIA V KONTEXTE
MODERNIZÁCIE LÔŽKOVEJ ČASTI NEMOCNICE, S OHLADOM NA DOCHÁDZKOVÚ
VZDIALENOSŤ OŠETROVATEĽSKÝCH SESTIER K LÔŽKAM 200

Tomáš Hakszer

VPLYV LISTNANÝCH STROMOV V SIMULAČNÝCH METÓDACH BUDOV –
ŠTÚDIA KANCELÁRSKEJ BUDOVY 212

Patrícia Jánošková

VPLYV VONKAJŠÍCH TIENIACICH PRVKOV NA TEPELNÚ POHODU 226

Martina Kalivodová

VPLYV ENERGETICKEJ HOSPODÁRNOSTI BUDOV NA VYBRANÉ CHARAKTERISTICKÉ PRVKY
VERNAKULÁRNEJ ARCHITEKTÚRY V PROCESE JEJ OBNOVY 236

Anežka Kašiarová

VPLYV LITURGICKEJ REFORMY NA AKUSTIKU INTERIÉROV HISTORICKÝCH KOSTOLOV 244

Magdaléna Kaššáková

VPLYV RÔZNYCH PÔDORYSOV NA AKUSTICKÝ KOMFORT V MALOM ÁTRIU 253

Jozef Olašák

KLIMATICKÝ PRÍNOS VEGETAČNÝCH STRIECH 261

Jana Pijáková

VALORIZÁCIA ODPADU Z BAUXITU V STAVEBNÍCTVE 269

Nancy Sedláčková
BIO-KOMPOZITNÁ TEPELNÁ IZOLÁCIA NA BÁZE SLNEČNICOVEJ DRENE:
MERANIE TEPELNOIZOLAČNÝCH VLASTNOSTÍ 277

Zuzana Šišková
ARCHITEKTONICKÉ VZORCE LE CORBUSIERA 284

Michal Šveda
OPTIMALIZÁCIA PREVÁDZKY TEPELNÉHO ČERPADLA V SYSTÉME S DVOJITOU
TRANSPARENTNOU FASÁDOU 292

THEORY AND STRUCTURES OF CIVIL ENGINEERING WORKS

Daniel Beutelhauser
MERANIE DYNAMICKÉHO SPRÁVANIA VYLAHČENEJ STROPNEJ DOSKY 303

Roman Červenka
ANALÝZA A EKONOMICKÉ POROVNANIE NÁVRHOV OCELOVÝCH STĹPOV
V POŽIARNEJ SITUACII 310

Tadeáš Fecko
VYHODNOTENIE PILOTNÝCH EXPERIMENTOV PRETLAČENIA LOKÁLNE PODOPRETÝCH
DOSIEK VYROBENÝCH Z BETÓNU S OBSAHOM HRUBÉHO RECYKLOVANÉHO KAMENIVA 319

Zuzana Haššová
VYUŽITIE VYSOKOPEVNOSTNÝCH PREDPÍNACÍCH LÁN V BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÁCH 328

Matej Jurgoš
PROCES VÝVOJA BETÓNOVEJ SAMOZHUTNITELNEJ ZMESI Z RECYKLOVANÉHO KAMENIVA 336

Michal Kázsmér
NÁVRH EXPERIMENTU PRE ZOSILNENIE PANELA Z KRÍŽOM LEPENÉHO LAMELOVÉHO
DREVA NA ÚČINKY PRETLAČENIA POMOCO VLEPOVANÝCH OCELOVÝCH PLATNÍ 344

Anna Kováčová
PRÍPRAVA EXPERIMENTU ŠTÍHLÝCH BETÓNOVÝCH STĹPOV PRI STRATE STABILITY 352

Silvia Martinkovičová
STATICKÉ PÔSOBENIE KROVOV Z HLADISKA ICH HISTORICKÉHO VÝVINU 357

Muhammad Mohsin
UDRŽATELNÉ RIEŠENIA NA ZLEPŠENIE ZEMÍN 365

Lucia Ondrašínová	ALTERNATÍVNE PRÍSTUPY STANOVENIA UVANOVEJ ZOSTATKOVEJ ŽIVOTNOSTI PREVZATÉ Z HISTORICKÝCH PREPRÁV NA MOSTOCH	373
Ján Pecka	EXPERIMENTÁLNE OVERENIE ZOSILNENIA ŠTÍHLÝCH ŽELEZOBETÓNOVÝCH STĹPOV CFRP LAMELAMI	379
Dana Tomajková	VPLYV POUŽITEJ VÝPOČTOVEJ METÓDY A DEFORMAČNÝCH CHARAKTERISTÍK NA VÝPOČET KONEČNÉHO SADNUTIA PLOŠNEJ ZÁKLADOVEJ KONŠTRUKCIE	386
Bahman Zarazvand	3D NUMERICKÉ MODELOVANIE KOMBINOVANÝCH ZÁKLADOV: SKÚMANIE DISTRIBÚCIE ZAŤAŽENIA NA ZÁKLADĚ PARAMETROV ZÁKLADU	394
Asad Zia, Ivan Hollý	ENHANCING MECHANICAL AND TOUGHNESS PROPERTIES OF CONCRETE USING INDUSTRIAL AND WASTE TIRE STEEL FIBERS: A HYBRID FIBER APPROACH	410

WATER RESOURCES ENGINEERING

Wael Almikaeel	HODNOTENIE ŠTATISTICKÝCH ROZDELENÍ DENNÝCH PRIETOKOV: POSTREHY Z NORMÁLNYCH, MOKRÝCH A SUCHÝCH ROKOV	417
Raghad Awad	HODNOTENIE EFEKTÍVNOSTI HOSPODÁRENIA SO ZRÁŽKOVOU VODOU POMOCOU RACIONÁLNEJ METÓDY A PROGRAMOVANIA R	424
Jana Grečnárová	LABORATÓRNA ANALÝZA RETENČNÝCH VLASTNOSTÍ STREŠNÉHO SUBSTRÁTU PRI RÔZNYCH VLNKOSTNÝCH PODMIENKACH	436
Adam Kollár	MATEMATICKÉ MODELOVANIE A SPRÁVA ODPADOVÝCH VÔD V URBANIZOVANÝCH OBLASTIACH	444
Anna Liová	JEDNODUCHÝ VS. KOMPLEXNÝ PRÍSTUP STANOVENIA PRIETOKOV DO VODNEJ NÁDRŽE LIPTOVSKÁ MARA	452
Martin Meliška	VÝZNAM DOMOVÝCH ČISTIARNÍ ODPADOVÝCH VÔD PRE UDRŽATELNOSŤ: DIGITALIZÁCIA A RIEŠENIE SÚČASNÝCH VÝZIEV	458

Lynda Paulíková

POROVNANIE METÓD ODHADU VRCHOLOVÉHO SÚČINITEĽA ODTOKU V NÍŽINNÝCH
LOKALITÁCH (PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA: ZÁPADNÉ SLOVENSKO)

466

Maksim Portnov

MODRO-ZELENÁ INFRAŠTRUKTÚRA A JEJ VPLYV NA ODLAHČOVACIE KOMORY
A KVALITU ODLAHČOVANÝCH VÔD

475

Mitra Tanhapour

CALIBRATION-FOCUSED STUDY OF THE HYDROLOGICAL MODEL UNDER
SUB-DECADES TIME PERIODS

483

Matúš Tomaščík

ANALÝZA ODTOKOVÝCH POMEROV V OBCI SMREČANY

491

Alexandra Vidová

SIMULÁCIA PRÚDENIA V PRÍRODE BLÍZKOM RYBOVODE

499

APPLIED MATHEMATICS

Matúš Ďubek¹

Študijný program: Aplikovaná matematika, 2. ročník

O ZOVŠEOBECNENIACH ATANASSOVÝCH INTUICIONISTICKÝCH MNOŽÍN

ON GENERALIZATIONS OF ATANASSOV'S INTUITIONISTIC SETS

Abstract

Intuitionistic fuzzy sets are a model that capture membership, non-membership and hesitancy with an individual approach. Since the introduction of the original intuitionistic fuzzy sets, many generalizations of such models were made with the claim of allowing more flexibility. Even though these models are mathematically correct, they are missing a proper motivation and support for their claims. We introduce a new approach based on automorphism that not only, in some sense, justifies the known models, but also completes the system of models in the sense of isomorphisms and clears some disputed questions.

Kľúčové slová / Key Words

Intuitionistic fuzzy set; Strong negation; Automorphism.

1. Introduction

In 1965, L.A. Zadeh introduced fuzzy sets as a new approach to handle imprecision of defined criteria for membership to capture vague terms like “the class of tall men” or “the class of beautiful women” [1]. His approach was to identify each fuzzy set A with a membership function $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ that determines to what degree any element of the universe of discourse, X , belongs to A . The complement of fuzzy sets was defined by the function by $\nu_A(x) = 1 - \mu_A(x)$ and the intersection and union of two fuzzy sets were defined by minimum and maximum functions, respectively. Later, triangular norms (t-norms), i.e. commutative, associative and non-decreasing functions on $[0,1]$ with neutral element 1 and triangular conorms (t-conorms), i.e. commutative, associative and non-decreasing functions on $[0,1]$ with neutral element 0, became a popular alternative to intersection and union operators. Among them, so called continuous Archimedean t-norms (t-conorms) satisfying the inequality $T(x, x) < x$ ($S(x, x) > x$) for all $x \in]0,1[$, became the most important ones.

This framework was generalized by Krasimir Atanasov in 1983 with the name intuitionistic fuzzy sets [2]. He enriched the framework by considering the degree of membership μ and degree of non-membership ν as two separate values, with the condition $\mu(x) + \nu(x) \leq 1$ to tie the values together. Since the membership and non-membership does not have to add to one, some hesitancy in the information itself is allowed. In this contribution, we recall several attempts to generalize the intuitionistic fuzzy sets and provide a framework that shows that, in fact, they were no true generalizations.

¹ Matúš, Ďubek, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Atanassov's intuitionistic fuzzy sets

An intuitionistic fuzzy set introduced by Atanassov is a fuzzy set A defined over universe of discourse X given by $A = \{x, \mu_A(x), \nu_A(x), |x \in X\}$ with condition $\mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1$ satisfied for every x . As mentioned before, $\mu(x), \nu(x)$ stands for the membership and non-membership degree, respectively. Note that if $\mu_A(x) + \nu_A(x) = 1$ for every x , the fuzzy intuitionistic set is equivalent to a classical fuzzy set with membership degree $\mu(x)$. For these fuzzy sets, Atanassov proposed several operators, specifically negation, standard intersection \cap and union \cup , and a pseudo-multiplication \odot and pseudo-addition \oplus as an alternative to them. These operations were defined as following:

$$\begin{aligned} A^c &= \{x, \nu_A(x), \mu_A(x) | x \in X\}, \\ A \cap B &= \{x, \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), \max(\nu_A(x), \nu_B(x)) | x \in X\}, \\ A \cup B &= \{x, \max(\mu_A(x), \mu_B(x)), \min(\nu_A(x), \nu_B(x)) | x \in X\}, \\ A \odot B &= \{x, \mu_A(x)\mu_B(x), \nu_A(x) + \nu_B(x) - \nu_A(x)\nu_B(x) | x \in X\}, \\ A \oplus B &= \{x, \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x), \nu_A(x)\nu_B(x) | x \in X\}. \end{aligned}$$

It is clear that the pseudo-multiplication and pseudo-addition were defined using the product t-norm and the probabilistic sum t-conorm.

Later, there were multiple attempts to generalize this framework, all based on expanding the domain for which the inequality $\mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1$ holds to increase the flexibility of the framework. These attempts resulted in the introduction of q-rung orthopair fuzzy sets, described in the following section.

3. Orthopair fuzzy sets

After a longer period, in 2013, there was a new type of fuzzy sets defined – Pythagorean fuzzy sets [3], inspired by the famous Pythagorean theorem. The main idea was to increase the domain of Atanassov's intuitionistic fuzzy sets by expanding the domain with the squares, i.e., changing the required inequality to $\mu_A^2(x) + \nu_A^2(x) \leq 1$.

The negation, standard intersection and union remained the same. In the pseudo-multiplication and pseudo-addition, a change was made to preserve closedness of these operations:

$$\begin{aligned} A \odot B &= \{x, \mu_A(x)\mu_B(x), (\nu_A^2(x) + \nu_B^2(x) - \nu_A^2(x)\nu_B^2(x))^{\frac{1}{2}}, | x \in X\} \\ A \oplus B &= \{x, (\mu_A^2(x) + \mu_B^2(x) - \mu_A^2(x)\mu_B^2(x))^{\frac{1}{2}}, \nu_A(x)\nu_B(x) | x \in X\} \end{aligned}$$

Although the domain of the membership and non-membership degrees of these fuzzy sets expanded from triangle under the secondary diagonal to the first quadrant of the unit circle, the claim that this change increases the flexibility of the model is not strongly supported, as the key thing is not just the range of the values one can choose from, but their interpretation.

Later, in 2017 the authors expanded this idea with the use of an arbitrary positive exponent q , resulting in the definition of q-rang orthopair fuzzy sets [4] equipped with the condition $\mu^q + \nu^q \leq 1$. The main motivation was to further increase the domain up to the full unit square as q approaches infinity. Strangely, one year later some authors decided to study the instance when $q = 3$ separately,

despite the fact that there were no specific properties in this case, naming the framework Fermatean fuzzy sets [5].

All this development led to a lot of repetitions in the theoretical advancement, as the proofs for common properties of the operations defined over these types of fuzzy sets, such as commutativity, associativity, modularity etc., were rewritten for each framework. In addition to multiple frameworks with the same idea, a lot of authors began to change the pseudo-addition and pseudo-intersection operators using different strict t-norms and t-conorms and again, they studied their properties despite the isomorphism between all strict Archimedean t-norms.

4. Generalization of Atanassov's intuitionistic fuzzy sets based on automorphism

All the types of fuzzy sets mentioned in the previous chapter have one idea in common– they transform the values of membership and non-membership degree with a power function. However, this is not the only function one can consider. First, note that the required condition for the q-rung orthopair fuzzy sets can be rewritten as

$$v(x) \leq (1 - \mu(x)^q)^{\frac{1}{q}}, \quad (1)$$

meaning the non-membership is bounded by the Yager negation of the membership degree. This negation can be replaced by any other strong negation n , i.e., strictly decreasing involutive function that is defined over the unit interval. Thanks to the results of Trillas [6], it is known that all strong negations can be obtained from a non-decreasing function $\varphi: [0,1] \rightarrow [0,1]$ that satisfies $\varphi(0) = 0$ and $\varphi(1) = 1$, which is an automorphism of the unit interval, by the formula

$$n(x) = \varphi^{-1}(1 - \varphi(x)).$$

By applying this to the inequality (1), and rearranging it thanks to the increasing property of φ , one can obtain a requirement for the general framework of φ -intuitionistic sets [7], given by

$$\varphi(\mu_A(x)) + \varphi(v_A(x)) \leq 1.$$

Note that when using this approach, the domain can be smaller than the one in the original Atanassov's intuitionistic fuzzy sets, whenever one considers a function that is convex on its whole domain. However, it is evident that all considered domains have the same cardinality.

Again, the standard negation, intersection and union remains the same as these were in the case of the original Atanassov intuitionistic fuzzy sets. The pseudo-multiplication and pseudo-addition are defined by

$$\begin{aligned} A \odot B &= \{x, \varphi^{-1}(T(\varphi(\mu_A(x)), \varphi(\mu_B(x))), \varphi^{-1}(S(\varphi(v_A(x)), \varphi(v_B(x)))) \mid x \in X\} \\ A \oplus B &= \{x, \varphi^{-1}(S(\varphi(\mu_A(x)), \varphi(\mu_B(x))), \varphi^{-1}(T(\varphi(v_A(x)), \varphi(v_B(x)))) \mid x \in X\} \end{aligned}$$

where T and S stands for a strict (nilpotent) t-norm and its dual t-conorm, respectively. This approach solves the issue with repetitiveness, as it uses general formulas instead of specific instances of t-norms, t-conorms and automorphisms. It is clear that all known types of fuzzy sets and their operations are covered by this framework. We will address this in the following section.

5. Reconstruction of common frameworks and critique of the current direction of research

As stated before, the framework of q-rung orthopair fuzzy sets and their special cases, such as Pythagorean fuzzy sets, are all instances of φ -intuitionistic fuzzy sets defined by a power function as the automorphism of choice. The framework is then completed by the choice of a t-norm and a t-conorm used in the pseudo-multiplication and pseudo-addition. These reconstructions are summed up in the following table:

Table 3: Some known types of φ -intuitionistic values .

Framework	Automorphism	t-norm and t-conorm
Original Atanassov intuitionistic fuzzy sets [2]	$\varphi(x) = x$	$T(x, y) = xy$ $S(x, y) = x + y - xy$
Original Pythagorean fuzzy sets [3]	$\varphi(x) = x^2$	$T(x, y) = xy$ $S(x, y) = x + y - xy$
Original q-rung orthopair fuzzy sets [4]	$\varphi(x) = x^q$	$T(x, y) = xy$ $S(x, y) = x + y - xy$
Original Fermatean fuzzy sets [5]	$\varphi(x) = x^3$	$T(x, y) = xy$ $S(x, y) = x + y - xy$
Intuitionistic fuzzy sets with Einstein operators [8]	$\varphi(x) = x$	$T(x, y) = \frac{x + y}{1 + xy}$ $S(x, y) = \frac{xy}{1 + (1 - x)(1 - y)}$
Intuitionistic fuzzy sets with Dombi operators [9]	$\varphi(x) = x$	$T(x, y) = \frac{1}{1 + \left(\left(\frac{1-x}{x}\right)^m + \left(\frac{1-y}{y}\right)^m\right)^{\frac{1}{m}}}$ $S(x, y) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\left(\frac{x}{1-x}\right)^m + \left(\frac{y}{1-y}\right)^m\right)^{\frac{1}{m}}}$
Intuitionistic fuzzy sets with Aczel-Alsina operators [10]	$\varphi(x) = x$	$T(x, y) = e^{-((-\log(x))^m + (-\log(y))^m)^{\frac{1}{m}}}$ $S(x, y) = 1 - e^{-((-\log(1-x))^m + (-\log(1-y))^m)^{\frac{1}{m}}}$
Pythagorean fuzzy sets with Einstein operators [11]	$\varphi(x) = x^2$	$T(x, y) = \frac{x + y}{1 + xy}$ $S(x, y) = \frac{xy}{1 + (1 - x)(1 - y)}$
Pythagorean fuzzy sets with Aczel-Alsina operators [12]	$\varphi(x) = x^2$	$T(x, y) = e^{-((-\log(x))^m + (-\log(y))^m)^{\frac{1}{m}}}$ $S(x, y) = 1 - e^{-((-\log(1-x))^m + (-\log(1-y))^m)^{\frac{1}{m}}}$

This table is, of course, not complete, as the field became so overwhelmed by the number of articles about such different types of fuzzy sets and operations that it is almost impossible to find all the distinctive types.

In recent years, orthopair fuzzy sets became very popular, confirmed by the quantity of both researchers and papers. For example, according to [13], there were 354 articles between years 2013 and 2020 about Pythagorean fuzzy sets, mostly written by Chinese authors, focusing mainly on applications. The review also points out that this trend seems to be exponential, as there were only nine articles in years 2013-2015, but by the year 2018, their count increased to 175 and the year 2019 alone exceeded this number with 179 articles. Similar observations were made in [14], where 152 articles about Fermatean fuzzy sets in Q1 and Q2 journals written between 2019 and 2023 were reviewed. It is reasonable to predict that these numbers will continue to grow in the following years.

Despite all these frameworks being mathematically correct and applicable, the repetition in their theoretical results should be criticized. Not only that, but the current state of this field is also full of misleading claims. Our critique can be summed up in the following points:

- None of the current „generalizations“ of classical Atanassov’s intuitionistic fuzzy set are true generalizations, as they are all specific instances of φ -intuitionistic fuzzy sets that are isomorphic to each other. The claim that they generalize intuitionistic fuzzy sets was made because of the enlargement of their domain, but that does not mean that they generalized them.
- The repetitiveness in the theoretical articles about different types of orthopair fuzzy sets is unnecessary, as there is no reason to focus on specific t-norm, t-conorm and automorphism in their research.
- Despite their popularity, there were no methods concerning choosing the optimal power when using q-rung fuzzy sets – in applications, the authors usually choose this number arbitrarily.
- The focus of these generalizations should not be on the size of their domain, but on the relationship between membership and non-membership, i.e., the strong negation outlining the domain. This is supported by the fact that using convex automorphisms will decrease the size of the domain.
- Although the use of power function as automorphism is correct, it is a pity that no other automorphisms are being explored.

6. Conclusions

In this paper, we discussed the state of the art in the generalization of Atanassov’s intuitionistic fuzzy sets. We provided a unified framework based on automorphisms, i.e. generators of strong negations that covers all the recent types of fuzzy sets that claimed to be generalizations of intuitionistic fuzzy sets and discussed the gaps in their approach. We hope that our approach will prevent further repetitions in the field and enrich it using different strong negations.

7. Literature

- [1] Zadeh L.A.: Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965, vol. 8, no. 3, pp. 338-353. ISSN 01650114.
- [2] Atanassov K. T.: Intuitionistic Fuzzy Sets. *VII ITKR Session*, Sofia, 20-23 June 1983.
- [3] Yager R. R.: Pythagorean Membership Grades in Multicriteria Decision Making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2014, vol. 22, no. 4, pp. 958-965.
- [4] Yager R. R.: Generalized Orthopair Fuzzy Sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2017, vol. 25, no. 5, pp. 1222-1230.
- [5] Senapati T, Yager R. R.: Fermatean fuzzy sets. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2020, vol. 11, no. 2, pp. 663-674. ISSN 18685145.
- [6] Trillas E.: Sobre funciones de negación en la teoría de conjuntos difusos. *Stochastica*. 1979, vol. 3, no. 1, pp. 47-60.
- [7] Ďubek M., Šeliga A.: General framework for intuitionistic values and related fuzzy sets based on automorphisms (*submitted*).
- [8] Wang W., Liu X.: Some operations over Atanassov's intuitionistic fuzzy sets based on Einstein t-norm and t-conorm. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2013, vol. 21, no. 2, pp. 263-276. ISSN 02184885.
- [9] Seikh M. R., Mandal, U.: Intuitionistic fuzzy Dombi aggregation operators and their application to multiple attribute decision-making. *Granular Computing*. 2021, vol. 6, no. 3, pp. 473-488. ISSN 23644974.
- [10] Senapati T, Chen G., Yager R. R.: Aczel–Alsina aggregation operators and their application to intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making. *International Journal of Intelligent Systems*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 1529-1551. ISSN 08848173.
- [11] Garg H.: A New Generalized Pythagorean Fuzzy Information Aggregation Using Einstein Operations and Its Application to Decision Making. *International Journal of Intelligent Systems*. 2016, vol. 31, no. 9, pp. 886-920. ISSN 08848173.
- [12] Hussain A., Ullah K., Alshahrani M. N., Yang M., Pamucar D.: Novel Aczel–Alsina Operators for Pythagorean Fuzzy Sets with Application in Multi-Attribute Decision Making. *Symmetry*. 2022, vol. 14, no. 5. ISSN 20738994.
- [13] Büyüközkan G., Uztürk D., Ilıcak Ö.: Fermatean fuzzy sets and its extensions: a systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*. 2024, vol. 57, no. 6, pp. 138. ISSN 15737462.
- [14] Lin M., Chen Y., Chen R.: Bibliometric analysis on Pythagorean fuzzy sets during 2013–2020. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*. 2021, vol. 14, no. 2, pp. 104-121. ISSN 1756378X.

Juraj Kalafut¹

Študijný program: Aplikovaná matematika, 3. ročník

PÁR POZNÁMOK K MODELOM BIPOLÁRNEHO SPRÁVANIA

A FEW NOTES ON MODELS OF BIPOLAR BEHAVIOR

Abstract

Many real-life models exhibit bipolar behavior, characterized by a preference for positive aspects and rejection of negative ones. Associative uninorms and pseudo-uninorms on the unit interval have traditionally been used to model such behavior. However, these approaches face certain limitations, which we address in this paper. We introduce a new class of binary functions that better captures bipolar behavior and explore the potential for extending this framework to more general, non-linear problems.

Kľúčové slová / Key Words

Bipolar functions; Uninorms; Grouping functions; Overlap functions; Unifunctions; Continuity; Lattices

1. Introduction

Uninorms were originally defined by Yager and Rybalov [1] as a unified basis for t-norms and t-conorms. Their behavior is conjunctive on the domain $[0, e]^2$, disjunctive on $[e, 1]^2$ and averaging otherwise. This, together with their associativity, brought them more into focus due to their ability to model bipolar decisions. To fill the gap where the decision maker is time-dependent, we dealt with pseudo-uninorms on the unit interval, which are the non-commutative versions of uninorms in our previous studies [2,3].

In these works, the limits of the associative approach appear. First of all, there is no single pseudo-uninorm that is continuous on the whole unit square, and continuity is usually required for its stability in computations. Moreover, the time-dependent behavior is strongly restricted, so that the non-commutativity of the pseudo-uninorm only applies to the characteristic set-valued function [3]. Finally, the need for associativity may be unnecessary of many cases of applications.

This contribution aims to stimulate a debate on the potential for adopting alternative approaches.

2. Bipolar behavior on the unit interval

We will consider the interval $[-1, 1]$. Although it is isomorphic to the unit interval, the following considerations are more natural on the interval $[-1, 1]$ than on the unit interval. The value 0 represents the indifferent state of the decision maker. On the one hand, values above 0 are positive from this point of view, and on the other hand, values below 0 are negative. Consider an issue that is viewed by the decision maker in two different inputs, and in each of them it can be perceived as either negative or positive with values in $[-1, 1]$. The natural property is that if both inputs are perceived

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

positively, then the issue as such is perceived at least as positive as the better of the inputs. This can be understood as a positive addition to a better input. On the other hand, if both are negative, then the issue as a whole is seen as more negative. Finally, if one is positive and the other negative, then the issue is somewhere in between.

Uninorms and pseudo-uninorms modestly model this bipolar behavior. In addition, associativity allows us to extend the number of perceived domains. However, due to their discontinuity [4], the decision maker makes sharp decisions in the sense that even a small change in quality can lead to a great change from disapproval to approval and vice versa. The other problem is the inability of pseudo-uninorms to represent the importance of the respective domains since the set of points of non-commutativity is very limited [3]. In the following section, we will discuss ways to overcome these problems.

3. Proposals for solutions

In the following, we will drop the axiom of associativity in order to preserve the other important properties of uninorms on $[-1,1]^2$. The structure of the associative uninorm U with the neutral element 0 is as follows.

- U restricted to $[0,1]^2$ is isomorphic to a t-conorm, which is called the underlying t-conorm.
- U restricted to $[-1,0]^2$ is isomorphic to a t-norm, which is called the underlying t-norm.
- For $(x, y) \in A(0) = [-1,0] \times [0,1] \cup [0,1] \times [-1,0]$, $\min(x, y) \leq U(x, y) \leq \max(x, y)$ holds.

The last constraint is implied by monotonicity and the existence of the neutral element 0. Thus, if we drop the axiom of commutativity, then such a function will satisfy all the assumptions of bipolar behavior. However, if we drop the axiom of associativity, the underlying functions are no longer required to be t-norms nor t-conorms. Instead, we can think in terms of a more general framework since our main goal is to obtain continuous non-decreasing functions, which are conjunctive below 0, disjunctive above 0, and otherwise averaging.

The class of continuous functions covering continuous t-norms are overlap functions [5] or pseudo-overlap functions [6] if commutativity is not preserved. Similarly, grouping functions [7] or pseudo-grouping functions [6] are extensions of continuous t-conorms. Therefore, we propose binary functions F which are non-decreasing, continuous and their restriction to $[-1,0]^2$ is isomorphic to (pseudo)-overlapping functions, and its restriction to $[0,1]^2$ is isomorphic to (pseudo)-grouping functions. We will call F a (pseudo)-unifunction.

Note that due to the continuity and monotonicity of a pseudo-unifunction, F is conjunctive on $[-1,0]^2$, disjunctive on $[0,1]^2$, and averaging if and only if 0 is the neutral element of F . A (pseudo)-unifunction F is called a strong (pseudo)-unifunction if F has the neutral element 0. To emphasize that we are not talking about a strong (pseudo)-unifunction, we will sometimes use the notation of a weak (pseudo)-unifunction.

However, the class of weak (pseudo)-unifunctions is still worth studying, since its restriction to $[0,1] \times [-1,0]$ is a bipolar function, since the restriction trivially satisfies monotonicity and the boundary conditions ($F(0,0) = 0$, $F(1,0) = 1$, $F(0,-1) = -1$).

Example 1

Let S be a continuous t-conorm. Consider a binary function $F: [-1,1]^2 \rightarrow [-1,1]$ given by

$$F(x, y) = \begin{cases} S(x, y), & \text{if } (x, y) \in [0,1]^2 \\ -S(-x, -y), & \text{if } (x, y) \in [-1,0]^2 \\ f(x, y), & \text{otherwise.} \end{cases}$$

- If $f(x, y) = \min(x, y)$ then F is a uninorm with the neutral element 0, but not a unifunction.
- If $f(x, y) = x + y$ then F is a (weak) unifunction, but not a uninorm.
- If $f(x, y) = \begin{cases} x + y & \text{if } x \leq 0 \\ \sqrt[3]{x^3 + y^3} & \text{otherwise} \end{cases}$ then F is a (weak) pseudo-unifunction, but not a unifunction nor a pseudo-uninorm.
- If $f(x, y) = \begin{cases} \min(x, y) & \text{if } x \leq 0 \\ \max(x, y) & \text{otherwise} \end{cases}$ then F is not a pseudo-unifunction, nor a pseudo-uninorm.

Note that in all four cases F restricted to $A(0)$ is a bipolar function, which is averaging in behavior.

4. Non-linear bipolar behavior

So far, we have discussed the situation of bipolar behavior on a linear scale. However, replacing the scale by a lattice can cover even more peculiar cases. For a better illustration of the situation, we offer the following example.

Example 2

Consider a test with n yes or no questions. If we consider only the correct answers, we can obtain a set X , which is a subset of the set of questions in the test, denoted by $N = \{1, 2, \dots, n\}$. If we compare the test of two people according to their set of correct answers, we can say with certainty that the person with test X is better than the person with test Y if only if $Y \subset X$. Thus, we can consider the lattice of positive impressions as $L = L^+ = \mathcal{P}(N)$, where $\mathcal{P}(X)$ denotes the power set of X . In contrast to the linear scale in this model, we are able to take into account that the knowledge of the field is not comparable, but significantly different or even complementary.

However, the teacher can also consider wrong answers. Note that they are actually different from blank answers, where the former can be understood as incorrect knowledge in the area studied and the latter as the area that is simply unknown. This is especially interesting when general knowledge in a certain area is needed to refute some traditional myths in society, where attitudes play an important role. Obviously, more wrong answers lead to lower scores.

We now want to aggregate this information to determine whether the result is negative or positive and how strongly it applies to a particular person.

Similar problems arise when considering a product or person that meets, fails to meet, or violates certain criteria, all of which may appear to be different settings for the same mathematical model.

Example 2 shows us a setup that is not covered by the linear scale. Following the steps of our discussion on a linear scale, we want to extend the setup for finite lattices as well. We will assume that L is a finite lattice representing the set of all perceptions. Each perception can be either positive or negative. The set of positive and negative perceptions will be denoted by L^+ and L^- , respectively.

L^+ coincides with the lattice L equipped with \leq and L^- coincides with the lattice L equipped with the reverse order \geq . For simplicity, we assume that the greatest element of L^- is the lowest element of L^+ . Since it is unique, we will denote it by 0. As in the case of the linear scale, in this setup 0 represents an indifferent state, neither positive nor negative. Moreover, for $x \in L$ we will use the upper index + or - to distinguish whether $x^+ \in L^+$ or $x^- \in L^-$.

5. Uninorms and pseudo-uninorms on finite lattices

Uninorms were extended to bounded lattices in [8]. Later, more attention was given to idempotent uninorms. For us, a particular characterization of idempotent uninorms on bounded lattices where $I_e = \emptyset$ proposed by Mesiarová-Zemánková et al. [9,10] is of special interest, since it covers the case of uninorms on $(L^+ \cup L^-)$ with neutral element 0. If we extend this result to idempotent pseudo-uninorms, we see that every idempotent uninorm with $I_e = \emptyset$ can be constructed as Clifford's ordinal sum of meet semilattices, join semilattices and projections to one of the coordinates on the two-point set [11].

However, there is no unique way to extend continuity to finite lattices. For t-norms on finite scales, several possibilities were proposed [12].

1. A t-norm T is smooth if $|T(x, y) - T(x - 1, y)| \leq 1$ for each $x, y \in N$
2. A t-norm T is 1-Lipschitz, if $|T(x, z) - T(y, z)| \leq |y - z|$ for each $x, y, z \in N$.
3. A t-norm T has intermediate value property when $T(x, z) \leq s \leq T(y, z)$ holds if and only if there exists some $t \in [\min(x, y), \max(x, y)]$ such that $T(t, z) = s$.
4. A t-norm T is divisible if for all $x, y \in N$ such that $x \leq y$ there exists $z \in N$ such that $T(y, z) = x$.

In [13] it was shown that these properties are equivalent for t-norms on finite chains. Nevertheless, a deeper investigation of divisible t-norms on more general finite lattices is still missing. In our future work, we aim to characterize divisible t-norms on finite lattices, since the other approaches are questionable for the case of lattices. Similarly, uninorms with divisible underlying functions have only been discussed for chains in [3] and [14].

6. Bipolar functions on finite lattices

Consider L^+ and L^- as in the fourth chapter. Then a function $B: L^+ \times L^- \rightarrow L^+ \cup L^-$ is called a bipolar function if B is non-decreasing in the first coordinate, non-increasing in the second, and satisfies boundary conditions, i.e., $B(0, -1) = -1$, $B(1, 0) = 1$, and $B(0, 0) = 0$. We will pay special attention to the following properties of bipolar functions.

1. A bipolar function B has a neutral element 0 if $B(x^+, 0) = x^+$ and $B(0, x^-) = x^-$ for each $x \in L$.
2. A bipolar function B is odd if $B(x^+, y^-) = d(B(y^-, x^+))$ for each $x, y \in L$ and where d is a duality function from L^+ to L^- and vice versa, i.e., it assigns x^+ to x^- and vice versa, i.e., $d(x^+) = x^-$ and $d(x^-) = x^+$.

We want to extend the notion of continuity to bipolar functions on finite lattices. For this particular case, the most suitable concepts are intermediate value and smoothness, which have to be redefined accordingly.

3. A bipolar function B is smooth if $x < y$ implies $B(x^+, z^-) \leq B(y^+, z^-)$ and $B(z^+, y^-) \leq B(z^+, x^-)$ for each $z \in L$ where $x < y$ stands for x is an immediate predecessor of y .

When we considered smooth bipolar functions with the neutral element 0, we found strong connections between the length of the shortest path to the points of L and the value of the bipolar function in these points. Note that for some finite lattices, there may be no smooth bipolar function with the neutral element.

Example 3

We will now continue in Example 2. Consider a survey of a group of people on the following two (just for the sake of simplicity) questions.

1. Do you think that Earth is flat in its shape?
2. Does vaccination cause a change in your genetics?

There are nine possible outcomes of this survey, each represented as a combination of wrong, correct and blank answer to one of the questions. Though the blank answer is not correct, the opinion of the responder does not exist and therefore he can be more easily persuaded than the responder with the opinion connected to the wrong answer. The classic linear model is then unable to distinguish between the respective questions. Just consider a pair of responders. Both of them have one correct and one blank answer. However, if these answers differ then the reeducation has to follow a diverse approach that focuses on the respective blank answer.

The following table represents the values of a smooth odd bipolar function in this setup. Observe that windows, which are left empty represent the non-achievable state and hence are omitted.

		0 correct answers	1 st answer cor.	2 nd answer cor.	All answers cor.
		0	x_1^+	x_2^+	1^+
0 wrong answers	0	0	x_1^+	x_2^+	1^+
1 st answer wr.	x_1^-	x_1^-		0	
2 nd answer wr.	x_2^-	x_2^-	0		
All answer wr.	1^-	1^-			

7. Conclusions

In this paper, we discussed the connection between uninorms and bipolar scales. We pointed out the limitations of the associative approach. Thus, an alternative binary function is proposed, which like the concept of uninorm covers t-norms and t-conorms, covers grouping and overlap functions.

In the second part of the paper, we wrote about scales based on finite lattices and the open problems for uninorms and bipolar functions. We discussed the extension of continuity to finite lattices since the definition of unification and pseudo-unification on a finite lattice is strongly dependent on continuity. The restriction of unification in the respective quadrants is either a bipolar function or an overlapping or grouping function. Note that a similar redefinition was done for semi-t-operators on bounded lattices in [15], which started the growing interest in the study of semi-t-operators on bounded lattices. We hope that our short contribution will lead to similar progress in research in this area.

8. Literature

- [1] Yager R.R., Rybalov A.: Uninorm aggregation operators. *Fuzzy Sets and Systems*. 1996, č. 80(1), s. 111-120. ISSN 01650114.
- [2] Mesiarová-Zemánková A., Kalafut J.: Pseudo-uninorms with continuous Archimedean underlying functions. *Fuzzy Sets and Systems*. 2023, č. 471, 108674. ISSN 01650114.
- [3] Kalafut J., Mesiarová-Zemánková A.: Decomposition of pseudo-uninorms with continuous underlying functions via ordinal sum. (*under review*).
- [4] Mesiarová-Zemánková A.: Characterization of Uninorms with Continuous Underlying T-norm and T-conorm by Their Set of Discontinuity Points. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018, roč. 26, č. 2, s. 705-714. ISSN 10636706.
- [5] Bustince H. et al.: Overlap functions. *Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications*. 2010, roč. 72, č. 3-4, s. 1488-1499. ISSN 0362546X.
- [6] Zhang X. et al.: Pseudo Overlap Functions, Fuzzy Implications and Pseudo-Grouping Functions with Applications. *Axioms*. 2022, roč. 11, č. 11, 593. ISSN 20751680.
- [7] Qiao J.: On binary relations induced from overlap and grouping functions. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2019. č. 106, s. 155-171. ISSN 18734731.
- [8] Karaçıl F., Mesiar R.: Uninorms on bounded lattices. *Fuzzy Sets and Systems*. 2015, č. 261, s. 33-43. ISSN 01650114.
- [9] Mesiarová-Zemánková et al.: Idempotent uninorms on bounded lattices with at most single point incomparable with the neutral element: Part I. *International Journal of General Systems*. (*in print*). ISSN 03081079.
- [10] Mesiarová-Zemánková et al.: Idempotent uninorms on bounded lattices with at most single point incomparable with the neutral element: Part II. *International Journal of General Systems*. (*in print*). ISSN 03081079.
- [11] Kalafut J., Mesiarová-Zemánková A.: Pseudo-uninorms on bounded lattices where all points are comparable with neutral element, in: *Uncertainty Modelling 2024*. Košice: ŠafarikPress, 2024, s. 22-23. ISBN 978-80-574-0318-0.
- [12] Mayor G., Torrens J.: Triangular Norms on Discrete Settings, in: *Logical, Algebraic, Analytic, and Probabilistic Aspects of Triangular Norms*. Amsterdam: Elsevier, 2005, s. 189-230.
- [13] Su Y. et al.: Divisible associative aggregation operations on finite chains. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*. 2023, roč. 20, č. 5, s. 1-8. ISSN 17350654.
- [14] Li G. et al.: On Weakly Smooth Uninorms on Finite Chain. *International Journal of Intelligent Systems*. 2015, roč. 30, č. 4, s. 421-440. ISSN 08848173.
- [15] Fang B.W., Hu B.Q.: Semi-t-operators on bounded lattices. *Information Sciences*. 2019, č. 490, s. 191-209. ISSN 00200255.

Katarína Lacková¹, Peter Frolkovič²

Študijný program: Aplikovaná matematika, ročník: 4

KOMPAKTNÉ SCHÉMY S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM PRE RIEŠENIE HAMILTON-JACOBI ROVNICE

COMPACT HIGH RESOLUTION SCHEME FOR HAMILTON-JACOBI EQUATION

Abstract

We introduce a novel unconditionally stable nonlinear scheme to find numerical solution of Hamilton-Jacobi equation that shows no nonphysical oscillations for an arbitrary Courant number. In addition, the proposed numerical scheme is compact implicit; therefore, the solution can be obtained using solvers such as the fast sweeping method [8], where in each iteration a single nonlinear equation is solved via e.g. the Newton method [3].

Kľúčové slová / Key Words

Hamilton-Jacobi equation; finite differences; implicit

1. Introduction

Consider the following nonlinear Hamilton-Jacobi equation in one-dimensional space:

$$\partial_t \phi + H(\partial_x \phi) = 0, \quad \phi(x, 0) = \phi^0(x), \quad (1)$$

where $\phi = \phi(x, t)$, $x \in \mathbb{R}$ is the unknown function, $t \in [0, \infty)$ and H is the equation's Hamiltonian, [2, 5]. One common example of a Hamiltonian is $H(q) = \hat{u}q$, where \hat{u} is a constant. This choice of Hamiltonian leads to the well-known linear transport equation, where the quantity ϕ propagates with constant velocity \hat{u} .

In this work, we adopt a uniform discretization for both the space and time domains. The spatial domain $x \in D \subset \mathbb{R}$ is divided into $N + 1$ grid points with spacing $h := x_{i+1} - x_i$, where $i \in \{0, 1, 2, \dots, I\}$, while the time is discretized with a step size $\tau := t^n - t^{n-1}$ with $n \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ being the time index. The solution at each grid point and time step is denoted by $\phi_i^n := \phi(x_i, t^n)$. We denote by C the Courant number defined as $C = \frac{\tau}{h} \max |H'(\partial_x \phi)|$, which, in the case of the linear transport equation, reduces to $C = \hat{u}\tau/h$. Furthermore, we denote by \hat{H} the so-called numerical Hamiltonian defined similarly as the Godunov flux in [7]:

$$\hat{H}(a, b) = \begin{cases} \min_{a \leq u \leq b} H(u) & \text{if } a \leq b, \\ \max_{b \leq u \leq a} H(u) & \text{if } a > b. \end{cases} \quad (2)$$

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

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

A simple first-order accurate finite difference approximation of the equation (1) in time t^n is:

$$\frac{\phi_i^n - \phi_i^{n-1}}{h} + \widehat{H}(\partial_x \widehat{\phi}_i^{-,n}, \partial_x \widehat{\phi}_i^{+,n}) = 0, \quad (3)$$

where $\partial_x \widehat{\phi}_i^{-,n} = (\phi_i^n - \phi_{i-1}^n)/h$ and $\partial_x \widehat{\phi}_i^{+,n} = (\phi_{i+1}^n - \phi_i^n)/h$.

2. Direct Compact Nonlinear Scheme

We now consider the following approximation of the equation (1) at time $t^{n-\frac{1}{2}}$

$$\partial_t \phi_i^{n-\frac{1}{2}} + \widehat{H}\left(\partial_x \phi_i^{-,n-\frac{1}{2}}, \partial_x \phi_i^{+,n-\frac{1}{2}}\right) = 0, \quad (4)$$

where $\partial_t \phi_i^{n-\frac{1}{2}}$, $\partial_x \phi_i^{-,n-\frac{1}{2}}$ and $\partial_x \phi_i^{+,n-\frac{1}{2}}$ are carefully chosen approximations described below. Without elaborating the underlying motivation for now, we approximate $\partial_x \phi_i^{-,n-\frac{1}{2}}$ using Taylor series as:

$$\partial_x \phi_i^{-,n-\frac{1}{2}} = \partial_x \phi_i^{-,n} - \frac{\tau}{2} \partial_{xt} \phi_i^{-,n}, \quad (5)$$

where the right-hand side can be approximated using finite differences:

$$\partial_x \phi_i^{-,n} = \frac{\phi_i^n - \phi_{i-1}^n}{h} + \frac{1 - \omega_i}{2h} (\phi_{i+1}^n - 2\phi_i^n + \phi_{i-1}^n) + \frac{\omega_i}{2h} (\phi_i^n - 2\phi_{i-1}^n + \phi_{i-2}^n) \quad (6a)$$

$$\tau \partial_{xt} \phi_i^{-,n} = \frac{\omega_i}{h} (\phi_i^n - \phi_{i-1}^n - \phi_i^{n-1} + \phi_{i-1}^{n-1}) + \frac{1 - \omega_i}{h} (\phi_{i+1}^n - \phi_i^n - \phi_{i+1}^{n-1} + \phi_i^{n-1}), \quad (6b)$$

where $0 \leq \omega_i \leq 1$ is a parameter. The approximation (6a) is second order accurate for any ω_i and the approximation (6b) is first-order accurate.

The final approximation has the following form:

$$\begin{aligned} \partial_x \phi_i^{-,n-\frac{1}{2}} &= \frac{\phi_i^n - \phi_{i-1}^n}{h} + \frac{\omega_i}{2h} (-\phi_{i-1}^n + \phi_{i-2}^n + \phi_i^{n-1} - \phi_{i-1}^{n-1}) \\ &\quad + \frac{1 - \omega_i}{2h} (-\phi_i^n + \phi_{i-1}^n + \phi_{i+1}^{n-1} - \phi_i^{n-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

One can similarly approximate $\partial_x \phi_i^{+,n-\frac{1}{2}}$ having:

$$\begin{aligned} \partial_x \phi_i^{+,n-\frac{1}{2}} &= \frac{\phi_{i+1}^n - \phi_i^n}{h} + \frac{\omega_i}{2h} (-\phi_{i+1}^n + \phi_{i+2}^n + \phi_i^{n-1} - \phi_{i+1}^{n-1}) \\ &\quad + \frac{1 - \omega_i}{2h} (-\phi_i^n + \phi_{i+1}^n + \phi_{i-1}^{n-1} - \phi_i^{n-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

Furthermore, we can employ central finite difference approximation for $\partial_t \phi_i^{n-\frac{1}{2}}$ in the form:

$$\partial_t \phi_i^{n-\frac{1}{2}} = \frac{\phi_i^n - \phi_i^{n-1}}{\tau}. \quad (9)$$

In this way, we effectively approximated (4) using a compact, second-order accurate stencil [4]. In addition, this scheme produces solution without nonphysical oscillations in the gradient of the solution for the Courant number $C_i < 1$ in the case of $H(q) = \hat{u}q$.

3. Inverse Compact Nonlinear Scheme

In Section 2 we introduced the approximation (4) at time $t^{n-\frac{1}{2}}$. However, an alternative approach could be taken and the final approximation could be derived starting from $\phi_{i-\frac{1}{2}}^n$ or $\phi_{i+\frac{1}{2}}^n$, depending on the upwind direction. In order to avoid complications arising from changes in the velocity direction in the Hamilton-Jacobi equation, we restrict this scheme to cases where the velocity does not change sign and $C > 0$. To simplify this idea we introduce a new function approximation $\partial_t \tilde{\phi}_i^n$:

$$\partial_t \tilde{\phi}_i^n = \begin{cases} \partial_t \tilde{\phi}_{i-\frac{1}{2}}^n & \text{if } H' > 0, \\ \partial_t \tilde{\phi}_{i+\frac{1}{2}}^n & \text{if } H' < 0. \end{cases} \quad (10)$$

This way, we introduced a new approximation of (1) in the form:

$$\partial_t \tilde{\phi}_i^n + \hat{H}(\partial_x \hat{\phi}_i^{-,n}, \partial_x \hat{\phi}_i^{+,n}) = 0 \quad (11)$$

where $\partial_x \hat{\phi}_i^{-,n}$ and $\partial_x \hat{\phi}_i^{+,n}$ are the first-order accurate approximations defined in (3). Similarly as in Section 2, we approximate $\partial_t \phi_{i-\frac{1}{2}}^n$ and $\partial_t \phi_{i+\frac{1}{2}}^n$ using finite differences. This time, we expand the time derivatives into Taylor series, analogously as in (5), and apply similar parametric approximations as in (6), leading to:

$$\begin{aligned} \partial_t \phi_{i-\frac{1}{2}}^n &= \frac{\phi_i^n - \phi_i^{n-1}}{\tau} + \frac{\alpha^n}{2\tau} (-\phi_i^{n-1} + \phi_i^{n-2} + \phi_{i-1}^n - \phi_{i-1}^{n-1}) + \frac{1-\alpha^n}{2\tau} (-\phi_i^n + \phi_i^{n-1} + \phi_{i-1}^{n+1} - \phi_{i-1}^n), \\ \partial_t \phi_{i+\frac{1}{2}}^n &= \frac{\phi_i^n - \phi_i^{n-1}}{\tau} + \frac{\alpha^n}{2\tau} (-\phi_i^{n-1} + \phi_i^{n-2} + \phi_{i+1}^n - \phi_{i+1}^{n-1}) + \frac{1-\alpha^n}{2\tau} (-\phi_i^n + \phi_i^{n-1} + \phi_{i+1}^{n+1} - \phi_{i+1}^n), \end{aligned}$$

where $0 \leq \alpha^n \leq 1$. The scheme is second-order accurate for any α^n [6] and it can produce a solution that gradient lacks any non-physical oscillations for $C_i \geq 1$ in the case of $H(q) = \hat{u}q$.

4. General Compact Nonlinear ENO Scheme

In order to obtain a general non-oscillatory scheme for any C_i , we need to estimate Courant numbers $\hat{C}_i = \partial_x \hat{\phi} \tau/h$ using first-order predictors $\hat{\phi}$ computed from (3).

Furthermore, we define a piecewise constant switch function A as

$$A := A(\hat{C}_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } \hat{C}_i \geq 1, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

and a related piecewise constant function $B := B(\hat{C}_i) = 1 - A(\hat{C}_i)$.

The resulting general scheme for $H' \geq 0$ will have the following form

$$\frac{\phi_i^n - \phi_i^{n-1}}{\tau} + A \left(\frac{1-\alpha^n}{2\tau} (\phi_{i-1}^{n+1,p} - \phi_{i-1}^{n,p} - \phi_i^{n,p} + \phi_i^{n-1,p}) + \frac{\alpha^n}{2\tau} (\phi_{i-1}^n - \phi_{i-1}^{n-1} - \phi_i^{n-1} + \phi_i^{n-2}) \right) + \hat{H} \left(\frac{\phi_i^n - \phi_{i-1}^n}{h} + B \left(\frac{1-\omega_i}{2h} (\phi_{i+1}^{n-1} - \phi_i^{n-1} - \phi_i^{n,p} + \phi_{i-1}^{n,p}) + \frac{\omega_i}{2h} (\phi_i^{n-1} - \phi_{i-1}^{n-1} - \phi_{i-1}^n + \phi_{i-2}^n) \right) \right), \quad (14)$$

where

$$\omega_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi_i^{n-1} - \phi_{i-1}^{n-1} - \phi_{i-1}^n + \phi_{i-2}^n < \phi_{i+1}^{n-1} - \phi_i^{n-1} - \phi_i^{n,p} + \phi_{i-1}^{n,p}, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

and

$$\alpha^n = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi_{i-1}^n - \phi_{i-1}^{n-1} - \phi_i^{n-1} + \phi_i^{n-2} < \phi_{i-1}^{n+1,p} - \phi_{i-1}^{n,p} - \phi_i^{n,p} + \phi_i^{n-1,p}, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (16)$$

Values with superscript p , such as $\phi_i^{n,p}$ are first-order predictors, obtained by a simple finite-difference first-order accurate scheme, see [6].

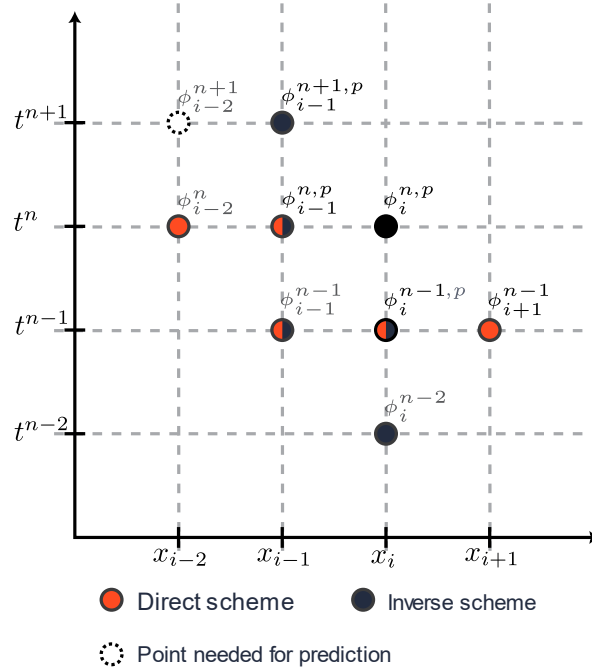


Figure 1: Stencil of the general scheme (14) for $H'(x) \geq 0$.

5. Numerical Experiments

In the following section, we provide a set of numerical experiments. We solve the equation (1) using the general numerical scheme (14). In all examples, we use the fast sweeping method to solve the resulting system of nonlinear equations. However, if $H'(q) > 0$ or $H'(q) < 0$, each numerical solution ϕ_i^n can be solved using the Newton method as the solution of a single nonlinear equation, due to the compact and upwind character of the scheme. In all of the following examples $H'(q) > 0$.

In all the numerical experiments described in this section we use the exact solution in the boundary and initial conditions. Furthermore, we calculate the accuracy of the solution using the norm $E := h\tau \sum_i^I \sum_n^N |\phi_i^n - \phi_e(x_i, t^n)|$, where ϕ_e is the exact solution. The implementation was done in Julia [1].

5.1 Quasi Burger's Equation

First, we solve the equation (1) with $H(\partial_x \phi) = (\partial_x \phi)^2/2$ and the initial condition

$$\phi_0(x) = \begin{cases} 0.0 & \text{if } x \leq -1 \\ \frac{2}{3} + x - \frac{x^3}{3} & \text{if } -1 < x \leq 1 \\ \frac{4}{3} & \text{if } x > 1, \end{cases} \quad (17)$$

using proposed numerical scheme (14), with $x \in [-2, 2]$ and $t \in [0, 1/2]$. The exact solution is, in this case, defined as $\phi_e(x, t) = \int_{-2}^x f(x, t) dx$, where

$$f(x, t) = \begin{cases} 1 - \frac{(1 - \sqrt{1 + 4t(t-x)})^2}{4t^2}, & \text{if } |1 - \sqrt{1 + 4t(t-x)}| \leq 2t, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (18)$$

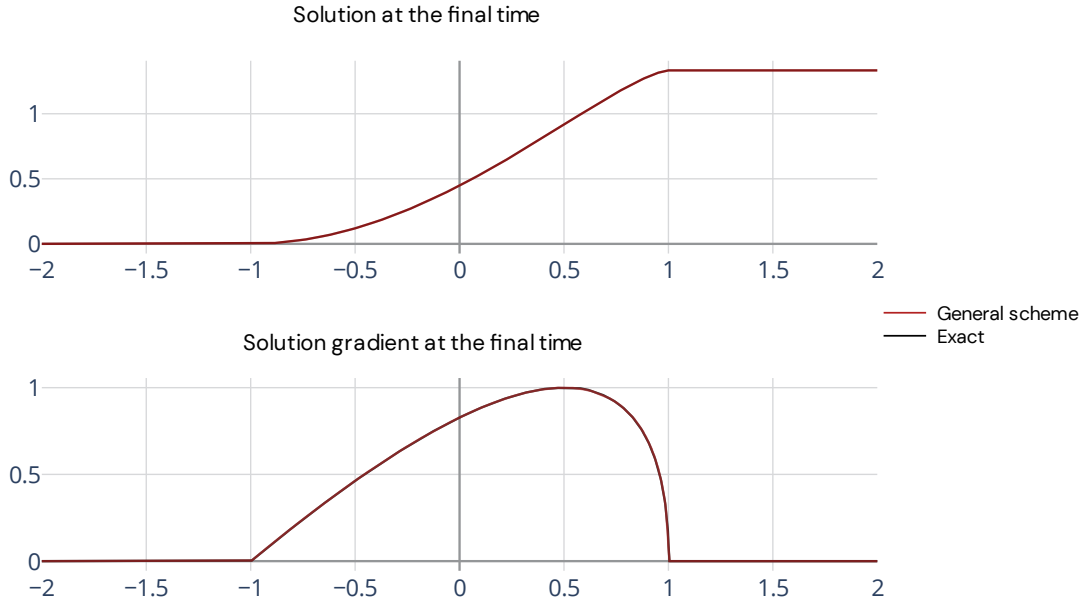


Figure 2: Solutions at the final time $T = 1/2$ of the equation (1) with $H(\partial_x \phi) = (\partial_x \phi)^2 / 2$ and the initial condition (17) using $I = 1600$ computed with the compact general scheme (14).

Table 1: Accuracy results for numerical experiment with initial condition (17). E represents the error of the general scheme (14) and \hat{E} represents the error of a simple first-order accurate scheme.

General Compact Scheme					
I	N	E	EOC	\hat{E}	EOC
100	2	9.33E-03		1.51E-02	
200	4	3.06E-03	1.61	7.03E-03	1.10
400	8	1.01E-03	1.60	3.36E-03	1.06
800	16	2.76E-04	1.87	1.63E-03	1.04
1600	32	7.98E-05	1.79	8.05E-04	1.02

This test confirmed the second-order accuracy of the scheme; see Table 1. The estimated Courant numbers \hat{C}_i were approximately $\hat{C}_i \in [0, 6.25]$.

Second, we solve again (1) with $H(\partial_x \phi) = (\partial_x \phi)^2 / 2$ on the interval $x \in [0, 1]$, $t \in [0, 1/4]$, with the initial condition being:

$$\phi_0(x) = \int_0^x f(x) dx, \quad (19)$$

where

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq -1, \\ \frac{2}{3} + x - \frac{x^3}{3}, & \text{if } -1 < x \leq 1, \\ \frac{4}{3}, & \text{if } x > 1. \end{cases}$$

This example highlights the ability of our proposed scheme to eliminate non-physical oscillations regardless of the Courant number C . In Figure 3, it can be observed that the direct numerical scheme, described in Section 2, produces oscillations in the gradient of the solution, particularly for Courant numbers C_i greater than 1. In contrast, the proposed general scheme (14) effectively suppresses these oscillations, demonstrating its stability across varying Courant numbers. The estimated Courant numbers \hat{C}_i were approximately $\hat{C}_i \in [0,5]$.

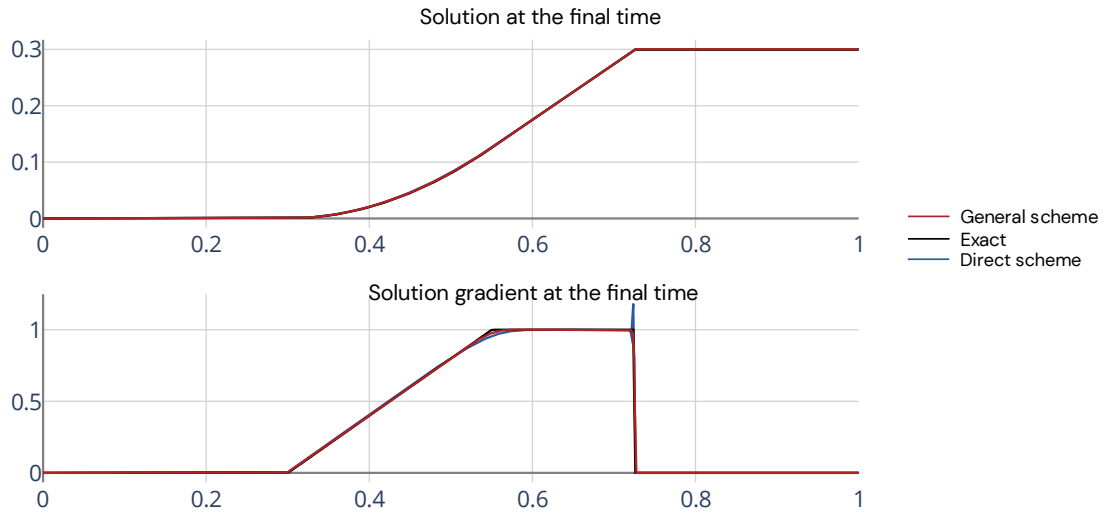


Figure 3: Solutions at the final time $T = 1/4$ of the equation (1) with $H(\partial_x \phi) = (\partial_x \phi)^2 / 2$ and the initial condition (19) using $I = 1600$ computed with the compact general scheme (14) and the direct scheme Section 2.

6. Conclusion

We proposed a novel nonlinear compact scheme that does not have any non-physical oscillations either in the solution or in the gradient of the solution for an arbitrary Courant number. The scheme is compact and implicit, therefore, the solution in each time iteration can be computed using the Newton method as a solution of a single nonlinear equation while maintaining unconditional stability. We used the fast sweeping method to compute a series of numerical examples that supported the second-order accuracy of the scheme.

References:

- [1] Jeff Bezanson, Alan Edelman, Stefan Karpinski, and Viral B Shah. Julia: A fresh approach to numerical computing. *SIAM review*, 59(1):65–98, 2017.
- [2] Michael G Crandall and Pierre-Louis Lions. Viscosity solutions of hamilton-jacobi equations. *Transactions of the American mathematical society*, 277(1):1–42, 1983.

- [3] Jean-Pierre Dedieu. *Newton-Raphson Method*, pages 1023–1028. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [4] Peter Frolkovič and Nikola Gajdošová. Unconditionally stable higher order semi-implicit level set method for advection equations. *Applied Mathematics and Computation*, 466:128460, April 2024.
- [5] Hitoshi Ishii. Hamilton-jacobi equations. *Recent Progress on Reaction-diffusion System and Viscosity Solutions*, page 97, 2009.
- [6] Katarína Lacková and Peter Frolkovič. Compact schemes for advection equation: Employing inverse lax-wendroff procedure. In *Proceedings of ALGORITMY*, pages 149–158, 2024.
- [7] Chi-Wang Shu. 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, pages 325–432. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [8] Hongkai Zhao. A fast sweeping method for eikonal equations. *Math. Comput.*, 74(250):603–627, 2005.

Soňa Zajícová¹

Študijný program: Aplikovaná matematika, ročník: 2.

RHEOLOGY, RELAXATION AND RETARDATION TIMES OF CHOSEN VISCOELASTIC MODELS

REOLÓGIA, RELAXAČNÉ A RETARDAČNÉ ČASY VYBRANÝCH VISKOELASTICKÝCH MODELOV

Abstract

This paper explores relaxation and retardation times of selected viscoelastic models including the Kelvin-Voigt and Poynting-Thompson models. By combining elastic and viscous components, these models simulate material behaviour under stress. The Kelvin-Voigt model is suitable only for describing creep behaviour, while Poynting-Thompson model incorporated both creep and relaxation phenomena, offering a more comprehensive representation of real world materials. This study also deals with the calculation of retardation and relaxation times, providing key insights into material performance under stress and strain.

Key Words

viscoelastic models; creep; relaxation; retardation time; relaxation time; rheology

1. Introduction

Rheology is the study of the flow and deformation of materials under applied forces. It examines how materials respond to stress or strain and is primarily concerned with the behaviour of materials whose responses to applied load are non-linear and time-dependent. Such materials are polymers, gels, biological tissues, some types of construction materials, bodily fluids and many others. [1]

1.1 Viscoelastic models

Viscoelasticity is a specific branch of rheology which studies materials that exhibit both viscous and elastic characteristics. Models that describe these materials are constructed by combining elastic and viscous elements in parallel or in series to replicate behaviour of the material. [2]

1.1.1 Hooke's element



Figure 1: Graphical representation of the Hookean spring [3]

This element, also known as the Hookean spring, is used to represent the purely elastic behaviour of a material. It follows Hooke's law, which states that the stress applied to an elastic material is directly proportional to the strain produced, as long as the material remains within its elastic limit. The relationship between stress σ and strain ε is given by:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

where E is the Young's Modulus, which quantifies the stiffness of the material. [4]

¹ Soňa Zajícová, Ing., Department of Mathematics and Descriptive Geometry, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

1.1.2 Newton's element

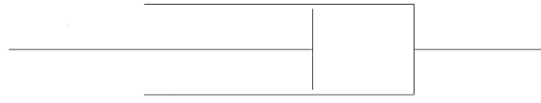


Figure 2: Graphical representation of the Newton's dashpot [3]

In viscoelastic models, Newton's element is used to represent purely viscous behaviour. It follows Newton's law of viscosity, which describes the relationship between normal stress σ and normal rate $\dot{\epsilon}$. The element is usually visualised as a dashpot (a piston moving through a viscous fluid) where the resistance to motion is proportional to the velocity of the piston. This relationship is given by:

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}, \quad (2)$$

where η is a material constant called dynamic viscosity and $\dot{\epsilon}$ is $\frac{\partial \epsilon}{\partial t}$. [4]

1.1.3 Connection types between fundamental elements

In viscoelastic models, the two fundamental elements - Hooke's Spring and Newton's dashpot - are combined in different configurations to represent various material behaviours. The arrangement of elements determines how the material will respond to stress or strain over time. The most common configurations are in series and in parallel.

Parallel connection abbreviated as " | ", means that the elements are connected side-by-side. Here, the total stress σ is the sum of the stresses in each element (σ_H and σ_N), while the strain is the same across all elements. This is given by two geometric equations: [5]

$$\sigma = \sigma_H + \sigma_N \quad (3)$$

$$\epsilon = \epsilon_H = \epsilon_N \quad (4)$$

Series connection abbreviated as " — ", is executed by connecting elements end-to-end, so the total strain ϵ is the sum of the strains in each element (ϵ_H and ϵ_N), while the stress is the same across all elements. So, the two geometric equations are in a following form: [5]

$$\sigma = \sigma_H = \sigma_N \quad (5)$$

$$\epsilon = \epsilon_H + \epsilon_N \quad (6)$$

1.1.4 Constitutive equation

A constitutive equation is a mathematical relationship that describes how a material responds to applied stress or strain. It defines the link between stress and strain for a given material, which enables the prediction of how materials deform or flow under different loading scenarios. [1]

2. Linear viscoelastic models and their constitutive equations

2.1 Maxwell model



Figure 3: Graphical representation of Maxwell model $\{M\}=(H) — (N)$ [7], where the Hookean spring is connected in series with the Newton's dashpot [3]

This model consists of a spring and dashpot connected in series. When a load is applied, the spring initially stretches to accommodate the applied stress, creating an immediate elastic response. Over time, the dashpot begins to elongate due to its viscous nature, allowing the spring to relax. Maxwell model is used to describe materials that exhibit stress relaxation but have poor resistance to creep. This makes it suitable for modelling polymer melts, bitumen, and biological tissues under certain conditions. It is particularly effective for materials that respond with an initial elastic deformation followed by a continuous, time-dependent flow. [2]

When deriving the constitutive relationship between stress and strain, geometric equations (5) and (6) are being used together with two physical equations:

$$\sigma_H = E \cdot \varepsilon_H \quad (7)$$

$$\sigma_N = \eta \cdot \dot{\varepsilon}_N \quad (8)$$

Equation (6) is used in a derivative form:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_H + \dot{\varepsilon}_N$$

and equations (7), (8) in the following form:

$$\dot{\varepsilon}_H = \frac{\dot{\sigma}_H}{E}$$

$$\dot{\varepsilon}_N = \frac{\dot{\sigma}_N}{\eta}$$

from what we get:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_H}{E} + \frac{\dot{\sigma}_N}{\eta} \quad (9)$$

Then can be applied the fact from equation (5), that stress is the same across all elements, therefore:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\dot{\sigma}}{\eta} \quad (10)$$

Finally, we rewrite the constitutive relationship in a standard form: [4]

$$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (11)$$

2.2 Kelvin-Voigt model

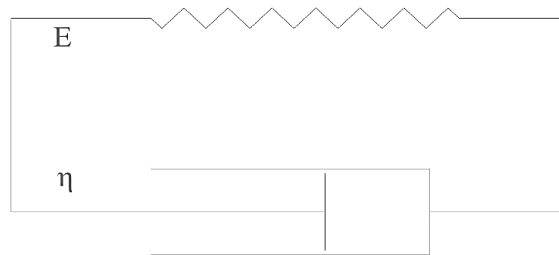


Figure 4: Graphical representation of Kelvin-Voigt model $\{KV\}=(H) | (N)$ [7], where the Hookean spring is connected in parallel with the Newton's dashpot [3]

In this configuration, a spring and a dashpot are placed in parallel. The model captures creep behaviour well but not the stress relaxation. When a load is applied, the material response is characterized by not exhibiting an immediate jump in strain but rather the strain gradually increases over time. The initial deformation is delayed until the dashpot begins to yield, making the material to appear stiff under short loading times. Kelvin-Voigt model is suitable for modelling materials that deform gradually under sustained stress but recover their shape after the stress is removed. Such materials are biological tissues like skin and muscles, wood or composite materials.

The constitutive equation is derived from geometric equations (5), (6) and physical equations (7), (8) from what we get: [4]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (12)$$

2.3 Poynting-Thompson model

The Poynting-Thomson model consists of a spring and a dashpot arranged in series, with an additional spring in parallel. When stress is applied, the parallel spring provides an instantaneous elastic response. Over time, the dashpot in the series configuration causes a delayed strain response.

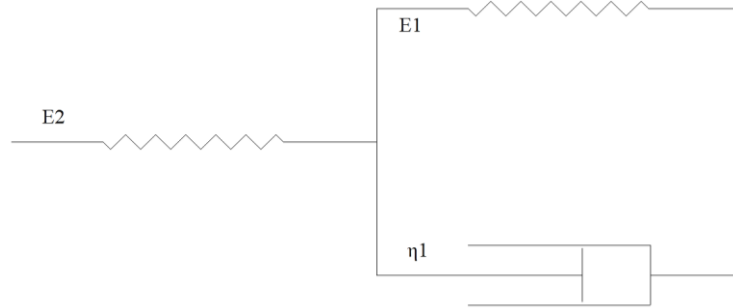


Figure 5: Graphical representation of the Poynting-Thompson model $\{PT\}=(H) \text{---}((H) | (N))$ [7], where the Hookean spring is connected in series with $\{KV\}$ model. [3]

This configuration allows the model to capture both creep and stress relaxation, making it more representative of real materials than the simpler models like Maxwell or Kelvin-Voigt. It is effective for modelling rubber, synthetic polymers, and complex biomaterials under varying stress and strain conditions. Constitutive equation is derived from the following geometric and physical equations:

$$\sigma = \sigma_{H2} = \sigma_{H1} + \sigma_{N1} \quad (13)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{H2} + \varepsilon_{H1} = \varepsilon_{H2} + \varepsilon_{N1} \quad (14)$$

$$\sigma_{H1} = E1 \cdot \varepsilon_{H1} \quad (15)$$

$$\sigma_{N1} = \eta1 \cdot \dot{\varepsilon}_{N1} \quad (16)$$

$$\sigma_{H2} = E2 \cdot \varepsilon_{H2} \quad (17)$$

and is being presented in the following form: [4]

$$\sigma + \frac{\eta1}{E1} \dot{\sigma} = E2 \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (18)$$

3. Creep and relaxation of chosen models, retardation and relaxation time.

3.1 Creep

Creep is the time-dependent strain that develops in a material when subjected to a constant stress over a period of time. [6] This behaviour is particularly pronounced at elevated temperatures or under high stresses, making it a critical factor in material selection for structural applications. [8]

The **retardation time** τ is a measure of the time it takes for a material under constant stress to reach a significant portion of its final deformation. In viscoelastic materials, the retardation time captures how quickly material transitions from an initial elastic response to a steady-state viscous flow. Longer retardation time indicates slower strain rate and more gradual deformation over time.[5]

3.1.1 Kelvin-Voigt model

This model initially resists deformation but gradually undergoes creep until it reaches a steady state. When a load is applied, the dashpot slows the rate of deformation, causing the spring connected in parallel to elongate only at the same pace as the viscous element. Once the spring reaches its maximum extension, the viscous element also stops moving, which results in a limited overall deformation. This controlled behaviour makes the KV model more suitable than the Maxwell model for representing materials that require resistance to long-term deformation under constant load.

In Figure 6 is displayed creep test performed on the KV model with parameters: $E = 3 Pa$ (elastic constant) and $\eta = 1 Pa \cdot s$ (dynamic viscosity). Applied load is

$$\sigma_0(t) = \begin{cases} 0 Pa & t_1 \leq t < t_2 \\ 1 Pa & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 Pa & t_3 \leq t < t_4 \end{cases}$$

during time $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\} = \{0, 0.5, 2, 4\}$. Viscoelastic response of the KV model is described by equation (12), which in this condition is a 1st order ordinary differential equation in a form:

$$\sigma_0 = 3\varepsilon + \dot{\varepsilon} \quad (19)$$

The image shows a typical creep-recovery graph for this model. During the initial stage of the test (between t_2 and t_3) when a constant load σ_0 is applied, strain increases gradually due to the dashpot's resistance, so the elastic deformation is delayed. Afterwards, when the load is removed, strain decreases but does not immediately return to zero, demonstrating the viscoelastic recovery phase.

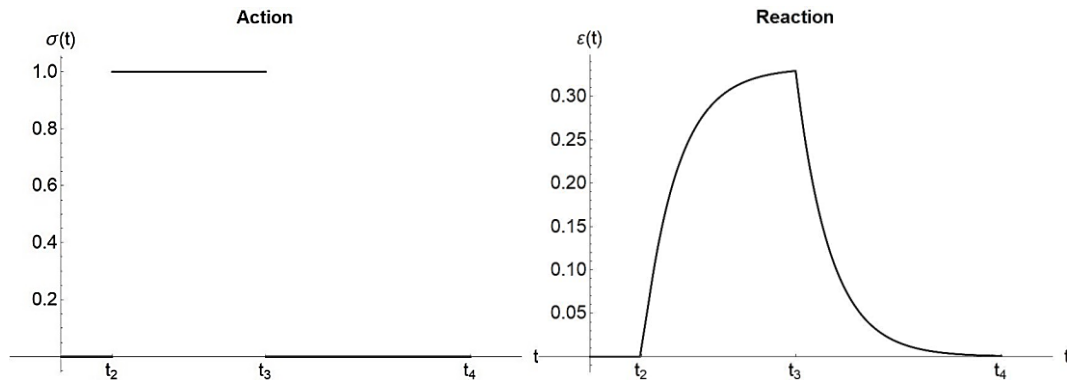


Figure 6: Creep test of the Kelvin-Voigt model.

a) Load applied ($\sigma(t)$ - applied stress, t - time), b) Material reaction ($\varepsilon(t)$ - strain, t - time).

Retardation time of the KV model is visually represented in Figure 7 as the time taken for the strain $\varepsilon(t)$ to reach a significant portion of its final value (the dotted line) under constant stress. It is calculated as the time difference between t_2 and t_{RTD} (point where the tangent line to strain curve intersects the line of maximum strain). The tangent line at t_2 represents the initial rate of strain, and the point of intersection shows where the maximum elastic deformation would occur if no viscosity was present. This gives the characteristic time it takes for material to respond to the applied stress.

For the chosen model was numerically calculated the retardation time as following:

$$\tau = t_{RTD} - t_2 = 0.3 \quad (20)$$

This corresponds with the fact that the retardation time of KV model is in general determined as: [5]

$$\tau = \frac{\eta}{E} \quad (21)$$

For our chosen model $\tau = \frac{1}{3} = 0.3$ which is the same as the value calculated from creep test.

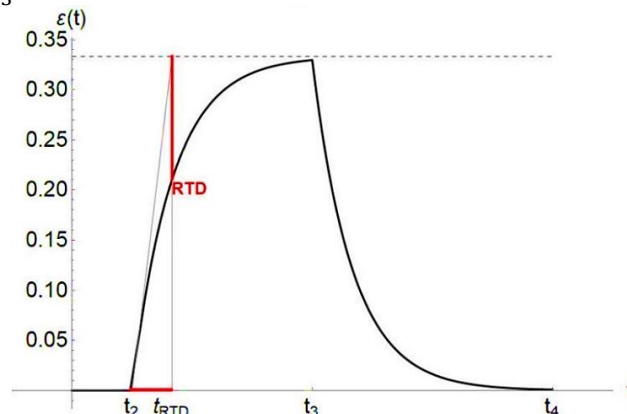


Figure 7: Retardation time of the KV model

3.1.2 Poynting-Thompson model

The Poynting-Thomson model initially shows an elastic response followed by a delayed, time-dependent deformation. When a load is applied, the spring responds immediately, while the dashpot (viscous element) controls the rate of deformation. The spring in series continues to deform gradually due to the dashpot's effect, leading to a slower progression into the steady-state phase.

This behaviour can be seen on Figure 8, which displays the creep test performed on the PT model with following parameters: $E1 = 2 Pa$ (spring in parallel), $\eta1 = 5 Pa \cdot s$ (dashpot in parallel), $E2 = 6 Pa$ (spring in series). Applied load is

$$\sigma_0(t) = \begin{cases} 0 Pa & t_1 \leq t < t_2 \\ 10 Pa & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 Pa & t_3 \leq t < t_4 \end{cases}$$

during time $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\} = \{0, 1, 20, 30\}$. Viscoelastic behaviour of the PT model is described by equation (18), which is a 1st order ordinary differential equation in a form:

$$\sigma_0 + \frac{5}{2}\dot{\sigma}_0 = 6\varepsilon + 5\dot{\varepsilon} \quad (22)$$

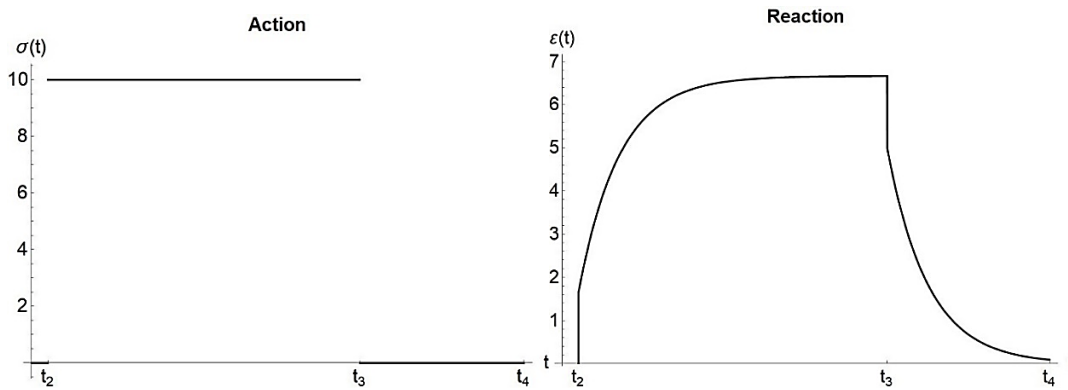


Figure 8 - Creep test of the PT model.

a) Load applied ($\sigma(t)$ - applied stress, t - time), b) Material reaction ($\varepsilon(t)$ - strain, t - time).

Retardation time for the chosen model with the above-mentioned parameters is:

$$\tau = t_{RTD} - t_2 = 2.49875 \cong 2.5 \quad (23)$$

Generally, the retardation time of Poynting-Thompson model is determined as: [5]

$$\tau = \frac{\eta_1}{E_1} \quad (24)$$

Therefore, for our model $\tau = \frac{5}{2} = 2.5$ which corresponds with the value calculated from the creep test.

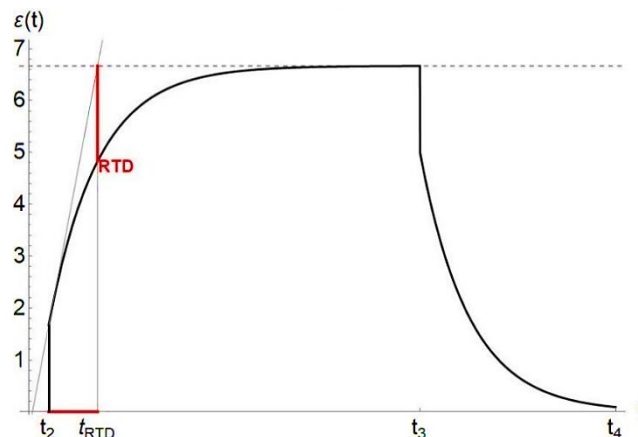


Figure 9: Retardation time of the PT model

3.2 Relaxation

Relaxation is the process by which the stress in a material decreases over time under a constant strain. [3] When a material is suddenly strained to a fixed amount and held in that position, the initial stress developed within material will decrease gradually. For different viscoelastic models, stress relaxation behaviour varies depending on the combination of elastic and viscous elements. Moreover, there are certain models, for which conducting a relaxation test is not feasible because an instantaneous strain cannot be applied. [7]

Relaxation time τ is the characteristic time it takes for the stress in a material under constant strain to decrease significantly. In viscoelastic materials, a longer relaxation time indicates a slower reduction of stress, meaning the material takes more time to reach equilibrium. This time constant is crucial for predicting the material's long-term stress behaviour. [5]

3.2.1 Kelvin-Voigt model

It is not possible to perform a true relaxation test for the KV model. The viscous element resists any instantaneous deformation, meaning the model cannot maintain a constant strain. As a result, the elastic element connected in parallel will not move either, so both deformation and stress remain constant. No significant stress relaxation occurs, making this test unsuitable for the KV model.

3.2.2 Poynting-Thompson model

When initial deformation is applied, the PT model shows an immediate elastic response due to the spring connected in series. Over time, the viscous element begins to undergo deformation, causing a gradual stress relaxation. The spring in series continues to deform slowly under the control of the dashpot, leading to a delayed, time-dependent deformation. This results in a slower approach to the steady-state phase, as the dashpot ensures a controlled progression of strain, capturing both short-term elasticity and long-term viscoelastic behaviour under sustained load.

Figure 10 displays the relaxation test performed on the PT model with parameters: $E1 = 2 Pa$ (spring in parallel), $\eta1 = 5 Pa \cdot s$ (dashpot in parallel), $E2 = 6 Pa$ (spring in series). Applied load is:

$$\varepsilon_0(t) = \begin{cases} 0 & t_1 \leq t < t_2 \\ 10 & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t_3 \leq t < t_4 \end{cases}$$

over time $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\} = \{0, 1, 20, 30\}$.

Constitutive equation describing behaviour of this model is derived from relationship (18) by substituting all parameters:

$$\sigma + \frac{5}{2}\dot{\sigma} = 6\varepsilon_0 + 5\dot{\varepsilon}_0 \quad (25)$$

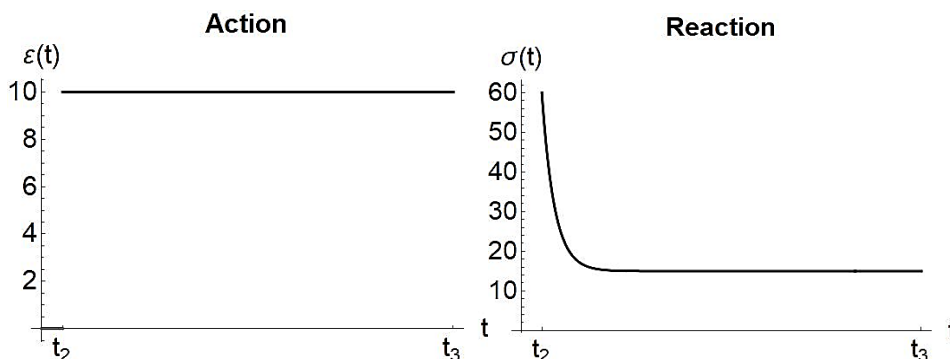


Figure 10: Relaxation test of the PT model.

a) Load applied ($\varepsilon(t)$ - applied strain, t - time), b) Material reaction ($\sigma(t)$ - stress, t - time).

The relaxation time is illustrated in Figure 11 and measured as the difference between t_2 and t_{RLX} . For our model with the above mentioned parameters numerically calculated relaxation time is:

$$\tau = t_{RTD} - t_2 = 0.625 \quad (26)$$

Generally, the relaxation time of PT model is determined as: [5]

$$\tau = \frac{\eta^1}{E_1 + E_2} \quad (27)$$

For our model $\tau = \frac{5}{2+6} = 0.625$ which corresponds with the value calculated from relaxation test.

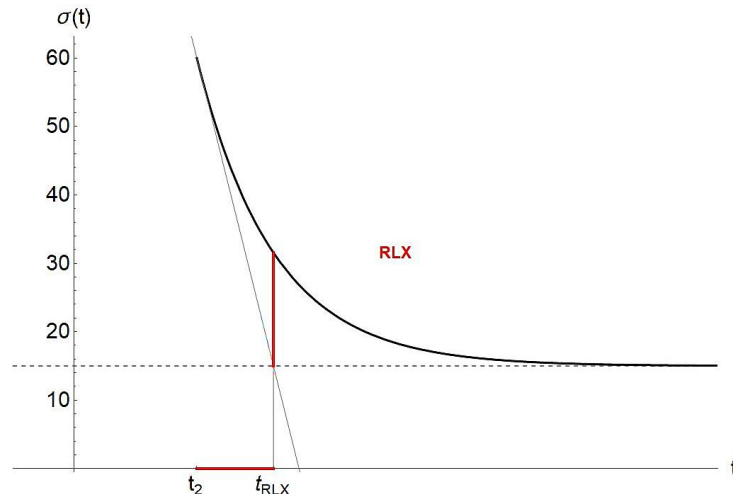


Figure 11: Relaxation time of the PT model

4. Conclusion

Our numerically calculated relaxation and retardation times align with theoretical expectations and known models. This consistency confirms that the behaviour of the Kelvin-Voigt and Poynting-Thompson models under applied stress and strain is accurately represented. These results provide further insight into time-dependent mechanical responses of viscoelastic materials.

References

- [1] MINÁROVÁ, M., & SUMEC, J. (2016). *Constitutive equations for selected rheological models in linear viscoelasticity*. In *Advances and Trends in ESaT II* (pp. 225-230). CRC Press.
- [2] GIORGI, C., MORRO, A. (2022). *Materials with Memory: Viscoelasticity and Hysteresis*. In: *Rega, 50+ Years of AIMETA*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94195-6_15
- [3] ZAJÍCOVÁ, S. (2021). *Chain and recurrent viscoelastic structures* (Diploma thesis)
- [4] SUMEC, J., & MINÁROVÁ, M. (2013). *Mechanical and mathematical modeling of viscoelastic continua-constitutive equations.*, *Sborník vědeckých prací VŠB – TU Ostrava*
- [5] MINÁROVÁ, M. (2018). *Rheology. Viscoelastic and viscoelastoplastic modelling* (Habilitation thesis).
- [6] MORRO, A. (2017). *Modelling of viscoelastic materials and creep behaviour*. *Meccanica*, 52(13), 3015-3021.
- [7] SOBOTKA, Z. 1981. *Rheology of Materials and Structures*. Prague: Academia
- [8] ALTENBACH, H., EISENTRÄGER, J. (2020). *Introduction to creep mechanics*. *Encyclopedia of Continuum Mechanics*, 1337-1344.
- [9] MINÁROVÁ, M., & SUMEC, J. (2017). *Alternative calculation of the retardation and relaxation spectra for the viscoelastic response of the solid phase materials*. *Procedia engineering*, 192, 597-602.

Dagmar Žáková¹

Študijný program: D-APLMA4, ročník: 4.

NUMERICAL EXPERIMENTS USING A SECOND ORDER ACCURATE COMPACT IMPLICIT NUMERICAL SCHEME FOR HYPERBOLIC CONSERVATION LAWS IN TWO DIMENSIONS

Abstract

This paper presents numerical solutions of a conservation law in two dimensional space using a novel implicit time discretization [5], which differs from the fully implicit scheme in a proposed stencil. We present some numerical results obtained by using this scheme, specifically for cases with a large Courant number or for the cases with modified problem.

Key Words

conservation law; advection equation; compact implicit scheme; Burgers equation; two dimensional space

1. Introduction

We consider two representative scalar hyperbolic partial differential equations in the two-dimensional case. We examine the nonlinear hyperbolic equation

$$\partial_t u + \partial_x f(u) + \partial_y g(u) = 0 \quad (1)$$

which can be modified into the linear hyperbolic problem in the form

$$\partial_t u + \partial_x(vu) + \partial_y(wu) = 0 \quad (2)$$

with space dependent velocity field $\vec{v} = \vec{v}(x, y) = (v(x, y), w(x, y))$ and $u = u(x, y, t)$ being the unknown function for $t \in (0, T)$ and $x \in (x_L, x_R) \subset R, y \in (y_L, y_R) \subset R$.

In our previously submitted article [5], we provide a comprehensive discussion of the problem, the boundary and initial conditions, the finite volume method employed, and the derivation of the numerical scheme aimed at achieving the second order accuracy, together with the fast-sweeping method used for finding the numerical solution.

The numerical scheme

$$u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n + \frac{\tau}{h}(F_{i+1/2,j} - F_{i-1/2,j}) + \frac{\tau}{h}(G_{i,j+1/2} - G_{i,j-1/2}) = 0 \quad (3)$$

with $F_{i+1/2,j} \approx f_{i+1/2,j} \approx f(u(x_{i+1/2}, y_j, t^{n+1/2}))$, $G_{i,j+1/2} \approx g_{i,j+1/2} \approx g(u(x_i, y_{j+1/2}, t^{n+1/2}))$, will collide into detecting the approximations $u_{i+1/2,j}^{n+1/2,\pm} \approx u(x_{i+1/2}, y_j, t^{n+1/2})$ and $u_{i,j+1/2}^{n+1/2,\pm} \approx u(x_i, y_{j+1/2}, t^{n+1/2})$ differently for positive and negative indexes.

To handle discontinuities in the solution, we enrich the second order accurate numerical scheme [5] by incorporating high-resolution formulations, specifically using the ENO (Essentially Non-Oscillatory) and WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) approximations. These modifications allow for improved resolution of discontinuities while maintaining accuracy, as detailed in the article [5].

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

The final numerical scheme derived from our work is as follows

$$\begin{aligned} u_{i+1/2,j}^{n+1/2,-} &= u_{i,j}^{n+1} - \frac{l_{i,j}^{x,-}}{2} (\omega_{i,j}^{x,-} (u_{i-1,j}^{n+1} - u_{i,j}^n) + (1 - \omega_{i,j}^{x,-}) (u_{i,j}^{n+1} - u_{i+1,j}^n)), \\ u_{i,j+1/2}^{n+1/2,-} &= u_{i,j}^{n+1} - \frac{l_{i,j}^{y,-}}{2} (\omega_{i,j}^{y,-} (u_{i,j-1}^{n+1} - u_{i,j}^n) + (1 - \omega_{i,j}^{y,-}) (u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j+1}^n)), \end{aligned} \quad (4)$$

for positive fluxes, and

$$\begin{aligned} u_{i+1/2,j}^{n+1/2,+} &= u_{i+1,j}^{n+1} - \frac{l_{i+1,j}^{x,+}}{2} (\omega_{i+1,j}^{x,+} (u_{i+2,j}^{n+1} - u_{i+1,j}^n) + (1 - \omega_{i+1,j}^{x,+}) (u_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^n)), \\ u_{i,j+1/2}^{n+1/2,+} &= u_{i,j+1}^{n+1} - \frac{l_{i,j+1}^{y,+}}{2} (\omega_{i,j+1}^{y,+} (u_{i,j+2}^{n+1} - u_{i,j+1}^n) + (1 - \omega_{i,j+1}^{y,+}) (u_{i,j+1}^{n+1} - u_{i,j}^n)), \end{aligned} \quad (5)$$

for negative fluxes, with $\mathbf{l} = (l_{i,j}^{x,\pm}, l_{i,j}^{y,\pm})$ being the time limiter for composition of the high-resolution scheme and the $\boldsymbol{\omega} = (\omega_{i,j}^{x,\pm}, \omega_{i,j}^{y,\pm})$ being the free parameter that creates the linear combination of two different stencils used in the formation of the numerical scheme.

2. Numerical experiments

We present some numerical results of the proposed second order and high resolution compact implicit finite-volume scheme [5] with the purpose of illustrating their accuracy and stability properties. We describe the results in two subsections, the first one dealing with a linear advection equation, and the second one dealing with the Burgers equation as a simple representative nonlinear problem.

The exact solution is known for each of the chosen examples, and it is used for boundary conditions, and the discrete L_1 norm (E) of the error is calculated as follows,

$$E = h^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |u_{i,j}^N - \bar{u}_{i,j}^N|. \quad (6)$$

Moreover, the Experimental Order of Convergence (EOC) is computed using the errors from (6) to confirm the expected order of the accuracy for the chosen examples. Concerning the time steps, we choose maximal Courant numbers much larger than allowed by a stability restriction of explicit schemes, and larger than used in [5].

The numerical methods and the graphical output are obtained using the Python programming language [3].

2.1 Linear advection equation

Firstly, we compute the linear advection equation (2). As a guiding factor to compare the results, we compute the maximal value of Courant number at each direction,

$$C_{max}^x = \frac{\tau}{h} \max_{i,j} \{|v_{i+1/2,j}|\}, \quad C_{max}^y = \frac{\tau}{h} \max_{i,j} \{|w_{i,j+1/2}|\},$$

over all edges of each finite volume. These "directional" Courant numbers will be larger than allowed by a stability restriction of explicit schemes and larger than used in [5].

We choose the computation domain $x, y \in [-1,1]$ and the velocity field representing the rotation in the form

$$\vec{v} = (-2\pi y, 2\pi x), \quad (7)$$

where the exact solution for any initial function u^0 is defined as

$$u(x, y, t) = u^0(x \cos(2\pi t) + y \sin(2\pi t), y \cos(2\pi t) - x \sin(2\pi t)). \quad (8)$$

In the first example, we consider the initial condition in a form of four Gaussians,

$$u^0(x, y) = e^{50(-(x-0.5)^2-(y-0.5)^2)} + e^{50(-(x+0.5)^2-(y+0.5)^2)} - e^{50(-(x+0.5)^2-(y-0.5)^2)} - e^{50(-(x-0.5)^2-(y+0.5)^2)} \quad (9)$$

and in the first experiment, we will choose the final time $T = 0.25$. In such a case, the Gaussians move by a quarter of a cycle. The initial function with the exact solution are shown in Fig. 1.

We compute the experiment for two different (but fixed) choices of ω to show the second order accuracy of the method. We choose sequentially $M = 80, 160, 320$ and 640 , and $N = M/20$ which leads to $C_{max}^x = C_{max}^y = 15.7$. The initial condition together with the contours of the numerical solution ($\omega = 1/2$) are shown in Fig. 2 for different times $t = T/2, T$, with $T = 0.25$. The errors and the EOCs in Table 1 confirm the expected order of accuracy for the two different choices of values $\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 0, 1/2$, and their combination ($\omega^{x,\pm} = 0, \omega^{y,\pm} = 1/2$). We also apply the ENO and WENO (with initial value of ω being $\bar{\omega} = 1/3$) approximations to check the order of accuracy for such schemes. We also compute the errors and the EOCs using the first order accurate numerical scheme to show the significant difference in the errors when using the higher order accurate schemes. The table also contains the minimum and maximum values of the unknown, showing the improvement when using the second order accurate scheme, also, as expected [4], with the noticeably smaller values when using ENO and WENO approximation.

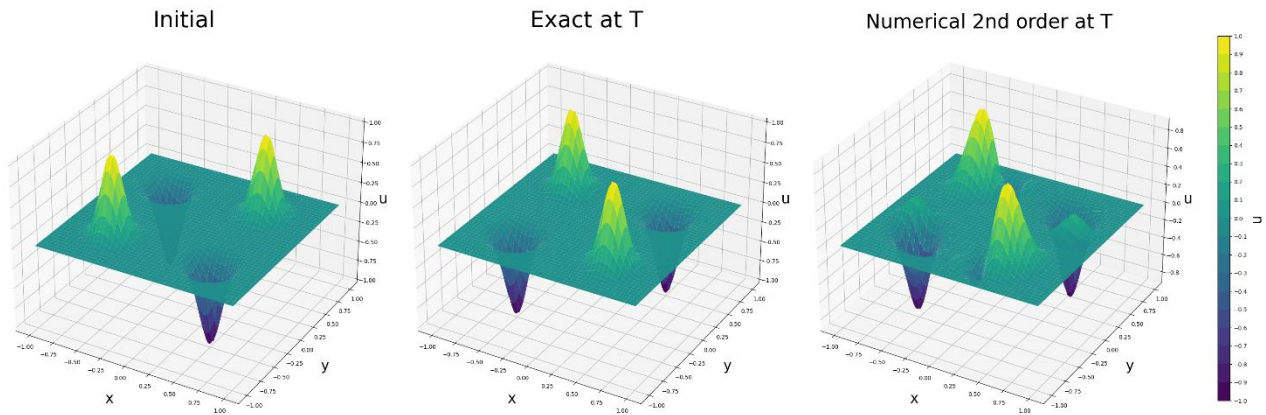


Figure 1: The initial condition, the exact solution and the numerical solution obtained by the second order accurate scheme with $\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 1/2, M = 320, T = 0.25$.

As is well known [1, 2], such a higher-order accurate scheme in two dimensions is only conditionally stable and it may lead to nonphysical oscillations. This occurs particularly when approximating sharp gradients or discontinuities (see the second example in Section 2.2), as these schemes tend to introduce spurious oscillations in the solution that are not present in the actual physical problem. Also when using some constant values of ω , the solution can lead to the appearance of oscillations, particularly when computing with the large Courant numbers, as described in [2]. Therefore, the results for $\omega^{x,\pm} = \omega^{y,\pm} = 1$ are not shown for this example, as they led to oscillations at the boundaries of the computational domain, which were caused in corporation with Dirichlet boundary conditions [5] used at both the inflow and outflow boundaries. These oscillations can be managed using ENO or WENO approximations, the results may be found in Table 1.

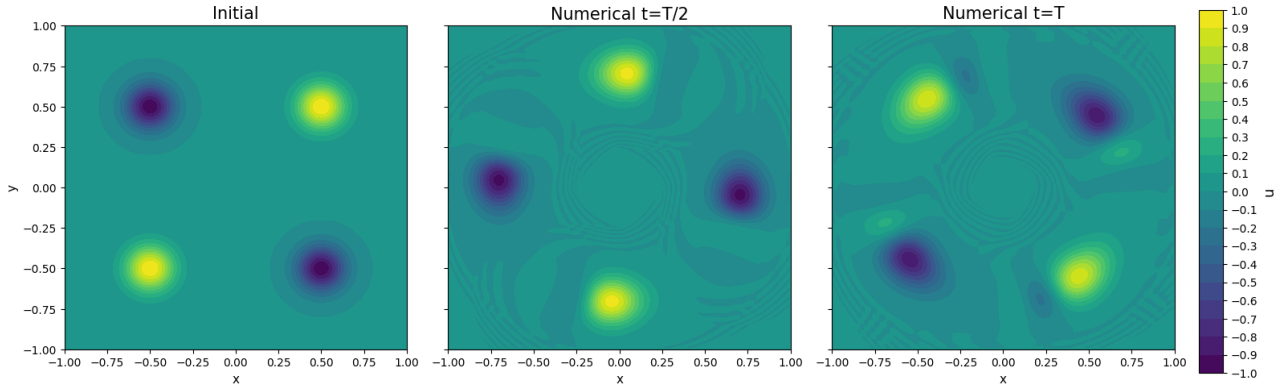


Figure 2: Contours of the initial condition and the numerical solution of the rotation of four Gaussians, obtained by the second order accurate scheme with $\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 1/2$ at different times $t = T/2, T$, for $T = 0.25$, with $M = 320$, and with $C_{max}^x = C_{max}^y = 15.7$.

Table 1: The numerical errors, the EOCs, and the minimum and maximum values of the numerical solution, obtained by the first and second order accurate numerical schemes for the rotation of four Gaussians, $C_{max}^x = C_{max}^y = 15.7$.

		$\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 0$				$\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 1/2$				$\omega^{x,\pm} = 0, \omega^{y,\pm} = 1/2$			
M	N	E	EOC	min	max	E	EOC	min	max	E	EOC	min	max
80	4	0.4876	-	-0.55	0.55	0.4256	-	-0.53	0.53	0.4544	-	-0.57	0.53
160	8	0.3149	0.63	-0.70	0.70	0.2802	0.60	-0.72	0.72	0.2981	0.60	-0.73	0.68
320	16	0.1590	0.98	-0.87	0.87	0.1315	1.09	-0.89	0.89	0.1456	1.03	-0.88	0.86
640	32	0.0512	1.63	-0.97	0.97	0.0410	1.68	-0.98	0.98	0.0462	1.65	-0.96	0.97
		ENO				WENO				1st order			
M	N	E	EOC	min	max	E	EOC	min	max	E	EOC	min	max
80	4	0.2725	-	-0.31	0.31	0.2646	-	-0.41	0.41	0.2594	-	-0.11	0.11
160	8	0.1630	0.65	-0.51	0.51	0.1814	0.54	-0.58	0.58	0.2467	0.07	-0.15	0.15
320	16	0.0785	1.05	-0.71	0.71	0.0958	0.92	-0.76	0.76	0.2272	0.12	-0.25	0.25
640	32	0.0350	1.16	-0.86	0.86	0.0397	1.26	-0.89	0.89	0.1843	0.30	-0.37	0.37

2.2 Nonlinear Burgers equation

We compute a representative nonlinear problem in the form of the Burgers equation. For the first 2D example we choose a Burgers equation in a form

$$\partial_t u + \partial_x \left(\frac{u^2}{2} \right) - \partial_y \left(\frac{u^2}{2} \right) = 0 \quad (10)$$

which differs from the example in [5] using the flux $f(u) = (f(u), -g(u))$. In this case, the maximum Courant number is defined as $C_{max} = \frac{\tau}{h} u_{max}$, with $u_{max} = \max(|u_{i,j}^n|)$ over all time steps and finite volumes.

For the first example we choose the computation domain $x, y \in [-1, 1]$ and $t \in [0, 0.5]$ with a smooth initial condition (Fig. 3) in the form

$$u^0(x, y) = \sin(\pi x) \sin(-\pi y) / 2. \quad (11)$$

The exact solution can be obtained numerically using the method of characteristics by solving the algebraic equations for $u = u(x_i, y_j, t^n)$

$$u = \sin(\pi(x_i - ut^n)) \sin(\pi(-y_j - ut^n)) / 2. \quad (12)$$

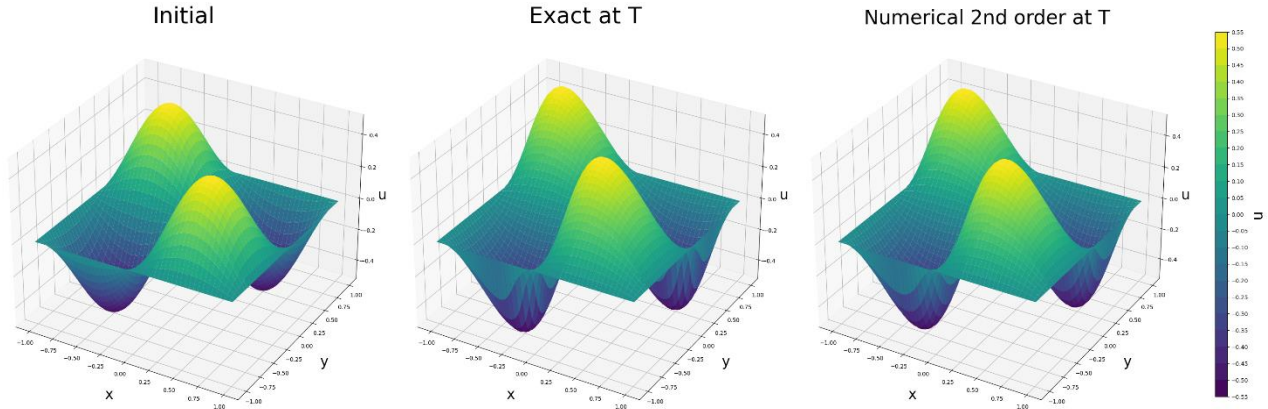


Figure 3: The initial condition (left), the exact solution (middle) and the numerical solution (right) obtained by the second order scheme at $T = 0.5$ for the nonlinear problem (10) with the smooth initial condition (11), $\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 0$, $M = 320$.

For this example, we chose sequentially $M = 160, 320$ and 640 , and the number of time steps is $N = M/160$. Together with the maximum absolute value of the function u^0 being 0.5 , one obtains $C_{max} = 20$.

We show results using the compact implicit numerical scheme with the constant values of $\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 0, 1/2, 1$, sequentially. We compute the errors (6) at the final time $T = 0.5$, the EOC and also the minimum and maximum value of u . The errors and the EOCs in Table 2 confirm the expected order of accuracy for the different constant values $\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm}$. We also show results using the ENO and WENO (with $\bar{\omega} = 1/3$) approximations, to demonstrate the order of accuracy. Notice that the maximum and minimum values when using the ENO and WENO schemes keep the values of u within the limits, unlike the constant value of ω used everywhere else. The results can be compared with the errors of the first order accurate scheme in Table 2.

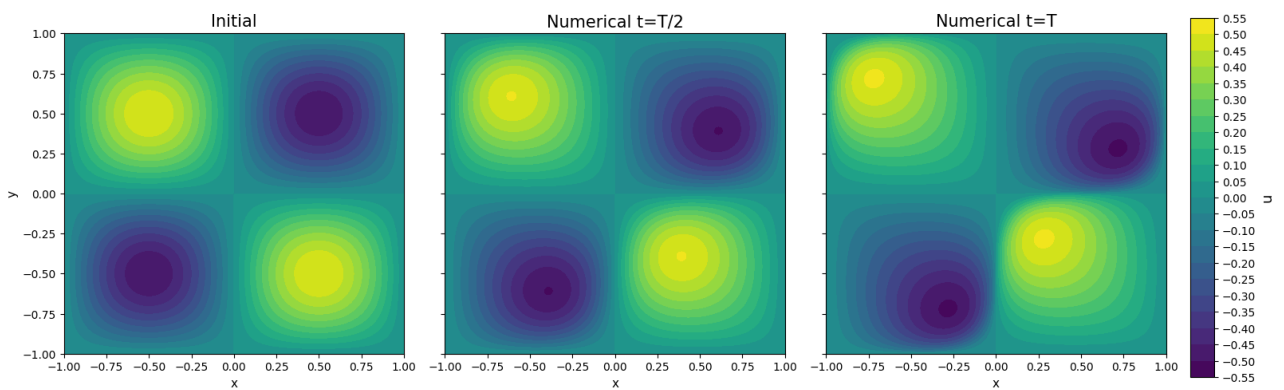


Figure 4: Contours of the numerical solution of the nonlinear problem (10) with the smooth initial condition (11) obtained by the second order accurate numerical scheme at times $t = 0, T/2, T$ with $T = 0.5, M = 320, \omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 0, C_{max} = 20$.

Table 2: The numerical errors, the EOCs and the minimum and maximum values for the first and second order accurate numerical schemes computed for the nonlinear problem (10) with the smooth initial condition (11), $T = 0.5$, $C_{max} = 20$.

		$\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 0$				$\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 1/2$				$\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm} = 1$			
M	N	E	EOC	min	max	E	EOC	min	max	E	EOC	min	max
160	1	0.0569	-	-0.508	0.508	0.0524	-	-0.507	0.507	0.0482	-	-0.506	0.506
320	2	0.0230	1.30	-0.509	0.509	0.0210	1.31	-0.508	0.508	0.0192	1.32	-0.507	0.507
640	4	0.0077	1.58	-0.505	0.505	0.0069	1.59	-0.504	0.504	0.0062	1.62	-0.504	0.504

		ENO				WENO				1st order			
M	N	E	EOC	min	max	E	EOC	min	max	E	EOC	min	max
160	1	0.0595	-	-0.461	0.461	0.0591	-	-0.461	0.461	0.2227	-	-0.432	0.432
320	2	0.0252	1.23	-0.479	0.479	0.0245	1.27	-0.479	0.479	0.1436	0.63	-0.445	0.445
640	4	0.0080	1.65	-0.493	0.493	0.0077	1.66	-0.490	0.490	0.0764	0.91	-0.485	0.458

The last problem deals with a discontinuity in the form of a shock wave and it is defined for $x, y \in [-1, 1]$ with the computational time $t \in [0, 0.4]$. The problem is defined in detail in [5] (see Figure 5), and in this paper, it differs in number of time steps being $N = M/80$ for the number of finite volumes $M = 80, 160, 320, 640$, with the value $C_{max} = 16$, which is two times larger than discussed in [5]. The ENO and WENO ($\bar{\omega} = 1/3$) approximations were used to compute the solution, together with the first order accurate scheme, to demonstrate the difference in the errors obtained, see Table 3. The visualization of contours of numerical solution, and the choices of values $\omega^{x,\pm}, \omega^{y,\pm}$ and $\beta^{x,\pm}, \beta^{y,\pm}$, for ENO approximation used, are visualized in Figures 6, 7, sequentially, and for WENO in Figures 8, 9.

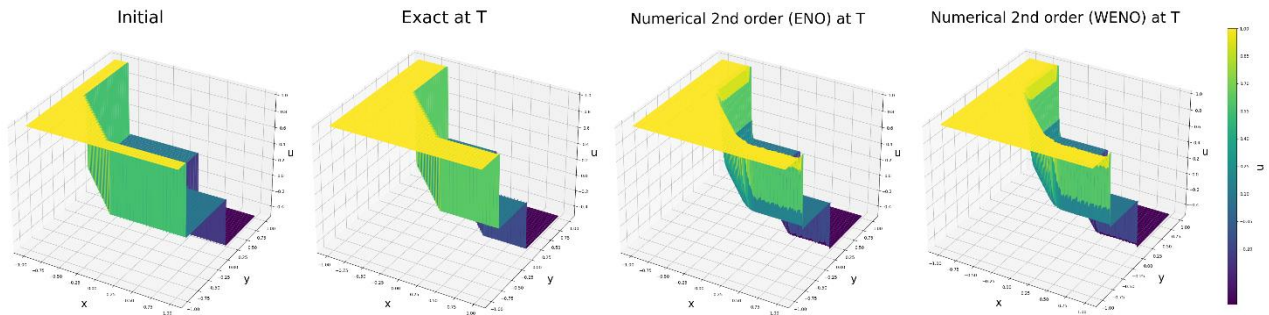


Figure 5: The visualization of the initial condition (left), the exact solution (second left) and the numerical solutions (right) obtained by the ENO and WENO approximations at $T = 0.4$, $M = 320$ for the nonlinear problem dealing with shocks.

Table 3: The numerical errors and the EOCs for the first and second (ENO, WENO) order accurate schemes for the nonlinear problem with the initial condition shown in Figure 5, $T = 0.4$, $C_{max} = 16$.

		ENO		WENO		1st order	
M	N	E	EOC	E	EOC	E	EOC
80	1	0.2194	-	0.2176	-	0.3893	-
160	2	0.1186	0.88	0.1180	0.88	0.2451	0.66
320	4	0.0616	0.94	0.0612	0.94	0.1430	0.77
640	8	0.0318	0.95	0.0313	0.96	0.0775	0.88

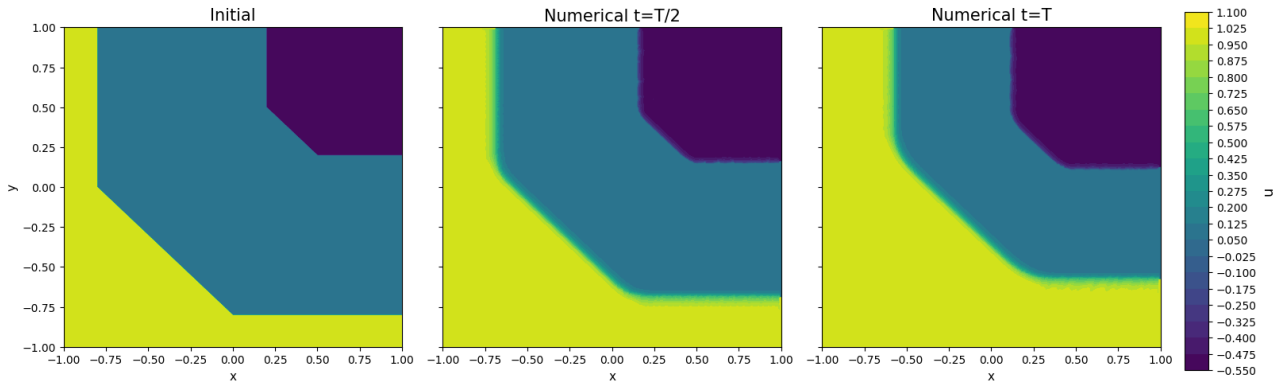


Figure 6: Contours of the initial condition and the numerical solution at two times $t = T/2, T$ for $T = 0.4$ obtained using the ENO approximation for the example with shocks, $M = 320, C_{max} = 16$.

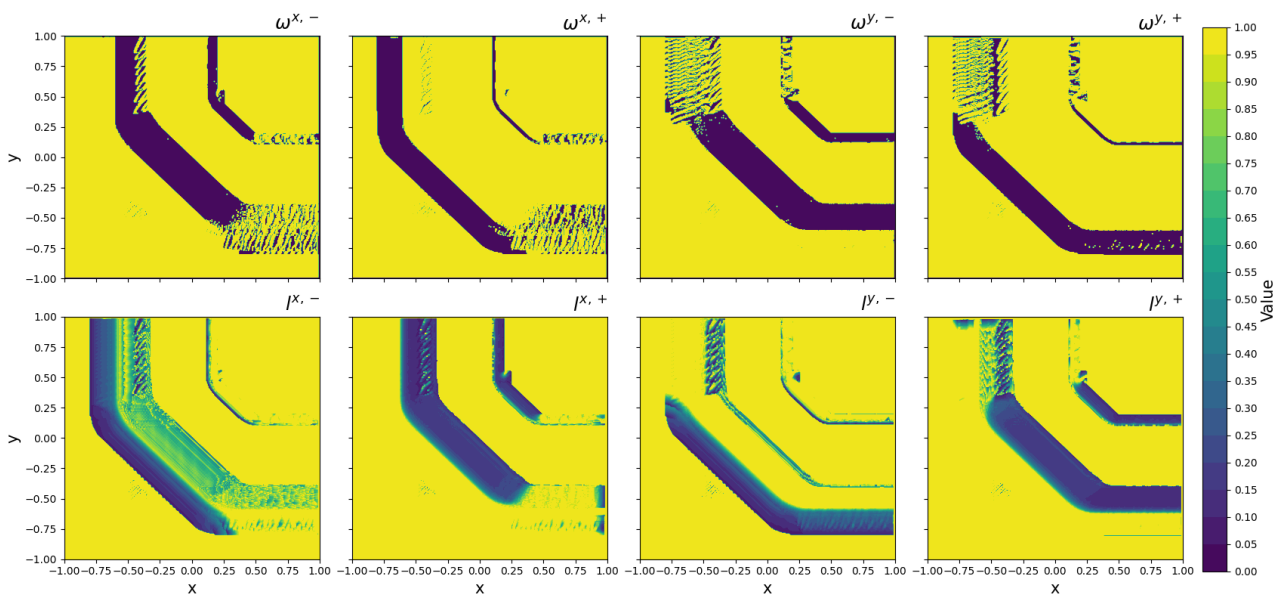


Figure 7: The visualizations of the values of ω and l at time $T = 0.4$ obtained using the ENO approximation for the example with shocks, $M = 320, C_{max} = 16$.

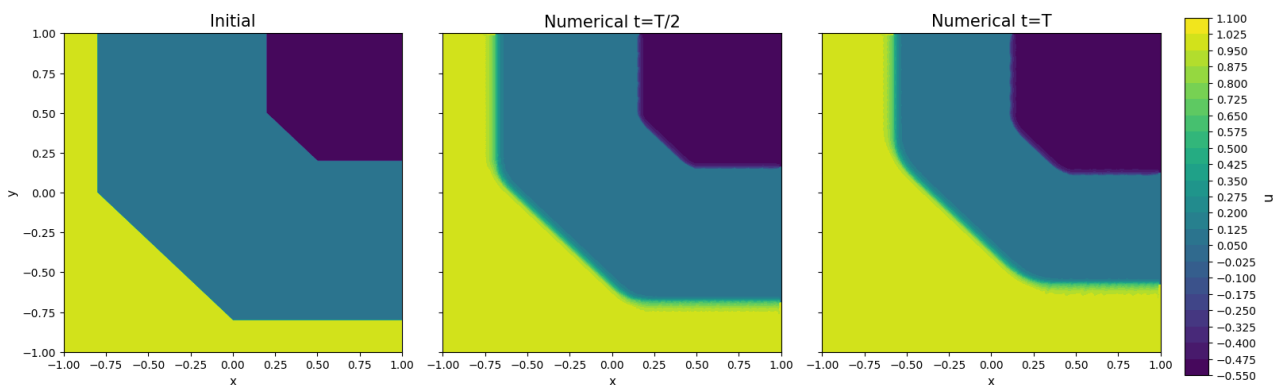


Figure 8: Contours of the initial condition and the numerical solution at two times $t = T/2, T$ for $T = 0.4$ obtained using the WENO approximation for the example with shocks, $M = 320, C_{max} = 16$.

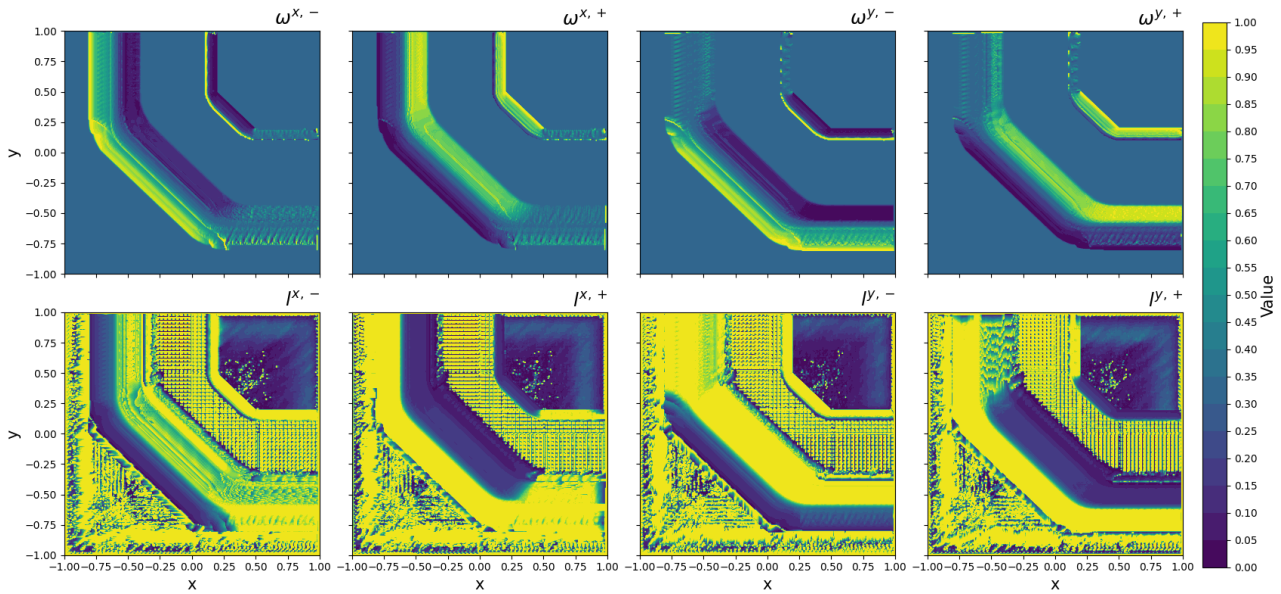


Figure 9: The visualizations of the values of ω and l at time $T = 0.4$ obtained using the WENO approximation for the example with shocks, $M = 320$, $C_{max} = 16$.

3. Conclusion

In this article, we focused on the numerical experiments that demonstrate the effectiveness of the numerical scheme previously derived in [5]. While the derivation and formulation of the scheme were covered in detail in that work, the emphasis here is on validating the method's accuracy, particularly for cases involving significantly larger Courant numbers. The results, in the form of errors and EOCs, confirm the second order accuracy of the scheme and demonstrate its improvement over first order accuracy.

References

- [1] Peter Frolkovič and Nikola Gajdošová. "Unconditionally stable higher order semi-implicit level set method for advection equations". In: *Applied Mathematics and Computation* 466 (Apr. 2024), p. 128460. issn: 0096-3003.
- [2] Peter Frolkovič and Karol Mikula. "Semi-implicit second order schemes for numerical solution of level set advection equation on Cartesian grids". In: *Appl. Num. Math.* (2018).
- [3] G. van Rossum. *Python tutorial*. Tech. rep. Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), May 1995. 7
- [4] Chi-Wang Shu. "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. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
- [5] Dagmar Žáková and Peter Frolkovič. „Numerical solution of two dimensional scalar conservation laws using compact implicit numerical schemes“. en. arXiv:2407.05275 [math]. Aug. 2024. url: <http://arxiv.org/abs/2407.05275>.

BUILDING TECHNOLOGY

Anton Bershadskyi¹

Študijný program: Technológia stavieb, 3. stupeň, 2. ročník

NOVEL FUNCTIONAL GEOPOLYMERS BASED ON ALUMINOSILICATES: APPLICABILITY IN CIVIL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Abstract

This study examines the development and use of innovative functional geopolymers made from aluminosilicates, emphasizing their significance in civil engineering and environmental protection. Known for their eco-friendly production methods and impressive mechanical properties, geopolymers serve as a promising alternative to traditional cement-based materials. The research explores how these geopolymers are synthesized and characterized, highlighting their potential to reduce carbon emissions and make use of industrial by-products. Different sources of aluminosilicates are analyzed to determine their impact on the physical and chemical properties of the final products. The study also looks into the applicability of these materials in construction, showcasing their durability, fire resistance, and resistance to acid corrosion. Furthermore, it evaluates the ability of geopolymers to help remediate contaminated environments and immobilize hazardous waste. Overall, the findings underscore the important role that functional geopolymers can play in promoting sustainable construction practices and enhancing efforts in environmental protection, paving the way for future advancements in materials science and engineering.

Key Words

Geopolymers, aluminosilicates, civil engineering, environmental protection, low carbon emissions, industrial by-products, clays.

1. Relevance and scientific novelty of the research topic

The construction industry is one of the largest sources of global CO₂ emissions, a significant portion of which is associated with the production of materials used in building construction and infrastructure projects. The manufacturing of materials, especially cement, steel, and other key construction components, generates vast amounts of carbon dioxide due to energy-intensive processes that heavily rely on fossil fuels. This makes the construction sector a critical area of focus in addressing the environmental impacts of climate change. Understanding the sources of CO₂ emissions in material production and exploring solutions to reduce them is crucial for achieving global climate goals and promoting sustainable development.

One of the primary sources of CO₂ emissions in construction is cement production, which accounts for approximately 7 - 8% of global carbon dioxide emissions [1]. Cement is the most widely used construction material, particularly in concrete, and its production is extremely energy-intensive. The cement manufacturing process involves heating limestone (calcium carbonate) to a temperature of about 1450 °C in kilns. This high-temperature process triggers a chemical reaction known as calcination, during which calcium carbonate breaks down into calcium oxide, releasing CO₂ as a by-product.

¹ Anton Bershadskyi, MSc., Radlinského 2766/11, 81005, Stare Mesto, Bratislava.

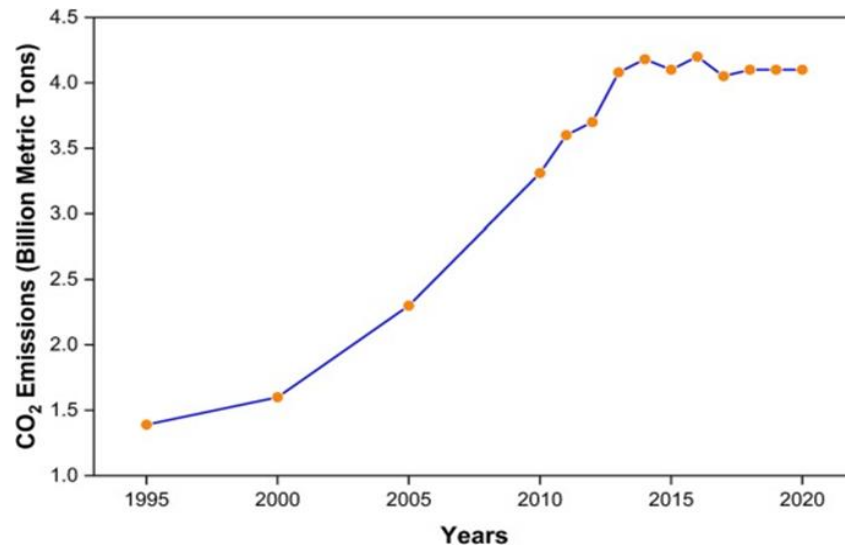


Fig.1. Worldwide CO₂ Emissions from Cement Production (1995–2020)[2]

More than 60 % of the total CO₂ emissions from cement production are attributed to this chemical reaction. Additionally, the energy required to heat the kilns often comes from burning fossil fuels such as coal, natural gas, or oil, which also significantly contributes to overall emissions. The combination of direct CO₂ emissions from the chemical reaction and the energy required to sustain the process makes cement production a particularly carbon-intensive industrial activity.

Another factor contributing to CO₂ emissions from material production is the growing demand for construction as the population increases and cities expand. The construction of more infrastructure, housing, and commercial buildings to meet these needs drives the demand for materials such as cement, steel, and aluminum. The scale of material production required to satisfy these demands leads to an increase in the carbon footprint. For example, global cement production reached 4.1 billion tons in 2020, and this figure is expected to grow as urbanization continues. Without significant changes in material production methods, emissions from the construction sector will continue to rise.

To address these challenges, it is crucial to explore solutions that can reduce CO₂ emissions during material production. One promising solution today is the use of geopolymers. Geopolymers are primarily the result of mixing an aluminosilicate source with an alkaline solution, sometimes followed by thermal treatment.

The primary advantage of geopolymers lies in their environmentally friendly nature. Unlike traditional Portland cement, which requires significant energy and produces large amounts of CO₂, geopolymers can be made at much lower temperatures – sometimes also below 100 °C. This drastically cuts greenhouse gas emissions. Additionally, geopolymers can utilize rich sources of clays, such as kaolin, bentonite and zeolite. It is also possible to use industrial by-products like fly ash and blast furnace slag, solving waste disposal challenges while reducing reliance on virgin raw materials.

One of the most significant benefits of geopolymers is the reduced carbon footprint caused by their production compared with cement based materials. While Portland cement production emits around 900 kg of CO₂ per ton, the energy needed to produce geopolymers is 60 - 80% lower, but sometimes more, reducing emissions of CO₂ to 100 - 200 kg per ton [3]. Such an alternative to cement materials could significantly lessen the construction sector's overall carbon emissions, a critical concern given its role as a major contributor to anthropogenic greenhouse gases. Geopolymer concretes also boast impressive compressive strength, ranging from 40 to 150 MPa, depending on their composition and manufacturing process [3]. They maintain structural integrity even at temperatures as high as 1000 °C – and in some cases, up to 1200 °C – whereas traditional concrete begins to deteriorate at around 300 – 400 °C.

Moreover, geopolymers are exceptionally resistant to acid corrosion, tolerating environments with sulfuric and hydrochloric acids at concentrations of 10 - 20%, compared to traditional cement, which starts to break down at much lower acid concentrations. This makes geopolymers ideal for use in chemically aggressive environments, enhancing durability in industrial and infrastructure applications. They also exhibit significantly less shrinkage during curing – less than 0.05 % compared to the 0.1 - 0.2 % typical for Portland cement – minimizing the risk of cracking and contributing to longer-lasting structures.

Another major advantage of geopolymers is their ability to incorporate industrial waste materials [4]. They can utilize up to 90 % of fly ash and slag, effectively recycling these by-products from power plants and steel mills into useful building materials, which helps to reduce waste accumulation and lower environmental impact.

The applications of geopolymers are diverse. Composite or multicomponent geopolymers can serve as a complete or partial replacement for cement in construction, offering strong, durable concrete for structures like roads, bridges, and buildings [3]. In some cases, geopolymer-based concrete can fully replace traditional cement mixes, significantly lowering the carbon footprint of construction projects while providing enhanced performance. Their ion-exchange and sorption properties also make geopolymers highly effective in water purification systems and soil remediation, where they can capture and immobilize heavy metals like lead, mercury, cadmium and others. This makes them particularly useful for industrial wastewater treatment and remediation of soil.

In the field of nuclear waste disposal, geopolymers offer exceptional stability in radioactive conditions, making them well-suited for immobilizing radioactive materials [5]. They can effectively trap and contain hazardous elements, preventing them from leaching into the environment. This long-term stability positions geopolymers as a valuable material for nuclear waste storage, reducing the risk of radioactive contamination over time. Their resistance to acid corrosion also makes geopolymers ideal for protecting industrial structures from the harsh effects of chemical exposure, extending the life of equipment and reducing maintenance costs.

Geopolymers are also valuable for stabilizing industrial waste, turning potentially hazardous by-products into safe, usable building materials. This approach could provide a sustainable solution to the growing problem of waste accumulation in industrial regions. Additionally, their heat resistance makes them suitable for manufacturing refractory materials and insulation for high-temperature applications, such as furnaces and power plant equipment, which are critical in industries like metallurgy and energy production.

2. Raw materials for geopolymer production

Geopolymers are synthesized from various aluminosilicate materials, each contributing unique properties to the final product. Kaolin, also known as kaolinite, is a clay mineral with the chemical formula $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. In its raw form, kaolin has limited reactivity, but when calcined (thermally treated) at temperatures around 600 - 800 °C, it transforms into metakaolin. Metakaolin is highly reactive and plays a crucial role in geopolymerization, making it one of the most widely used raw materials in geopolymer production. Its high purity and availability contribute to its popularity, especially in applications requiring high-strength geopolymer concrete.

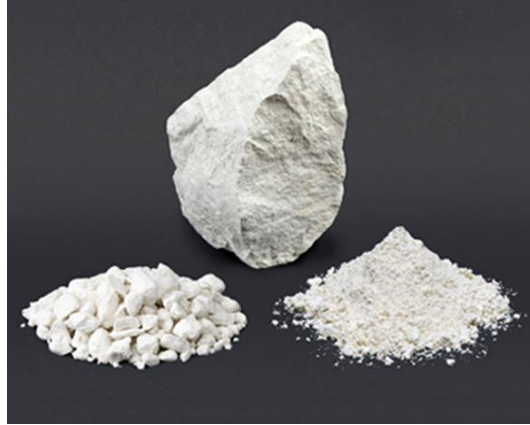


Fig.2. Kaolin

Bentonite is another clay mineral primarily composed of montmorillonite, which has a layered structure. Bentonite can be modified into metabentonite through thermal treatment. Both forms can serve as precursors for geopolymer production, but bentonite's reactivity is generally lower than that of kaolin and metakaolin. However, it is valued for its water retention and binding properties, which can improve the workability of the geopolymer mix. A major application of metabentonite-based geopolymers is mainly in environmental protection, where these materials can immobilize heavy metals and radionuclides into their geopolymeric matrix.



Fig.3. Bentonite

Zeolite is a naturally occurring aluminosilicate with a highly porous structure. It is typically used in geopolymers for its pozzolanic properties and its ability to enhance the mechanical strength of the final product. When thermally treated, it forms metazeolite, which increases its reactivity. Zeolites are often used in combination with other materials like fly ash or slag to optimize geopolymer properties.



Fig.4. Zeolit

Fly ash, a byproduct of coal combustion in power plants, is one of the most commonly used materials in geopolymer production. It contains silica and alumina in amorphous forms, making it highly reactive in an alkaline environment. Fly ash-based geopolymers are known for their excellent mechanical strength, durability, and resistance to chemical attack, making them ideal for construction applications, including concrete.



Fig.4. Fly-ash

Ground granulated blast furnace slag (GGBFS) is another industrial byproduct that plays a significant role in geopolymer production. It is formed from the waste material generated during steel production and contains high levels of calcium, which can enhance the geopolymerization process. GGBFS-based geopolymers offer excellent durability, low shrinkage, and high compressive strength, making them suitable for structural applications.



Fig.5. Ground granulated blast furnace slag

Volcanic ash, a natural pozzolan, is also used in geopolymer production due to its high silica content. It behaves similarly to fly ash and can form strong, durable geopolymers when combined with alkaline solutions. Volcanic ash is abundant in regions with volcanic activity and offers a sustainable alternative to traditional cement materials.



Fig.6. Volcanic ash

Each of these materials – kaolin, metakaolin, bentonite, metabentonite, zeolite, metazeolite, fly ash, GGBFS, and volcanic ash – offers distinct advantages in geopolymer production, depending on the desired properties of the final product. Metakaolin and fly ash are particularly popular due to their high reactivity and performance, while materials like GGBFS and volcanic ash enhance durability and strength. The combination of different materials allows for the optimization of geopolymers for specific applications, making them a promising solution for sustainable construction [6].

3. Testing methods of physical and chemical properties

In studying of geopolymers it's crucially important to determine structure, chemical composition and physical properties. Also, due to different source of material it's also important to understand composition of every source material. Main methods to understand those important chemical properties are X-ray Diffraction, Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Scanning Electron Microscopy, BET-N₂ adsorption test.

X-ray diffraction (XRD) analysis is a powerful analytical technique used to determine the crystalline structure of materials, including aluminosilicate components in geopolymers. By directing X-rays at the sample, the technique measures the angles and intensities of the scattered rays, providing information on the arrangement of atoms within the crystal lattice. This data helps identify the phases present in the geopolymer, revealing the formation of crystalline structures and the extent of crystallinity. XRD can also indicate changes in mineralogy during the curing process, which is crucial for understanding the material's properties and performance. The information obtained from XRD contributes to optimizing geopolymer formulations and ensuring their stability and durability in various applications.

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) is an analytical technique used to identify functional groups and molecular structures in geopolymer materials. By passing infrared light through the sample, FTIR measures the absorption of specific wavelengths corresponding to various chemical bonds. The resulting spectrum provides valuable information about the organic and inorganic components of the geopolymer, revealing the presence of key functional groups such as silicates and aluminates. FTIR is particularly useful for monitoring chemical changes during geopolymerization and assessing the effects of different raw materials on the final product. This information aids in understanding the material's behavior and reactivity, allowing researchers to tailor geopolymer formulations for specific applications.

Scanning Electron Microscopy (SEM) is a high-resolution imaging technique that provides detailed information about the surface morphology and microstructure of geopolymers. By scanning the sample with a focused beam of electrons, SEM generates images that reveal the texture, particle size, and distribution of phases within the material. This technique can also be coupled with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) to obtain elemental composition data, further enhancing the understanding of the material's characteristics. SEM is invaluable for examining the microstructural changes that occur during the curing process and assessing the effects of different additives or production methods on the geopolymer's performance. The insights gained from SEM analyses contribute to optimizing the properties of geopolymers for various engineering applications.

The BET-N₂ adsorption test is a crucial method for evaluating the specific surface area, porosity, and pore structure of geopolymer materials. This technique involves exposing geopolymer samples to nitrogen gas at varying pressures to measure the amount of nitrogen adsorbed on the surface. The resulting data provides important parameters, including the specific surface area, which reflects the material's reactivity and bonding potential, and pore volume, indicating its absorption capacity. Additionally, the pore size distribution can be determined, which affects the geopolymer's

permeability and strength. The BET-N₂ test is essential for optimizing geopolymer formulations for specific applications, such as environmental remediation and construction, by ensuring that the material possesses the desired surface characteristics and durability.

To study mechanical properties of geopolymers compressive strength test, tensile strength test, water adsorption test, frost resistance test, porosity test and chemical resistance test are carried out.

Compressive Strength Testing is a standard mechanical test used to evaluate the load-bearing capacity of geopolymers. This test measures the ability of the material to resist deformation under compression, which is a critical factor for structural applications.

Flexural Strength Testing assesses the material's ability to resist bending forces. Flexural strength is particularly important for geopolymers used in structural elements that may be subject to tensile and compressive forces, such as beams or slabs.

Water Adsorption and Porosity Tests are used to evaluate the durability of geopolymers, especially in environments exposed to moisture. These tests help determine the material's ability to resist water infiltration, which is critical for long-term performance in construction applications.

Chemical Resistance Testing examines how well geopolymers withstand exposure to aggressive chemical environments, such as acids, alkalis, or salts. Geopolymers are often praised for their superior chemical resistance compared to traditional cement concrete, making this testing important for applications in harsh environments like wastewater treatment plants or industrial facilities.

4. Objectives of the work

The main goal of this work will be to prepare new functional geopolymers based on aluminosilicates in the near future, which will be promising for construction and environmental applications. In order to meet the main objective, the production of individual geopolymers will be optimised. Their structural, physicochemical and mechanical properties will be investigated using various scientific techniques.

5. Conclusions

In conclusion, novel functional geopolymers based on aluminosilicates demonstrate significant promise in civil engineering and environmental protection. Their unique properties, such as high strength, durability, and sustainability, make them suitable for various applications, including construction materials and waste management solutions. These geopolymers can effectively utilize industrial by-products, thereby contributing to circular economy principles and reducing environmental impact. As advancements continue in this field, the integration of these innovative materials into mainstream practices can enhance building performance and promote sustainable development. Ultimately, the ongoing exploration of these geopolymers is crucial for addressing the challenges faced in modern construction and environmental preservation.

References

- [1] Luciano Sambataro, Facundo Bre, Neven Ukrainczyk, Eduardus A.B. Koenders, Environmental benchmarks for the European cement industry, Sustainable Production and Consumption, Volume 45, 2024, Pages 429-449, ISSN 2352-5509, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.01.020>
- [2] Raheel Asghar, Mohsin Ali Khan, Rayed Alyousef, Muhammad Faisal Javed, Mujahid Ali, Promoting the green Construction: Scientometric review on the mechanical and structural performance of geopolymer concrete, Construction and Building Materials, Volume 368

- [3] Swagato Das , Purnachandra Saha , Swatee Prajna Jena , Pratyush Panda (2022)
Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission – A review, *Materials today: proceedings*. Vol. 60 pp. 62-71
- [4] A.M. Fernandez-Jiminez, A. Palomo, C. Lopez-Hombrados Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete, *ACI Mater J*, 103 (2006), pp. 106-112
- [5] Jiarui Liu , Yidong Xu , Wensheng Zhang c , Jiayuan Ye c , Rui Wang (2024), Solidification performance and mechanism of typical radioactive nuclear waste by geopolymers and geopolymer ceramics: A review, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 169 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130502>.
- [6] H.M. Tanu, Sujatha Unnikrishnan, Review on Durability of Geopolymer Concrete Developed with Industrial and Agricultural Byproducts, *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.335>.

Adam Hopocký

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

INOVATÍVNE METÓDY OŠETROVANIA BETÓNU PRE ZVÝŠENIE ŽIVOTNOSTI STAVEBNÝCH KONŠTRUKCIÍ

INNOVATIVE CURING METHODS FOR ENHANCED DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES

Abstract

This article explores innovative curing methods for concrete, focusing on their impact on the hydration process and long-term performance of concrete structures. Methods using internal curing agents like lightweight aggregates and superabsorbent polymers have been analyzed, and the research findings indicate significant benefits such as reduced shrinkage and improved compressive strength. Various self-curing mechanisms are compared with traditional curing techniques, providing a comprehensive analysis of the advantages these methods bring to concrete durability.

Kľúčové slová

Vnútorne ošetrovanie betónu, samoošetrovanie betónu, hydratačný proces, ľahké kamenivo, superabsorpčné polyméry

1. Úvod

Betón je jedným z najpoužívanějších stavebných materiálov súčasnej doby, pričom jeho ročná globálna spotreba sa odhaduje na minimálne 1 tonu betónu na každého človeka na planéte. Trvanlivosť a mechanické vlastnosti betónu výrazne závisia od správneho priebehu hydratácie cementu v betónovej zmesi. Proces hydratácie je vážne ovplyvňovaný ošetrovaním. Bežné metódy ošetrovania čerstvého betónu spočívajú v zabráňovaní úniku vlhkosti z konštrukcie, alebo v dopĺňaní vlhkosti do konštrukcie. Avšak s rastúcim dopytom po kvalitnejších, trvanlivejších a efektívnejších konštrukciách sa zvyšuje záujem o inovátné metódy ošetrovania betónu.

Jednou z inovátnějších metód ošetrovania je aj vnútorne ošetrovanie betónu – samoošetrovanie. Tento druh ošetrovania sa realizuje prostredníctvom materiálov, ktoré sú schopné udržať vodu v betónovej zmesi a v prípade potreby ju postupne uvoľňovať počas procesu hydratácie. Tento prístup umožňuje neprerušovanú hydratáciu cementu v celom priereze konštrukcie, čím sa dosahuje lepšia trvanlivosť a vyššia pevnosť betónu.

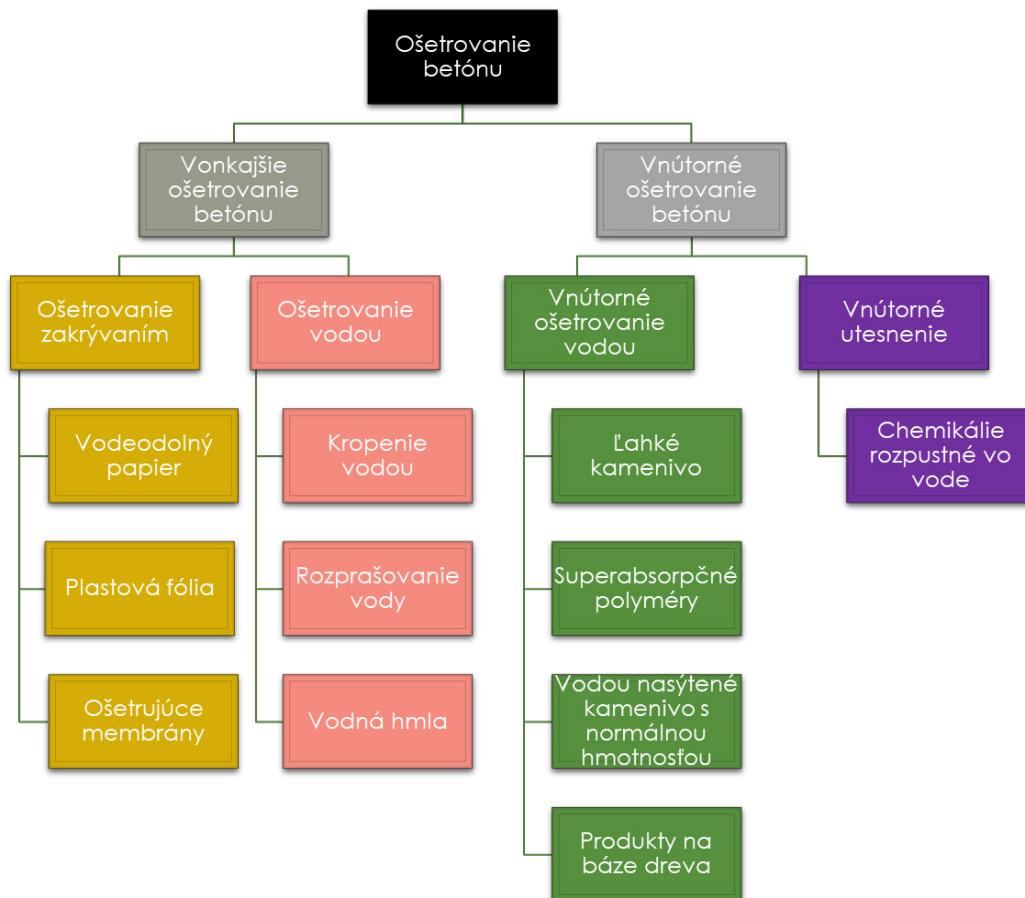
Cieľom tohto článku je poukázať na výhody samoošetrovania betónu na jeho účinnosť a dlhodobé výhody. Špeciálnu pozornosť budeme venovať efektívnym nosičom vody, ako sú ľahké kamenivá a superabsorpčné polyméry a ich vplyvu na hydratáciu betónu.

2. Proces hydratácie bežného betónu

Proces hydratácie cementu v sebe zahŕňa sériu viacerých chemických reakcií – voda reaguje so slinkovými minerálmi v cemente. Proces je najintenzívnejší v prvotných fázach zrenia betónu. Počas zrenia sa v čerstvej betónovej zmesi voda viaže na slinkové minerály, čím vznikajú produkty ako hydrát kremečitanu vápenatého (C-S-H) a hydroxid vápenatý (CH), ktoré veľmi výrazne ovplyvňujú finálne pevnosti betónových konštrukcií. V závislosti od druhu cementu a jeho použitého zloženia môžu hydratačné produkty, ktoré behom hydratácie vznikajú, významne ovplyvňovať nie len mikroštruktúru, ale aj výsledné mechanické vlastnosti betónu a teda aj realizovanej betónovej konštrukcie.

Hydratácia cementovej kaše je dlhotrvajúci proces, ktorý trvá dni až týždne. Z matematického pohľadu ho vieme označiť aj za „nekonečný“. Pričom betón postupne získava svoje finálne požadované vlastnosti. Betónové konštrukcie sú vo všeobecnosti citlivé na vplyvy prostredia a sú náchylné na poruchy nie iba v mladom veku, ale počas celej životnosti konštrukcie. Požiadavky na životnosť, odolnosť, nosnosť a mechanické vlastnosti sú dôležité z ekonomického hľadiska. A aj preto je nutné počas celého procesu hydratácie zabezpečiť dostatočné množstvo vody pre správnu hydratáciu cementovej kaše.

Navzdory aktuálnosti a dôležitosti ošetrovania konštrukcií z betónu, nie je známy žiadny komplexný model návrhu optimálneho ošetrovania.



Obr. 1 Metódy ošetrovania betónu

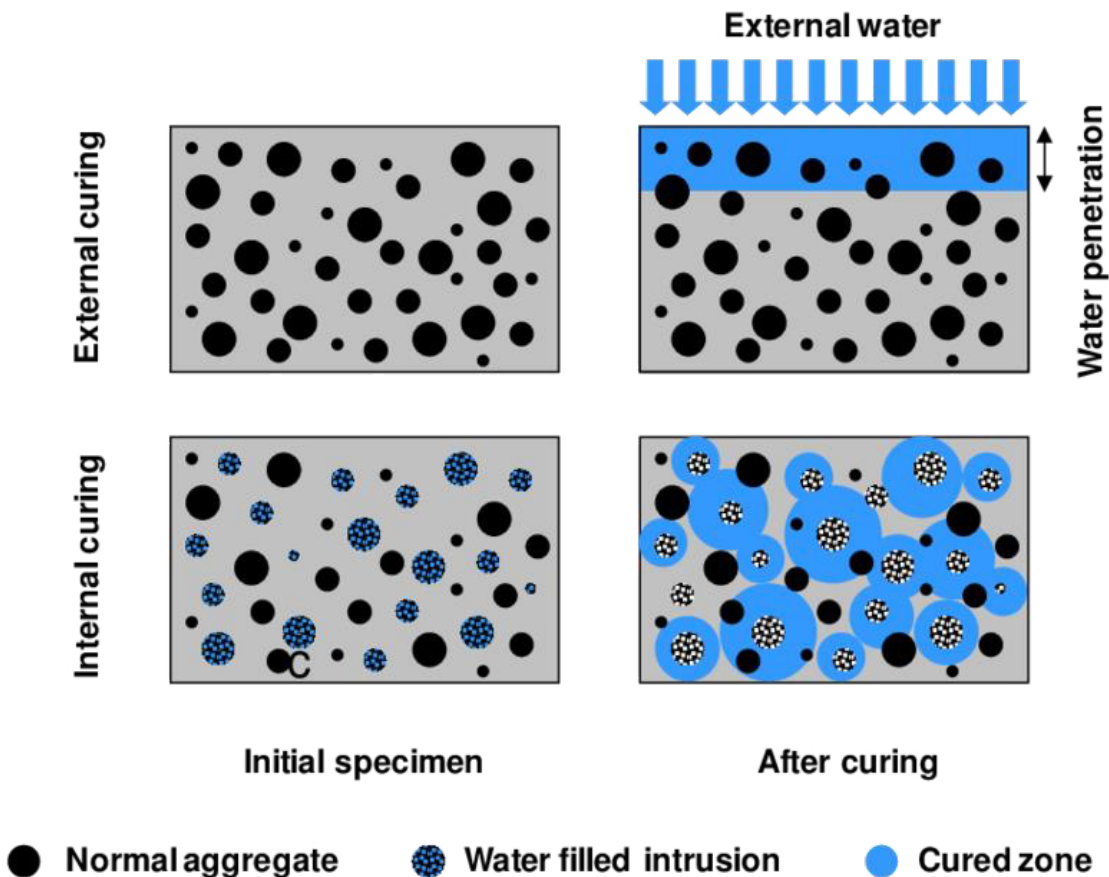
3. Samoošetovanie betónu a jeho výhody

Samoošetovanie betónu je metóda ošetrovania betónu, ktorá spadá do kategórie vnútorného ošetrovania pomocou vody. V rámci tohto procesu sa využívajú vnútorné médiá alebo nosiče vody, tieto nosiče vody boli úplne hydratované a pridávajú sa do betónovej zmesi. Tieto hydratované médiá slúžia ako zásobníky vody, ktorú postupne uvoľňujú počas procesu hydratácie betónu. Podstatou tejto technológie je redukovať odparovanie vody z materiálu, či už betónu alebo maltovín a zvýšiť schopnosť materiálu zadržiavať vodu.[1]

Pre vytvorenie čo najefektívnejšieho zloženia samoošetrovacieho betónu prebehlo mnoho vedeckých skúmaní, v ktorých sa výskumníci zamerali na použitie rôznych materiálov ako ošetrovacích médií.

Niektoré vedecké kolektívy uvažovali s použitím ľahkých pórovitých kamenív (LWA) [2], pórovitých super jemných práškov [3], umelých kamenív s normálnou hmotnosťou [4], alebo prírodných vlákien [5]. Iní zas zvolili prístup cez chemické ošetrovacie médiá - superabsorpčné polyméry [6] a polyetylénglykol [7].

Všetky tieto materiály majú spoločné vlastnosti a to absorbovať, zadržať a následne uvoľniť vodu. Voda je do konštrukcie uvoľňovaná postupne, čím je zaistená kontinuálna hydratáciu betónu v celom priereze, a tým zlepšujú jeho mechanické vlastnosti vrátane väčšej pevnosti a menšieho zmršťovania pri schnutí.



Obr. 2 Porovnanie vonkajšieho a vnútorného ošetrovania betónu[8]

4. Porovnanie tradičných a inovatívnych metód ošetrovania betónu

Tradičné všeobecne rozšírené metódy ošetrovania betónu sú hlavne metódy, ktorých podstata spočíva v polievaní realizovanej konštrukcie vodou alebo jej zakrytie, aby sa predišlo odparovaniu vody. (Vid'. Obr. 1 ľavá strana) Tieto metódy nie sú vždy dostatočne účinné, čo môže viesť aj k vážnym defektom realizovaných konštrukcií – vznik trhlín. Problém s rýchlou dehydratáciou betónu dochádza v našich klimatických podmienkach hlavne v období teplých letných mesiacov, kedy teploty presahujú 25 stupňov Celzia. Tento druh ošetrovania je však veľmi ekonomicky výhodný a jednoduchší na implementáciu v rámci stavby a aj staveniska.

Na druhej strane stoja metódy vnútorného ošetrovania, kam patrí aj samoošetrovanie predstavujú riešenie, ktoré je schopné zabezpečiť kontinuálnu dostupnosť vody pre úplnú hydratáciu cementovej pasty v celom objeme konštrukcie. Tieto metódy je možné využiť na miestach, kde je bežné vnútorné ošetrovanie nemožné, alebo ťažko realizovateľné. Výhodným ošetrovacím riešením je táto metóda aj pre masívne železobetónové konštrukcie, ako sú mosty a iné dopravné stavby. Samoošetrovanie predstavuje inováciu, ktorá z počiatku môže viesť k vyšším nákladom, avšak treba uvážiť jej dlhodobé prínosy pre realizované konštrukcie, ako dlhšia životnosť a nižšie režijné náklady, ako aj náklady na opravy.

Jedným z hlavných rozdielov pri použití vnútorného ošetrovania je ošetrovacia voda, ktorá sa uchovaná v ošetrovacích médiách. Následne sú rovnomerne rozptýlené počas procesu miešania v cementovej zmesi. To zabezpečuje aj rovnomernosť distribúcie vody pre ošetrovanie v celom priereze realizovanej konštrukcie. Ošetrovacia voda nie je dodávaná len na povrch konštrukcie, odkiaľ môže prenikať maximálne len niekoľko milimetrov smerom dnu do realizovanej konštrukcie. Priebeh vnútorného a vonkajšieho ošetrovania znázorňuje Obr.2, kde vidíme jasný rozdiel v distribúcií vody v rámci prierezu konštrukcie.

5. Záver

V stavebnom priemysle je stále kladený dôraz na hľadanie nových a zlepšovanie zaužívaných technológií, ktoré by zlepšili kvalitu a trvanlivosť realizovaných konštrukcií a stavebných projektov. Jednu z takýchto inovácií predstavuje aj samoošetrovanie betónu. Táto technológia poskytuje alternatívny prístup k tradičnému ošetrovaniu betónu, pričom využíva špeciálne nosiče vody, ktoré zabezpečujú vnútornú hydratáciu betónu. Vďaka tomu sa minimalizuje riziko vzniku prasklín, ktoré práve pri masívnych betónových konštrukciách predstavujú veľký problém, ktorý môže ohrozovať integritu celej konštrukcie.

V rámci tuzemských podmienok, krajín V4 – Slovensko, Česko, Poľsko, Maďarsko, nie sú dostupné žiadne relevantné informácie o používaní technológie samoošetrovania na realizácii stavebných projektov.

Vzhľadom na všetky výhody, ktoré technológia poskytuje možno očakávať, že samoošetrovanie betónu bude v budúcnosti čoraz častejšie využívané v stavebných projektoch, kde je potrebné zlepšiť trvanlivosť a odolnosť konštrukcií. Kým bude táto technológia implementovaná do bežnej praxe je nutné ju experimentálne otestovať. Odkúšať rôzne materiály, ktoré by boli vhodné na využitie pri

tejto technológií a sú jednoducho dostupné v miestnych podmienkach, napríklad ľahké kamenivá Keramzit, Liapor.

Použitá literatúra:

[1] Bentz, D.P.; Lura, P.; Roberts, J.W. Mixture proportioning for internal curing. *Concr. Int.* 2005, 27, 35–40.

[2] Kevern, J.T.; Nowasell, Q.C. Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2018, 161, 229–235. [Online] ku dňu 4.4.2024, dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.055>

[3] Van, V.-T.A.; Rößler, C.; Bui, D.-D.; Ludwig, H.-M. Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2014, 53, 270–278. [Online] ku dňu 4.4.2024, dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015>

[4] Abate, S.Y.; Song, K.-I.; Song, J.-K.; Lee, B.Y.; Kim, H.-K. Internal curing effect of raw and carbonated recycled aggregate on the properties of high-strength slag-cement mortar. *Constr. Build. Mater.* 2018, 165, 64–71. [Online] ku dňu 4.4.2024, dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.035>

[5] Jongvisuttisun, P.; Leisen, J.; Kurtis, K.E. Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers. *Cem. Concr. Res.* 2018, 107, 206–220. [Online] ku dňu 4.4.2024, dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.007>

[6] Woyciechowski, P.P.; Kalinowski, M. The Influence of Dosing Method and Material Characteristics of Superabsorbent Polymers (SAP) on the Effectiveness of the Concrete Internal Curing. *Materials* 2018, 11, 1600. [Online] ku dňu 4.4.2024, dostupné na: <https://doi.org/10.3390/ma11091600>

[7] Chand, M.S.R.; Giri, P.S.N.R.; Pancharathi, R.K.; Kumar, G.R.; Raveena, C. Effect of self curing chemicals in self compacting mortars. *Constr. Build. Mater.* 2016, 107, 356–364. [Online] ku dňu 4.4.2024, dostupné na: <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1160843>

[8] Bentz, D.P.; Weiss, W.J. *Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review*; US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 2011; pp. 1–82.

Artem Chystiakov¹

Študijný program: Technológia stavieb, 3. stupeň, 3. ročník

USING OF MIXED RECYCLED AGGREGATES FOR CONCRETE PRODUCTION

Abstract

The article presents results on properties of concretes based on recycled aggregates of different types for construction of lower layers of rigid pavements. The following concrete compositions were used: river gravel and quartz sand, recycled concrete aggregate and quartz sand, recycled masonry aggregate and quartz sand, and mixed recycled aggregate and quartz sand. Results obtained in experiments for the compressive strength, flexural strength in bending, average density, water absorption, and frost resistance are presented. A comparison of the properties of concretes from different types of aggregates is carried out. The possibility and feasibility of producing concrete based on mixed recycled aggregates have been proven using the comparison with concretes based on other types of aggregates. The developed concretes are proposed to be used for road construction as a lower layer for multilayer rigid pavements made from cement concrete.

Key Words

Recycled aggregates, recycled concrete aggregates, recycled masonry aggregates, mixed recycled aggregates, secondary crushed stone, concrete recycling, road concretes.

1. Relevance and scientific novelty of the research topic

Nowadays humanity is producing a colossal amount of construction and demolition waste. In 2016 in Europe approximately 915 million tons of concrete scrap were received [1], in France in 2008 38.2 million tons of concrete scrap were received [2], in the USA – 143 million tons [3], and this figure is increasing annually [4]. There are a number of reasons why such a large amount of construction and demolition waste is produced: dismantling of typical buildings massively erected in middle of the last century (often such building erected as temporary housing with little exportation period) which is obsolete physically and aesthetically; renovation of industrial districts which over time began to be located in the central parts of developed cities with high cost of real estate; natural disasters and earthquakes first of all; hostilities and military conflicts. In particular, because of natural disasters and military conflicts, dismantling of structures is always chaotic and disorganized, as results demolition waste is formed with a heterogeneous and very diverse composition. Such waste is very difficult to sort to obtain clean and homogeneous raw material. Still, that remains can be processed into mixed recycled aggregates and reused. The most rational way to use such raw materials is to produce concrete with low strength requirements, for example for the construction of lower layers of rigid road surfaces. The most important requirement for mixed recycled aggregate is the absence of gypsum inclusions in its composition, since gypsum can subsequently cause corrosion of concrete made from this aggregate [5]. Modern dismantling technologies and technologies for processing of mixed construction and demolition waste allow to obtaining raw materials without gypsum content [3].

¹ Artem Chystiakov, MSc., Radlinského 2766/11, 81005, Stare Mesto, Bratislava.

Along with the use of mixed recycled aggregates for the production of concrete, the use of other types of recycled aggregates is promising such as recycled concrete aggregates and recycled masonry aggregates of coarse and fine fractions. To date, a number of studies have been conducted confirming the feasibility of using recycled aggregates of various types for the production of concrete. Such concretes have sufficient strength to be used for road construction and for arranging of other structures that do not experience critical loads [6, 7]. The strength characteristics of concrete made from secondary aggregates do not allow the production of critical load-bearing reinforced concrete structures from it, but it is acceptable to use it for construction of lower layers of cement concrete pavements [8, 9]. According to normative documents GBN B.2.3-37641918-557 [10] and DBN B.2.3-4:2015 [11], the concretes lower layers of rigid pavements must have flexural strength in bending mainly 1.0 MPa or 1.2 MPa depending of the road class and frost resistance grade at least F25 or F50, depending on the average temperature of the coldest month of region of construction.

Nowadays, the international scientific community has an insufficient amount of knowledge about production of concrete compositions from different types of recycled aggregates. First of all, this is affected by a wide variety of recycled and natural coarse and fine aggregates, which can differ significantly depending on the region or country of manufacture, a wide range of cements and superplasticizer additives that are on the market. The combination of certain components significantly affects the properties of concrete, which was confirmed during ongoing tests. Moreover, topic of using of mixed recycled aggregates for concrete production still remains unexplored, it is relatively new to study and important for many countries.

This research aims to develop optimal concrete compositions based on recycled aggregates of different types, including mixed recycled aggregates, for the construction of lower layers of rigid road pavements. The experimental concretes meet the requirements of regulatory documents for the construction of structures of this type. Research confirms the possibility of using mixed recycled aggregates without a significant loss of concrete strength, in comparison with the use of natural aggregates and homogeneous pure recycled concrete and masonry aggregates.

2. Materials used for research

For production of experimental concretes Portland cement CEM II/B-S 42.5 N produced by the Slovak company Cementaren Ladce was used. Brand of cement 500, it consist up to 21 % of blast furnace slag. For increasing of workability of concrete mixtures without increasing of w/c of concrete a polycarboxylate type superplasticizer additive Berament HT28 produced by the Slovak company Beton Racio was used in amount of 1.2 % of cement mass. The manufacturer of additive notes that the Berament HT28 is effective in increasing of workability of concrete mixtures, increasing of the self-compacting ability of mixture, which is especially important when working with concrete mixtures with low workability (S1 with cone slump 1 cm – 2 cm).

For the production of experimental concrete of series 1 – 4 the following types of coarse aggregate of fraction of 8 mm – 16 mm were used:

- river gravel. Bulk density of gravel $\rho_n = 1570 \text{ kg/m}^3$, water absorption 0.70 % (see Figure 1a);
- recycled concrete aggregate. Bulk density of RCA $\rho_n = 1260 \text{ kg/m}^3$, water absorption 5.94 % (see Figure 1b);
- recycled masonry aggregate. Bulk density of RMA $\rho_n = 1150 \text{ kg/m}^3$, water absorption 8.53 % (see Figure 1c).
- mixed recycled aggregate. Bulk density of MRA $\rho_n = 1170 \text{ kg/m}^3$, water absorption 13.03 % (see Figure 1d).

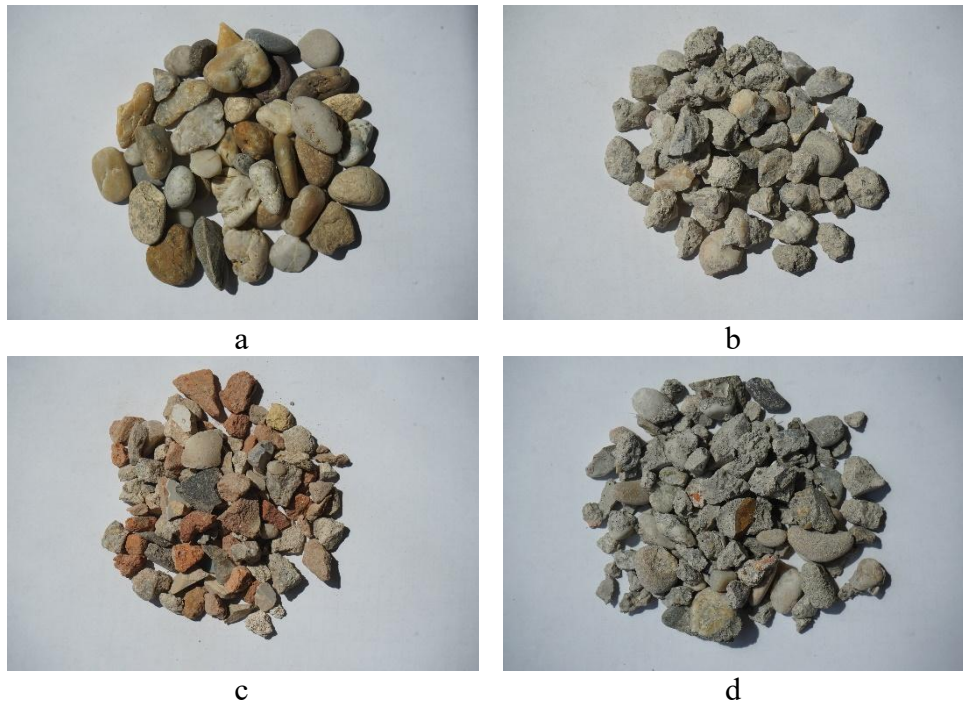


Figure 1: Types of coarse aggregates used in this research

Mixed recycled aggregate is a specific raw material because it has not a constant composition, the composition can be differed depends of region of origin, type of demolished structure, technology of demolition and processing and other aspects. In the present research mixed recycled aggregate with presented composition was used: 34.7 % of pure cement-sand matrix, 31.5 % of granite connected with cement-sand matrix, 23.9 % of pure granite, 8.9 % of bricks and ceramic tiles, 0.7 % of asphalt concrete, and 0.3 % of steel wire.

As a fine aggregate for production of experimental concretes we used quartz sand with the fineness modulus of 3.19 and bulk density $\rho_n = 1835 \text{ kg/m}^3$ (see Figure 2).



Figure 2: Quartz sand as fine aggregate

The compositions of all the studied concretes based on recycled and natural aggregates are shown in Table 1.

Table 1: Compositions of the studied concretes

No	Cement (type, kg/m ³)	Coarse aggregate (type, kg/m ³)	Sand (type, kg/m ³)	Additive (type, kg/m ³)	Water (l/m ³)	w/c
1	CEM II/B-S 42.5 R, 300	river gravel, 1252	quartz, 762	Berament HT28, 3.6	124	0.41
2		recycled concrete aggregate, 1122			138	0.46
3		recycled masonry aggregate, 982			175	0.58
4		mixed recycled aggregate, 1102			148	0.49

3. Methods of research

In the process of research four compositions of concrete labelled 1 – 4 based on recycled aggregates were developed. The purpose of concretes is for construction of lower layers of rigid road pavements. Taking into account that layers of concrete during construction of road surface are laid using concrete pavers, which can work with concrete mixtures with minimal workability S1 (cone slump 1 cm – 2 cm), concrete mixtures were developed with minimal possible workability. Workability of researched experimental concretes were S1 which corresponds to 1 cm – 2 cm of cone slump. As is known, reducing the workability of concrete mixture allows to reduce its w/c ratio, which as a result lead to an increase in the strength and durability of concrete due to the lower content of micropores, which are converted as a result of water evaporation [12]. In the case of low workability, developed concrete mixtures can be used only for road construction using concrete paver laying methods.

During research, the mechanical properties of concrete were determined: compressive strength, flexural strength in bending, average density, water absorption, and frost resistance. The properties of concretes based on different types of coarse aggregate were compared: on river gravel and quartz sand (1) as reference composition, on recycled concrete aggregate and quartz sand (2), on recycled masonry aggregate and quartz sand (3) and on mixed recycled aggregate and quartz sand (4).

For the production of all types of concrete mixtures, mixing was carried out in a forced-type laboratory mixer. The workability of the concrete mixtures was determined with help of moisturized steel cone for determining the workability of the concrete mixture. It was established that for all mixtures of the studied concretes, the cone slump was 1 cm – 2 cm, which corresponds to the type of mixture workability S1. The research was conducted on concrete samples – cubes with dimensions of 100 mm × 100 mm × 100 mm and prisms with dimensions 100 mm × 100 mm × 400 mm. After de-moulding, the samples were gaining strength under normal conditions at a temperature of (20 ± 2) °C and a humidity of (95 ± 5) % in a special cabinet.

The concretes were tested for the *compressive strength* at the age of 28 days on samples with dimensions of 100 mm × 100 mm × 100 mm on a Controls MCC8 150/600/1000 press (see Figure 3). The dimensions and density of samples were preliminarily determined. The equipment undergoes an annual accuracy check.

Testing of the concretes for *flexural strength in bending* on the 28th day (see Figure 4) was carried out on samples with dimensions of 100 mm × 100 mm × 400 mm on VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig 280 press. The dimensions and density of samples were preliminarily determined.



Figure 3: Testing of samples for compressive strength



Figure 4: Testing of samples for flexural strength in bending

The *average density* of concretes in normal condition was determined by weighing and measuring of samples using Radwag PS 1000.R2 scales with a scale division of 0.01 g and a maximal load of 3000 g and callipers.

The concretes were tested for *water absorption*. The samples were soaked in water for 5 days and then weighed. After that, the samples were dried in a drying oven BUKOTHERM BK-50 for 24 hours at a temperature of 102 °C, then weighed. Based on the difference in the weight of the samples in a water-saturated and absolutely dried condition, the water absorption of concrete by volume was determined.

The determination of *frost resistance* of the concretes was carried out in accordance with STN 73 1322 [13] according to the third accelerated method. Test was carried out in a 5 % sodium chloride solution at a temperature of freezing –50 °C and a thawing temperature of 20 °C in a climatic chamber BINDER Model MKF 720. The samples were previously water saturated with 5 % sodium chloride solution for 5 days. The frost resistance grade was determined according to STN 73 1322 [13].

4. Research results

Mechanical properties of the concretes made from (1) river gravel and quartz sand, (2) recycled concrete aggregate and quartz sand, (3) recycled masonry aggregate and quartz sand, and (4) mixed recycled aggregate and quartz sand were determined. The experimental concretes were tested for compressive strength on the 28th day, flexural strength in bending on the 28th day, and the average density, water absorption by volume and frost resistance were measured. Properties of the studied concretes are presented in Table 2.

Table 2: Mechanical properties of the studied concretes

№	w/c	Average density, kg/m ³	Water absorption by the volume, %	Compressive strength on 28 th day, MPa	Flexural strength on 28 th day, MPa	Frost resistance
1	0.41	2458	6.3	48.0	3.6	F100
2	0.46	2341	7.7	49.1	3.8	F100
3	0.58	2238	9.8	41.6	3.2	F100
4	0.49	2281	9.1	48.1	3.6	F100

As can be observed from the Table 2, the w/c ratio of concretes directly depends on the type of coarse aggregate used to make concrete. There is a dependence that concretes on a more porous aggregate require more water to ensure the same workability of the mixture – S1, which corresponds

to 1 cm – 2 cm of cone slump. Thus, the lowest w/c, as expected, have concretes based on river gravel. Concretes from more porous recycled concrete aggregate and mixed recycled aggregate have a higher w/c. Mixtures based on the most porous recycled masonry aggregate made of ceramic materials with high water absorption have the highest w/c ratio. The w/c ratio of concretes directly affected their average density in a proportional way. The concretes with a lower w/c ratio have a higher average density. As can be seen from the data in Table 2 and from the graph in Figure 5, the studied concretes have a fairly high compressive strength on the 28th day. Concrete on river gravel and quartz sand (1) has 48 MPa in compression, concrete on recycled concrete aggregate and quartz sand (2) has 49.1 MPa in compression, which is 2 % higher than the strength of reference composition. First of all, this is explained by the wider, rougher and uneven surface of the recycled concrete aggregate compared to the smooth surface of river gravel, this ensures better adhesion of the cement-sand matrix with the aggregate, which ultimately leads to higher strength of concrete. Concrete on recycled masonry aggregate and quartz sand (3) has a compressive strength of 41.6 MPa, which is 13.5 % lower than the strength of the control concrete composition. This is a good indicator given that the recycled masonry aggregate consists of highly porous crushed brickwork, ceramic tiles and porous concrete. The compressive strength of concrete on mixed recycled aggregate and quartz sand (4) is 48.1 MPa, which is the same strength as the reference concrete have. Also, experimental concretes have similar dependencies for flexural strength in bending – 3.6 MPa (1), 3.8 MPa (2), 3.2 MPa (3) and 3.6 MPa (4). When testing concrete for frost resistance, all compositions confirmed the frost resistance grade F100. It is important to note that all concretes were tested only for frost resistance grade F100 – 5 freeze-thaw cycles in a salt solution to meet the requirements of the standards for road concrete. In fact, concretes can have a higher frost resistance grade, which is planned to be established in the future.

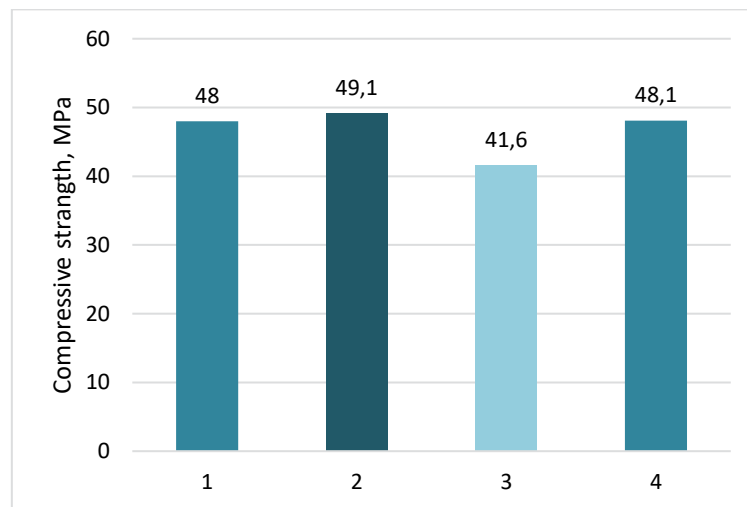


Figure 5: Compressive strength on the 28th day of the tested concretes 1 – 4

Taking into account that studied concretes is developing for construction of lower layers of rigid pavements, they must to comply with the relevant standards. According to GBN V.2.3-37641918-557:2016 [10] and DBN V.2.3-4:2015 [11], concretes for lower layers of rigid pavements from cement concrete must have at least 1.0 MPa or 1.2 MPa of flexural strength in bending depending on class of road and frost resistance grade F25 or F50 depending on climatic features of region. All developed concretes are comply with the requirements for concretes for lower layers of rigid pavements.

The study compared the properties of concrete based on mixed recycled aggregate with concretes based on other natural and recycled aggregates. Mixed recycled aggregate has a much more heterogeneous structure and mixed composition, has higher porosity and water absorption compared to other aggregates that were used to make concrete in this experiment. Despite this, the properties of

concrete based on this aggregate do not differ significantly compared to concretes based on aggregates with a homogeneous composition. This indicates the admissibility of using mixed recycled aggregate for the production of road concrete. Such aggregate can be the most widespread in conditions of chaotic dismantling or destruction of structures, and such aggregate also has the lowest price, which is caused by a more simplified technology for its sorting and processing. It is important to note that in this experiment, a specific blend of mixed recycled aggregate was used, which is specified in the material characteristics in section 2, the blend of recycled aggregate can vary significantly depending on the batch and manufacturer, which will directly affect the properties of the concrete.

5. Conclusions

- Concretes based on different types of natural and recycled aggregates were tested: on (1) river gravel and quartz sand, (2) recycled concrete aggregate and quartz sand, (3) recycled masonry aggregate and quartz sand, and (4) mixed recycled aggregate and quartz sand.
- Compressive strength on the 28th day, flexural strength in bending on the 28th day, average density, water absorption by volume, and frost resistance were determined.
- It was established that the strength and durability characteristics of studied concretes (1 – 4) comply with the standards GBN V.2.3-37641918-557:2016 [10] and DBN V.2.3-4:2015 [11] for the construction of lower layers of rigid pavements.
- It was established that concretes based on mixed recycled aggregates had a sufficiently high strength. The strength of such concrete does not differ significantly from the strength of concretes based on river gravel and pure homogeneous recycled concrete aggregates. That proves the possibility of using such a type of aggregate for the production of a concrete for road construction without additional sorting and processing of mixed recycled aggregate.
- Optimal concrete compositions based on various types of recycled aggregates have been developed, which makes it possible to address the issue of construction and demolition waste reusing, to reclaim construction waste dumps, and to reduce the consumption of natural resources for construction purposes.
- Based on the research results, it was established that the concretes had a fairly high strength and durability indicators, which allows to conclude that further tests on the use of concrete for the arrangement of the upper layers of rigid pavements are advisable. Namely, testing for higher grades of frost resistance, impact resistance and abrasion resistance. It is also expedient to test concretes based not only on recycled coarse-fraction aggregates, but also on fine fractions recycled aggregates in the future.

6. Acknowledgement

Research was funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V01-00141.

Literature

- [1] European Union. WasteStat. Eur. Retrieved 10 6, 2019, from Eurostat.
- [2] Sylvain Guignot, Solene Touze, Frederic Von der Weid, Yannick Menard, Jacques Villeneuve (2015), Recycling Construction and Demolition Wastes as Building Materials. A Life Cycle Assessment. *Journal of industrial ecology*, 19(6), pp. 1030-1041. <https://doi.org/10.1111/jiec.12262>
- [3] Shiv Sai Trivedi, K. Snehal, B. B. Das, Salim Barbhuiya. A comprehensive review towards sustainable approaches on the processing and treatment of construction and demolition waste. *Construction and Building Materials* 393 (2023) 132125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132125>
- [4] Abdol R. Chini, Stuart F. Bruening (2003), Deconstruction and materials reuse in the United States. *The Future of Sustainable Construction*, pp. 1-22.
- [5] Oleg Popov, Artem Chystiakov, Anatoly Petrovsky (2021), Analytical methods for selection of demolition technology. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1141(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1141/1/012029>
- [6] Artem Chystiakov, Sergii Kroviakov, Andrii Ihnatenko, Igor Medved. Use of secondary aggregates for concrete production. Conference: Juniorstav 2024: Proceedings 26th International Scientific Conference Of Civil Engineering. <https://doi.org/10.13164/juniorstav.2024.24091>
- [7] Yuanxun Zheng, Yahui Zhang, Peng Zhang. Methods for improving the durability of recycled aggregate concrete: A review. *Journal of materials research and technology* 2021, 15, pp. 6367-6386. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.085>
- [8] Kroviakov S.O., Chystiakov A.O.(2023), Strength of concrete for bases of road clothes on different types of secondary gravel and sand. *Modern construction and architecture*, No. 5, pp.79-85. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-5-79-89>
- [9] L. A. A. Al-Hindawi, A. M. Al-Dahawi, A. Sh. J. Al-Zuheriy (2023), Use of Waste Materials for Sustainable Development of Rigid Pavement. *International Journal of Engineering*, 36(10), pp. 1919-1931. <https://doi.org/10.5829/ije.2023.36.10a.16>
- [10] GBN V.2.3-37641918-557:2016. Automobile roads. Rigid road clothing. Designing. Ministry of Infrastructure of Ukraine, 2016.
- [11] DBN B.2.3-4:2015. Automobile roads. Transport facilities. Part I. Design. Part II. Construction. K.: Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2015. 112 c.
- [12] Morteza Nematollahzade, Azim Tajadini, Iman Afshoon, Farhad Aslani. Influence of different curing conditions and water to cement ratio on properties of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials* 237 (2020) 117570. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117570>
- [13] STN 73 1322. Stanovenie mrazuvzdornosti betónu. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2016.

Hajizah Azmi Siregar¹; Daniel Urban^{1,2}

¹ Department of Materials Engineering and Physics, Faculty of Civil Engineering,
Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05

² Research Division for Building Physics, Institute of Material Technology, Building Physics, and
Building Ecology, Faculty of Civil Engineering, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-
1040 Vienna

ON THE SOUND ABSORPTION MEASUREMENT METHODS APPLICABLE FOR THE BIO-BASED MATERIALS

Abstract

This paper presents an overview of standard methods for measuring the sound absorption properties of materials, with a focus on most widely used approaches in the field of acoustic engineering. Bio-based materials are increasingly recognized as a sustainable option for sound absorption in modern construction methods. These environmentally friendly materials are sometimes effective for sound absorption and could be used as an alternative to conventional materials. Understanding the acoustic properties of these materials through standard methods ensures their reliability and performance in a variety of acoustic environments.

Kľúčové slová / Key Words

Bio-based material, Measurement techniques, Sound absorption.

1. Introduction

In recent years, the expansion of industrial activities and population has resulted in increased noise pollution and global warming. The World Health Organization (WHO) has established a link between noise and negative health impacts, such as heart attacks and hypertension (Van Kempen et al., 2012). There are several examples of noise that we experience every day, one of which is from household appliances and daily activities indoors (Australian Government Department of Environment and Energy, 2019). Large crowds and public announcements primarily cause noise in public areas (Acoustical Society of America, 2017). Airplanes, which are the main cause of noise pollution in our daily lives, have a major impact on sleep quality and stress levels (International Civil Aviation Organization, 2019).

Increasing noise pollution requires solutions to reduce noise. One way is to combine urban design, technological advances, and the use of sound-absorbing materials. Sound-absorbing materials are one of the important factors in reducing noise pollution. Good sound-absorbing materials generally have a porous and fibrous structure because they are effective in reducing noise and controlling echoes / sound reflections (Berardi and Iannace, 2017; Seyedzavvar et al., 2023). Bio-based materials consist of natural fibers and are derived from agricultural waste. Other factors that affect sound absorption are density, porosity, and structural composition. High porosity promotes increased energy dispersion, thereby increasing sound absorption; for example, materials with higher densities are more effective at low frequencies, while materials with lower densities are better at high frequencies (Shin et al., 2022).

Bio-based sound-absorbing materials minimize waste and reduce the carbon footprint associated with conventional synthetic materials, such as mineral wool and foam. The development of sustainable soundproofing is essential in building acoustics and noise control to promote environmentally friendly construction practices and reduce the ecological impact of structures.

Hajizah Azmi Sirega, Department of Materials Engineering and Physics, Faculty of Civil Engineering,
Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05

Agricultural production often discards grape stalks, hemp, and rice husks, yet these materials, with their porous and fibrous characteristics, exhibit superior acoustic properties (Manohar et al., 2023). Reusing these materials allows bio-based sound absorbers to divert waste from landfills and improve resource.

This contribution presents the brief overview of the basic and mostly known measurement techniques that can be used for sound absorption determination of the bio-based materials in general or constructions and acoustic measures where bio-based material takes the sound absorption role.

2. Sound Absorption Measurement Methods

Understanding the methods and standards used when testing bio-based materials and others is important. Several standards and methods are applicable in sound absorption tests, such as: The Method Using a Standing Wave Ratio, The Two-microphone Technique applying the transfer matrix method, The Extended Surface Method, The Spot Method for Reflective Surfaces, The Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room, the p-u intensity probe-based method etc. Before conducting the test, it is necessary to be familiar enough with the available measurement techniques to be able to choose the most suitable one for wanted purpose. The characteristics of the sample under test can guide the selection of the method. As every measurement technique also here, each of method has specific advantages and disadvantages. The following will be discussed in more detail.

2.1 Standing Wave Ratio Method

Standing Wave Ratio Method is Part 1 of ISO Standard 10534-1:1996. The method measures the sound absorption coefficient in an impedance tube using the standing wave ratio (SWR) method, this is to determine the main acoustic properties, such as sound absorption coefficient and acoustic impedance. This measurement is important to know how much sound is absorbed by the material. There are some differences in characteristics between this method and sound absorption measurements in a reverberation room. The impedance tube method can be used to determine the reflection factor and impedance by calculating the sound that comes normally to the surface of the object (ISO 10534-1, 1996). The reverberation room method ascertains the sound absorption coefficient for random sound incidents. This method is exclusively applicable to normal incidence sound, indicating that it assesses the interaction between the material and sound waves that strike it directly and perpendicularly.

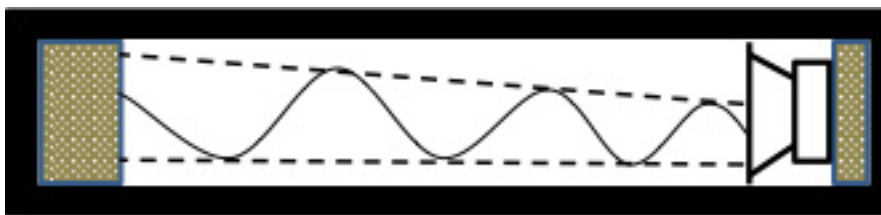


Figure 1 Standing wave pattern in an impedance tube

The sound absorption coefficient quantifies the ratio of sound energy absorbed by a material relative to the energy reflected. The coefficient is ascertained by the measured SWR and varies from 0 to 1, where 0 signifies perfect reflection and 1 denotes perfect absorption. The value is established through the correlation of sound pressure and particle velocity at the surface of the material. This method is commonly used to evaluate the acoustic properties of materials over a wide frequency range. Materials suitable for testing using this method include foams, fibers, textiles, and acoustic panels. This method facilitates the selection of materials for soundproofing, noise attenuation, and architectural acoustics. This standard is essential for assessing the acoustic performance of materials, especially in soundproofing, architectural acoustics, and noise reduction contexts.

2.2 The Two-microphone Technique

Technique defined in the standard ISO 10534-2 and ASTM E2611-09 describes a method for measuring the normal incident sound absorption coefficient and the normal surface impedance of an acoustic material using a two-microphone technique in an impedance tube (ISO 10534-2, 2023; ASTM E2611-09, 2011). This procedure evaluates the acoustic properties of a material through the computation of the acoustic transfer matrix. This method is employed to evaluate the intrinsic properties of homogeneous acoustic materials, including characteristic impedance, characteristic wavenumber, dynamic mass density, and dynamic bulk modulus. The standard applies to a range of materials, including composites, foams, porous substances, fibers, and multilayer systems. This test is generally relevant for frequencies ranging from 50 Hz to 6,400 Hz, contingent upon the tube's dimensions and the material's characteristics.

The method involves generating sound waves from a loudspeaker positioned at one end of an impedance tube, which then propagate toward the sample material located at the opposite end (See figure 2). Sound waves reflect off the material, resulting in a complex sound field within the tube formed by the interaction of incident and reflected waves. Two microphones, positioned at specified locations within the tube, record the sound pressure at various points. The sound pressure levels captured by the two microphones allow for the mathematical separation of incident and reflected sound waves. The sound reflection coefficient is calculated from the measured sound pressure, representing the proportion of sound energy reflected by the material. The normal incident sound absorption coefficient (α) is determined using the reflection coefficient. The coefficient quantifies the sound absorption capacity of a material, with values ranging from 0 (indicating no absorption) to 1 (indicating total absorption). This test method resembles the Standing Wave Ratio Method, utilizing an impedance tube with a sound source at one end and a test sample positioned at the opposite end. But the methods of measurement are different. The complex acoustic transfer function is then calculated. The purpose of this test method is to provide a measurement technique that is more effective than the Standing Wave Ratio Method. According to ISO 10534-1:1996, the random incidence absorption coefficient measured in a reverberation chamber and the absorption coefficient at normal incidence derived from impedance tube measurements are not directly comparable.

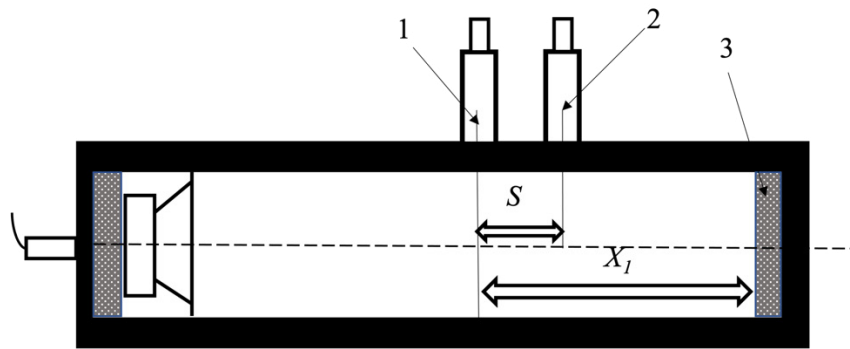


Figure 2 Microphone positions and distance

Key:

1: Microphone A

2: Microphone B

3: Test specimen

S : Spacing between the two microphones

X_1 : Distance between the surface of the test specimen and the microphone closest to the sound source

The test specimen must be firmly secured in its holder. However, the specimen should not be overly compacted or secured in a manner that causes distortion. Sealing any gaps around the periphery of the sample with petroleum jelly or thread tape is advisable. Materials such as carpet or low-density

substances should be firmly attached to the back plate using thin double-sided adhesive tape to reduce unwanted vibrations and air gaps. The flat test specimen's anterior surface must be positioned perpendicular to the tube's axis. The position must be ascertained with a minimum tolerance of up to 0.5 mm for objects possessing a flat and smooth surface. For porous materials exhibiting low bulk density, it may be advantageous to stabilize and delineate the surface using a broad grid with large apertures.

This specific method is very suitable for development of bio-based composites or bio-based materials analysis in general. Some essential modifications are required when the material in loose form must be tested.

2.3 Extended Surface Method

ISO 13472-1:2022 is the standard sound absorption coefficient of road surfaces (in situ) within the frequency range of 250 Hz to 4 kHz. This standard aims to reduce road traffic noise by assessing the sound absorption characteristics of surfaces and comparing design specifications for sound absorption with actual performance data collected post-construction. This technique is implemented directly on the road surface under actual environmental conditions, including temperature, humidity, and roughness.

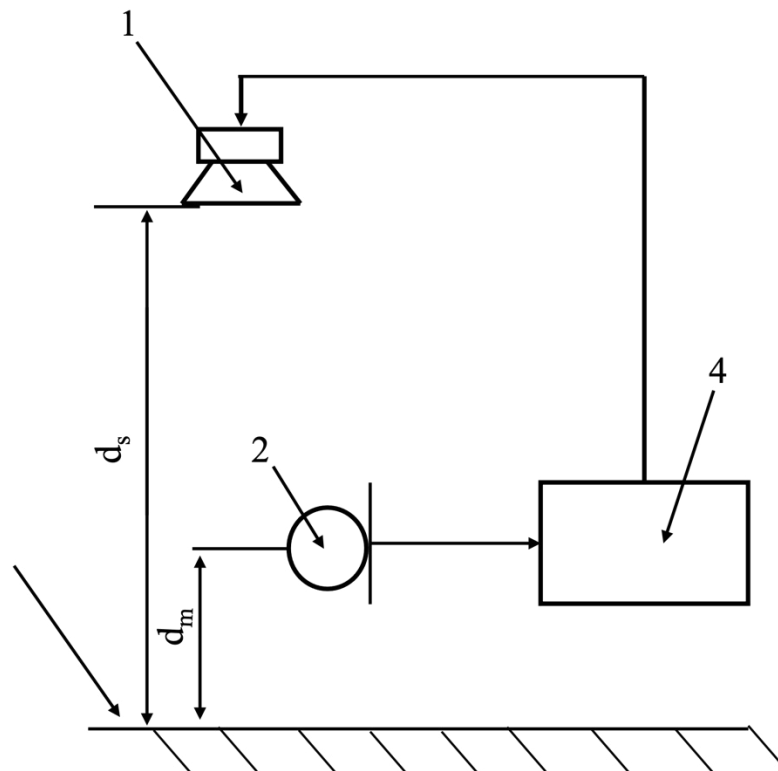


Figure 3 Sketch of the essential components of the measurement set-up

Key:

1: Sound source

2: Microphone

3: Surface under test

4: Signal processing unit

d_m : The distance between microphone and the reference plane for the surface under test

d_s : The distance between the sound source and the reference plane for the surface under test

Method involves positioning the sound source, energized by the signal generator, above the surface under examination, while the microphone is situated between the source and the surface (ISO 13472-1, 2022). The assessment of the transfer function between the signal generator's output and the

microphone's output constitutes the basis of the measurement methodology. The transfer function comprises two components: one from the reflected path (signal generator to test surface, loudspeaker, amplifier, and microphone) and another from the direct path (signal generator to amplifier, loudspeaker, and microphone). The complete impulse response, encompassing both direct and reflected sound, is evaluated in the time domain. The measurement method is based on figuring out the transfer function between the output of the signal generator and the output of the microphone. There are two parts to the transfer function: one comes from the reflected path (signal generator to test surface, loudspeaker, amplifier, and microphone) and the other comes from the direct path (signal generator to amplifier, loudspeaker, and microphone) (see Figure 3).

2.4 The Spot Method for Reflective Surfaces

The Spot Method for Reflective Surfaces assesses, in urban and suburban environments, how various road surfaces affect traffic noise attenuation. For surfaces lacking significant sound absorption but still helping with noise control, this method is especially successful. This approach is used by engineers and designers to evaluate fresh road surface materials aiming at balancing acoustic performance with durability (ISO 13472-2, 2010). The method uses for projecting sound waves toward a specified test point from a loudspeaker next to the road surface. One places a microphone to record surface sound reflections. We measure the sound pressure level and examine the variation between the reflected and emitted sounds. This approach assesses whether the surface helps to clearly lower traffic noise. The operation is carried out straight on the road under actual environmental conditions including different temperature, humidity, and weather. This guarantees that, under normal running conditions, the results exactly represent the real performance of the road surface. Specifically, from 250 Hz to 4,000 Hz, the spot method allows measurements over a broad frequency range—that which is most pertinent for assessing traffic noise.

2.5 The Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room

Comparing the reverberation time (the time it takes for the sound to decay to 60 dB) of an empty reverberation chamber with the reverberation time after the test material is introduced is mentioned in ISO 354: 2003. A sound source produces broadband noise or pink noise to generate uniformly distributed sound energy in the reverberant room. The reverberation time is measured with and without the test sample in place. The difference in reverberation time is used to calculate the sound absorption coefficient of the material. Measurements are made over a range of frequencies, typically from 100 Hz to 5,000 Hz (for 1/3rd octave band) which covers the ranges most important to building acoustics, because the absorption properties of materials vary with frequency. The test material in this method must cover at least 10 m² of surface area to ensure accurate measurements. The material is placed on the floor of the reverberation chamber or mounted vertically, depending on the specific test requirements. This method is commonly used in the design of acoustic treatments for spaces such as concert halls, recording studios, classrooms, and offices. This testing is also important in the development of building materials such as acoustic panels, carpets, draperies, and furniture, all of which contribute to sound absorption in an environment.

ISO 354 (2003) provides a realistic assessment of the sound absorption performance of materials as it has a diffuse sound field. This represents real-world acoustic environments, such as offices, auditoriums, classrooms, and other enclosed spaces. The method is widely recognized and standardized, ensuring consistency and comparability of results across tests and materials, wall or ceiling treatments, or the equivalent sound absorption of objects, such as furniture, people, or room absorbers, in reverberation chambers. This method is not intended for use in measuring the absorption characteristics of weakly damped resonators. The results obtained can be used for comparison purposes and for design calculations related to room acoustics and noise control. However, this method is very difficult to obtain accurate measurement results because of the low density of the echo

chamber model, especially at low frequencies below 100 Hz. In addition, the volume of the echo chamber is recommended to be at least 200 m³.

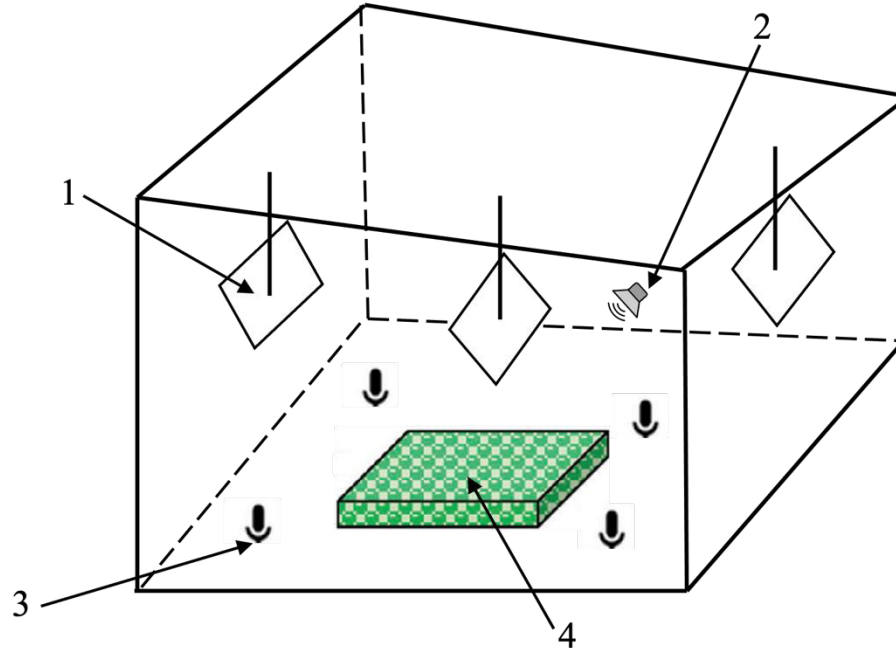


Figure 4 Schematic drawing of the reverberation room method for sound absorption coefficient measurements.

Key:

- 1: Diffusers
- 2: Sound source
- 3: Microphone
- 4: Sample

2.6 Microflown Technology Method

Microflown Technology, in conjunction with the Impedance Tube Method, has been acknowledged by the scientific community as a sophisticated in-situ technique for quantifying sound absorption. Microflown Technology employs a pressure-velocity (P-U) probe to concurrently assess sound pressure and particle velocity, thus offering thorough signal processing analysis of the sound absorption characteristics of materials (de Bree et al., 2016). This method provides the benefit of in-situ measurements, enabling direct assessment of sound absorption in practical applications, unlike conventional laboratory techniques (Ravenhorst et al., 2015).

3. Conclusion

Numerous sound absorption measurement standards provide methodologies for assessing the efficacy of surfaces and materials in noise control across diverse environments. The precision of sound absorption and impedance data is derived from the ASTM, utilizing the Standing Wave Ratio Method and the Two-Microphone Technique Method. Two-Microphone Technique Method is ideal to measuring bio-based material because this method is ideal for small sample. The main advantage is that, only small samples need to be provided for testing, so methods can find application in prototype development of materials with uniform material distribution of small particles. This method's limitation is that it uses sound waves perpendicular to the material's surface to measure its acoustic properties, whereas sounds in the real world can originate from any direction. The Extended Surface Method and The Spot Method for Reflective Surfaces assess in-situ road surfaces to determine how reflective surfaces mitigate traffic noise. Tests of building material absorption in a reverberant chamber is simulating realistic situation that can occur in indoors spaces under diffuse

acoustic field. For this type of test relatively large size samples are necessary to provide. Also, more complex materials, sound absorptive constrictions and resonators can be tested. These techniques are fundamental for guiding the choice and development of materials enhancing indoor and outdoor acoustic environments, so supporting improved noise control and sound quality. This information helps one to choose and use materials best for acoustic requirements with efficiency. Using suitable measuring methods, such those described in ISO and ASTM standards, engineers and designers can precisely evaluate the performance of materials, so guaranteeing that they satisfy the required noise reduction and absorption criteria.

Acknowledgements

This work was supported by the Slovak national grant VEGA 1/0205/22 and KEGA 033STU-4/2024.

References

1. Acoustical Society of America. (2017). Noise in public spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141 (5), 3642-3654. <https://doi.org/10.1121/1.4987298>
2. ASTM International. (2009). *ASTM E2611-09: Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method*. <https://www.astm.org/e2611-09.html>
3. Australian Government Department of the Environment and Energy. (2019). Noise in your home. <https://www.environment.gov.au/protection/noise/publications/noise-your-home>
4. Berardi, U., & Iannace, G. (2017). Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant. **Applied Acoustics*, 115*, 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.019>
5. de Bree, H.-E., Druyvesteyn, W., & de Vries, J. (2016). *Advancements in Microflown technology for in-situ acoustic measurements*. *Journal of Acoustics and Vibrations*, 24(2), 100-110.
6. International Civil Aviation Organization. (2019). Aircraft noise. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/noise.aspx>
7. ISO 13472-1:2022 (Second Edition). *Acoustics — Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ — Part 1: Extended surface method*. International Organization for Standardization.
8. ISO 13472-2:2010 (First Edition). *Acoustics — Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ — Part 2: Spot method for reflective surfaces*. International Organization for Standardization.
9. ISO 354:2003 (Second Edition). *Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room*. International Organization for Standardization.
10. ISO 10534-1:1996. *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance — Part 1: Impedance tube method*. International Organization for Standardization.
11. ISO 10534-2:1998. *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance*. International Organization for Standardization
12. Manohar, K., Gupta, V., Sharma, R., & Moinuddin, K. (2023). Acoustic properties of bio-based materials: A review of sustainable solutions for noise control. **Journal of Sound and Vibration*, 529*, 116931. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.116931>
13. Ravenhorst, G., Druyvesteyn, W., & de Bree, H.-E. (2015). *In-situ determination of acoustic material properties using the Microflown PU probe*. *Applied Acoustics*, 89, 123-131.

14. Seyedzavvar, M., Amiri, S., & Rezaei, P. (2023). Investigation of sound absorption properties of natural and hybrid fibers using the impedance tube method. **Materials Today Communications, 34**, 105361. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105361>
15. Shin, D., Lee, J., & Park, S. (2022). Effect of particle size and distribution on the sound absorption characteristics of natural fibers in sustainable building applications. **Building and Environment, 225**, 109634. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109634>
16. Van Kempen, E., & Babisch, W. (2012). The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis. *Journal of hypertension, 30*(6), 1075-1086. <https://doi.org/10.1097/HJH.0b013e328352ac54>
17. World Health Organization. (2018). Occupational noise: Assessing the burden of disease from work-related hearing impairment at national and local levels. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241508421>

Milan Švolík

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

VPLYV TECHNICKÉHO STAVU PODPIER NA VEĽKOSŤ DODATOČNÉHO ZAŤAŽENIA PRI FIXÁCIÍ

THE INFLUENCE OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE SUPPORTS ON THE SIZE OF THE ADDITIONAL LOAD DURING FIXATION

Abstract

Steel supports are one of the most used tools in the construction of monolithic structures. The basic purpose of a support is to temporarily support the formwork of concrete structures, but supports are used for many other purposes related to construction, such as: they ensure the stability of ceiling boards on lower floors and serve to distribute the load, they ensure the stability of the entire structure or as temporary support during reconstruction and repairs. The supports contain a thread with which they are adjusted in height or fixed between floors. The static load of the floor is considered the most critical load that could lead to the failure of the supports [1], however, when the supports are fixed, an additional non-negligible load is induced on the structure, the size of which can also be influenced by the technical condition of the support.

Kľúčové slová / Key Words

Podpera, Stropná doska, Zaťaženie, Fixácia

1. Úvod

Takmer každá nová budova je navrhnutá pre úžitkové zaťaženie, ktoré je len malou časťou celkového projektovaného zaťaženia. V mnohých budovách je súčet projektovaného živého zaťaženia a vlastného zaťaženia iba 40 % vlastnej hmotnosti betónovej podlahy a v bytových domoch často menej ako 25 %. Preto vlastnú hmotnosť novo odliatej dosky nemôže niesť nedávno dokončená doska pod ňou a konštrukčné zaťaženie je potrebné distribuovať na nižšie stropné dosky. Na to používame podpery, ktoré je nutné zafixovať medzi podlažiami [2]. Pri fixácií sa vyvoláva dodatočné zaťaženie na konštrukciu, ktorá môže byť v rozmedzí od 1 kN až do 14 kN [3], [4]. Fixácia podpier prebieha údermi kladivom do závitu jednotlivých podpier. V stavebníctve pracovníci len zriedka, ak vôbec niekedy, zafixujú podperu na doraz s nulovou fixáciou. Prax je, že pracovníci použijú zopár úderov kladivom, aby sa podpera zafixovala medzi doskami [13]. Takže sa dá predpokladať, že pracovníci budú osádzať jednotlivé podpery s väčším predpätím, kvôli dokonalej fixácii medzi poschodiami a aby sa zabránilo ich prevráteniu. Keďže stropné dosky sú pružné, predpätím jednej podpery sa môžu uvoľniť susedné podpery, takže sa dá počítat s tým, že podpery nebudú predpäté rovnako [5]. Veľkosť sily, ktorú pracovníci vyvíjajú na podpery, ovplyvňuje aj technický stav podpier, kde pri opotrebovaných podperách a podperách so zaneseným závitníkom musia pracovníci vyvinúť viacej sily, ako pri podperách, ktoré sú v dobrom fyzickom stave. Tu môže nastať, že pracovníci budú vyvíjať rovnakú silu aj keď sa v závite povolí vôľa, čo môže mať za následok nadmerné napätie v podpere a teda aj dodatočné zaťaženia na stropné dosky.

1.1 Podpery podľa normy EN 1065

Európska norma EN-1065 špecifikuje materiály, konštrukčné požiadavky a alternatívy ochrany proti korózii pre nastaviteľné teleskopické oceľové podpery (odteraz jednoducho označované ako „podpery“) s krytým aj nekrytým závitom [6]. Norma EN 1065 sa týka teleskopických oceľových podpier, špecifikuje požiadavky na ich návrh, výrobu, kontrolu, testovanie a označovanie. Je to európska norma používaná v stavebníctve na zabezpečenie bezpečnosti a kvality oceľových podpier. Kvalita používaných podpier na stavbách sa dokazuje certifikátom, ktorý potvrdzuje, že vlastnosti využívaných podpier na stavbe spĺňajú túto normu. Táto norma stanovuje celosvetovo najprísnejšie požiadavky na materiály, konštrukčné požiadavky a ochranné opatrenia proti korózii [7]. Materiály musia byť v súlade s existujúcimi európskymi normami. Všetky komponenty musia byť chránené proti korózii. EN-1065 zvažuje päť metód ochrany, klasifikovaných podľa výroby. Použitá metóda sa uvádza na označení podpery. Hlavným údajom pri podperách je jej nosnosť. Nosnosť podpery je normou udávaná ako minimálna hodnota vonkajšieho zaťaženia, ktorá je schopná aktivovať kolapsové mechanizmy pri porušení rúr v ohybe [8]. Pričné časti trubice musia byť vybrané podľa medzinárodných referenčných noriem. Menovitá hrúbka akejkoľvek rúry (vrátane tolerancií) nesmie byť menšia ako 2,6 mm pre podpery v triedach B, C, D, E. Pre podpery triedy A musí byť aspoň 2,3 mm. Vnútorne a vonkajšie rúry sa musia prekrývať o $l_0 \geq 300\text{mm}$ keď je podpera úplne vysunutá [6].

2. Technický stav podpier

Vzhľadom na ich veľké pracovné výšky a vysokú nosnosť, sú tieto komponenty vystavené vysokým tlakovým a ťahovým silám. Pri jednorazovom použití by to nebol problém, avšak podpery sa používajú cyklicky a cyklické používanie môže výrazne vplyvať na únavu materiálu podpier [9]. Rutinná kontrola podpier je prvým krokom, pokiaľ ide o údržbu podpier. Pravidelná kontrola môže zabrániť nehodám a nákladným škodám, či opravám. Všeobecne platí, že pred použitím podpier je nutné podperu vizuálne a mechanicky skontrolovať a určiť vhodnosť jej použitia [10]. Medzi kontroly vieme zaradiť:

- Kontrola povrchu: Vizuálna kontrola vonkajšieho povrchu podpery, či nie je hrdzavý, preliačený, alebo inak fyzicky poškodený.
- Kontrola závitov: Je potrebné skontrolovať závit podpier, či neobsahujú nečistoty a poškodenia. Pre správne fungovanie podpier je nevyhnutné dokonalé a hladké otáčanie závitnice.
- Kontrola pripínacieho mechanizmu: Kontrola kolíkov, ktoré zaisťujú podpery v požadovanej výške, či nie sú poškodené, alebo sa na nich nenachádzajú nečistoty, ktoré by zabránili zaisteniu výšky podpery. Je potrebné skontrolovať aj priestor medzi jednotlivými dierkami na kolíky, či neobsahuje poškodenie, najmä kvôli prerezaniu trubky.
- Kontrola nosnosti : Treba overiť, či podpery nie sú nepreťažované, pretože toto môže viesť k poškodeniu a ohrozeniu bezpečnosti.
- Mechanizmus nastavenia: Je potrebné otestovať, či je možné podpery plynulo a bezpečne nastaviť. Ak sa narazí na nejaký odpor, alebo ťažkosti, môže to byť príznakom poškodenia, alebo mechanických nečistôt.

V prípade odhalenia poškodenia, alebo deformácie podpier, musia byť tieto podpery vymenené. Oceľová podpera je totiž tvorená súpravou kusov s rôznou pevnosťou. Skladajú sa zo štyroch častí: vnútorná rúrka s jednou hornou doskou, vonkajšia rúrka so spodnou doskou a vonkajším závitom, rukoväť nastavenia a fixačný kolík. Každá z týchto častí môže mať technicky nevyhovujúci stav a môže byť nejakým spôsobom poškodená [11]. Na stavbách sa však využíva veľké množstvo týchto podpier a nie je možné pracovníkmi skontrolovať každú podperu samostatne a preto sa často stáva, že podpery sú využívané aj keď ich technický stav nie je ideálny.

2.1 Typy poškodenia

Najčastejší typ poškodenia, najmä u starých podpier, alebo povrchovo opotrebovaných podpier je korózia. U oceľových starých podpier môže korózia oslabiť štruktúru podpery, čo vedie k zníženiu nosnosti a zvýšenému riziku zlyhania. Podpery spĺňajúce EN 1065 by tento problém mať nemali. Je potrebné si uvedomiť, že najmä pri menších stavbách, alebo stavbách stavaných svojpomocne sa používajú podpery, ktoré sú dostupné pre daného realizátora. To môže znamenať aj využívanie podpier, ktoré nemajú povrchovú úpravu, ani vonkajšiu, ani vnútornú. Môže to znamenať problém pri vysúvaní podpier, kde rúry podpier medzi sebou zahrdzaveli pri nesprávnom skladovaní, poprípade koróziou napadnuté závitky podpier. V prípade podpery Španielskeho typu, kde závit je skrytý môže dôjsť k zložitejšiemu otáčaniu závitnice aj po úderoch kladiva.

Mechanické poškodenie.

Praskliny, ohnutie, alebo deformácie môžu významne oslabiť podperu, najmä ak sú na kritických miestach. Môže ísť o:

- Praskliny alebo preliačiny na trubke podpery
- Nedokonalé, alebo popraskané zvary
- Deformácie styčných plôch oceľových platní
- Deformácia trubky

2.2 Opotrebovanie

Postupné opotrebovanie. V dôsledku dlhodobého používania môže nastať únava materiálu, čo zníži schopnosť podpery uniesť predpísanú záťaž.

Opotrebovanie môže nastať aj na výbežkoch v závite, ktoré sú určené na údery kladiva. Pri mechanických nárazoch tam môže dôjsť k poškodeniu, poprípade aj k poškodeniu vonkajšieho obalu matice, ak údery nie sú presné.

2.3 Manipulácia s podperami

Aby sa predišlo neželaným poškodeniam na podperách, je potrebné dodržiavať zásady manipulácie a prepravy podpier. Najvhodnejšou prepravou podpier je umiestnenie podpier do ochrannej klietky s následným zafixovaním podpier. V takomto stave je možné podpery prepravovať aj na vysokozdvížných vozíkoch, prípadne aj na žeriavoch a to bez poškodenia podpier, alebo ohrozenia pracovníkov na stavbe.

3. Analýza testovaných vzoriek

V rámci analýzy technického stavu náhodne vybraných podpier boli zapožičané podpery od najväčších dodávateľov debnenia a podpier na Slovensku, kde sme skúmali vizuálny technický stav podpier, spôsob a náročnosť fixácie podpier. Celkovo bolo v experimente otestovaných 11 podpier od rôznych výrobcov, kde pri najväčších výrobcov boli použité podpery v dvoch verziách a to vo verzii nepoužitej podpery a používanej podpery.

Typy vzoriek:

- Peri Alpha- 2 D300 (nová)
- Peri Alpha- 2 D300 (používaná)
- Doka Eurex 20 top- 300 (nová)
- Doka Eurex 20 top- 300 (používaná)

- ULMA EP C+D30, 20-35/180-300
- ALPIPROP ST B30-175/300
- MUBA Euro Baustutzen der klas B/D35-196/350
- Scafom-rux EP20-300, D30
- CONCOR CEP 20/150-250
- PANALEX B35-200/350
- Španielsky typ podpery

Z testovaných vzoriek boli vybrané tri podpery, ktoré po vizuálnej stránke mali najhorší technický stav. Medzi ne patrili podpera Alpiprop ST B30-175/300, MUBA Euro Baustutzen der klas B/D35-196/350 a ULMA EP C+D30, 20-35/180-300. Ostatné podpery sa zdali po vizuálnej kontrole v poriadku a vhodné.

3.1 Alpiprop ST B30-175/300

Podpera má problém s výrazným fyzickým opotrebovaním na styčných plochách a ich deformáciách, čo spôsobuje, že podpera nemôže samostatne stáť a pri fixácii má tendenciu točiť sa (viď. Obr.6). Závitnica je značne znečistená betónovou, alebo cementovou zmesou, čo zamedzuje ľahký chod závitú okolo osi závitnice. V prípadoch zaťažovania rukou nie je možné podperu fixovať medzi stropnými doskami, pretože ľudská sila nevie vyvolať toľko energie, aby prerazila nečistoty v závite. Závit nie je namazaný a jeho chod je obtiažny a zasekáva sa. Na závite sa nachádzajú defekty, ako ohnutá koľajnica závitú, kde nebolo možné, aby cez ňu prešla otáčacia kľuka. Technický stav podpery sa dá označiť ako nevyhovujúci a nie je možné ho využívať na stavbe. Odporúča sa vyradenie podpery.



Obr. 1 Znefunkčnený závit na podpere (Autor)

3.2 MUBA Euro Baustutzen der klas B/D35-196/350

V prípade podpier Muba je deformácia na stranách styčných plôch na vrchu a spodku oceľových platní (viď Obr.7). Táto deformácia rovnako ako pri predošlej podpere spôsobuje točenie podpery pri

fixácii a nesprávne rozloženie tlaku na stropnú dosku. Vo vrchnej časti, pri spoji rúry a vrchnej platni, sú mierne nedostatky - praskliny pri zvaroch. Závit je očistený, avšak vo vrchnej časti sú zdeformované koľajničky v závite. Technický stav sa dá opísať ako mierne závažný a odporúča sa technická úprava, alebo vyradenie podpery.



Obr. 2 Ohnutá ocel'ová platňa (Autor)

3.3 ULMA EP C+D30, 20-35/180-300

Pri podpere Ulma bol identifikovaný len jeden defekt a to preliačina na závite podpery. V tomto prípade preliačina neobmedzovala funkčnosť podpery, ale bolo nevyhnutné, aby sa vynaložila väčšia energia pri jej fixácii, aby sa tento defekt prekonal maticou. Technický stav sa dá označiť ako vyhovujúci s menšou technickou úpravou.

4. Porovnanie veľkosti fixácie podpier

Meranie prebiehalo na zostrojenej ocel'ovej konštrukcii o rozmeroch 500x500mm a štyroch kalibrovaných tenzometrických snímačoch. Následne na tejto konštrukcii boli merané tri hodnoty a to maximálna fixácia rukou, fixácia kladivom po troch úderoch a fixácia kladivom po piatich úderoch. Na testovaní sa zúčastnilo 7 pracovníkov zo stavieb po celom Slovensku a zahraničí. Pracovníkom bola zohľadnená aj ich váha, ktorá však nemala vo finálnom výsledku vplyv na výsledok fixácie podpier. Údaje boli porovnané s novou podperou od firmy Doka- Eurex 20 top- 300, ktorá je jedna z najčastejšie používaných podpier na Slovensku.

Tabuľka 1- Namerané hodnoty pri fixovaní podpier (Autor)

Podpera	Váha podpery (kg)	Stav	Subjekty	Váha pracovníka (kg)	Ručný doťah	kN	Fix- 3x úder kladivom (Kg)	kN	Fix- 5x úder kladivom (Kg)	kN	Priemer (kN)
ALPROP ST B30-175/300	14,5	používaná	1	112,5	N	N	96,5	0,95	132	1,29	1,99
			2	117,5	N	N	55,5	0,54	98,5	0,97	
			3	102	N	N	54,5	0,53	125,5	1,23	
			4	120	N	N	60	0,59	111	1,09	
			5	108	N	N	72,5	0,71	143,5	1,41	
			6	79	N	N	75	0,74	281	2,76	
			7	83	N	N	88,5	0,87	527	5,17	
MUBA Euro Baustutzen der klas B/D35-196/350	19	používaná	1	112,5	153	1,50	276	2,71	398,5	3,91	3,46
			2	117,5	28	0,27	161	1,58	265,5	2,60	
			3	102	73	0,72	95	0,93	207	2,03	
			4	120	80	0,78	135,5	1,33	268,5	2,63	
			5	108	96	0,94	169,5	1,66	236	2,31	
			6	79	108,5	1,06	284	2,79	538,5	5,28	
			7	83	109	1,07	234	2,29	555,5	5,45	
Scafo-m-rux EP20-300, D30	15	používaná	1	112,5	169	1,66	246	2,41	385	3,78	5,01
			2	117,5	92,5	0,91	168	1,65	439,5	4,31	
			3	102	103,5	1,01	162,5	1,59	549	5,38	
			4	120	58,5	0,57	139,5	1,37	366	3,59	
			5	108	106,5	1,04	201	1,97	397,5	3,90	
			6	79	27,5	0,27	328,5	3,22	656,5	6,44	
			7	83	65,5	0,64	355,5	3,49	785	7,70	

*pozn: N- Ručný doťah nebolo možné zmerať kvôli zaneseniu závitu podpery.

Tabuľka 2- Namerané hodnoty novej podpery od firmy Doka (Autor)

Podpera	Váha podpery (kg)	Stav	Subjekty	Váha pracovníka (kg)	Ručný doťah	kN	Fix- 3x úder kladivom (Kg)	kN	Fix- 5x úder kladivom (Kg)	kN	Priemer (Kn)
Doka Eurex 20 top-300	14	Nová	1	112,5	131,5	1,29	491	4,82	865	8,48	7,65
			2	117,5	124,5	1,22	469,5	4,60	600	5,88	
			3	102	382	3,75	395	3,87	462	4,53	
			4	120	225,5	2,21	449	4,40	654	6,41	
			5	108	241,5	2,37	501	4,91	652	6,39	
			6	79	120,5	1,18	694	6,81	1144,5	11,22	
			7	83	135	1,32	701	6,87	1083,5	10,63	

5. Analýza meraní

Rozdiel pri výslednom napätí vznikajúcim pri fixovaní podpier medzi stropnými doskami je značný. Najviac poškodená podpera v priemere vyvolá na konštrukciu dodatočné napätie 1,99 kN, zatiaľ čo podpera, ktorá má z vybraných podpier najmenšie poškodenia, vie vyvolať dodatočné napätie v priemere až 7,65 kN na siedmych rôznych meraniach. Rozdiely medzi vyvolanými zaťažzeniami je 5,66 kN. V Tabuľke 2 je možné vidieť merania na novej podpere od spoločnosti Doka. Priemerné vyvolané napätie je 7,65 kN a maximálne dosiahnutie napätie v meraniach je 11,22 kN na jednej podpere. Z tabuliek je jasné, že podpery so skúmanými konkrétnymi poškodeniami dosahujú menšie napätia, ako nová podpera bez poškodení. V konkrétnych prípadoch to je pri podpere Alpiprop rozdiel 5,66 kN, pri podpere Muba to je 4,19 kN a v prípade najmenej poškodenej podpery Scaform to je 2,64 kN. Oveľa väčšie rozdiely je možné sledovať pri fixovaní tromi údermi kladiva, kde priemer vyvolaného napätia pri podpere Alpiprop je 0,70 kN, pri podpere Muba 1,90 kN a pri podpere Scaform 2,25 kN. Zatiaľ čo pri novej podpere je to v priemere 5,18 kN.

6. Riziká zamiešania poškodených podpier

Používanie poškodených podpier bude pravdepodobne ojedinelé a v systéme rozloženia podpier je možné, že ich bude minimum avšak pri zmiešaní poškodených podpier s nepoškodenými môže mať vážne následky pre štrukturálnu integritu a bezpečnosť celej konštrukcie. Zmiešanie podpier môže mať vplyv na:

- **Nerovnomerné rozloženie zaťaženia**

Poškodené podpery môžu prenášať zaťaženie slabšie ako nepoškodené, čo môže viesť k nerovnomernému rozloženiu síl medzi podperami. To môže spôsobiť preťaženie nepoškodených podpier.

- **Znížená nosnosť**

Poškodené podpery môžu mať zníženú nosnosť, čo môže viesť k ich zlyhaniu pod zaťažením. Ak sa poškodené podpery používajú v kritických miestach, môže to viesť k vážnym následkom.

- **Dynamické účinky**

Poškodené podpery môžu reagovať odlišne na dynamické zaťaženia (napr. vibrácie, nárazy), čo môže viesť k ďalšiemu poškodeniu, alebo dokonca zlyhaniu konštrukcie.

- **Dlhodobé následky**

Dlhodobé vystavenie nerovnomernému zaťaženiu môže viesť k postupnému zhoršeniu stavu nepoškodených podpier a celkovej stability konštrukcie.

- **Bezpečnostné riziká**

Ak dôjde k zlyhaniu podpery, môže to mať vážne bezpečnostné následky pre osoby v blízkosti a môže spôsobiť majetkové škody.

7. Záver

Merania a analýza napätí v konštrukciách podpier ukazujú značné rozdiely medzi poškodenými a nepoškodenými podperami, čo môže mať významné dôsledky na štrukturálnu integritu. Najviac poškodené podpery vykazujú výrazne nižšie vyvolané napätia (v priemere 1,99 kN) v porovnaní s nepoškodenými podperami, ktoré v priemere vyvolávajú napätie až 7,65 kN. Rozdiel medzi najviac poškodenou a najmenej poškodenou podperou je 5,66 kN, čo naznačuje, že rozsah poškodení má zásadný vplyv na schopnosť podpery fixácie medzi dvoma stropnými doskami. Zamiešaním podpier

zo zlým technickým stavom do systému podpier pre roznos zaťaženia môže dôjsť k viacerým problémom, ktoré sú uvedené v kapitole 6. Pri nerovnakej fixácii podpier môže nastať, že stropné dosky sa medzi sebou jemne odchyliť na základe vyvolaných väčších napätí z podpier, ktorých technický stav je nezávadný, čo môže mať za následok buď popadanie poškodených podpier a ohrozenie pracovníkov, alebo neprenášanie zaťaženia do týchto podpier. V tomto prípade by sa zaťaženie z realizovanej stropnej dosky prenášalo najmä do podpier, ktoré sú zafixované väčšou silou, čo by mohlo viesť k ich preťaženiu, alebo k deformácii, keďže projektové zaťaženie rátať s rovnakou únosnosťou všetkých podpier rovnako. Pri určitom usporiadaní podpier sa sily nemusia rovnomerne rozkladať medzi podpory, čo môže viesť k nadmernému zaťaženiu určitých miest. To však spôsobí vznik dodatočných momentov ohybov alebo šmykových síl v mieste spojov podpier so stropnou doskou, čo môže viesť k prasklinám, alebo iným poškodeniam stropných dosiek. Nedostatočne zafixované, alebo poškodené podpory môžu byť príčinou postupného kolapsu konštrukcie, čo predstavuje riziko pre ľudí, ale aj objekty v jeho blízkosti.

Z daných zistení teda vieme potvrdiť, že technický stav podpory má priamy vplyv na veľkosť fixácie podpier a teda dodatočného napätia, ktoré je vnášané do konštrukcie a môže ohroziť stabilitu konštrukcie a zdravie pracovníkov na stavenisku. Vieme potvrdiť, že aj pri náhodnom výbere podpier od dodávateľov je možné natrafiť na podpory, ktoré nie sú v ideálnom technickom stave. V našom prípade z 11 podpier, tri nespĺňali požiadavky. V celkovom merítku sa toto zistenie štatisticky nedá porovnať vzhľadom na to že využívaných podpier na stavbách je mnohonásobne viac, ale čo je dôležité, poukazuje to na skutočnosť, že dodávatelia poškodené podpory nevyraďujú, ale cyklicky ich otáčajú znova po stavbách.

Tento príspevok bol zrealizovaný za podpory grantu pre mladých výskumníkov STU.

Literatúra

- [1] A.S. Yassin, J.F. Martonik, Safety Sci. 42, 921 (2004), Office of Evaluations and Audit Analysis, Occupational Safety and Health Administration, USA, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2004.05.001>
- [2] Dostupné na internete 24.09.2024 : <https://www.idh-design.co.uk/projects/back-propping/>
- [3] ALEXANDER S., Propping and loading of insitu floors, Article in CONCRETE, January 2004, Volume 38 Number 1, pp 33 to 35
- [4] VOLLUM, R. Investigation into preloads induced into props during their installation, Imperial College, London, November 2008, 6pp)
- [5] Peter Pallett, Temporary Works Toolkit: Part 6: Backpropping of flat slabs – design issues and worked examples, The Structural Engineer, Volume 95, Issue 1, 2017, Page(s) 30-32 <https://doi.org/10.56330/HBAS6818>
- [6] A. Salvadori, Ultimate strength of adjustable telescopic steel props according to standard EN 1065, Journal of Constructional Steel Research 65, 2009, pp 1964-1970
- [7] Dostupné na internete 24.09.2024: <https://www.gbmitaly.com/props/din-en-1065-props#>
- [8] [European Committee for standardization EN 1065, Adjustable telescopic steel props, product specifications, design and assessment by calculation and tests, 1999.
- [9] Ö. Karaçalı, A New Perspective on Cyclic Loading Behavior Analysis of ATSP-Adjustable Telescopic Steel Prop S235GT Material Used in Structural Engineering, 5th International Science Congress & Exhibition APMAS2015, Lykia, Oludeniz, April 16–19, 2015, DOI: 10.12693/APhysPolA.129.436
- [10] Dostupné na internete 24.09.2024: <https://www.tjrscufflingltd.co.uk/blogs/articles/best-practices-for-inspecting-and-maintaining-acrow-props>
- [11] Cleirton André Silva de Freitas, Francisco J. P. Almeida, Ailton T. Silva, Wagner O. Batista Theoretical and Experimental Study of Steel Props Used in Concrete Buildings, International Journal of Engineering and Technology, 7(3): 170-175, 2015, ISSN: 1793-8236

[12] Comipont, Hanbook steel props EN 1065, Page 4, Dostupné na internete 24.09.2024:

<https://www.peri.ltd.uk/dam/jcr:f1491a88-bdce-43a0-b268-0935528dca4a/comipont-steel-slab-props-instructions-for-assembly-use.pdf>

[13] PALLETT, P. F., Temporary Works Toolkit, Part 6, Backpropping of flat slabs - design issues and worked examples, Article in The Structural Engineer, January 2017, Vol. 95, Issue 1, pages 30-32, dostupné : https://www.temporaryworks.info/PFP_136F_Backpropping_Flat_Slabs.pdf

GEODESY AND CARTOGRAPHY

Ján Brindza¹

Študijný program: Geodézia a kartografia, 3. ročník

KINEMATICKÝ ZBER PRIESTOROVÝCH ÚDAJOV PRE TVORBU 3D MODELOV BUDOV

KINEMATIC COLLECTION OF SPATIAL DATA FOR 3D BUILDING MODEL CREATION

Abstract

The article focuses on the creation of building interior models in the form of point clouds using simultaneous localization and mapping approaches. The data for processing are obtained by the prototype of a mobile mapping system developed at the Department of Surveying. This mobile mapping system consists of three subsystems that include sensors such as LiDARs, a stereo camera, an IMU, and rotary encoders. The created models reflect the progression of simultaneous localization and mapping approach development. The paper presents 3 different results of data processing. The first model used raw data, the second model used measured data with constraints, and the final model used point cloud filtering. The individual results are described, along with the shortcomings of the simultaneous localization and mapping approach.

Kľúčové slová / Key Words

LiDAR; model; mapovanie; mobilný mapovací systém; SLAM

1. Úvod

Množstvo výrobcov v poslednej dobe prezentuje svoje vlastné mobilné mapovacie systémy (MMS) rôzneho typu, ako napríklad ručné alebo vozíkové. Najčastejšie sú využívané v geodézii, v strojárstve, v architektúre a v medicíne. Primárny účel MMS je mapovanie, resp. skenovanie okolitého prostredia a jeho prevod do digitálnej podoby vo forme mračna bodov. Získané mračno bodov môže okrem súradníc jednotlivých bodov obsahovať aj radiometrické informácie (RGB, intenzita) skenovaného prostredia ak to použítý MMS umožňuje. Výsledkom merania sú mračná bodov v rôznych časových epochách, ktoré je potrebné následne spojiť do jedného výstupného mračna bodov. Toto je zabezpečené pomocou prístupov simultánnej lokalizácii a mapovania (SLAM). Prístupy SLAM môžeme rozdeliť na základe použitého snímača na systémy využívajúce LiDAR [1], na systémy využívajúce kamery [2] a systémy využívajúce kombináciu viacerých snímačov [3].

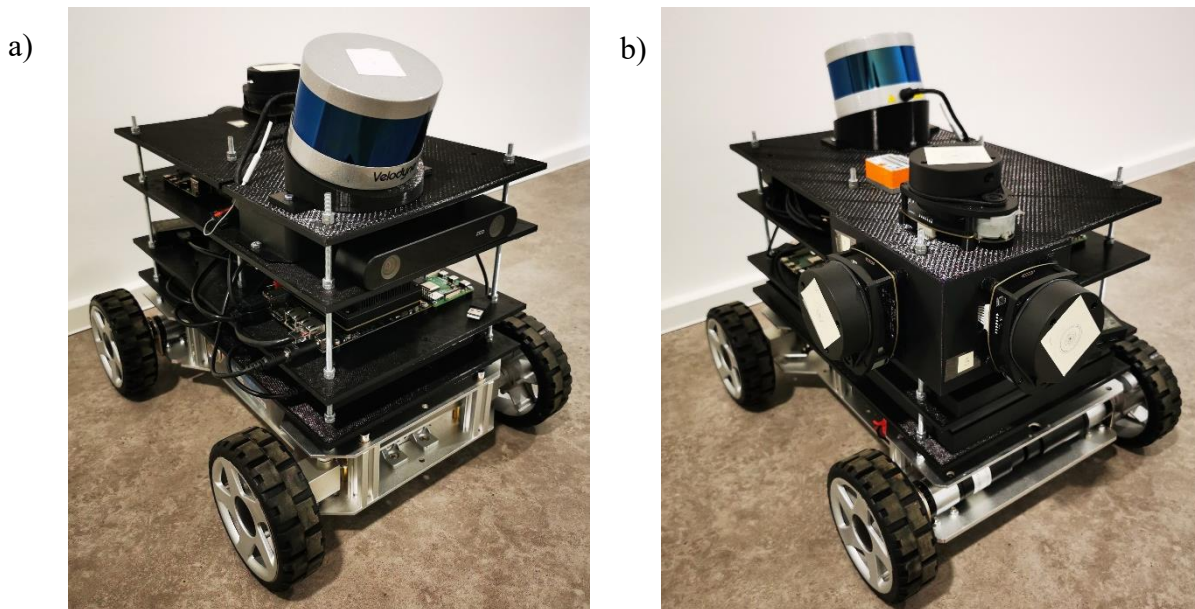
Článok sa venuje tvorbe modelov interiéru budov s využitím grafického prístupu na SLAM. Merané dáta sú získané vytvoreným prototypom MMS vyvíjaným na Katedre geodézie, ktorý sa skladá z kombinácie viacerých snímačov (Obr. 1). V prvej časti je popísaný vytvorený prototyp MMS, kde sú popísané jednotlivé hardvérové komponenty vytvoreného prototypu. V ďalšej časti článku je popísaná samotná tvorba modelov, pomocou údajov získaných využitím MMS. Vytvorené boli tri modely, v ktorých sa postupne zdokonaľoval vytváraný algoritmus na SLAM. V závere článku sú zhodnotené dosiahnuté výsledky spracovania nameraných dát z vytvoreného MMS.

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

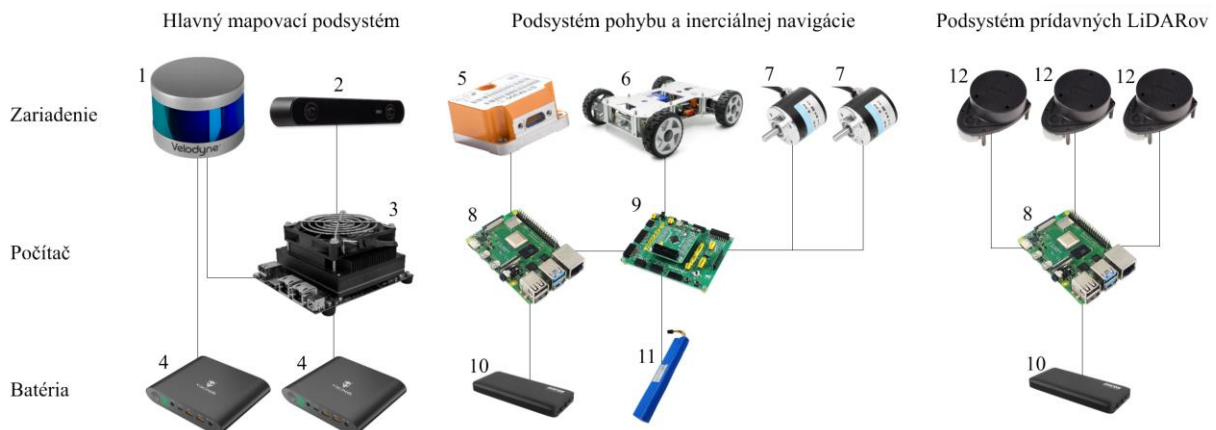
2. Popis mobilného mapovacieho systému

Vytvorený prototyp nízko nákladového MMS je navrhnutý pre mapovanie vnútorných priestorov budov. Pod pojmom nízko nákladový uvažujeme hodnotu celkových nákladov na MMS v rozsahu 20 % až 30 % ceny bežne dostupných riešení na trhu (napr. Leica BLK2GO – 43 750 €). Prototyp MMS (Obr. 1) sa skladá z kombinácie viacerých snímačov tak, aby si navzájom eliminovali svoje nedostatky. Skladá sa z LiDARov, inerciálna meracia jednotka (IMU), snímačov otáčok, stereokamery, riadiacich počítačov, pohybujúcej sa platformy a batérii. Počítače, resp. mikropočítače prototypu MMS používajú operačný systém Ubuntu 20.04 spolu s robotickým operačným systémom (ROS) vo verzii Noetic. Hlavným riadiacim počítačom MMS je NVIDIA Jetson AGX Xavier (Obr. 2 - 3), ktorý zabezpečuje chod ROS a ukladá merané dáta. Dva mikropočítače Raspberry Pi 4 (Obr. 2 - 8) sú pripojené ku hlavnému počítaču na základe IP adresy. Použité snímače sú zoskupené do troch podsystémov umiestnených na pohybujúcej sa platforme (vozíku) (Obr. 2):

1. Hlavný mapovací podsystém,
2. Podsystém pohybu a inerciálnej navigácie,
3. Podsystém prídavných LiDARov.



Obr. 1 Prototyp MMS: a) pohľad spredu, b) pohľad zozadu



Obr. 2 Schéma zapojenia podsystémov

Hlavný mapovací podsystém je tvorený dvomi zariadeniami na zber priestorových dát a to stereokamerou ZED 2 (Obr. 2 - 2) [4] a LiDARom Velodyne Puck VLP-16 (Obr. 2 - 1) [5]. Stereokamera ZED 2 (Obr. 2 - 2) sa skladá z dvojice CMOS snímačov, IMU, magnetometra a barometra. Rozlíšenie jedného CMOS snímača je 4 Mpx s veľkosťou 2688 px x 1520 px, pričom veľkosť jedného pixelu je 2 μm x 2 μm . Vzďialenosť medzi dvojicou CMOS snímačov tvorí základnicu stereokamery, ktorej veľkosť je 120 mm. Hodnota ohniskovej vzdialenosti je 2,12 mm a veľkosť zorného poľa je 110° x 70° x 120°. Výstupom zo stereokamery ZED 2 je dvojica stereosnímkov, ktorých maximálna veľkosť je 2 208 px x 1 242 px pri 15 fps. Z dvojice stereosnímkov môže byť vytvorená hĺbková snímka (z angl. depth image), kde každý jej pixel má určenú vzdialenosť objektu od kamery. Velodyne Puck VLP-16 (Obr. 2 - 1) je 3D LiDAR, ktorý zachytáva okolité prostredie v 16 kanáloch s veľkosťou zorného poľa v horizontálnom smere 360° a vo vertikálnom smere 30° (+/- 15° od „horizontu prístroja“). Výrobcom definovaný rozsah merania dĺžok je do 100 m s presnosťou ± 3 cm. Výstupnými meranými dátami je 3D mračno bodov, ktoré má definované priestorové súradnice X, Y, Z a intenzitu (intenzita odrazeného laserového lúča). Velodyne Puck VLP-16 má frekvenciu záznamu 5 Hz až 20 Hz, pričom dokáže odmerať maximálne 600 000 bodov. Celý podsystém je riadený počítačom NVIDIA Jetson AGX Xavier (Obr. 2 - 3), do ktorého sa stereokamera pripája pomocou USB-A konektora a LiDAR sa pripája pomocou ethernet konektora. Podsystém je napájaný dvojicou 12 V batérii typu Viking Smartech II (Obr. 2 - 4).

Podsystém pohybu a inerciálnej navigácie je tvorený IMU STIM 300 (Obr. 2 - 5) [6] a vozíkom (Obr. 2 - 6), ktorý obsahuje dvojicu optických snímačov otáčok (Obr. 2 - 7) [7]. IMU STIM 300 (Obr. 2 - 5) obsahuje 3 MEMS gyroskopy SAR500 a 3 kapacitné MEMS snímače zrýchlenia MS1000. Rozsah merania gyroskopov SAR500 je ± 400 °/s s rozlíšením 0,22 °/hod. Rozsah merania snímačov zrýchlenia MS1000 je ± 10 g s rozlíšením 1,9 μg . Meranými dátami IMU STIM 300 (Obr. 2 - 5) je zrýchlenie a uhlová rýchlosť. IMU sa pripája do mikropočítača Raspberry Pi 4 (Obr. 2 - 8) pomocou USB-A konektora. Použitý vozík (Obr. 2 - 6) [7] je typu ackerman a vyrába ho firma Roboworks. Priemer použitých kolies je 125 mm. Riadenie celého vozíka zabezpečuje mikropočítač s procesorom STM32F103RCT6 (Obr. 2 - 9), na ktorý sa pripája prevodovka riadenia predných kolies, dva motory na pohon zadných kolies a dva snímače otáčok. Vozík používa dvojicu 500 inkrementových optických snímačov otáčok (Obr. 2 - 7), ktoré sú dodávané spolu s vozíkom a výrobcu ich bližšie nešpecifikuje. Meranými dátami zo snímačov otáčok sú počty inkrementov. Vozík je ovládaný pomocou rádiového ovládača a je napájaný 22,2 V batériou (Obr. 2 - 11). Podsystém je napájaný 5 V batériou AlzaPower Onyx (Obr. 2 - 10). Mikropočítač STM32F103RCT6 (Obr. 2 - 9) je z konektora microUSB prepojený káblom s Raspberry Pi 4 (Obr. 2 - 8) do konektora USB-A.

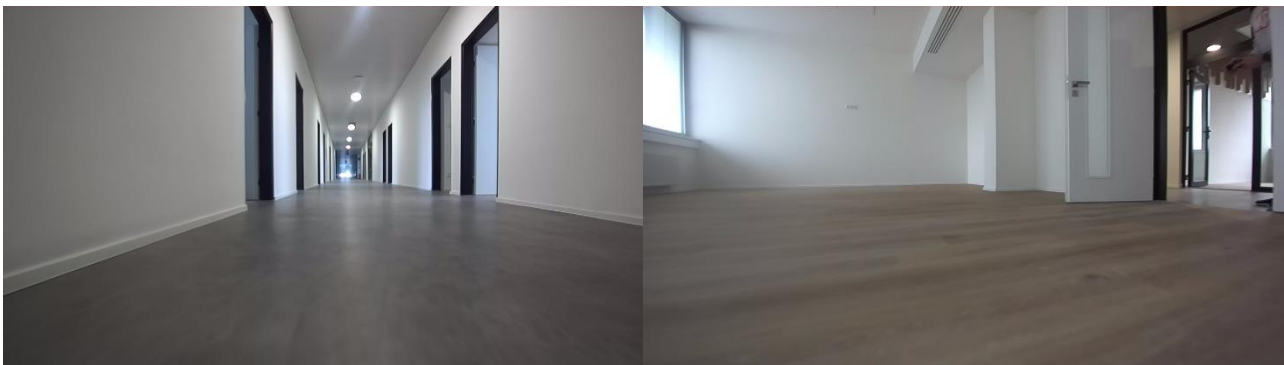
Podsystém prídavných LiDARov je tvorený tromi RPLidarmi A1 (Obr. 2 - 12) [8] od spoločnosti Shanghai Slamtec Co., Ltd. RPLidar A1 je 2D LiDAR, ktorý rotuje v 360° zornom poli. Výrobcom definovaný rozsah merania dĺžok je od 0,15 m do 12 m, pričom ich presnosť do 3 m je 1 % meranej dĺžky, od 3 m do 5 m je 2 % a od 5 m do 12 m je 2,5 %. Frekvenciu skenovania je možné nastaviť v rozmedzí od 2 Hz do 10 Hz, pričom odporúčaná frekvencia výrobcu je 5,5 Hz. Výstupnými meranými dátami RPLidaru A1 je 2D mračno bodov so súradnicami X a Y. RPLidary A1 sú orientované tak, aby vytvárali 3 na seba kolmé roviny (Obr. 1). Podsystém je riadený mikropočítačom Raspberry Pi 4 (Obr. 2 - 8), ku ktorému sú pripojené LiDARY pomocou USB-A konektora. Celý podsystém je napájaný 5 V batériou AlzaPower Onyx (Obr. 2 - 10).

3. Tvorba modelu s využitím SLAM

Vytvorený prototyp MMS bol navrhnutý pre mapovanie vnútorných priestorov budov s využitím prístupu na SLAM. Výsledkom spracovania meraných dát je 2D, resp. 3D mračno bodov. Pre zistenie presnosti vytvoreného mračna bodov vnútorného priestoru bolo vykonané experimentálne meranie,

vytvoreným prototypom MMS. Cieľom tejto kapitoly je prezentovať prvé dosiahnuté výsledky spracovania meraných dát grafickým prístupom na SLAM.

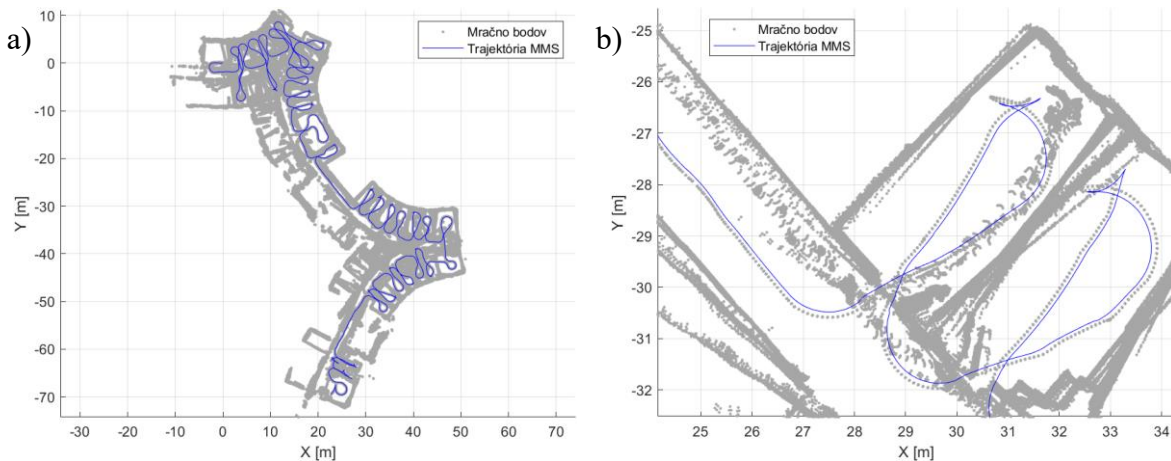
Pre účely testovania vytvoreného MMS v reálnych podmienkach bolo vyhotovené testovacie meranie na 4. poschodí Bloku A, Stavebnej fakulty, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. Budova Bloku A je po kompletnej rekonštrukcii, pričom v kanceláriách a na chodbe 4. poschodia sa v čase merania nenachádzal nábytok (Obr. 3). Pred samotným meraním bola vykonaná inicializácia MMS, ktorá pozostáva zo spustenia všetkých podsystémov a ich pripojenia do ROS. Následne bol vykonaný záznam meraných dát zo všetkých snímačov (3x 2D LiDAR, 3D LiDAR, stereokamera, IMU, 2x snímač otáčok). MMS bol ovládaný rádiovým ovládačom, pričom bol navigovaný tak, aby vošiel do každej miestnosti. Do niektorých miestností MMS vošiel opakovane kvôli tvorbe trajektórie vo forme uzavretých polygónov. Takýto pohyb je dôležitý pre zvýšenie presnosti určenia trajektórie, pretože môže byť vykonaná optimalizácia trajektórie MMS a modelu prostredia. Po vykonaní merania z celého poschodia bol záznam meraných dát ukončený a stiahnutý z MMS na externé pamäťové médium. Meranie MMS trvalo 18 minút a 30 sekúnd s veľkosťou meraných dát 6,9 GB. Počas merania bolo pomocou RPLidaru A1 č. 1 vyhotovených 7 586 mračien bodov, RPLidarom A1 č. 2 7 813 mračien bodov, RPLidarom A1 č. 3 7 643 mračien bodov a pomocou Velodyne Puck VLP-16 bolo vyhotovených 11 012 mračien bodov, pričom bola zaznamenávaná aj intenzita odrazu jednotlivých bodov. Pomocou stereokamery ZED 2 bolo vyhotovených 16 592 stereosnímkov, pomocou IMU STIM300 bolo vyhotovených 138 834 meraní a pomocou dvojice snímačov otáčok bolo vyhotovených 21 714 meraní.



Obr. 3 Ukážka priestorov 4. poschodia Bloku A z pohľadu MMS: a) Chodba, b) Miestnosť

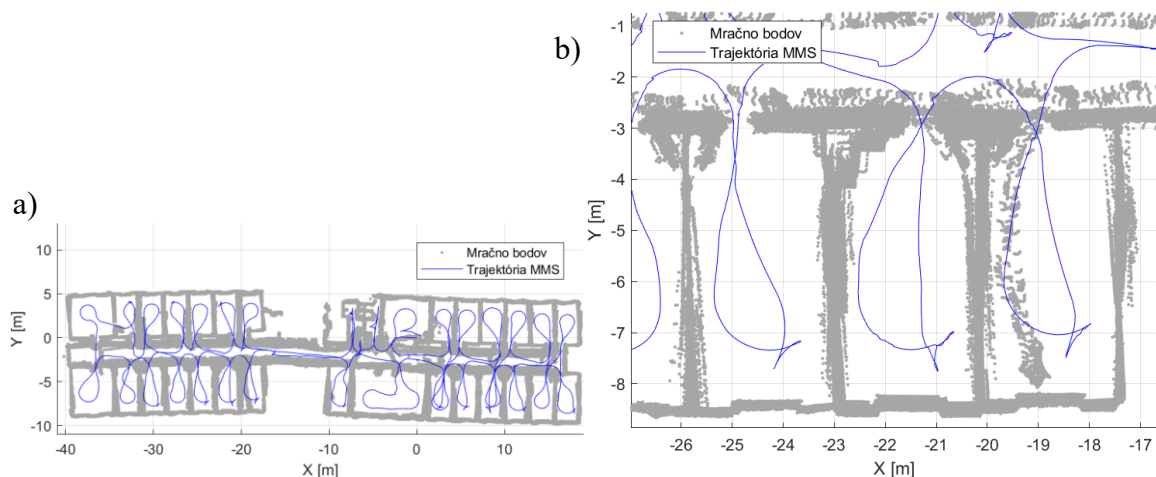
Spracovanie meraných dát bolo vykonané softvérom MATLAB. Prvé výsledky MMS boli vytvorené z dát 2D LiDARu RPLidar A1 č. 2, kvôli nižšej výpočtovej náročnosti. Dátami RPLidaru A1 sú 2D mračná bodov, pričom jedno mračno bodov obsahuje približne 650 bodov so súradnicami X a Y. Použitý typ prístupu na SLAM bol založený na teórii grafov. Pre vzájomnú transformáciu meraných mračien bodov bola využitá transformácia normálnych rozdelení (NDT z angl. normal distributions transform). NDT je metóda používaná na odhad polohy a orientácie MMS na základe porovnania dvojice mračien bodov. Z bodov v mračne bodov je vytvorený pravdepodobnostný model, ktorý je následne porovnávaný s nasledujúcim meraným mračnom bodov, vďaka čomu je realizovaná transformácia. Pomocou transformácie sú určené tri transformačné parametre a to dve translácie v smere osi X a Y a jedna rotácia okolo osi Z, čím získame relatívnu polohu medzi dvomi po sebe meranými mračnami bodov. NDT je efektívna a robustná metóda voči šumu, čo z nej robí vhodný nástroj pre úlohy v robotike a mapovaní. Prezentované sú tri výsledky spracovania a to:

1. Spracovanie „surových“ meraných dát (bez dodatočnej úpravy meraných údajov),
2. Spracovanie meraných dát so zavedenými podmienkami,
3. Spracovanie s následnou filtráciou mračna bodov.



Obr. 4 Spracovaním surových meraných dát: a) Výsledné mračno bodov, b) Detail mračna bodov

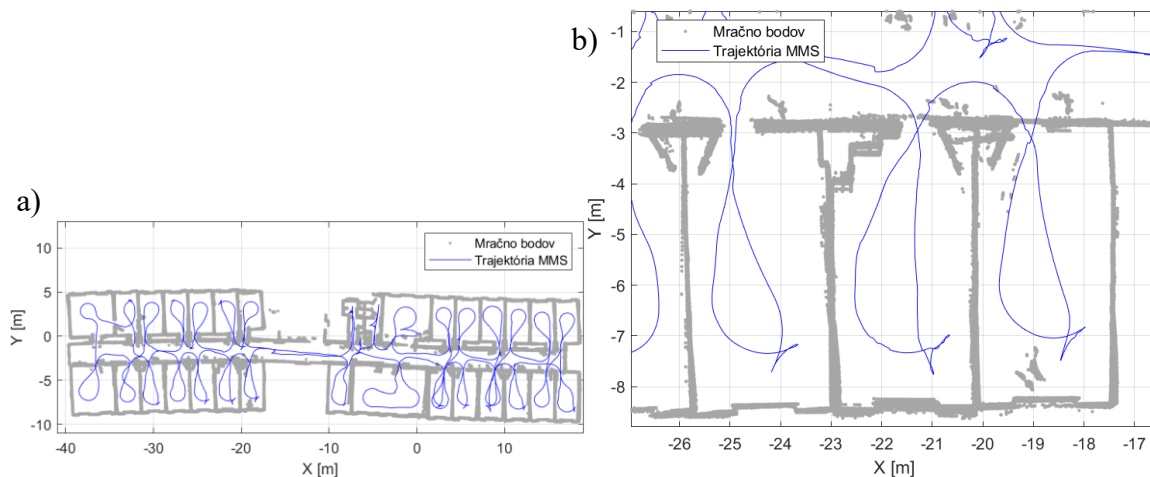
Pred prvým spracovaním, surové merané dáta neboli upravené a počas spracovania neboli identifikované uzatvorené polygóny a tým nebola vykonaná optimalizácia trajektórie a mračna bodov. Výsledok spracovania je znázornený na Obr. 3. **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov. a.** Počiatočné súradnice MMS sú $X = 0$ m, $Y = 0$ m. Pri prvom pohľade môžeme vidieť, že výsledná trajektória a mračno bodov sa postupne „stáča“, čím sa prejavuje hromadenie chýb spôsobené výpočtom aktuálnej polohy MMS z predchádzajúcej polohy MMS. Trajektória MMS sa stáča vľavo vzhľadom na smer jeho pohybu, čo môže byť spôsobené vchádzaním do miestností nachádzajúcich sa na ľavej strane chodby v smere pohybu MMS. V úsekoch trajektórie, kde MMS nevchádza do miestností, nedochádza k deformácii trajektórie ani mračna bodov. Pri detailnom pohľade na mračno bodov (Obr. 4 b) môžeme vidieť v blízkosti trajektórie MMS body, ktoré kopírujú jej priebeh. Jedná sa o časť meraného mračna bodov, ktorá reprezentuje časť konštrukcie MMS, konkrétne LiDAR Velodyne Puck VLP-16. Pre elimináciu týchto bodov je potrebné nastaviť minimálnu vzdialenosť bodov od LiDARu, ktoré budú vstupovať do spracovania. Nadbytočné body sú viditeľné pri stene chodby (Obr. 4 b), ktoré sú spôsobené pohybom operátora MMS.



Obr. 5 Spracovanie meraných dát s obmedzeniami: a) Výsledné mračno bodov, b) Detail mračna

Pred druhým spracovaním boli merané dáta z LiDARu predspracované. Z každého meraného mračna bodov boli vyselektované body s minimálnou a maximálnou vzdialenosťou od LiDARu. Minimálna vzdialenosť bola nastavená na 0,5 m z dôvodu merania konštrukčného prvku MMS. Maximálna vzdialenosť bola stanovená na 6 m, na základe vykonaného testovania meranej dĺžky [9], kde odchýlky v meranej dĺžke dosahovali hodnoty do 10 cm. V rámci spracovania bolo použité

identifikovanie uzavretých polygónov, pomocou ktorého bola vykonaná optimalizácia trajektórie a mračna bodov. Pomocou identifikácie uzavretých polygónov sú pri opakovanom navštívení rovnakého miesta modelu identifikované už merané orientačné body, na základe ktorých sa určí chyba v polohe a tým sa optimalizuje model aj samotná poloha MMS. Orientačné body reprezentujú výber charakteristických bodov z okolitého prostredia (napr. roh miestnosti). Výsledné mračno bodov (Obr. 4 a) je oproti predchádzajúcemu mračnu bodov (Obr. 4 a) celistvé a nedochádza k jeho výraznému stáčeniu. Deformácia mračna bodov však nie je úplne odstránená, čo môže byť spôsobené samotnou presnosťou RPLidaru A1. Pri detailnom pohľade (Obr. 5 b) je zrejmé, že body reprezentujúce konštrukčný prvok MMS sú odstránené, čím sa eliminujú nadbytočné body v mračne bodov. Nadbytočné body spôsobené pohybom operátora je potrebné odstrániť vhodnou filtráciou.



Obr. 6 Použitie filtrácie: a) Výsledné mračno bodov, b) Detail mračna bodov

Mračno bodov získané spracovaním meraných údajov s obmedzeniami (Obr. 5 a) bolo následne filtrované s cieľom odstrániť nadbytočné body. Použitá filtrácia na základe hustoty bodov analyzuje lokálnu hustotu susedných bodov každého bodu, čím identifikuje izolované alebo riedke body ako šum a následne ich odstráni. Výsledné mračno bodov po filtrácii je na Obr. 6 a. Filtrácia odstránila väčšinu nadbytočných bodov spôsobených pohybom operátora, avšak nie úplne (Obr. 6 b). Odstránený bol aj šum v blízkosti stien miestností, ktorý mohol byť spôsobený rýchlym pohybom MMS alebo samotnou nedokonalosťou RPLidaru A1.

Výsledné mračno bodov (Obr. 6 a) je prvotným výsledkom spracovania meraných dát prototypu MMS s prístupom na SLAM. Dosiahnuté výsledky meraných dát z RPLidaru A1 predstavujú vhodný základ pre spracovanie dát zo všetkých snímačov a hlavne využitím 3D LiDARu Velodyne Puck VLP-16. V budúcnosti bude nevyhnutné optimalizovať spôsob zberu dát MMS, vrátane prispôbenia rýchlosti pohybu MMS prostredím a vzdialenosti operátora od MMS počas merania.

4. Záver

Článok sa venuje vytvorenému MMS a spracovaniu jeho meraných dát. V prvej časti článku je popísaný samotný MMS, ktorý sa skladá z kombinácie viacerých snímačov, vďaka čomu sa eliminujú ich vzájomné nedostatky. Skladá sa z trojice 2D LiDARov RPLidarov A1, 3D LiDARu Velodyne Puck VLP-16, IMU STIM 300, stereokamery ZED 2 a dvojice optických snímačov otáčok (500 line AB phase photoelectric encoders). Tieto snímače sú rozdelené do 3 podsystémov, ktoré navzájom komunikujú vďaka ROS.

V ďalšej časti článku bolo vykonané experimentálne meranie, z ktorého boli použité dáta na tvorbu modelov pomocou prístupu SLAM. Z meraných dát boli vytvorené tri modely, ktoré odzrkadľujú

postupný vývoj použitého prístupu SLAM. Prvý model bol vytvorený zo surových dát (bez dodatočnej úpravy meraných údajov), ktoré neboli predspracované. Výsledný model bol výrazne stočený a obsahoval body, ktoré patrili konštrukčnej časti MMS, operátorovi a obsahoval aj veľké množstvo šumu. Pri tvorbe druhého modelu boli merané dáta predspracované obmedzením minimálnej a maximálnej meranej vzdialenosti. Zároveň bol upravený aj spôsob spájania meraných mračien bodov, kde sme použili identifikáciu uzavretých polygónov. Výsledný model je celistvý a nedochádza k jeho výraznému stáčaniu. Nevýhodou však je, že stále obsahuje body, ktoré patria operátorovi a veľké množstvo šumu. Tieto body boli vo veľkej miere odstránené filtráciou čím sme získali tretí model.

Použitý prístup SLAM na spracovanie meraných dát je dobrým podkladom pre výpočet trajektórie MMS a modelu okolitého prostredia. Použitý prístup je však potrebné rozšíriť o ďalšie snímače, pretože dosiahnuté výsledky boli vytvorené len z dát RPLidaru A1.

Podakovanie

„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“.

„Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0247“.

Literatúra

[1] 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.

[2] CUMMINS, M. - NEWMAN, P.: Probabilistic appearance based navigation and loop closing. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, s. 2042-2048. ISSN 1050-4729. Dostupné na:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4209386>

[3] KUDRIASHOV, A. et al.: *SLAM Techniques Application for Mobile Robot in Rough Terrain*. Cham : Springer International Publishing, 2020. 131 s. ISBN 978-3-030-48980-9.

[4] Vlastnosti stereokamery ZED 2. Dostupné online:
https://store.stereolabs.com/cdn/shop/files/ZED_2_Datasheet.pdf?v=14666199487818461309,
Prístupné dňa 8.7.2024

[5] Vlastnosti lidarů Velodyne VL-16 Puck. Dostupné online:
<https://www.amtechs.co.jp/product/VLP-16-Puck.pdf>, Prístupné dňa 8.7.2024

[6] Vlastnosti IMU STIM300. Dostupné online:
<https://sensor.azurewebsites.net/media/5z5lv25o/ts1524-r29-datasheet-stim300.pdf>, Prístupné dňa 8.7.2024

[7] Vlastnosti pohybujúcej sa platformy. Dostupné online:
<https://static1.squarespace.com/static/5e76e0c52a318c0c1a850442/t/63f4408fe7287f4a231273ad/1676951781181/Rosbot+User+Manual.pdf>, Prístupné dňa 8.7.2024

[8] Vlastnosti lidarů RPLidar A1. Dostupné online: https://www.slamtec.ai/wp-content/uploads/2023/11/LD108_SLAMTEC_rplidar_datasheet_A1M8_v3.0_en.pdf, Prístupné dňa 8.7.2024

[9] BRINDZA, J. et al. Testing of Velodyne PUCK VLP-16 and RPLIDAR A1 LIDARS for a mobile mapping system. *Pollack Periodica*, 2024.

Lukáš Kubica¹

Študijný program: geodézia a kartografia, 4. ročník

VPLYV DIGITÁLNEHO VÝŠKOVÉHO MODELU POVRCHU NA GEOLOKÁCIU PRIRODZENÝCH TRVALÝCH ODRAŽAČOV

INFLUENCE OF DIGITAL SURFACE MODEL ON THE GEOLOCATION OF NATURAL PERMANENT SCATTERERS

Abstract

Satellite Radar Interferometry (InSAR) is a precise geodetic method for monitoring ground deformation. This technique identifies permanent natural scatterers to create a geodetic estimation network that allows point displacements to be measured with millimeter accuracy. A critical component of InSAR processing is the Digital Surface Model (DSM), which provides essential elevation data for the area of interest. The primary objective of this study is to evaluate how the quality of the DSM affects the positioning accuracy and residual height of the observed points. The processing was performed using GECORIS software, with a focus on the city of Šal'a and its surrounding areas. Different DSMs were used throughout the analysis, each of which produced different processing results. The results showed minimal differences in ellipsoidal heights of observed points between the DSMs; however, these variations had a significant impact on positional accuracy, with the SRTM model producing the least accurate results. The study concludes that the use of current and higher resolution DSMs is essential to improve the effectiveness of InSAR measurements. In addition, the use of external DSMs is inconvenient and very limited, highlighting the need for alternative methods of using elevation data in the InSAR processing chain.

Kľúčové slová

InSAR, Digital surface model, geolocation

1. Úvod

Družicová radarová interferometria (InSAR) je považovaná za etablovanú geodetickú metódu diaľkového prieskumu zeme a metódu merania deformácii zemského povrchu. Technológia využíva sériu radarových snímok časti zemského povrchu na identifikáciu prirodzených trvalých odražačov formujúcich geodetickú výpočtovú sieť. Vhodným spracovaním série radarových snímok je možné z meraní získať informáciu o pohybe pozorovaných bodov s milimetrovou presnosťou a bez nutnosti fyzickej prítomnosti v teréne. Existuje viacero spôsobov spracovania radarových snímok, avšak z pohľadu geodézie je najrelevantnejší spôsob spracovania meraní InSAR založený na teórii geodetického odhadu neznámych parametrov s využitím siete prirodzených trvalých odražačov. Algoritmus spracovania pozostáva z viacerých na seba nadväzujúcich krokov, pričom postup je svojou povahou blízky princípom známym z geodetického spracovania meraní (vyrovnanie siete, spracovanie GNSS meraní a pod.).

Neoddeliteľnou súčasťou spracovania InSAR meraní je digitálny model povrchu (DMP), ktorý charakterizuje výškové pomery záujmového územia. Využitie DMP pri spracovaní meraní InSAR prebieha vo viacerých fázach spracovania. Ide napríklad o koregistráciu radarových snímok, odhad neznámych parametrov výpočtovej siete, spresnenie polohy výsledného mračna pozorovaných bodov alebo simuláciu odrazivosti signálu v rámci záujmového územia.

¹ Ing. Lukáš Kubica, STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra globálnej geodézie a geoinformatiky, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

Cieľom predkladanej práce je zistiť vplyv kvality digitálneho modelu povrchu na presnosť určenia polohy a reziduálnej výšky prirodzených trvalých odrážačov v rámci spracovania meraní InSAR. V rámci práce bolo realizované spracovanie meraní InSAR v softvéri GECORIS [1]. Záujmovú lokalitu tvorilo mesto Šaľa a jeho blízke okolie. Pri spracovaní boli použité štyri rôzne digitálne modely povrchu. V rámci vyhodnotenia výsledkov sme sa primárne zamerali na polohovú zložku výsledného mračna pozorovaných bodov.

2. Úloha DMP pri spracovaní meraní InSAR

Cieľom spracovania družicových meraní InSAR je transformácia množiny radarových snímok do časových radov pohybu prirodzených trvalých odrážačov [2]. Digitálny model povrchu v procese spracovania radarových snímok priamo figuruje pri dvoch fázach, ktoré sú bližšie špecifikované v nasledujúcich podkapitolách.

2.1 Koregistrácia

Štandardné spracovanie radarových snímok, za účelom monitorovania deformácií zemského povrchu, vychádza z N realizácií (radarových snímok) záujmového územia. Jednotlivé pixely tak nemusia zodpovedať rovnakému územiu na zemskom povrchu. Z uvedeného dôvodu musia byť snímky transformované do jednotného súradnicového systému zodpovedajúcemu referenčnej snímke. Tento krok sa nazýva koregistrácia radarových snímok. Geometrická koregistrácia [3] zabezpečí transformáciu súradnicových systémov vedľajších snímok do súradnicového systému referenčnej snímky. Výsledkom sú snímky, ktorých pixely zodpovedajú rovnakému územiu na zemskom povrchu v každej epoche. V procese koregistrácie sú riešené Range-Doplerovské rovnice, ktoré využívajú digitálny model povrchu.

2.2 Odhad reziduálnej výšky pozorovaných bodov

Jedným z určovaných parametrov spracovania meraní InSAR je reziduálna výška pozorovaných bodov. Ide o veličinu, ktorá vyjadruje výškovú odľahlosť miesta odrazu signálu od jeho priemetu na digitálnom modeli povrchu. Z uvedeného vyplýva, že pokiaľ hodnoty reziduálnej výšky bodov oscilujú okolo nuly, tak sa pozorovaný bod nachádza na DMP. Hodnoty reziduálnych výšok sa líšia v prípade, ak je použitý neaktuálny DMP, na ktorom pozorovaný objekt neexistuje alebo je použitý DMP s nízkym priestorovým rozlíšením. Reziduálna výška je následne použitá na korekciu elipsoidickej výšky pozorovaných bodov. Takto opravená výška je použitá pri spresnení polohy výsledného mračna pozorovaných bodov. Presnosť geolokácie sa v plnej miere prejaví najmä na vyšších objektoch ako sú výškové budovy, priemyselné veže, komíny, stožiare prenosovej sústavy a pod.

3. Aktuálne používané DMP pri spracovaní meraní InSAR

Aktuálne riešenie spracovateľského softvéru umožňuje použiť dvojicu štandardne ponúkaných digitálnych modelov povrchu. Ide o modely *SRTM* (z angl. *Shuttle Radar Topography Mission*) [4] a *Copernicus DEM* [5]. Ich použitie je možné bez nutnosti akejkoľvek dodatočnej akcie zo strany používateľa. V prípade potreby sa dáta automaticky stiahnu na základe vstupnej geometrie záujmovej lokality. Ďalšou alternatívou je využitie externého DMP. Táto alternatíva si však vyžaduje dodatočnú predprípravu. Dáta musia byť vyjadrené v elipsoidických súradniciach (WGS84, EPSG: 4326) a exportované vo formáte GeoTIFF [6].

3.1 Digitálne modely povrchu

SRTM je globálny digitálny model povrchu, ktorý vznikol na podklade družicových radarových meraní počas 11 dní v roku 2000. Dáta pokrývajú približne 80% zemského povrchu s priestorovým rozlíšením 30 metrov, resp. 90 metrov. Nevýhodou modelu je jeho neaktuálnosť.

Copernicus je globálny a európsky digitálny model povrchu, ktorý vznikol z radarových meraní družicovej misie TanDEM-X v rokoch 2011-2015 s nepravidelnou aktualizáciou najmä v hornatých oblastiach, kde boli detegované chyby. Dáta z modelu sa poskytujú v troch verziách:

- EEA-10 s priestorovým rozlíšením 10 metrov.
- GLO-30 s priestorovým rozlíšením 30 metrov.
- GLO-90 s priestorovým rozlíšením 90 metrov.

V rámci spracovania meraní InSAR sa zvyčajne používa verzia GLO-30. Výhodou modelu *Copernicus* oproti modelu *SRTM* je najmä jeho aktuálnosť. Ako sa uvádza v kapitole 2.2, aktuálnosť digitálneho modelu povrchu je jedným z predpokladov správneho určenia reziduálnej výšky pozorovaných bodov a preto je použitie modelu *Copernicus* vhodnejšie.

Copernicus EEA-10 s priestorovým rozlíšením 10 metrov je dostupný len pre 39 členských štátov Európskej únie. Model nie je štandardne dostupný v spracovateľskom softvéri a preto je jeho použitie potrebné realizovať prostredníctvom pripojenia externého digitálneho modelu povrchu.

DMP1.0 s priestorovým rozlíšením 3 metre je digitálny model povrchu Slovenskej republiky vytvorený na podklade leteckého laserového skenovania [7]. Dáta boli zozbierané v období november 2017 – marec 2018. Ide o najkvalitnejší a najaktuálnejší model z uvedenej štvorice použitých modelov. Rovnako ako v prípade modelu *Copernicus EEA-10*, aj tento model je možné použiť len ako externý. V tabuľke č. 1 je sumárny prehľad použitých DMP so základnými informáciami.

Tab. 1: Prehľad použitých DMP

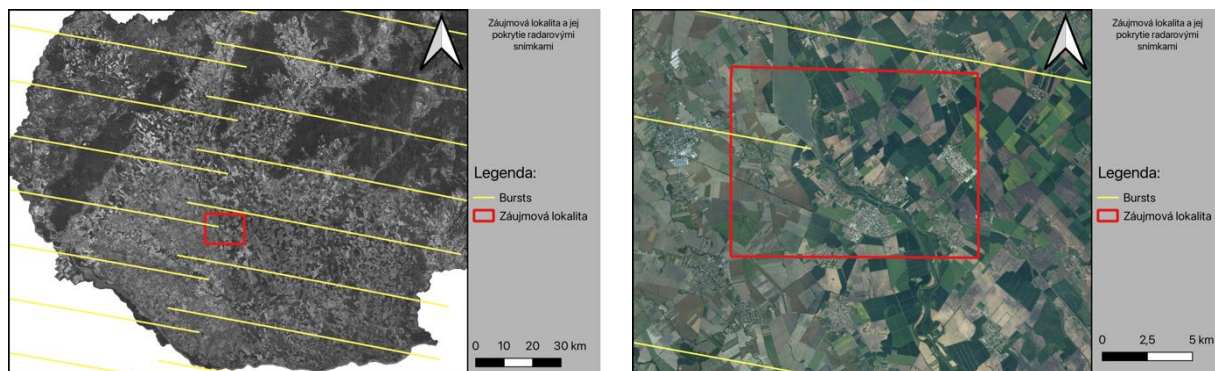
Názov modelu	Rok vzniku	Priestorové rozlíšenie
SRTM 1arc sec	2000	30 m
Copernicus GLO-30	2011-2015	30 m
Copernicus EEA-10	2011-2015	10 m
DMP1.0	2017-2018	3 m

4. Praktický experiment

Cieľom praktického experimentu bolo preskúmať vplyv kvality digitálneho modelu povrchu na presnosť určenia polohy a reziduálnej výšky prirodzených trvalých odrážačov v rámci spracovania meraní InSAR.

4.1 Záujmová lokalita

Za záujmovú lokalitu pre praktický experiment bolo zvolené mesto Šaľa a jeho blízke okolie (Obr. 1). Pri výbere záujmovej lokality sme kládli dôraz na rôznorodosť územia. V rámci záujmovej oblasti sa nachádza hustá bytová zástavba (mesto Šaľa a okolité dediny), vodné dielo Kráľová, cestná a železničná infraštruktúra, priemyselný park Duslo Šaľa s výškovými objektmi a stožiare elektrickej prenosovej sústavy. Zároveň je lokalita pomerne rovinatá.



Obr. 1: Zaujmová lokalita

4.2 Spracovanie meraní InSAR

Spracovanie meraní InSAR v záujmovej lokalite bolo realizované na podklade radarových snímok družicovej misie Sentinel-1. Základné informácie o spracovaní meraní InSAR sú uvedené v tabuľke č. 2. Celkovo boli realizované 4 samostatné spracovania, pričom rozdiel bol v použitom DMP. Výsledkom spracovania sú štyri datové sady, pričom každá obsahuje približne 6000 pozorovaných bodov.

Tab. 2: Základné informácie o spracovaní meraní InSAR

Časový interval snímok	01.08.2018 - 31.07.2020
Geometria snímania	klesajúca (Descending)
Relatívne číslo dráhy	124
Počet snímok	118
Referenčný dátum	18.09.2019

4.3 Použitie externého DMP pri koregistrácii radarových snímok

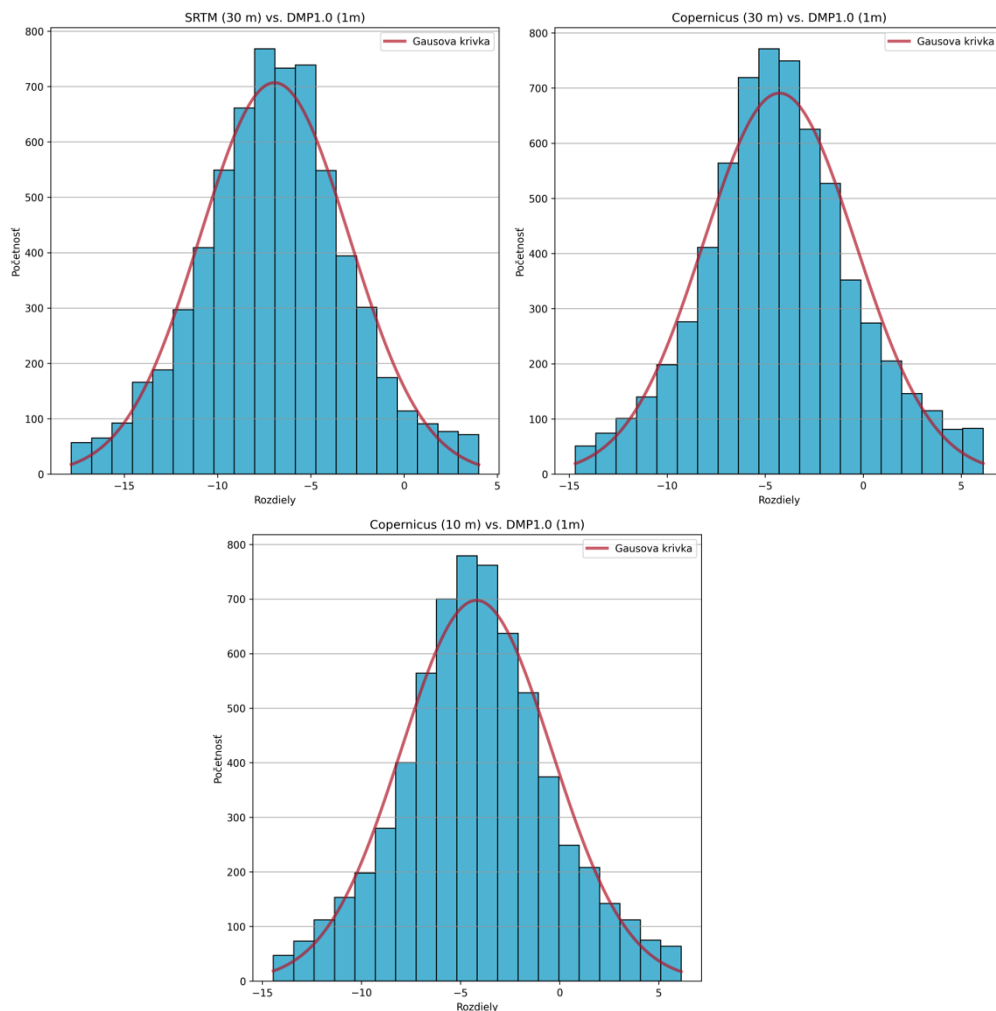
Ako je uvedené v kapitole 3, použitie externého DMP v procese spracovania meraní InSAR si vyžaduje predprípravu dát do požadovaného formátu. Následne je možné externý DMP použiť pri výpočte. Každá radarová snímka z družicovej misie Sentinel-1 pozostáva z troch hlavných častí označovaných ako „sub-swath“. Každý sub-swath obsahuje 9 pásov o veľkosti približne 10x85 km, ktoré sa označujú ako „bursty“. Koregistrácia prebieha po jednotlivých burstoch. Nevýhodou použitia externého DMP je, že musí pokrývať oblasť celého burstu aj v prípade, že sa záujmová lokalita rozprestiera len na malej časti. To spôsobuje nárast v dátovom objeme DMP a veľké nároky na výpočtové zdroje. V tabuľke č. 3 je porovnanie koregistrácie dvojice snímok s použitím rôznych typov DMP. Z hodnôt vidieť, že čas koregistrácie sa významne zvyšuje pri použití podrobnejšieho DMP. Testovanie bolo realizované na výpočtovom serveri, ktorý disponuje procesorom AMD Ryzen Threadripper PRO 3975WX 32-Cores (4,2 GHz) a operačnou pamäťou 256 GB.

Tab. 3: Čas koregistrácie dvojice snímok

Názov modelu	Čas koregistrácie
SRTM 1arc sec	20 s
GLO-30	20 s
EEA-10	480 s
DMP1.0	1020 s

4.4 Analýza výsledkov

V rámci analýzy výsledkov spracovania meraní InSAR sme ako prvé analyzovali rozdiely v elipsoidickej výške pozorovaných bodov medzi etalónom reprezentovaným DMP1.0 s priestorovým rozlíšením 1 meter a použitými DMP. Na obrázku č. 2 sú zobrazené histogramy rozdielov pre jednotlivé DMP. Tabuľka č. 4 sumarizuje základné štatistické hodnoty vypočítané z rozdielov. Z grafického zobrazenia rozdielov, ako aj z numerických charakteristík je zrejme, že rozdiely medzi jednotlivými DMP sú veľmi mierne.

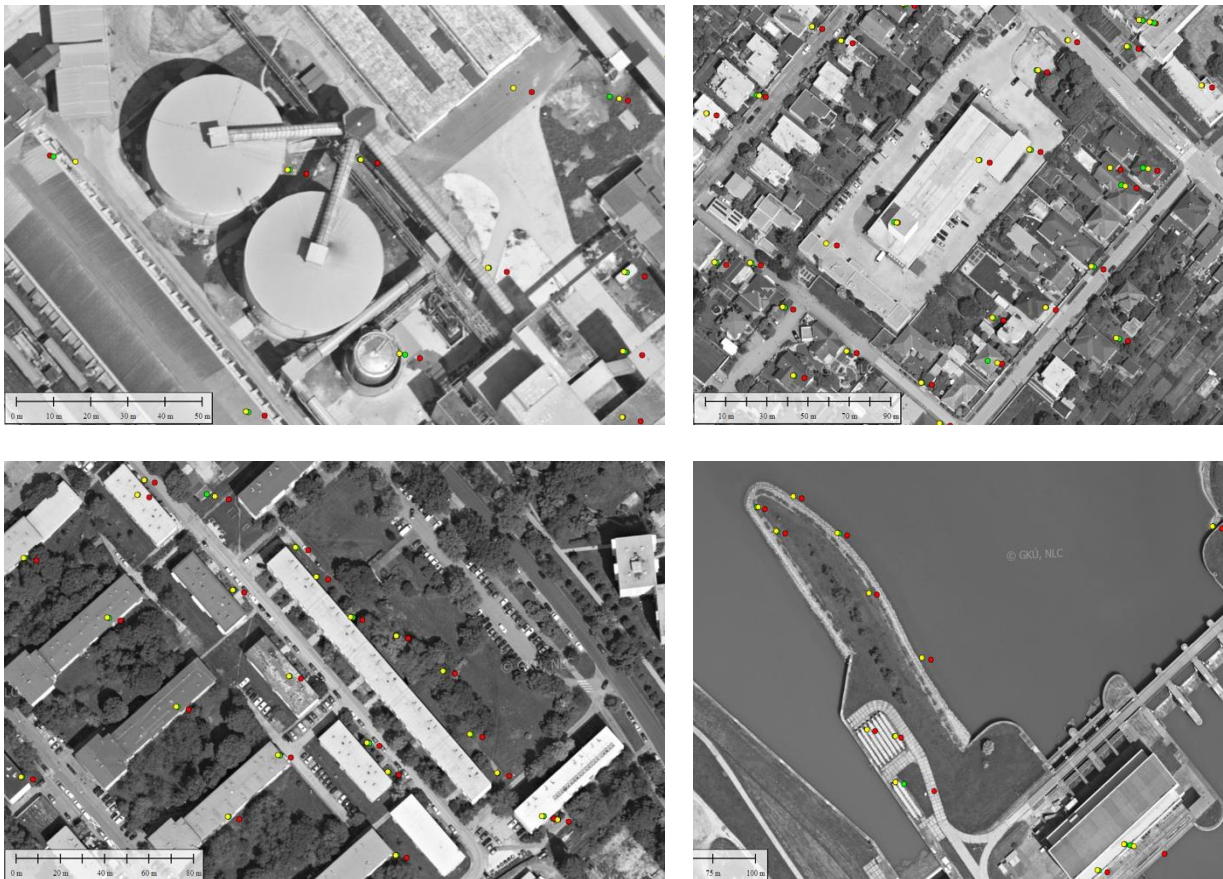


Obr. 2: Početnosť rozdielov elipsoidických výšok

Tab. 4: Základná štatistika rozdielov elipsoidických výšok (hodnoty sú uvedené v metroch)

Model	Min	Max	Q1	Medián	Priemer	Q3	Disperzia	Štandard. odchýlka
SRTM	-17,840	4,002	-9,495	-6,931	-6,941	-4,488	16,019	4,002
GLO-30	-14,687	6,118	-6,680	-4,374	-4,273	-1,896	15,074	3,883
GLO-10	-14,443	6,129	-6,543	-4,251	-4,199	-1,818	14,430	3,799

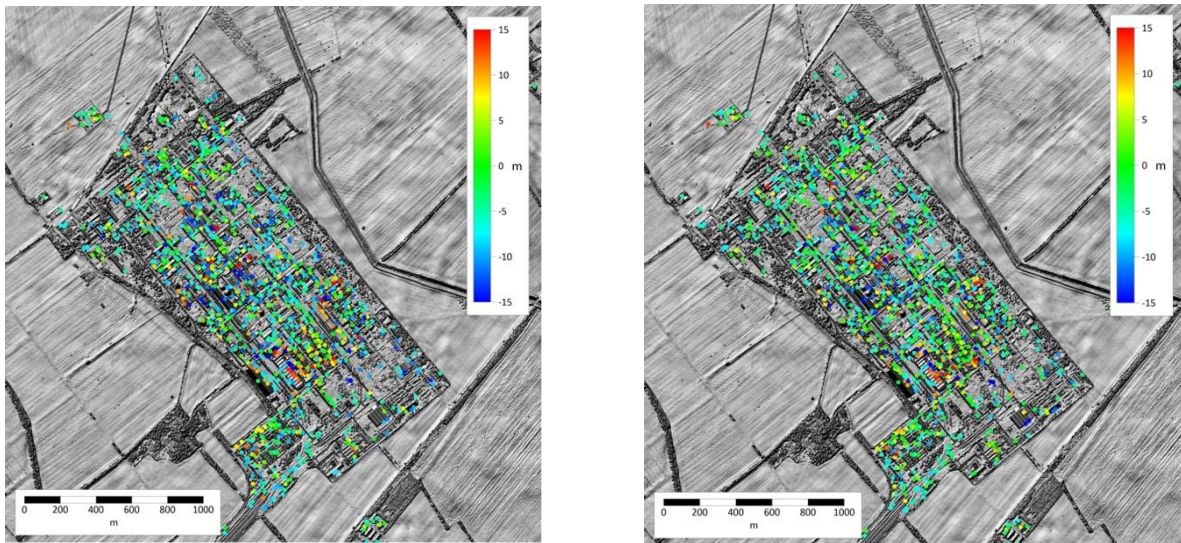
Napriek tomu, že rozdiely v elipsoidickej výške medzi modelmi nie sú výrazne odlišné, ich vplyv sa prejavil na výslednej polohe pozorovaných bodov (Obr. 3). Na obrázku môžeme vidieť polohu bodov farebne odlišenú podľa použitého modelu. Model SRTM je zobrazený červenou farbou, model Copernicus GLO-30 zelenou farbou a model Copernicus EEA-10 žltou farbou. Dráha družice je klesajúca z čoho vyplýva, že družica snímala územie z východu. Na vybraných situáciách vidieť, ako sa poloha bodov upravila na miesto odrazu. Najhoršiu polohu dosahujú body zo spracovania, ktoré používalo model SRTM. Rozdiely medzi modelmi Copernicus GLO-30 a EEA-10 sú vo väčšine prípadov zanedbateľné.



Obr. 3: Rozdiely vo výslednej polohe pozorovaných bodov
(červená: SRTM, zelená: GLO-30, žltá: EEA-10)

Mechanizmus určenia miesta odrazu vyslaného signálu je veľmi komplexný. Dochádza k rôznym alternatívam odrazu (jednoduchý, dvojitý, trojitý odraz). Presný a aktuálny DMP je nápomocný a kľúčový prvok k správne určenie polohy prirodzeného odrážača. V prípade, že je reziduálna výška bodu na hodnote 0, znamená to, že miesto odrazu signálu je totožné s miestom na digitálnom modeli povrchu. Obrázok č. 4 znázorňuje hodnoty reziduálnych výšok na pozorovaných bodoch

v rámci priemyselného areálu Duslo Šaľa. Pri použití modeli EEA-10 vidíme vyššiu koncentráciu bodov s reziduálnou výškou okolo hodnoty 0.



Obr. 4: Zobrazenie hodnôt reziduálnej výšky pozorovaných bodov nad priemyselným parkom Duslo Šaľa (vľavo: model SRTM, vpravo: model EEA-10)

5. Záver

V rámci predkladanej práce bolo naším cieľom zistiť vplyv kvality digitálneho modelu povrchu na presnosť určenia polohy a reziduálnej výšky prirodzených trvalých odrážačov v rámci spracovania meraní InSAR. Digitálny model povrchu vstupuje do spracovania meraní InSAR vo viacerých fázach a priamo ovplyvňuje odhad reziduálnej výšky pozorovaných bodov a ich výslednú polohu. Aktuálna implementácia spracovateľského algoritmu meraní InSAR štandardne ponúka dvojicu digitálnych modelov povrchu – *SRTM 1Arc sec* a *Copernicus GLO-30*. Ide o modely s rovnakým priestorovým rozlíšením, avšak dáta modelu *GLO-30* sú aktuálnejšie o 15 rokov. Okrem štandardne ponúkaných modelov je možné použiť aj externý DMP.

V práci sme analyzovali trojicu spracovaní meraní InSAR, pričom každé spracovanie bolo vyhotovené s iným digitálnym modelom povrchu. Rozdiely v elipsoidickej výške pozorovaných bodov voči etalónu DMP1.0 s metrovým priestorovým rozlíšením nevykazujú zásadné rozdiely. Polohové spresnenie výslednej množiny pozorovaných bodov je najviac viditeľné pri prechode z modelu SRTM na model GLO-30. V niektorých prípadoch došlo k miernemu zlepšeniu aj pri prechode z modelu GLO-30 na model EEA-10.

V rámci predkladanej práce bolo naším cieľom realizovať spracovanie InSAR meraní aj s využitím modelu DMP1.0 s priestorovým rozlíšením 3 metre. Avšak, počas riešenia úlohy sme narazili na problémy spojené s limitmi výpočtovej techniky, ktorú sme mali k dispozícii. Z uvedeného dôvodu sa nám nepodarilo toto spracovanie zrealizovať a výsledky začleniť do analýzy. Predpokladom je, že by došlo k ďalšiemu spresneniu polohy výsledného mračna pozorovaných bodov a to najmä z dôvodu podrobnejšieho priestorového rozlíšenia, ktoré model dosahuje. Implementácia externého DMP v takejto podobe je veľmi náročná na praktické využitie a preto je potrebné hľadať iné spôsoby, ako priniesť kvalitnejšiu výškovú informáciu do spracovania meraní InSAR.

Literatúra

[1]

CZIKHARDT, R.; MAREL, H. van der; PAPCO, J., 2021. *GECORIS: An Open- Source Toolbox for Analyzing Time Series of Corner Reflectors in InSAR Geodesy*. Remote Sensing. Roč. 13. issn 2072-4292. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13050926>.

[2]

LEIJEN, FJ van, 2014. *Persistent scatterer interferometry based on geodetic estimation theory*. ISBN 978-94-6186-299-0. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.4233/uuid:5dba48d7-ee26-4449-b674-caa8df93e71e>. Dizertačná práca.

[3]

SANSOSTI, E.; BERARDINO, P.; MANUNTA, M.; SERAFINO, F.; FORNARO, G., 2006. Geometrical SAR image registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Roč. 44, s. 2861–2870. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.875787>.

[4]

NASA JPL. *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second sub-sampled*. 2013, distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL3S.003>. Accessed 2024-10-09.

[5]

Copernicus DEM – Global and European Digital Elevation Model. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>

[6]

OGC GeoTIFF špecifikácia: <http://www.opengis.net/doc/IS/GeoTIFF/1.1>

[7]

1. cyklus projektu LLS (2017 – 2023) a tvorba DMR 5.0. Dostupné online: <https://www.geoportal.sk/sk/zbgis/lls/1-cyklus/>

Aset Madiev¹

Study program: Geodesy and Cartography, year: 3.

A SCAN-VS-BIM APPROACH FOR PLANAR OBJECTS

Abstract

This paper presents a Scan-vs-BIM approach for verifying the geometry of planar objects in buildings, such as walls. The method extracts as-built geometry from point clouds and compares it to the as-planned model from BIM. Using a modified RANSAC and region-growing algorithm, planar objects are segmented, and deviations between the as-built and as-planned models are visualized with color-coded deviation maps, flatness calculation and quantitative assessment are also performed. The approach has been tested on data from an apartment complex in Bratislava, demonstrating its potential for improving accuracy and efficiency in as-built verification processes in construction.

Key Words

Point cloud; Scan-vs-BIM; python.

Introduction

As-built verification is an essential step in ensuring that constructed structures meet design specifications, especially in complex projects where precision is crucial. One of the main challenges in this process is comparing the as-built models, often presented as point clouds, to the as-planned models represented in BIM formats. This comparison allows for early detection of deviations, which can impact structural integrity, safety, and compliance [1].

With the introduction of advanced scanning technologies such as terrestrial laser scanning (TLS), capturing high-density 3D point clouds has become more accessible and reliable. These point clouds, representing millions of data points, provide detailed information of the built environment. However, processing and analyzing this vast amount of data to extract meaningful information remains a challenge.

In this article, we focus on walls as planar objects and demonstrate a method to automatically extract and compare their geometry. The approach combines point cloud segmentation techniques with BIM data extraction to provide an accurate comparison between as-built and as-planned models. By algorithms for segmentation and demonstrating deviations, this process aids in quality control and ensures that discrepancies between the construction and design models are quickly identified and addressed.

Methodology

The proposed methodology consists of three main steps: extraction of geometry data from the IFC, segmentation of planar object from point cloud and comparing as-planned (IFC) model with as-built

¹ Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

(point cloud) model with visualization of differences between them by creating deviation maps in the form of signed color maps.

To demonstrate the effectiveness of the proposed approach, the point cloud data (Fig. 1) and BIM model in IFC format (Fig. 2) were obtained from an apartment located in the apartment complex Zvirn, Bratislava. The measurement was performed using a Trimble TX 3D laser scanner. The parameters were set as follows: field of view 360° H, 305° V, resolution 1/10, which means that distance between measured point on the surface is 15.3 mm by 15.3 mm, 3 repetitions of the measured distances. The point cloud registration was performed using surface-based registration and target-based registration.

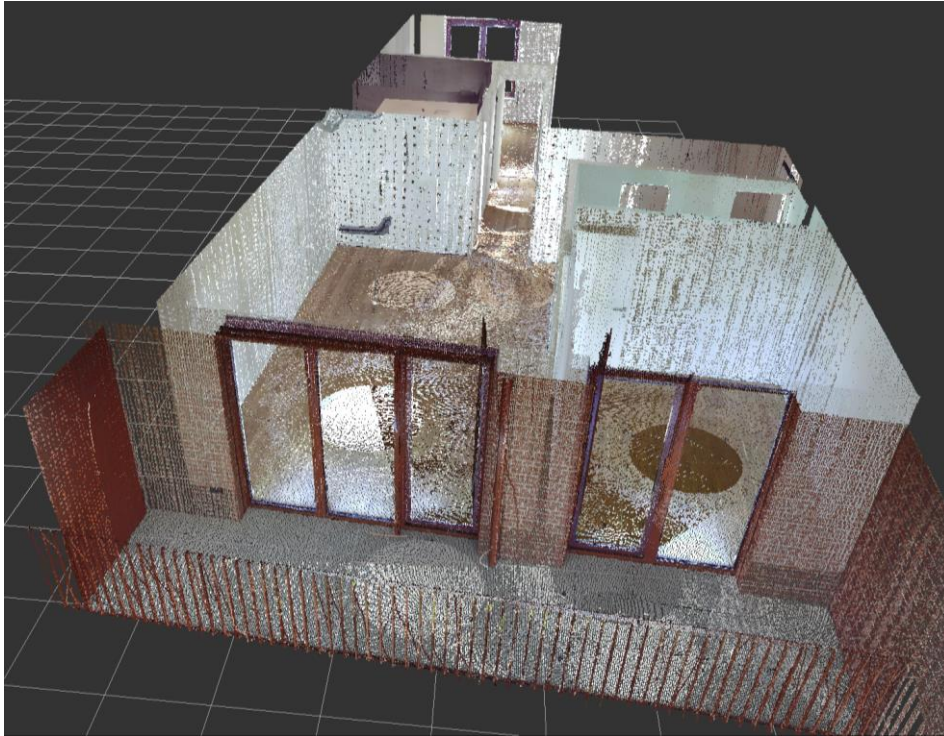


Figure 1: Source point cloud

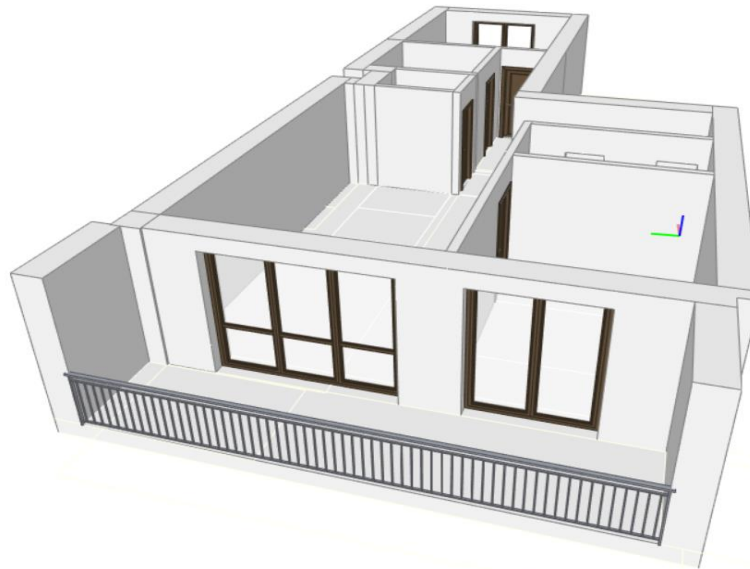


Figure 2: Source BIM model in IFC format

As-planned geometry extraction implies extracting the coordinates of the required object from a BIM model represented by IFC format. In IFC, a wall's structure is defined using entities like `IFCWALL` or `IFCWALLSTANDARDCASE`. To extract geometric information, it is necessary to know the origin coordinates and orientation of the local coordinate system for the given wall, within the World Coordinate System (WCS), which is the global coordinate system for the whole project. The `IfcLocalPlacement`, which has attributes `RelativePlacement` and `PlacementRelTo`, specifies the position of the coordinates system's origins. If `PlacementRelTo` is not used, then the wall's position is defined in WCS. The origin of the local coordinate system is determined by `IfcAxis2Placement3D`, which is accessed through `IfcLocalPlacement` and uses `IfcCartesianPoint`.

The X and Z axes directions of the local coordinate system for the given wall are defined by `IfcDirection`, while the Y axis completes a right-handed Cartesian system. In the subsequent phase, identification of information related to the shape of the wall as defined by `IfcProductDefinitionShape` is required. For instance, if the wall is a swept solid, the corners of a 2D polygon outlining the wall's shape can be determined by `IfcArbitraryClosedProfileDef`. The entity can be reached sequentially, starting from `IfcProductDefinitionShape`, followed by `IfcShapeRepresentation`, and finally, `IfcExtrudedAreaSolid`. `IfcExtrudedAreaSolid` also specifies the direction and distance of the wall height (Fig. 3) [2].

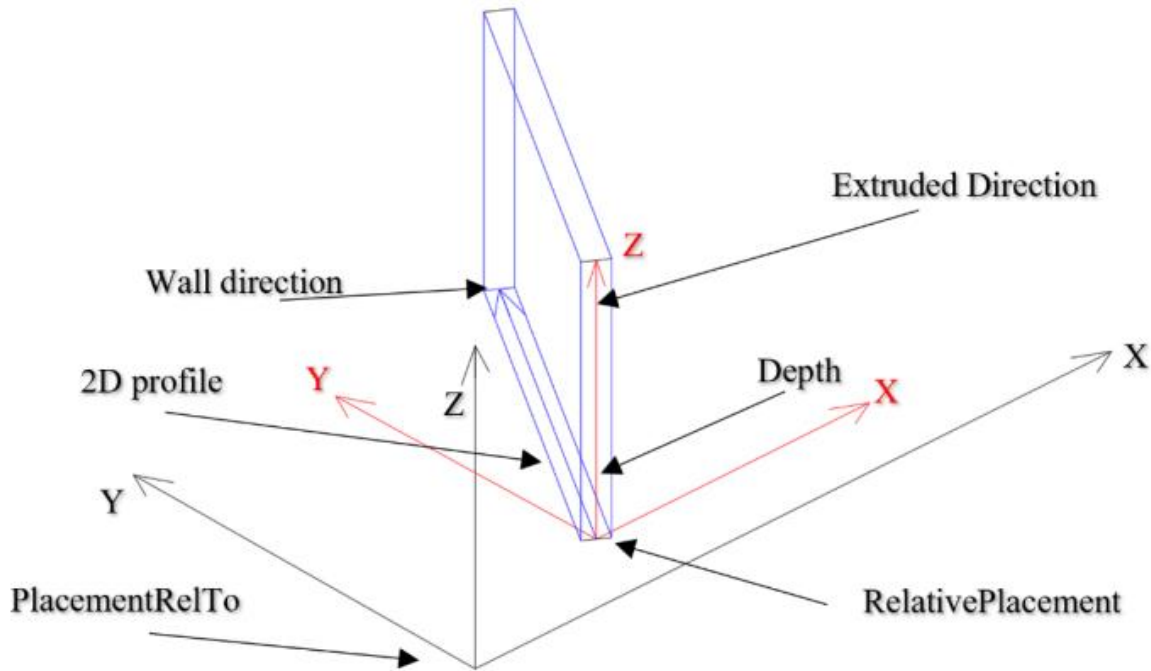


Figure 3: Visualization of wall definition in IFC

As a base for as-built geometry segmentation process was used algorithm, developed by R. Honti at the Department of Surveying of the Faculty of Civil Engineering of Slovak University of Technology in Bratislava [3]. However, the initial algorithm was written in Matlab programming language and needed some modification. In this regard, some innovations have been added to the algorithm, allowing it to work with IFC files and additional filters. The algorithm for segmentation combines a modified RANSAC approach with the region-growing method, as detailed in [3]. The segmentation process begins by calculating the normal vectors to the surface in points present in the cloud. Surface normals are important properties of a geometric surface and are widely used to solve various practical problems, mostly related to graphical visualization. Normals helps to recognize objects and surfaces in the point cloud. The challenge of determining the normal at a point in the point cloud is approximated by estimating the normal of a plane fitted to the points in the nearest neighborhood of the selected point. Therefore, the function responsible for computing the normal for each point typically relies on either a search radius or a maximum number of neighboring points. Further, the segmentation process starts from the seed point, which represents object's center of gravity, extracted from the as-planned element. The most appropriate regression model is determined using the k nearest points, selected automatically based on the local density of points surrounding the seed point. This process involves using orthogonal regression to minimize the orthogonal distances of these k points from the resulting model.

Subsequently, the estimated regression plane is examined for nearest neighbors, and inlier points for this plane are identified. The selection of such points is based on two criteria. Firstly, inlier points are those closer to the model than a specified threshold distance. However, the implementation of the distance threshold value is not a sufficient filter, since the points may be within the threshold value while lying on a different surface. Thus, the second criterion is that the inlier points are determined based on the orientation of the normal vector. Specifically, points are considered inliers if the angle between the local normal vector (at the point) and the normal vector of the resulting regression model is less than a chosen threshold.

Identification of inlier points and re-evaluation of model parameters occur iteratively by checking neighboring points, gradually increasing their number. This re-evaluation process continues until all points belonging to a specific model are selected. The outcomes of the model segmentation are

subsets of point clouds associated with the as-planned structural elements from BIM model, along with parameters of regression models.

The comparison and visualization of the data involve analyzing the extracted geometry from the BIM model alongside the segmented subsets of the as-built point cloud, leading to the creation of deviation map. This deviation map expresses the distance between as-planned (IFC) and as-built (point cloud) model, for what the general equation of the plane was used (Fig. 4). Also, we are creating the second deviation map expresses the deviation between the segmented points for the selected plane and the best-fit regression plane – to determine the relative geometric flatness (Fig. 5).

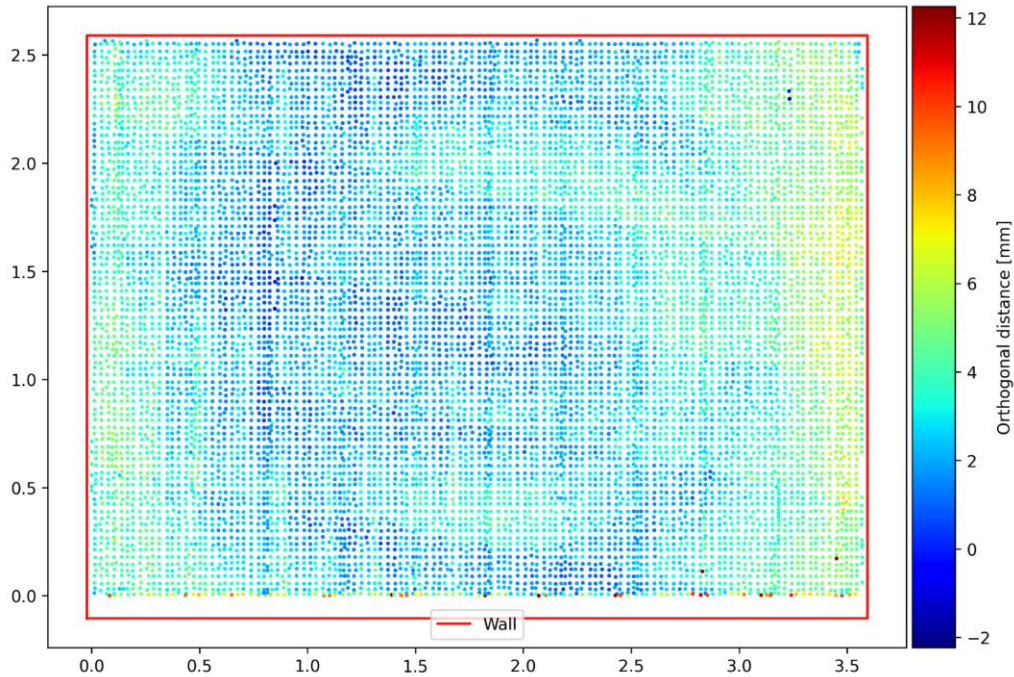


Figure 4 Deviation (distance) between the as-planned (IFC) and the as-built (TLS) walls

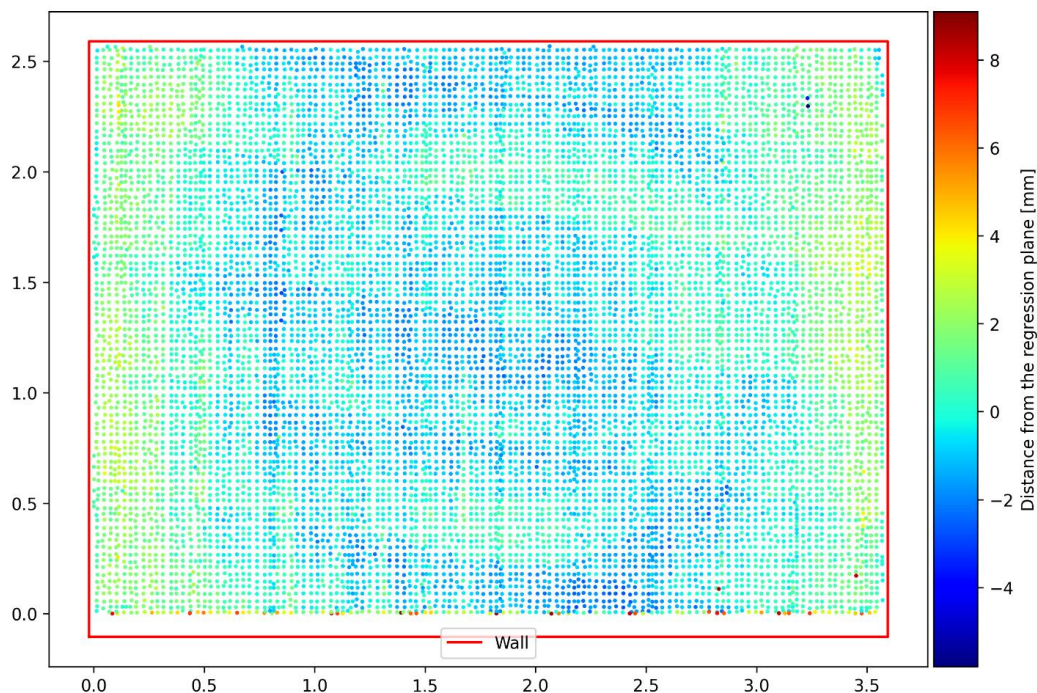


Figure 5 Deviation map for the wall flatness quantification

Conclusion

In this article, a Scan-vs-BIM approach for planar objects was presented. We have demonstrated the stages of this approach, which include extracting geometry data from an IFC file, segmentation of planar objects from a point cloud, and comparing an as-built (IFC) models and as-planned (Point Cloud) models with visualization of the differences between them, creating deviations maps in the form of signed color maps. The results obtained show that this approach can be used in the field.

In future work, we plan to include additional objects like columns and openers in this approach. The implementation of such objects will allow us to use our approach as a fully automated software solution for geometry verification of rough structures in construction.

Acknowledgement

“This publication was created with the support of the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, science, research and sport of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences for the project VEGA-1/0272/22”.

„Funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V01-00053.”

References

1. EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R. AND LISTON, K. (2011) *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. John Wiley & Sons, Hoboken.
2. BuildingSMART: Industry Foundation Classes (IFC). [Online]. Available: <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/> [Cit. 30 09 2024].
3. HONTI, R.: *Development of efficient algorithms for segmentation of geometric shapes from point clouds*. Dissertation thesis. 2021.

Laura Pénzešová¹

Študijný program: Geodézia a kartografia, 4. ročník

VERTIKÁLNE POSUNY A TIAŽOVÉ ZRÝCHLENIE - KOLOKAČNÉ STANICE IGETS-GNSS

VERTICAL DISPLACEMENTS AND GRAVITY MEASUREMENTS – COLOCATION STUDY OF IGETS AND GNSS

Abstract

This study investigates the vertical displacements of the Earth's surface through collocated Global Navigation Satellite System (GNSS) and International Geodynamics and Earth Tracks Service (IGETS) stations in Europe. The combination of these data provides a comprehensive overview of the influence of surface loading, in particular hydrological changes, on the vertical displacements of the Earth's surface. The research includes time series analysis of selected European collocated stations where vertical displacements and gravity changes have been monitored simultaneously for at least four years. To improve accuracy, local hydrological corrections, based on global models such as MERRA-2, were applied. The results show increased coherence between vertical displacements and gravity changes after the application of hydrological corrections, especially on annual time scales. The results show that the hydrological corrections significantly improved the coherence between gravity and elevation time series, with significant increases in coherence at several stations. The study highlights the importance of local hydrological corrections and their contribution in accurately assessing geodynamic processes. The conclusions support further research on collocated stations and their use in monitoring earth changes.

Kľúčové slová / Key Words

Vertikálne posuny; tiažové zrýchlenie; IGETS; GNSS

Úvod

Vertikálne posuny zemského povrchu sú dôležitým ukazovateľom geodynamických procesov a sú úzko prepojené práve s časovými zmenami tiažového zrýchlenia. Táto práca skúma vertikálne posuny na kolokačných staniách GNSS a gravimetrických staniách Medzinárodnej služby pre geodynamiku a zemské slapy (IGETS) pomocou analýzy časových radov. IGETS [1] 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 dovedajších aktivít s názvom Global Geodynamics Project (GGP) [2, 3] Kontinuálne merania tiažového zrýchlenia sa často využívajú pri skúmaní zemských slapov, oceánskeho a atmosférického zaťaženia [4], [5], pohybu pólu [6, 7], vulkanickej činnosti [8], hydrogeológie a ďalších geodynamických procesov, ktoré sú detailne popísané napr. publikácií [9].

Vertikálne posuny zemského povrchu spôsobené povrchovým zaťažením sú predmetom rozsiahleho skúmania, najmä v kontexte hydrologických procesov, ako je zmena pôdnej vlhkosti,

¹ Pénzešová Laura, Ing. Radlinského 2766/11 810 05 Bratislava

snehu alebo iných zdrojov povrchovej vody. Práce [10, 12] poskytujú dôležitý teoretický rámec pre kvantifikáciu vzťahu medzi vertikálnymi posunmi a gravitačnými zmenami, známy ako *gravity to height ratio* (pomer gravitácie k výškovým zmenám).

1 Teoretický základ

Povrchové zaťaženie (napr. hydrologické) vedie k zmenám v tiažovom poli, ako aj k vertikálnym deformáciám zemského povrchu. Tento vzťah je kritický pre pochopenie interakcií medzi redistribúciou hmoty a deformáciou povrchu, pričom zmeny v tiažovom poli môžu byť presne merané pozemnými gravimetrami a porovnávané s vertikálnymi zmenami zaznamenanými pomocou GNSS.

Celková zmena tiaže v danom mieste je výsledkom viacerých zložiek, ktoré možno vyjadriť rovnicou:

$$g(\theta, \lambda) = g^{N,global} + g^{N,local} + g^{E,u} + g^{E,m}, \quad (1.1)$$

kde:

- $g^{N,global}$ je globálny gravitačný účinok povrchového zaťaženia,
- $g^{N,local}$ je lokálny gravitačný účinok povrchového zaťaženia,
- $g^{E,u}$ je deformačný účinok (tzv. free-air effect),
- $g^{E,m}$ je deformačný účinok v dôsledku redistribúcie hmôt pod zemským povrchom.

Podľa [12], priemerná spektrálna hodnota pomeru tiažového zrýchlenia a vertikálnych zmien predstavuje hodnotu približne $-2.6 \text{ nm s}^{-2}/\text{mm}$ ak je lokálny gravitačný účinok vynechaný. Priestorová stredná hodnota pomeru na kontinentoch v prípade hydrologického zaťaženia je približne $-8.6 \pm 5.7 \text{ nm s}^{-2}/\text{mm}$ v prípade, ak vlhkosť pôdy a snehové zrážky sú zohľadnené, a $-9.7 \pm 5.4 \text{ nm s}^{-2}/\text{mm}$ v prípade, ak je zohľadnená iba vlhkosť pôdy.

Štúdia [13] nadväzuje na výskum de Linage tým, že sa zameriava na praktické porovnanie tiažových a vertikálnych zmien na kolokačných staniciach. Táto práca je významná tým, že vykonáva interkomparáciu medzi meraniami tiažových zmien a vertikálnych posunov na staniciach IGETS, ktoré umožňujú simultánne sledovanie oboch veličín, avšak bez uváženia akejkoľvek lokálnej hydrologickej korekcie. Jedným z dôležitých záverov práce Rosat et al. je, že lokálne hydrologické procesy, ako sú sezónne zmeny v pôdnej vlhkosti, výrazne ovplyvňujú gravitačné a výškové zmeny.

2 Použité dáta a metódy

V štúdiu sú použité časové rady pochádzajúce z viacerých kolokačných staníc v Európe, ktoré kombinujú GNSS merania s gravimetrickými dátami. Pre štúdiu boli vybrané stanice s minimálne štyrmi rokmi súbežných meraní. GNSS riešenia boli spracované pomocou softvéru CNES POD – GINS, pričom boli použité G20 obežné dráhy a údaje o hodinách zo spracovateľského centra CNES-CLS/GRGS. Údaje boli spracované homogénne v referenčnom rámci ITRF2020, čo zabezpečilo konzistentnosť časových radov zo všetkých staníc. Na zvýšenie presnosti sa využil IPPP režim (Integer Precise Point Positioning), ktorý minimalizuje chyby spôsobené vlnovými dĺžkami a umožňuje presné stanovenie polohy s milimetrovou presnosťou.

Časové rady tiažového zrýchlenia boli získané z databázy IGETS, konkrétne produkty úrovne 3, ktoré predstavujú časové rady s krokom 1 minúta po aplikácii geofyzikálnych korekcií, ktoré sú podrobne uvedené v publikáciách [1, 14]. Gravitačné merania boli filtrované low-pass filtrom a decimované na hodinové intervaly a následne priemerované na denné hodnoty pre porovnanie s GNSS dátami.

Na elimináciu vplyvu redistribúcie lokálnych hydrologických hmôt na tiažové zrýchlenie bola aplikovaná lokálna hydrologická korekcia. Korekcia je založená na globálnom modeli MERRA-2 [11], ktorý poskytuje informácie o zmenách pôdnej vlhkosti a snehu na dennej báze. Tento model umožňuje simulovať zmeny v povrchových vodných zásobách a ich vplyv na gravitačné údaje. Na výpočet lokálnych hydrologických korekcií bol použitý prípustný faktor k odhadnutý metódou najmenších štvorcov (LSM), podľa vzťahu:

$$g_{hyd_res} = g_{res} - k g_{loc_hyd}, \quad (2.1)$$

kde:

- g_{res} je časový rad tiažového zrýchlenia úrovne 3 z databázy IGETS,
- g_{loc_hyd} je lokálna časť gravitačného účinku povrchového zaťaženia dostupné z EOST loading service (http://loading.u-strasbg.fr/sg_hydro.php),
- k je prípustný faktor odhadnutý metódou najmenších štvorcov (pre reziduálny časový rad opravený o globálny hydrologický efekt).

Koherencia medzi tiažovými a výškovými časovými radmi bola analyzovaná pomocou Welchovej metódy hustoty výkonového spektra (PSD) vzťahom:

$$C_{xx}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)}, \quad (2.2)$$

kde:

- $P_{xy}(f)$ je krížová hustota výkonového spektra (CPSD) medzi tiažovými a výškovými údajmi,
- P_{xx} and P_{yy} sú PSD pre výškové a gravitačné zmeny.

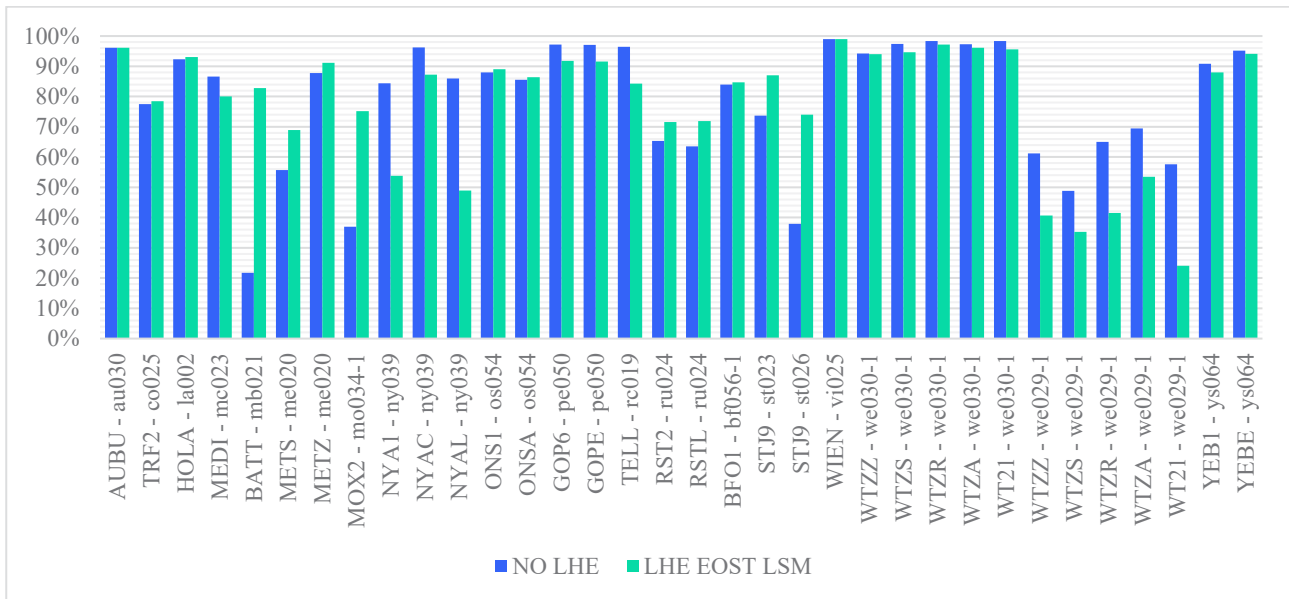
Prenosová funkcia (transfer function) kvantifikuje vzťah medzi zmenami tiažového zrýchlenia a vertikálnymi posunmi. Pomocou prenosovej funkcie je možné určiť, ako sa zmeny v tiažového zrýchlenia transformujú na vertikálne pohyby a naopak. Prenosová funkcia vyjadruje citlivosť vertikálnych posunov na zmeny tiažového zrýchlenia pri rôznych frekvenciách. Prenosová funkcia je daná vzťahom:

$$T_{xx}(f) = \frac{P_{xy}(f)}{P_{xx}(f)}. \quad (2.3)$$

V rámci tejto štúdie sme porovnávali tri datasety: (1) modelované vertikálne posuny z MERRA-2 s modelovaným tiažovým zrýchlením dostupné na EOST loading service, (2) vertikálne posuny z GNSS s meraným tiažovým zrýchlením bez lokálnej hydrologickej korekcie a (3) GNSS vertikálne posuny s meraným tiažovým zrýchlením po aplikácii lokálnej hydrologickej korekcie.

3 Výsledky

Porovnanie koherencie pre ročnú periódu pre všetky analyzované kolokačné stanice v Európe je znázornené na obrázku 1. Tieto výsledky ukazujú, že aplikácia lokálnych hydrologických korekcií výrazne ovplyvňuje koherenciu medzi vertikálnymi posunmi a zmenami tiažového zrýchlenia, a tým poskytuje lepšie pochopenie interakcií medzi povrchovým zaťažením a vertikálnymi pohybmi zemského povrchu. Pre väčšinu analyzovaných kolokačných staníc bolo pozorované zlepšenie koherencie po zohľadnení lokálnych hydrologických korekcií, najmä na ročných periódach, kde sú hydrologické procesy najvýraznejšie.



Obrázok 1 Koherencia v ročnej perióde medzi časovými radmi tiažového zrýchlenia a vertikálnymi posunmi pred (modrá) a po (zelená) lokálnej hydrologickej korekcie

Pre stanicu Membach (Belgicko) (Tabuľka 1) sa koherencia medzi časovými radmi tiažového zrýchlenia a vertikálnych posunov zvýšila o 61 % po aplikácii hydrologickej korekcie. Podobne aj stanica Moxa (Nemecko) (Tabuľka 1) zaznamenala výrazné zvýšenie koherencie o 54 %. Stanice umiestnené v podzemných priestoroch, ako sú Moxa a Schiltach a Membach poskytujú jedinečné výsledky (Obr. 2). Na stanici Schiltach sa pred aplikáciou korekcií zaznamenala kladná hodnota pomeru medzi tiažovými a vertikálnymi zmenami. Po aplikácii hydrologických korekcií však došlo k zmenám tohto pomeru.

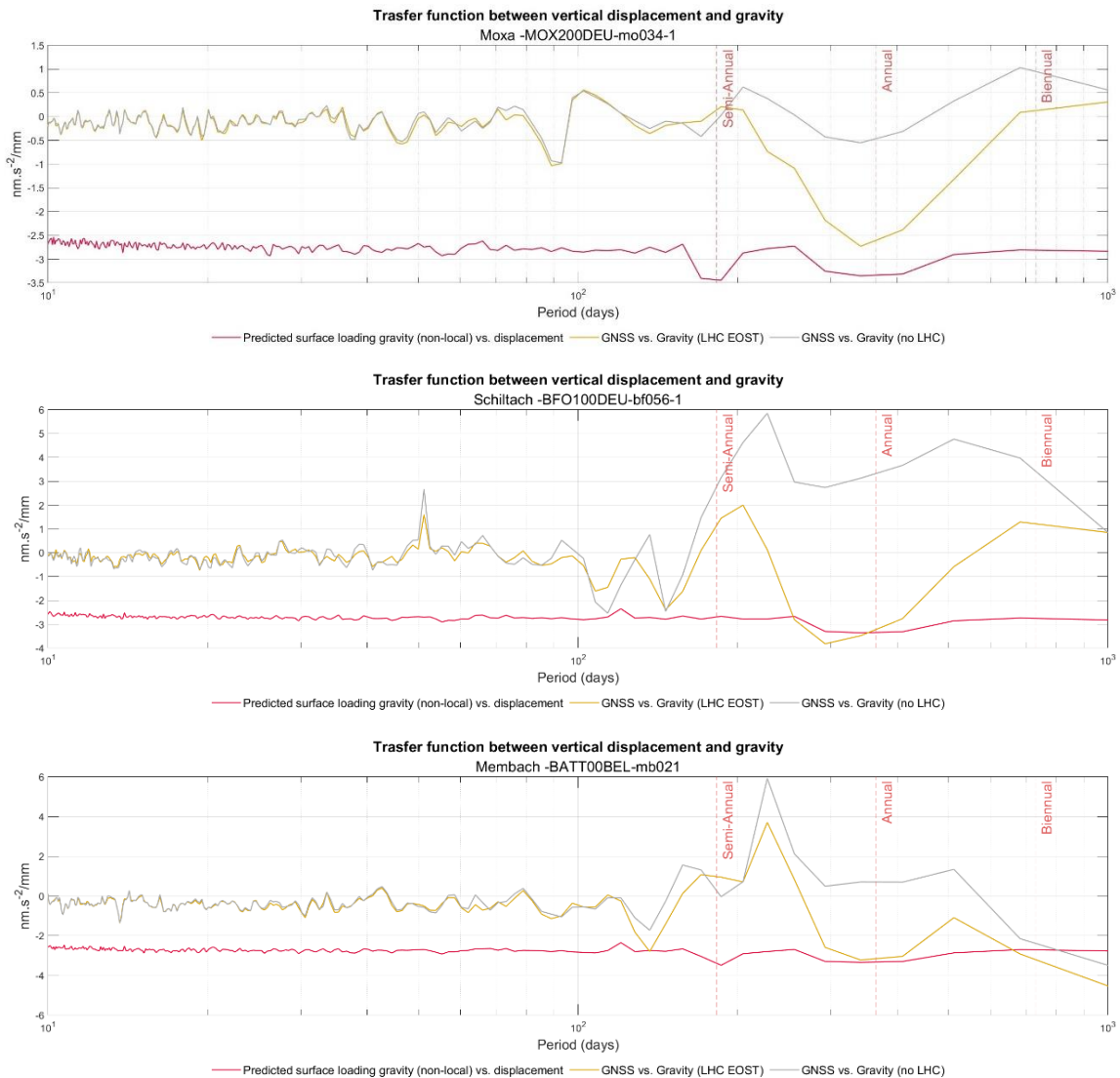
Tabuľka 1 Porovnanie predikovaných hodnôt pomeru tiažového zrýchlenia s meranými hodnotami bez uváženia aj s uvážením lokálnej hydrologickej korekcie pre vybrané stanice IGETS

	MERRA-2 pomer g/u	Coherencia pre ročnú periódu g/u [$nm\ s - 2/mm$]	
		NO LHC	LHC EOST
BATT - mb021	-3.32	0.22 / 0.71	0.83 / -3.15
MOX200 - mo034-1	-3.34	0.37 / -0.48	0.75 / -2.61
BFO1 - bf056-1	-3.34	0.84 / 3.32	0.85 / -3.23

Na staniach Wetzell (Nemecko) a Pecny (Česká republika) (Obr. 2 a 3) však aplikácia hydrologických korekcií priniesla zmiešané výsledky. Na stanici Wetzell sa koherencia medzi vertikálnymi posunmi a tiažovým zrýchlením znížila, čo môže byť spôsobené neštandardným hydrologickým správaním alebo špecifickými geologickými vlastnosťami lokality, ktoré hydrologické modely nedokážu úplne zachytiť. Podobné výsledky boli pozorované aj na stanici Pecny, kde sa zaznamenali vyššie odchýlky medzi meraniami pred a po aplikácii korekcií.

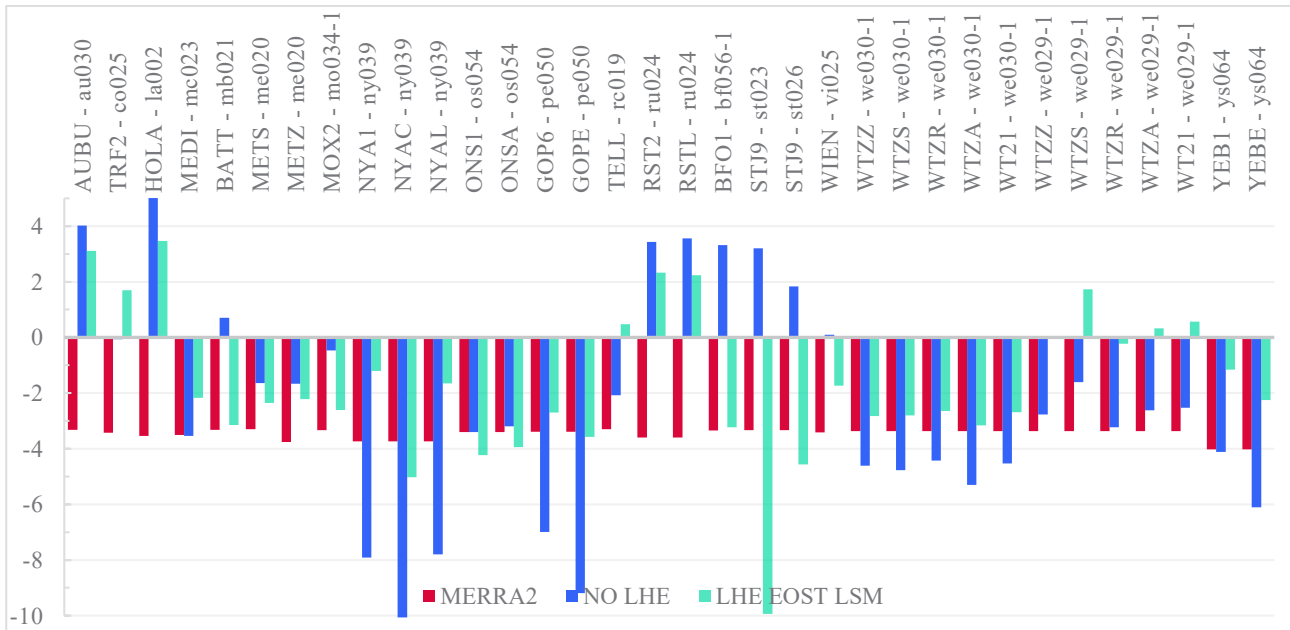
Zaujímavý bol aj prípad stanice Ny-Alesund (Nórsko), kde došlo k poklesu koherencie po aplikácii hydrologických korekcií. Tento pokles môže byť dôsledkom extrémnych klimatických

podmienok v arktických oblastiach, kde je dynamika pôdnej vlhkosti a snehu veľmi odlišná od modelových predpokladov používaných v hydrologických korekciách.



Obrázok 2 Porovnanie prenosovej funkcie medzi tiažovým zrýchlením a vertikálnymi posunmi pred uvážením lokálnej hydrologickej korekcie (sivá), po uvážení korekcie (žltá) a medzi modelovými hodnotami (červená) pre podzemné stanice Moxa, Schiltach a Membach

Výpočet prenosových funkcií (transfer functions) (Obr. 4) tiež potvrdil citlivosť vertikálnych posunov na gravitačné zmeny spôsobené povrchovým zaťažením. Na väčšine staníc sa pozoroval nárast hodnoty prenosovej funkcie po aplikácii hydrologických korekcií pre ročnú periódu v absolútnej hodnote.



Obrázok 3 Prenosová funkcia v ročnej perióde medzi časovými radmi tiažového zrýchlenia a vertikálnymi posunmi pred (modrá) po (zelená) lokálnej hydrologickej korekcie a medzi modelovými hodnotami (červená)

4 Záver

Výsledky štúdie ukazujú, že aplikácia lokálnych hydrologických korekcií výrazne ovplyvňuje koherenciu medzi vertikálnymi posunmi a zmenami tiažového zrýchlenia, a tým poskytuje lepšie pochopenie interakcií medzi povrchovým zaťažením a vertikálnymi pohybmi zemského povrchu. Pre väčšinu analyzovaných kolokačných staníc bolo pozorované zlepšenie koherencie po zohľadnení lokálnych hydrologických korekcií, najmä na ročných periódach, kde sú hydrologické procesy najviac výrazné. Zvýšená koherencia na ročných periódach po aplikácii korekcie podporuje hypotézu, že tieto korekcie sú kľúčové pre správnu interpretáciu dát. Pre niektoré stanice, najmä podzemné, však tieto korekcie prinášajú zmiešané výsledky, čo môže byť dôsledkom komplexnejších podmienok, ako sú podzemné vodné zásoby. Na stanici Membach sa koherencia zvýšila z hodnoty okolo 0,40 na približne 0,75, čo poukazuje na silný vplyv sezónnych zmien pôdnej vlhkosti a snehových zásob na tiažové zrýchlenie.

Literatúra

- [1] BOY, Jean Paul, Jean Pierre BARRIOT, Christoph FÖRSTE, Christian VOIGT a Hartmut WZIONTEK. Achievements of the First 4 Years of the International Geodynamics and Earth Tide Service (IGETS) 2015–2019. In: *International Association of Geodesy Symposia* [online]. B.m.: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020, s. 107–112. ISBN 9783031098567. Dostupné z: doi:10.1007/1345_2020_94
- [2] CROSSLEY, David a Jacques HINDERER. *Global Geodynamics Project-GGP: status report 1994*. 1994
- [3] CROSSLEY, D., J. HINDERER, G. CASULA, O. FRANCIS, H. T. HSU, Y. LMANISHI, G. JENTZSCH, J. KADRIDNEN, J. MERRIAM, B. MEURERS, J. NEUMEYER, B. RICHTER, K. SHIBUYA, T. SATO a T. VAN DAM. Network of superconducting gravimeters benefits a number of disciplines. *Eos* [online]. 1999, **80**(11). ISSN 23249250. Dostupné z: doi:10.1029/99EO00079

- [4] HINDERER, Jacques, U. RICCARDI, S. ROSAT, J.-P. BOY, B. HECTOR, M. CALVO, F. LITTEL a J.-D. BERNARD. A study of the solid earth tides, ocean and atmospheric loadings using an 8-year record (2010–2018) from superconducting gravimeter OSG-060 at Djougou (Benin, West Africa). *Journal of Geodynamics* [online]. 2020, **134**, 101692. ISSN 02643707. Dostupné z: doi:10.1016/j.jog.2019.101692
- [5] CUI, Xiaoming, Heping SUN, Séverine ROSAT, Jianqiao XU, Jianguan ZHOU a Bernard DUCARME. Investigation of the time variability of diurnal tides and resonant FCN period. *Journal of Geodynamics* [online]. 2014, **79**, 30–38. ISSN 02643707. Dostupné z: doi:10.1016/j.jog.2014.05.003
- [6] HARNISCH, Martina a Günter HARNISCH. Polar motion influences in the gravity data recorded by superconducting gravimeters. *Journal of Geodynamics* [online]. 2009, **48**(3–5), 340–347. ISSN 02643707. Dostupné z: doi:10.1016/j.jog.2009.09.015
- [7] XU, J.-Q., H.-P. SUN a X.-F. YANG. A study of gravity variations caused by polar motion using superconducting gravimeter data from the GGP network. *Journal of Geodesy* [online]. 2004, **78**(3), 201–209. ISSN 0949-7714. Dostupné z: doi:10.1007/s00190-004-0386-1
- [8] CARBONE, Daniele, Flavio CANNAVÒ, Filippo GRECO, Richard REINEMAN a Richard J. WARBURTON. The Benefits of Using a Network of Superconducting Gravimeters to Monitor and Study Active Volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [online]. 2019, **124**(4). ISSN 21699356. Dostupné z: doi:10.1029/2018JB017204
- [9] VAN CAMP, Michel, Olivier DE VIRON, Arnaud WATLET, Bruno MEURERS, Olivier FRANCIS a Corentin CAUDRON. *Geophysics From Terrestrial Time-Variable Gravity Measurements* [online]. 2017. ISSN 19449208. Dostupné z: doi:10.1002/2017RG000566
- [10] DE LINAGE, Caroline, Jacques HINDERER a Yves ROGISTER. A search for the ratio between gravity variation and vertical displacement due to a surface load. *Geophysical Journal International* [online]. 2007, **171**(3), 986–994. ISSN 0956540X. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03613.x
- [11] GELARO, Ronald, Will MCCARTY, Max J. SUÁREZ, Ricardo TODLING, Andrea MOLOD, Lawrence TAKACS, Cynthia A. RANGLES, Anton DARMENOV, Michael G. BOSILOVICH, Rolf REICHLE, Krzysztof WARGAN, Lawrence COY, Richard CULLATHER, Clara DRAPER, Santha AKELLA, Virginie BUCHARD, Austin CONATY, Arlindo M. DA SILVA, Wei GU, Gi Kong KIM, Randal KOSTER, Robert LUCCHESI, Dagmar MERKOVA, Jon Eric NIELSEN, Gary PARTYKA, Steven PAWSON, William PUTMAN, Michele RIENECKER, Siegfried D. SCHUBERT, Meta SIENKIEWICZ a Bin ZHAO. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate* [online]. 2017, **30**(14), 5419–5454. ISSN 08948755. Dostupné z: doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1
- [12] LINAGE, Caroline, Jacques HINDERER a Jean Paul BOY. Variability of the gravity-to-height ratio due to surface loads. *Pure and Applied Geophysics* [online]. 2009, **166**(8–9), 1217–1245. ISSN 00334553. Dostupné z: doi:10.1007/s00024-004-0506-0
- [13] ROSAT, Severine, Jean-Paul BOY, Janusz BOGUSZ a Anna KLOS. Inter-Comparison of Ground Gravity and Vertical Height Measurements at Collocated IGETS Stations. In: [online]. 2020. Dostupné z: doi:10.1007/1345_2020_117
- [14] BOY, Jean-Paul. *Description of the Level 2 and Level 3 IGETS data produced by EOST* [online]. 2019. Dostupné z: <http://igets.u->

LANDSCAPING

Barbora Považanová¹
Krajinárstvo, 4. ročník

VYUŽITIE MODELOV STROJOVÉHO UČENIA PRI URČOVANÍ VODNEJ HODNOTY SNEHOVEJ POKRÝVKY

THE USE OF MACHINE LEARNING MODELS IN ESTIMATING SNOW WATER EQUIVALENT

Abstract: This study evaluates the effectiveness of machine learning algorithms in calculating snow water equivalent (SWE) compared to the traditional degree-day method. Machine learning techniques, including LASSO, Random Forest, Support Vector Machines (SVM), and CatBoost, were applied, with their performance assessed against the conventional degree-day approach for SWE estimation. The analysis, conducted using a case study from the mountainous region of Slovakia, reveals that machine learning models, particularly CatBoost, provide more accurate SWE predictions than the degree-day method. Additionally, the degree-day method was refined through the use of genetic algorithms, improving its accuracy. The findings contribute to enhancing snow hydrology modeling and optimizing SWE predictions, aiding decision-making in snow-dominated regions.

Kľúčové slová: vodný ekvivalent snehovej pokrývky; degree-day method; strojové učenie; SWE

1. Úvod

Snehová pokrývka je kľúčovým aspektom hydrologického cyklu [1]. Voda obsiahnutá v snehovej pokrývke je dôležitou súčasťou svetových zásob vody [2]. Je kľúčovou súčasťou ekosystému Zeme a jedná sa o veľmi citlivý ukazovateľ zmeny klímy. Na výpočet množstva vody v snehovej pokrývke sa používajú rôzne premenné a metódy. Tento článok pojednáva o vodnej hodnote snehovej pokrývky (snow water equivalent - SWE), ktorá predstavuje množstvo vody obsiahnutej v snehu. Zvyčajne sa meria v centimetroch vodného stĺpca a môže sa vypočítať ako súčin výšky a hustoty snehu. Odhad vodnej hodnoty snehovej pokrývky je dôležitý v hydrologickom modelovaní, najmä v oblastiach, kde topenie snehu významne ovplyvňuje povrchový odtok [3]. Poznanie tejto hodnoty je nevyhnutné napríklad pri hodnotení povodňového rizika, manažmente vodných zdrojov alebo vodohospodárskom návrhu vodných stavieb [4].

Množstvo vody v snehovej pokrývke sa dá určiť pomocou dvoch hlavných metód. Metóda energetickej bilancie zahŕňa analýzu pomeru prichádzajúcej a odchádzajúcej energie na odhad miery topenia snehu. Táto metóda vyžaduje podrobné údaje o tokoch energie, ako je slnečné žiarenie, vyžarovanie zemského povrchu a latentné teplo. Hoci táto metóda podrobne opisuje proces topenia snehu, vyžaduje veľké množstvo údajov a vo všeobecnosti sa preto využíva iba v teoretickom výskume. Kvôli horšej dostupnosti dát v mnohých oblastiach na svete sa preto väčšinou uprednostňuje teplotná metóda výpočtu SWE, tzv. degree-day method, ktorej vstupnými údajmi sú len denné teploty vzduchu a zrážkové úhrny.

Teplotná metóda je rozšírená kvôli jej efektívnosti, najmä vo veľkých povodiach alebo regiónoch s

¹ Barbora Považanová, Ing., Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, Bratislava 81106

obmedzenou dostupnosťou údajov [5]. Nevýhodou tejto metódy je však jej nižšia presnosť najmä v heterogénnom teréne, nakoľko zachytenie komplexnej dynamiky hromadenia a topenia snehu len prostredníctvom teploty a zrážok je v takýchto podmienkach zložité a výsledky sú nespoľahlivé.

Integrácia techník strojového učenia (ML) do modelovania SWE sa ukazuje ako sľubný kompromis medzi detailnosťou a veľkým množstvom potrebných údajov energetickej bilančnej metódy a jednoduchosťou, ale potenciálne nižšou presnosťou teplotnej (degree-day) metódy. Algoritmy ML dokážu identifikovať zložité vzorce v údajoch, čím môžu zvýšiť presnosť tradičných výpočtových metód. Strojové učenie je známe svojou schopnosťou zachytiť zložité nelineárne vzťahy v rámci údajov, čo z neho robí široko uplatniteľný nástroj v hydrológii, ale aj v iných odvetviach [6].

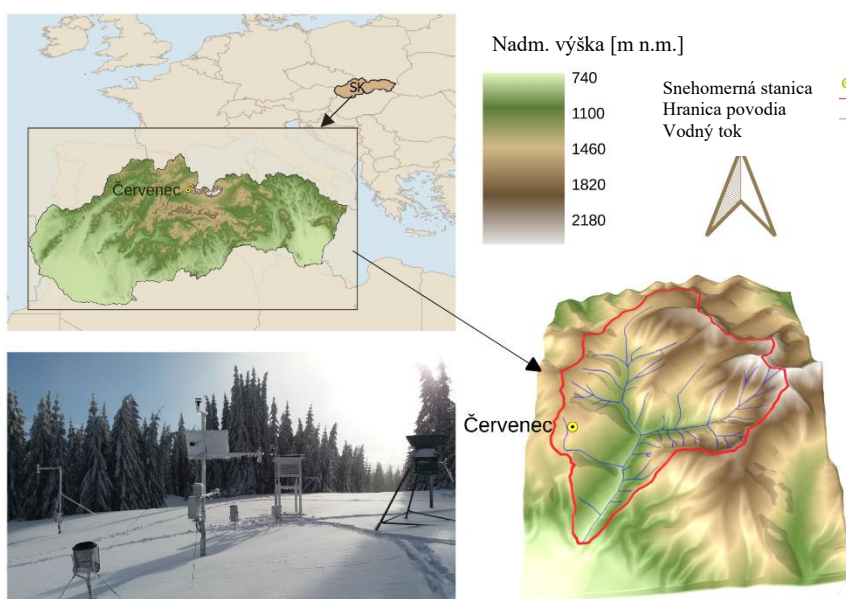
Súčasná poznatky o využívaní strojového učenia pre výpočet množstva vody v snehovej pokrývke sú uvedené v článkoch [7-12].

Cieľom tohto článku je vyhodnotiť viacero metód strojového učenia pre výpočet SWE a určiť, ktorá metóda predstavuje najlepší kompromis medzi množstvom vstupných údajov, jednoduchosťou použitia a presnosťou výsledkov.

Výsledné modely možno použiť na rôzne účely – na doplnenie chýbajúcich údajov, v prípade zlyhania prístrojov, na ťažko dostupných miestach, na doplnenie občasných meraní alebo na rozšírenie údajov o namerané budúce alebo minulé obdobia. V tejto práci sa autori zamerali najmä na doplnenie chýbajúcich údajov obsahu vody v snehovej pokrývke.

2. Zaujímavé územie

Metódy uvedené v tejto práci boli testované na lokalite Červenec, ktorá sa nachádza v nadmorskej výške 1500 m n.m. v horskej kotline Jaloveckého potoka v Západných Tatrách (Obrázok 1). Povodie Jaloveckého potoka je experimentálnym povodiím Ústavu hydrológie SAV a má rozlohu 45 km². Siahá od Západných Tatier po Liptovskú kotlinu s nadmorskou výškou od 821 m n.m. pri obci Jalovec do 2178 m n.m. pri vrchu Baníkov. Priemerný sklon kotliny je 30°.

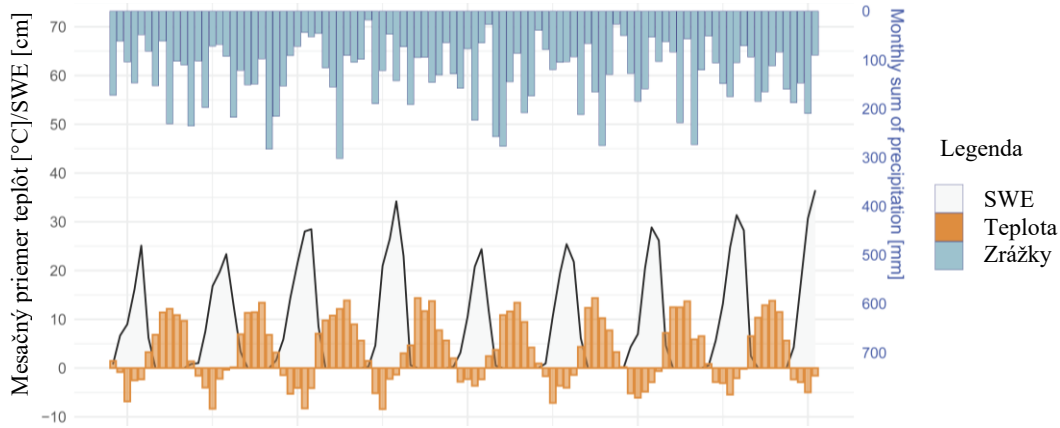


Obrázok 1 Poloha záujmového územia

Povodie sa vyznačuje rôznorodým vegetačným pokryvom: 44 % pokrývajú lesy s prevahou smreka, 31 % kosodrevina a vysokohorské lúky a 25 % skalnaté oblasti bez vegetácie.

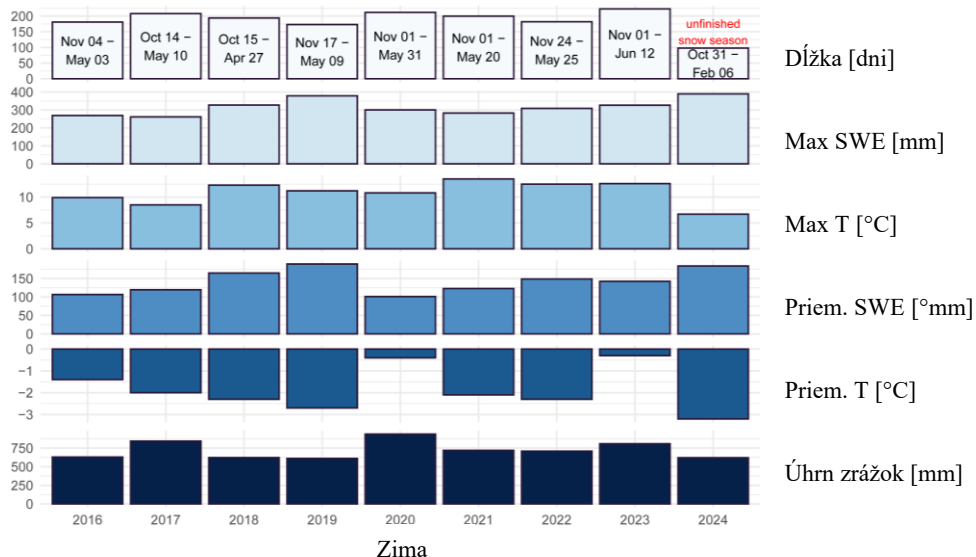
Údaje o zrážkach a teplote vzduchu sa na stanici Červenec zaznamenávajú od roku 1988, výsledkom

čoho je 30-ročný nepretržitý rad údajov. Priemerný ročný úhrn zrážok je 1450 mm, pričom ročné maximá boli zaznamenané v rokoch 2003 (1086 mm) a 2010 (1984 mm). Priemerná ročná teplota vzduchu v sledovanom období bola 3,0 °C, 8,7 °C v teplej polovici roka (apríl až september) a -2,8 °C v studenej polovici (október až marec). Priebeh stredných mesačných teplôt je znázornený na Obrázok 2.



Obrázok 2 Mesačné hodnoty klimatických premenných v skúmanom období (2016-2024)

Údaje na výpočet obsahu vody snehovej pokrývky (SWE) boli zhromaždené z automatických meraní snehu od roku 2016 do roku 2024 vykonávaných pomocou prístroja Sommer SSG-2 s plochou sedem panelov $80 \times 120 \text{ cm} = 6,72 \text{ m}^2$ a presnosťou 0,3 %. Snahou autorov v tejto práci bolo vytvorenie modelov strojového učenia, schopných doplniť chýbajúce údaje SWE (resp. celé obdobia, napr. pred inštaláciou meracích zariadení alebo budúce obdobia). Obdobia s výskytom snehu (snow seasons) použité v tomto článku sú znázornené na Obrázok 3.



Obrázok 3 Charakteristika zimných období skúmaných v tejto práci.

Dostupné údaje zozbierané z konzistentných meraní boli usporiadané do tabuľky. Podľa štandardnej praxe odporúčanej v literatúre boli dáta rozdelené do tréningového súboru a testovacieho súboru v pomere približne 2:1. Tréningový súbor pokrýval obdobie od zimy 2016 do roku 2021 a pozostával z 1174 riadkov údajov. Stĺpce tabuľky predstavovali dátum, zrážky, teplotu a nameraný SWE. Testovací súbor zahŕňal zimné obdobia od roku 2022 do roku 2024 a obsahoval 506 riadkov údajov.

Modely pre predikciu SWE boli vyvinuté pomocou tréningových údajov a ich výkonnosť bola hodnotená pomocou testovacích údajov.

3. Metódy

Teplotná metóda (Degree day - DD) [13] sa používa na odhad vodnej hodnoty snehu (SWE). Využíva sa na výpočet akumulácie a topenia snehu na základe denných údajov o teplote vzduchu a zrážok. Metóda DD je založená na princípe, že akumulácia snehu nastáva, keď je teplota vzduchu pod určitým prahom (T_{ra}), a topenie snehu nastáva, keď teplota prekročí iný prah T_{rm} . Prechodová tolerancia T_r sa používa na vyhodnotenie podmienok, za ktorých sa sneh čiastočne hromadí a čiastočne topí.

Hromadenie snehu: Keď je teplota vzduchu (T_{air}) pod stanoveným prahom ($T_{ra} - T_r$), všetky zrážky (P) spadnú ako sneh. Ak je teplota medzi ($T_{ra} - T_r$) a ($T_{ra} + T_r$), časť zrážok spadne ako sneh. Ak teplota prekročí ($T_{ra} + T_r$), sneh sa nehromadí, ale topí.

Výpočet topenia snehu: Keď teplota vzduchu prekročí hraničnú teplotu začiatku topenia snehu (T_{rm}), dochádza k topeniu snehu rýchlosťou úmernou teplotnému rozdielu ($T_{air} - T_{rm}$). Koeficient topenia (degree-day factor - DDF) je konštanta, ktorou je tento rozdiel pre násobený pre získanie hodnoty množstva roztopeného snehu (M). Ak sú teploty merané v dennom kroku (24h), počíta sa množstvo rozpusteného snehu podľa vzorca (1). V tomto článku autori uvažovali so samostatnou hodnotou koeficientu topenia pre každý mesiac.

$$M = DDF * (T_{air} - T_{rm}) * (\Delta t / 24) \quad (1)$$

M je množstvo roztopeného snehu [mm],
DDF je koeficient topenia snehu (degree-day coefficient),
 T_{air} je priemerná denná teplota vzduchu [$^{\circ}C$],
 T_{rm} je hraničná teplota začiatku topenia snehu [$^{\circ}C$].

Koeficienty topenia snehu DDF sú pri teplotnej metóde rozhodujúce a boli optimalizované nasledujúcim spôsobom. Súbor údajov (Dátum, T_{air} – priemerná denná teplota vzduchu, P – denný úhrn zrážok, SWE_{mer} - merané hodnoty obsahu vody v snehovej pokrývke) bol rozdelený na tréningové a testovacie súbory. Tréningové údaje sa použili na optimalizáciu DDF každého mesiaca pomocou genetického algoritmu (GA). GA hľadá optimálny súbor DDF minimalizáciou strednej kvadratickej chyby (root mean square error - RMSE) medzi pozorovanými (meranými) a simulovanými hodnotami SWE na tréningových údajoch. Do tohto výpočtu vstupovali mesačné hodnoty SWE. Pre aplikáciu GA bol použitý balík R `rgenoud` [14].

Optimalizácia začína definovaním rozsahu možných hodnôt DDF. Tieto sú medzi 0 a 8. GA potom vyberie náhodnú počiatočnú populáciu v tomto rozsahu (súbor chromozómov). Vhodnosť každého prvku (chromozómu) sa hodnotí pomocou RMSE medzi pozorovaným (meraným) a simulovaným SWE. GA iteratívne vyvíja populáciu výberom najvýkonnejších jedincov (chromozómov) a na vytváranie nových riešení používa genetické operátory, ako je crossover alebo mutácia. Tento proces pokračuje, kým sa zlepšovanie nezastaví, čo naznačuje najlepšie možné hodnoty DDF.

Keď boli identifikované optimálne DDF, boli aplikované na testovacie údaje na simuláciu SWE. Funkcia v R používa denné teploty a zrážky ako vstupy a optimalizované mesačné DDF na výpočet SWE. Výkonnosť modelu bola hodnotená porovnaním simulovaného SWE s pozorovanými (meranými) hodnotami SWE pomocou rôznych štatistických premenných.

3.1. Metódy strojového učenia

V článku bolo použitých niekoľko metód strojového učenia na odhad SWE: jednoduchá lineárna regresia, regularizovaná lineárna regresia (LASSO), Random forest, metóda podporných vektorov (Support vector machine – SVM) a CatBoost. Tieto metódy boli zvolené tak, aby reprezentovali rôzne triedy algoritmov strojového učenia. Cieľom článku bolo ukázať, či je pre výpočet SWE nutné použiť pokročilejšie techniky alebo či postačujú jednoduchšie metódy, ako je lineárna regresia.

Detailné matematické vysvetlenia algoritmov strojového učenia sú v nasledujúcom popise vynechané, nakoľko ich možno nájsť v citovanej literatúre. Namiesto toho sú v nasledujúcom texte stručne uvádzané hlavné črty používaných metód strojového učenia.

Viacnásobná lineárna regresia (multiple linear regression - MLR) rieši lineárny vzťah medzi nezávislými a závislými premennými. MLR je najjednoduchšou metódou v tomto článku a slúži pre porovnanie s inými, robustnejšími a komplexnejšími metódami. MLR je definovaná takto:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_p \cdot X_p + \varepsilon \quad (2)$$

,kde

Y je závislá premenná,

X_1, X_2, \dots, X_p sú nezávislé premenné,

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ sú neznáme parametre (koeficienty) vyjadrujúce priesečník regresnej priamky s osou y (intercept) a sklon (slope).

ε je chybový člen, náhodná premenná s nulovou strednou hodnotou, štandardnou odchýlkou σ a je nezávislá od X.

LASSO regresia (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator): je regularizačná metóda, ktorá pomáha predchádzať nadmernému „zahlteniu“ modelov tým, že znižuje koeficienty menej dôležitých premenných smerom k nule [15]. Okrem použitia predchádzajúcej rovnice viacnásobnej lineárnej regresie zavádza penaltu:

$$\sum |\beta_i| \leq \lambda \quad (3)$$

kde λ je parameter riadiaci mieru zmrštenia jednotlivých nezávislých premenných podľa toho, do akej miery sú schopné vylepšiť výsledný model.

Metóda podporných vektorov (SVM): SVM rieši úlohy nelineárnej regresie pomocou kernelovej funkcie [16]. Medzi najčastejšie používané kernelové funkcie patria: lineárny alebo polynomiálny kernel, prípadne RBF (Radial basis function). V tejto práci bola použitá RBF. Metóda SVM zahŕňa mapovanie údajov do priestoru vyššej dimenzie, čo vytvára lineárny problém, ktorý je ľahšie riešiteľný. SVM potom efektívne zachytáva zložité vzťahy, ktoré nie sú zjavné v pôvodnom priestore nižšej dimenzie. Cieľom SVM je nájsť v priestore optimálnu deliacu rovinu (hyperrovinu), ktorá maximálne oddeľuje jednotlivé nájdené triedy dát. Hľadaná je taká rovina (alebo čiara v prípade dvojrozmerného priestoru), ktorá má najväčšie rozpätie (margin) medzi dvoma triedami.

Random Forest (RF): RF je ansámblový model regresných stromov (kombinuje viacero slabších modelov – stromov) [17]. Kombinuje viacero rozhodovacích stromov paralelne aby na základe nich vytvoril robustnejší model. Základnou črtou RF je bootstrap sampling, tiež známy ako bagging. Bagging je technika, ktorá spočíva vo vytváraní viacerých vzoriek dát (s opakovaním) z pôvodnej množiny a trénovaní modelu na každej z týchto vzoriek. Bagging znižuje riziko pretrénovania a zvyšuje robustnosť modelu. Výsledkom je, že stromy v lese nie sú identické a nie všetky robia rovnaké chyby.

CatBoost: CatBoost (Categorical Boosting) je algoritmus založený na princípe gradientového boostingu na rozhodovacích stromoch pre numerické a kategorické údaje [18]. Konštruuje súbor sekvenčných rozhodovacích stromov, čo je stratégia odlišná od bootstrap samplingu v RF. Každý nový strom má za cieľ opraviť chyby predchádzajúcej verzie modelu (t. j. minimalizovať rozdiely medzi skutočnými a simulovanými hodnotami) a opakovane model takýmto spôsobom spresňuje. CatBoost zahŕňa niekoľko sofistikovaných stratégií na minimalizáciu pretrénovania modelov, ako napríklad ordered boosting, regularizáciu a randomizáciu pri výbere atribútov a dát. Pozoruhodnou vlastnosťou CatBoost je jeho účinnosť a jednoduchosť použitia. Algoritmus má dobre optimalizované implicitné parametre, vďaka čomu je dostupný aj pre používateľov bez hlbších znalostí ladenia modelov strojového učenia.

Hodnotenie teplotnej metódy (degree-day)

Teplotná metóda je v tejto práci použitá ako základná na porovnanie s inými metódami. V tejto práci autori optimalizovali koeficient topenia snehu (DDF), kľúčový parameter tejto metódy, s využitím genetického algoritmu (GA). Optimalizácia zahŕňala výber vhodného GA, definovanie chromozómu (ktorý obsahuje parametre na optimalizáciu) a naprogramovanie fitness funkcie na vyhodnotenie každého možného riešenia zakódovaného v chromozóme. Autori zvolili algoritmus Genoud [14]. Chromozóm GA obsahuje koeficient topenia snehu pre každý mesiac a tri konštanty: hraničnú teplotu pre začiatok topenia snehu (T_{rm}) hraničnú teplotu pre akumuláciu snehu (T_{ra}) a prechodový interval T_r . Okrem časových radov teplôt a zrážok, ktoré sú potrebné počas tréningového obdobia, proces optimalizácie vyžaduje aj namerané hodnoty SWE na výpočet hodnoty fitness funkcie pre každý chromozóm, konkrétne RMSE. Cieľom GA je nájsť chromozóm, ktorý má najlepšiu hodnotu fitness funkcie.

Výsledky teplotnej metódy (degree-day) sú $RMSE = 79,46$, $PBIAS = 27,2 \%$, $NSE = 0,57$ a $R2 = 0,8$ (Tabuľka 1). Cieľom tejto práce je zlepšiť hodnoty týchto štatistických ukazovateľov použitím metód strojového učenia. Menšie hodnoty NSE a vysoké RMSE a PBIAS naznačujú relatívne slabšie výsledky. Pre porovnanie sú tieto výsledky v Tabuľka 1 spolu s výsledkami navrhovaných metód ML.

4. Záver

Tento článok demonštruje výhody používania algoritmov strojového učenia (ML) oproti tradičným metódam výpočtu obsahu vody v snehovej pokrývke (SWE) v horských oblastiach. Vyzdvihuje potenciál techník ML na zvýšenie presnosti výpočtu SWE. V článku bolo dokázané, že modely strojového učenia, najmä CatBoost, výrazne prekonal tradičnú teplotnú metódu pokiaľ ide o predikčnú presnosť a spoľahlivosť.

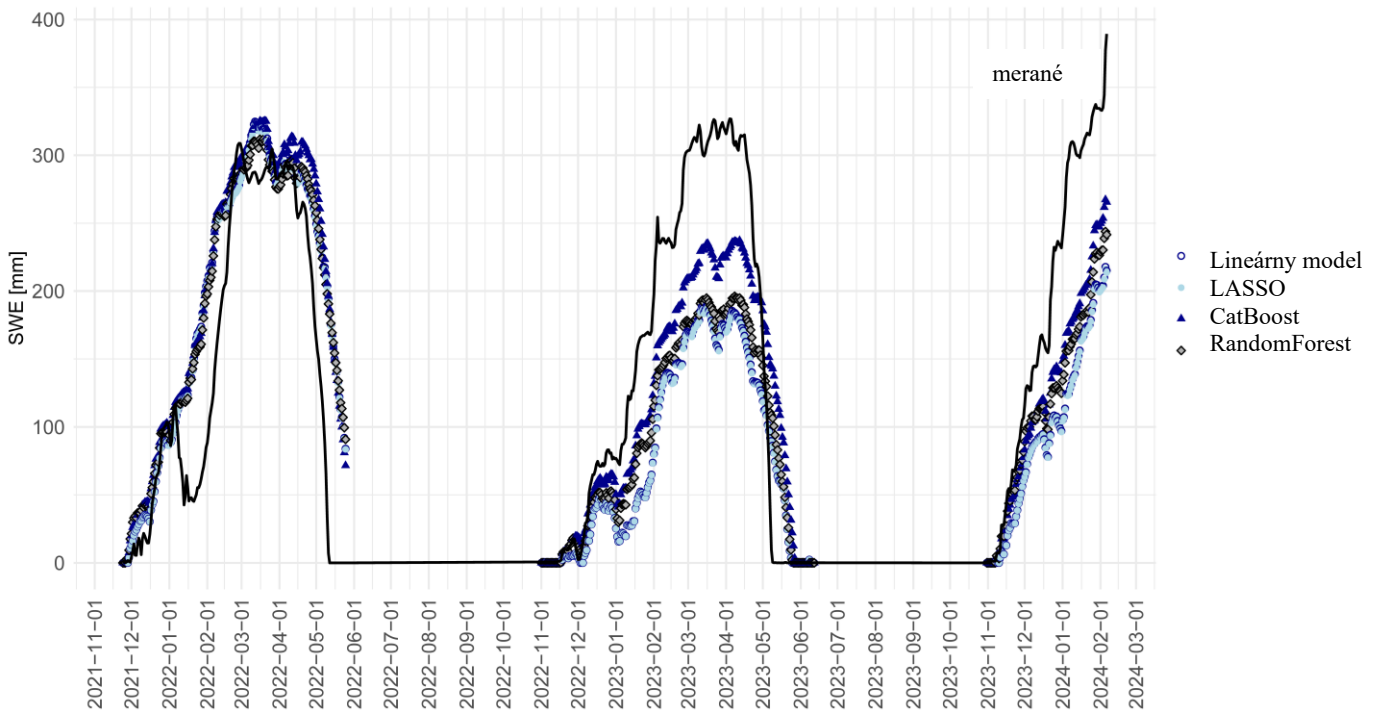
Úspešná aplikácia algoritmov ML pri výpočte SWE v tomto článku demonštruje potenciál využitia týchto modelov v hydrologickom modelovaní a manažmente vodných zdrojov v regiónoch s výskytom snehu. Využitím pokročilých výpočtových techník je možné zvýšiť presnosť predpovedí SWE, čo umožní lepšie rozhodovanie pri manažmente vodných zdrojov, hodnotení povodňových rizík a správe ekosystémov.

Tabuľka 1 Vyhodnotenie výpočtu SWE teplotnou metódou (degree-day) a metódami strojového učenia.

Statistic	Degree	MLR	LASSO	CatBoost	Random
-----------	--------	-----	-------	----------	--------

	Day	Forest			
ME	41.64	-29.34	-30.08	-6.10	-19.75
RMSE	79.46	85.79	86.02	67.67	75.92
PBIAS %	27.20	-19.20	-19.70	-4.00	-12.90
NSE	0.57	0.49	0.49	0.69	0.60
R ²	0.80	0.56	0.56	0.69	0.63

Na výpočet SWE boli použité modely ML opísané v predchádzajúcej časti článku. Vstupmi do týchto modelov boli zrážky a teploty a závislou premennou bol následne vypočítané denné hodnoty SWE. Na Obrázok 4 a v Tabuľka 1 je vyhodnotenie a porovnanie výsledkov výpočtu SWE pomocou štyroch modelov strojového učenia a teplotnej metódy (degree-day). Iba jeden (CatBoost) dosiahol lepšie výsledky ako denná metóda. Ďalším krokom pre zlepšenie výsledkov môže byť použitie odvodených premenných (features) pri výpočte, s využitím princípov feature engineering.



Obrázok 4 SWE vypočítané pomocou strojového učenia

Pod'akovanie

Článok vznikol s podporou projektu VEGA 1/0067/23.

Literatúra

- [1] MA, Y., Y. HUANG, X. CHEN, Y. LI a A. BAO. 2013. Modelling Snowmelt Runoff under Climate Change Scenarios in an Ungauged Mountainous Watershed, Northwest China. *Mathematical Problems in Engineering* [online]. 2013: 1-9 [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.1155/2013/808565. ISSN 1024-123X. Dostupné na: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/808565/>
- [2] BROWN, R. D. a P. W. MOTE. 2009. The Response of Northern Hemisphere Snow Cover to a Changing Climate. *Journal of Climate* [online]. 22(8): 2124-2145 [cit. 2024-6-21]. DOI: 10.1175/2008JCLI2665.1. ISSN 1520-0442. Dostupné na: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2008JCLI2665.1>
- [3] DEWALLE, D. R. a A. RANGO. 2008. *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press. ISBN 1139471600.
- [4] BUTT, M. J. a M. BILAL. 2011. Application of snowmelt runoff model for water resource management. *Hydrological Processes* [online]. 25(24): 3735-3747 [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.1002/hyp.8099. ISSN 0885-6087. Dostupné na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.8099>
- [5] ZHANG, Y., S. LIU a Y. DING. 2006. Observed degree-day factors and their spatial variation on glaciers in western China. *Annals of Glaciology* [online]. 43: 301-306 [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.3189/172756406781811952. ISSN 0260-3055. Dostupné na: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0260305500262113/type/journal_article
- [6] DAWSON, C. W. a R. L. WILBY. 2001. Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* [online]. 25(1): 80-108 [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.1177/030913330102500104. ISSN 0309-1333. Dostupné na: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913330102500104>
- [7] WANG, G., X. HAO, X. YAO, J. WANG, H. LI, R. CHEN a Z. LIU. 2023. Simulations of Snowmelt Runoff in a High-Altitude Mountainous Area Based on Big Data and Machine Learning Models: Taking the Xiyang River Basin as an Example. *Remote Sensing* [online]. 15(4) [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.3390/rs15041118. ISSN 2072-4292. Dostupné na: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/4/1118>
- [8] ZHANG, J., V. A. POHJOLA, R. PETTERSSON, B. NORELL, W.-D. MARCHAND, I. CLEMENZI a D. GUSTAFSSON. 2021. Improving the snowpack monitoring in the mountainous areas of Sweden from space: a machine learning approach. *Environmental Research Letters* [online]. 16(8) [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.1088/1748-9326/abfe8d. ISSN 1748-9326. Dostupné na: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abfe8d>
- [9] VAFAKHAH, M., A. NASIRI KHAIVI, S. JANIZADEH a H. GANJKHANLO. 2022. Evaluating different machine learning algorithms for snow water equivalent prediction. *Earth Science Informatics* [online]. 15(4): 2431-2445 [cit. 2024-6-21]. DOI: 10.1007/s12145-022-00846-z. ISSN 1865-0473. Dostupné na: <https://link.springer.com/10.1007/s12145-022-00846-z>
- [10] THAPA, K. K., B. SINGH, S. SAVALKAR, A. FERN, K. RAJAGOPALAN a A. KALYANARAMAN. 2024. Attention-Based Models for Snow-Water Equivalent Prediction. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* [online]. 38(21): 22969-22975 [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.1609/aaai.v38i21.30337. ISSN 2374-3468. Dostupné na: <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/30337>
- [11] DE GREGORIO, L., D. GÜNTHER, M. CALLEGARI, U. STRASSER, M. ZEBISCH, L. BRUZZONE a C. NOTARNICOLA. 2019. Improving SWE Estimation by Fusion of Snow Models with Topographic and Remotely Sensed Data. *Remote Sensing* [online]. 11(17) [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.3390/rs11172033. ISSN 2072-4292. Dostupné na: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/17/2033>

- [12] HSU, F., Z. SUN, G. PRATHIN a S. ACHAN. 2024. A Review of Machine Learning in Snow Water Equivalent Monitoring [online]. EarthArXiv [cit. 2024-10-13]. DOI: <https://doi.org/10.31223/X57391>.
- [13] HOCK, R. 2003. Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology* [online]. 282(1-4): 104-115 [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00257-9. ISSN 00221694. Dostupné na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169403002579>
- [14] MEBANE, W. R. a J. S. SEKHON. 2011. Genetic Optimization Using Derivatives: The rgenoud Package for R. *Journal of Statistical Software* [online]. 42(11): 1-26 [cit. 2022-6-22]. DOI: 10.18637/jss.v042.i11. ISSN 1548-7660. Dostupné na: <http://www.jstatsoft.org/v42/i11/>
- [15] FRIEDMAN, J., T. HASTIE, R. TIBSHIRANI, B. NARASIMHAN, K. TAY, N. SIMON, J. QIAN a J. YANG. 2023. Glmnet: Lasso and elastic-net regularized generalized linear models: Lasso and elastic-net regularized generalized linear models. *Astrophysics Source Code Library*. : ascl-2308.
- [16] AWAD, M., R. KHANNA, M. AWAD a R. KHANNA. 2015. Support Vector Regression. In: *Efficient Learning Machines* [online]. Berkeley, CA: Apress, s. 67-80 [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.1007/978-1-4302-5990-9_4. ISBN 978-1-4302-5989-3. Dostupné na: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4302-5990-9_4
- [17] BREIMAN, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning* [online]. 45(1): 5-32 [cit. 2024-6-19]. DOI: 10.1023/A:1010933404324. ISSN 08856125. Dostupné na: <http://link.springer.com/10.1023/A:1010933404324>
- [18] DOROGUSH, A. V., V. ERSHOV a A. GULIN. 2018. CatBoost: gradient boosting with categorical features support: gradient boosting with categorical features support. *ArXiv preprint* [online]. [cit. 2024-10-13]. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.11363>.

Miriám Zaťovičová¹

Študijný program: Krajinárstvo, III. Ročník

VPLYV ORIENTÁCIE ULÍC NA POVRCHOVÉ TEPLoty AKO INDIKÁTOR MESTSKÝCH TEPELNÝCH OSTROVOV

THE IMPACT OF STREET ORIENTATION ON SURFACE TEMPERATURES AS AN INDICATOR OF URBAN HEAT ISLANDS

Abstract

Given the unlikely reduction in global temperatures, strategies to help populations adapt are essential. Vegetation can mitigate extreme urban temperatures, but understanding local conditions is crucial for effective solutions. This research focuses on the streets of Old Town Bratislava, Slovakia, using thermographic measurements to identify overheated areas. We studied local characteristics of wide streets in various directions for typical urban materials like asphalt, paving, and facades. Our findings highlight street traits that need adaptation measures, such as tree planting. The field measurements show that the overheating is significantly influenced by the street orientation and geometry and the temperature differences on each side of the street are substantial. Therefore, these insights can guide European cities in optimizing green infrastructure, avoiding resource misallocation, and improving local microclimate.

Kľúčové slová

Zelená infraštruktúra, klimatická zmena, mestské tepelné ostrovy, prehrievanie miest

1. Úvod

Klimatická zmena je čoraz naliehavším problémom, ktorý si vyžaduje nielen snahu o znižovanie globálnej teploty, ale aj konkrétne adaptačné opatrenia pre mestské prostredie. Predpokladá sa, že nedôjde k dostatočnému zníženiu teploty, preto je nevyhnutné vytvárať stratégie, ktoré pomôžu ľuďom prispôbiť sa novým podmienkam. S rastúcou urbanizáciou sa v mestách znižuje množstvo zelene a vodných plôch. Tie však predstavujú dôležité faktory pre ochladzovanie a čistenie vzduchu [1]. Rozsiahle spevnené povrchy bez vegetácie, ako sú cesty, parkoviská a budovy, zadržiavajú slnečné žiarenie a spôsobujú zvýšenie teploty oproti okolitému prostrediu [2]. Tento jav, známy ako mestský tepelný ostrov (urban heat island - UHI), postihuje takmer 40 % európskych krajín, kde je väčšina populácie vystavená vysokým teplotám [3].

Nárast teploty v mestách sa pripisuje z 90 % vlastnostiam stavebných materiálov [4], ktoré sa líšia od prírodných materiálov vo svojich optických, tepelných, vodivých a hydrologických vlastnostiach [5]. Stavebné materiály absorbujú veľké množstvo slnečného žiarenia, ktoré sa počas dňa hromadí a následne sa v noci uvoľňuje do okolia ako citeľné teplo. Tento mechanizmus prispieva k celkovému otepleniu mestského prostredia, čo zvyšuje tepelný diskomfort pre obyvateľov [2].

Medzi najčastejšie odporúčané opatrenia na zníženie UHI patrí modro-zelená infraštruktúra,

¹ Miriám Zaťovičová, Ing.

Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

použitie priepustných materiálov a inštalácia vodných prvkov [6]. Vlastnosti budov môžu ovplyvniť teplotu rôznymi spôsobmi – odrážaním žiarenia do okolia môžu zvýšiť pocitovú teplotu, ale zároveň poskytujú tieň, ktorý môže pomôcť znižovať teplotu. Kľúčové je aj správne využitie geometrie a orientácie budov na reguláciu mestského tepelného systému a prúdenia vzduchu [7]. Výskumy zamerané na znižovanie UHI sa sústredia najmä na využitie zelenej infraštruktúry, ktorá poskytuje tieň a znižuje teplotu pomocou transpirácie. Správne navrhnuté zelené plochy dokážu ochladiť mestské prostredie [8]. Nesprávne umiestnenie vegetácie však môže brániť prúdeniu vzduchu a paradoxne zvýšiť teplotu [6].

Geometria a orientácia budov zohrávajú kľúčovú úlohu pri formovaní mestskej mikroklímy. Úzke uličné profily môžu zachytávať teplo medzi budovami, čo zabraňuje jeho vyžiareniu do atmosféry, zatiaľ čo široké ulice môžu byť nadmerne vystavené slnečnému žiareniu. Na druhej strane však široké ulice poskytujú priestor na dostatočnú ventiláciu a v úzkych je naopak dostatok tieňa [9]. Optimálna orientácia budov a ulíc, ktorá minimalizuje prehrievanie, sa líši v závislosti od lokálnych podmienok. Napríklad, orientácia ulíc v smere východ-západ je často problematická, pretože takéto ulice sú po celý deň vystavené slnečnému žiareniu, čo spôsobuje vyššie teploty [6]. Vysádzanie stromov na južnej či juhovýchodnej strane ulíc môže znížiť teplotu, zatiaľ čo nesprávne umiestnenie zelene napríklad na všeobecne chladnejších severných stranách môže byť neúčinné čím dochádza jednak k blokovaniu prúdeniu vzduchu a následne zvyšovaniu teplotného diskomfortu, ale aj k plytvaniu verejných zdrojov [10].

Významnou výzvou pre mestských plánovačov je nájsť rovnováhu medzi tienením a prístupom slnečného žiarenia, aby sa zohľadnili sezónne potreby. V lete je dôležité znižovať teplotu prostredníctvom tieňa, zatiaľ čo v zime je žiaduce maximalizovať slnečné žiarenie [11]. Použitie opadavých druhov stromov, ktoré poskytujú tieň v lete a v zime umožňujú prienik slnka, je preto jedným z efektívnych riešení. Zohľadnenie zimného prúdenia vzduchu je rovnako dôležité, pretože silné vetry môžu zhoršiť teplotný komfort v zimnom období [7].

1.1. Možnosti získavania údajov

Získavanie údajov pre meteorologické účely často nezohľadňuje mestskú mikroklímu. Meracie stanice sú zväčša umiestnené mimo centier, čo skresľuje reálne podmienky v mestskom jadre [12]. Povrchové mestské tepelné ostrovy (SUHI) berú do úvahy povrchovú teplotu mestských oblastí v porovnaní s prírodnými a sú často intenzívnejšie počas horúcich letných dní, kedy spevnené povrchy dosahujú teploty o 25-50°C vyššie ako je teplota vzduchu [13]. Povrchová teplota priamo ovplyvňuje mikroklímu, pretože teplo zo spevnených materiálov sa prenáša do okolitého prostredia a ovplyvňuje najmä úroveň nad povrchom, kde sa koncentruje väčšina ľudských aktivít. Vzhľadom na to je povrchová teplota lepším indikátorom UHI ako teplota vzduchu, čo umožňuje detailnejšiu analýzu chladiaceho potenciálu zelene [3].

Presnosť meraní povrchových teplôt pomocou diaľkového prieskumu často neodráža skutočný chladiaci efekt vegetácie, pretože zachytáva najmä povrchovú teplotu korún stromov, nie zatienené priestory pod nimi. Terénne merania sú preto kľúčové pre presnejšie vyhodnotenie efektívnosti zelene pri znižovaní teploty [14]. Ukázalo sa, že efekt zelene na ochladenie môže byť až štyrikrát vyšší, ako to naznačujú satelitné údaje. Presné a lokálne zamerané analýzy sú preto nevyhnutné pre účinné návrhy adaptačných opatrení [15].

1.2. Situácia na Slovensku

V rámci urbanistických riešení sa len zriedka ponúkajú konkrétne, praktické opatrenia na zmiernenie UHI, ktoré by boli zrozumiteľné pre mestské samosprávy. Táto práca sa preto zameriava na analýzu podmienok východnej časti Starého Mesta v Bratislave. Cieľom je identifikovať vhodné adaptačné opatrenia na základe terénnych meraní, ktoré by boli efektívne z mikroklimatického a ekonomického hľadiska.

Podľa prognóz Slovenského hydrometeorologického ústavu bude priemerná teplota na Slovensku naďalej stúpať, čo zvýši počet dní s teplotami nad 30°C. To bude mať za následok aj zvýšenie intenzity UHI, zníženie vlhkosti vzduchu a vyššie riziko povodní [16].

Bratislava čelí klimatickým problémom rovnako ako iné európske mestá, avšak nemá ucelenú komplexnú metodiku pre uplatňovanie adaptačných opatrení, čo vedie k neefektívnym a nekoordinovaným snahám o riešenie klimatických výziev. Je preto potrebné vypracovať podrobnú analýzu územia a navrhnúť udržateľné a účinné opatrenia, ktoré zohľadnia lokálne podmienky a klimatické zmeny v budúcnosti. Napriek tomu, že existujú strategické plány do roku 2050, chýba jednotný prístup k aplikácii opatrení a efektívne využívanie modro-zelenej infraštruktúry. Projekty na zvýšenie podielu zelene sú zatiaľ len bodové a nekomplexné. Na efektívne riešenie je potrebné najskôr analyzovať mikroklimatické podmienky konkrétnych oblastí a na základe toho navrhovať vhodné opatrenia. To zahŕňa správne využitie stavebných materiálov, vegetácie, ale aj úpravu mestskej morfológie na zlepšenie teplotných podmienok.

Podľa prehľadovej štúdie od Degirmenci et al. [17], ktorá analyzovala 97 rozdielnych vedeckých publikácií sa nenašiel ani jeden výskum adaptačných opatrení na mestské tepelné ostrovy realizovaný na Slovensku, či publikovaný slovenskými autormi.

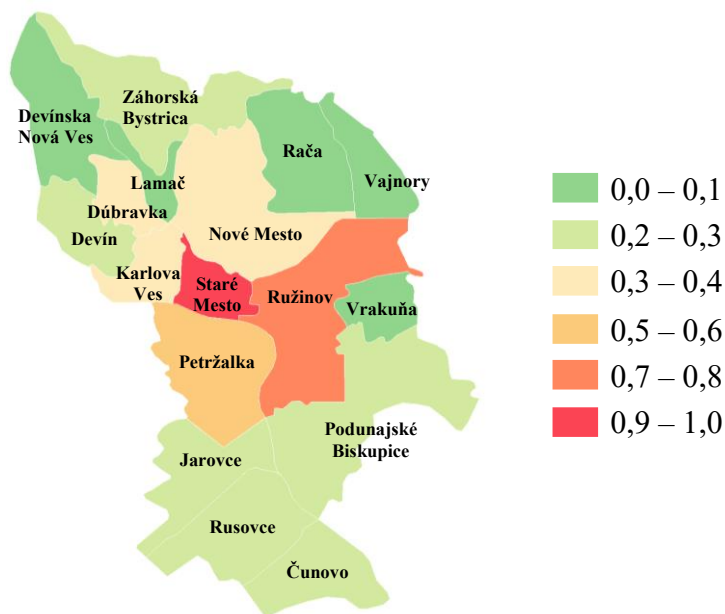
Vzhľadom na predpokladané zvyšovanie teplôt o 2 až 4 °C do konca storočia je nevyhnutné vyvíjať komplexné stratégie na adaptáciu mestských oblastí, ktoré budú zohľadňovať sezónne potreby a zabezpečovať tepelný komfort aj v extrémnych podmienkach.

2. Metodika

V tejto práci prezentujeme druhú časť komplexného výskumu pre vytvorenie stratégie na zmiernenie mestských tepelných ostrovov pre mesto Bratislava, konkrétne sa zameriava na východnú časť Starého Mesta. Zaoberá sa výskumom povrchových teplôt v rôznych častiach dňa v závislosti od orientácie ulíc, ktoré poslúžia ako indikátor pre určenie typov ulíc, ktoré podliehajú prehrievaniu.

2.1. Výber vhodných ulíc

Zamerali sme sa na mestskú časť Staré Mesto, ktorá je historickým a husto zastavaným centrom Bratislavy s množstvom spevnených plôch. Podľa dokumentu Atlas hodnotenia zraniteľnosti a rizík nepriaznivých dôsledkov zmeny klímy [18] sa ukázalo, že Staré Mesto patrí medzi najohrozenejšie mestské časti (Obr. 1). V rámci našich analýz sa sústreďujeme na východnú časť územia, čiže historické centrum.



Obr. 1: Citlivosť obyvateľov na extrémne horúčavy (Konrad et al., 2020)

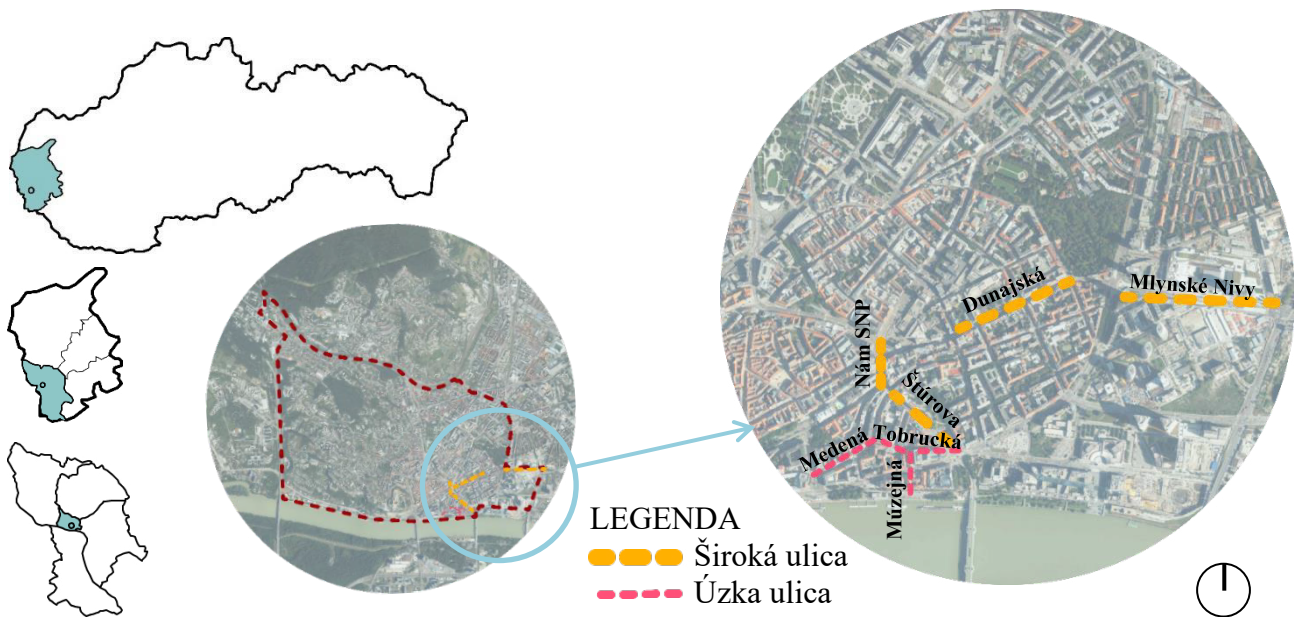
Prvou etapou práce bolo určenie reprezentatívnych ulíc a následná analýza povrchových teplôt. Tá zahŕňala meranie povrchových teplôt ulíc pomocou ručnej termokamery Flir E52, pričom sa brala do úvahy ich orientácia voči svetovým stranám a geometria ulíc, teda pomer výšky a šírky uličného koridoru. Tieto faktory výrazne ovplyvňujú množstvo slnečného žiarenia a prúdenie vzduchu, a tým aj tepelný komfort pre obyvateľov.

Na základe týchto parametrov boli vybrané charakteristické ulice. Tie sme rozdelili do dvoch skupín: úzke ulice s pomerom výšky a šírky koridoru 2 alebo viac, s jedným jazdným pruhom, a široké ulice s pomerom nižším ako 2, ktoré mali dva alebo viac jazdných pruhov. Z každého typu sme vybrali po jednej ulici v každej orientácii (sever-juh, východ-západ, severovýchod-juhozápad, severozápad-juhovýchod) a merali sme povrchové teploty rozličných druhov spevnených plôch. Aby sme zachovali rovnaké podmienky, výber ulíc závisel od prítomnosti rovnakých typov povrchov. Medzi základné materiály v Starom Meste sme zaradili asfalt, dlažbu a tri druhy fasád: svetlú a tmavú omietku a sklo. Reprezentatívne ulice, ktoré spĺňali všetky kritériá, sú uvedené v tabuľke 1 a graficky znázornené na obrázku č. 2.

Táto práca vyhodnocuje pomery širokých ulíc a nadväzuje na minuloročnú zameriavajúcu sa na úzke ulice [19]. Keďže terénny prieskum sme vykonávali fyzicky, dôležitá bola blízka pešia dostupnosť, aby boli údaje namerané v čo najbližších časových intervaloch, kedy sa neprejaví zmena teplôt.

Tab. 1: výber reprezentatívnych ulíc na základe ich orientácií a geometrie

Geometria	Orientácia			
	S-J	V-Z	SZ-JV	SV-JZ
Úzke	Múzejná	Tobrucká	Tobrucká	Medená
Široké	Nám SNP	Mlynské Nivy	Štúrova	Dunajská



Obr. 2: Poloha záujmových ulíc v rámci Slovenska, Bratislavského kraja, Bratislavy a Starého Mesta (Miriam Zaťovičová, 2023, podkladová mapa:

<https://zbgis.skgeodesy.sk/mkzbgis/sk/zakladna-mapa?pos=48.153791,17.129536,14>)

2.2. Terénny prieskum

Merania prebiehali v mesiacoch jún-september rokov 2023 a 2024 pomocou ručnej termokamery FLIR E52. Zvolili sme letné mesiace, a to konkrétne dni s maximálnymi teplotami nad 30°C, kedy sú extrémny najvýraznejšie a teplotné rozdiely jasne badateľné. V týchto dňoch je teda jednoznačne zrejme, ktoré časti ulíc podliehajú prehrievaniu. Vo vybraných uliciach sme merali teploty piatich vyššie spomenutých povrchov v časoch o 9:00, 14:00 a 23:00. Tieto časy boli zvolené na základe predchádzajúcich štúdií zo zahraničia, kedy bolo dokázané, že najvyššiu teplotu mestá dosahujú medzi 13:00-16:00 [2], [11], [20]. Najvyšší efekt mestského ostrova tepla býva štandardne v noci, kedy je slnečná energia naakumulovaná počas celého dňa sálaná do okolia [13], preto sme zvolili aj meranie po zotmení o 23:00. Na porovnanie priebehu povrchových teplôt počas celého dňa sme merania vykonávali aj ráno, o 9:00.

Merania teplôt všetkých piatich materiálov sme vykonávali na oboch stranách ulice, aby sme mohli porovnať vplyv geometrie a orientácie ulíc na teplotu povrchov. Na základe týchto výsledkov sme potom mohli určiť, kde by bolo vhodné uvažovať o výsadbe stromov alebo kde by postačovalo tienenie budovami. Pre každý materiál sme merania vykonali na troch rôznych miestach, aby sme zabezpečili presné zachytenie typickej povrchovej teploty v danej oblasti. Následne sme získané hodnoty spriemerovali.

Na základe týchto meraní budeme schopní vyhodnotiť vlastnosti lokalít, ktoré majú predispozíciu na prehrievanie a to najmä v letných mesiacoch pri extrémnych teplotách.

3. Výsledky

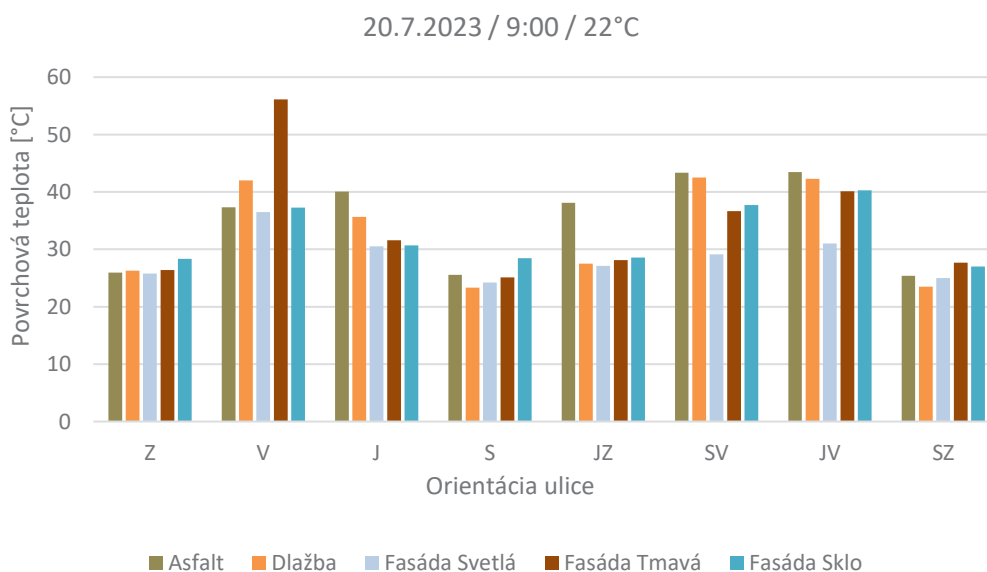
Výsledky meraní, ktoré boli vykonávané v období júl až september 2023 a 2024, sa zhodujú s predchádzajúcimi štúdiami zo zahraničných publikácií. Aj v našom prípade boli zaznamenané najvyššie hodnoty povrchových teplôt na stranách ulíc smerujúcich na juh, juhovýchod a juhozápad, čiže v uliciach rozliehajúcich sa smerom V-Z, na ktoré slnečné žiarenie pôsobí najdlhšie. Priebehy nameraných teplôt vo všetkých meraných dňoch boli pre všetky materiály a orientácie podobné, čo naznačuje vhodne zvolené metódy a umožňuje nám to závery aplikovať na akýkoľvek letný slnečný deň.

Z hľadiska výberu materiálov najvyššie teploty vo všetkých častiach dňa a všetkých typoch a orientáciách ulíc vykazoval asfalt a zámková dlažba. Spomedzi povrchov fasád to bola tmavá fasáda a sklo. Svetlé fasády mali takmer vo všetkých meraných situáciách najnižšiu teplotu.

3.1. Podmienky v širokej ulici

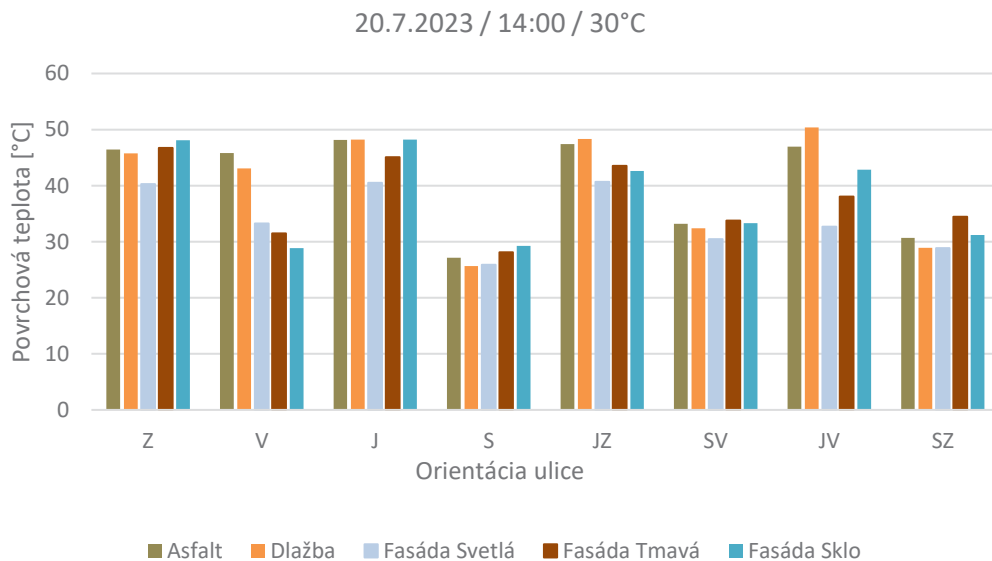
Priebeh teplôt v širokých uliciach bol odlišný oproti úzkym. Široký uličný koridor dovoľuje slnečnému žiareniu pôsobiť na povrchy dlhšie ako v prípade úzkych ulíc, kde sa skôr prejaví zatienenie budovami. Naopak, vzduch tu môže lepšie prúdiť a tým pádom sa priestor rýchlejšie schladí. Variabilita teplôt v priebehu dňa sa v rôznych orientáciách mení výraznejšie, preto nie je možné všeobecne povedať, ktorá orientácia vykazuje najvyššie povrchové teploty počas celého dňa. Južne orientovaná časť ulice, samozrejme, patrí medzi najteplejšie a v poobedných časoch dosahuje výrazne vysoké teploty.

V ranných hodinách mala výrazne najvyššiu povrchovú teplotu východne orientovaná tmavá fasáda, v niektorých prípadoch až o takmer 30°C oproti najchladnejšej západne a severne orientovanej časti. Môže to byť spôsobené tým, že pri východe sa slnko oprie najskôr do fasády a až postupom času ožiari aj povrchy chodníkov. Na tie naopak pôsobí dlhšie počas dňa, kedy sú už fasády zatienené. Ďalšími orientáciami s najvyššou povrchovou teplotou boli J, SV a JV.

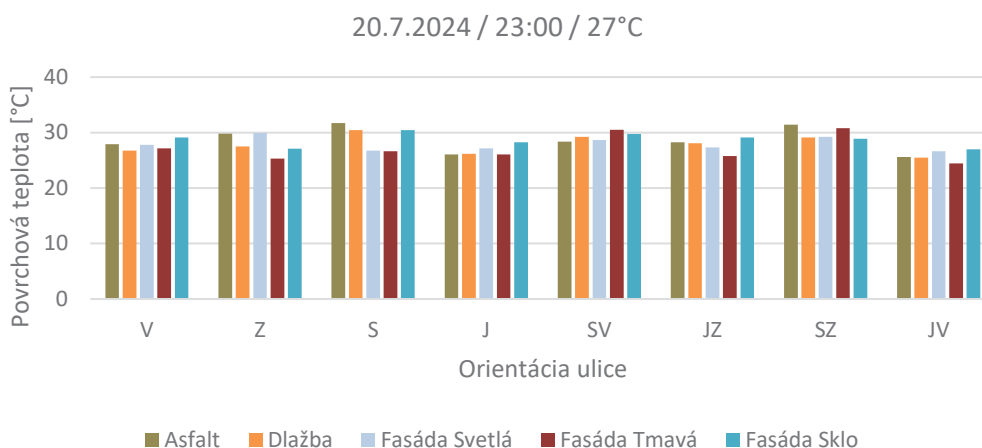


Naopak, najnižšie povrchové teploty boli namerané na stranách orientovaných na západ, sever, juhozápad a severozápad. Vo všeobecnosti by sme mohli konštatovať, že pri širokých uliciach sa doobeda najviac prehrejú povrchy orientované na V, SV, JV. Pri úzkych uliciach to boli J, JZ, JV a v doobedných hodinách aj SV orientácie.

V poobedných hodinách je priebeh v podstate opačný. Najvyššie povrchové teploty sme namerali na uliciach orientovaných na západ, kde rozdiely medzi ránom a poobedím dosiahli 20°C, juhozápad, ale tiež aj na juhovýchod. Táto orientácia patrila medzi výrazne najteplejšie aj doobeda a počas poobedia ostali hodnoty povrchových teplôt fasád všetkých typov viac-menej rovnaké. Teploty asfaltu a dlažby sa však oproti ostatným povrchom pri tejto orientácii poobede zvýšili ešte o 10 °C. Tak ako sa predpokladalo, južná orientácia bude v poobedných hodinách najteplejšia, keďže na ňu slnko pôsobí najdlhší čas. Teploty povrchov orientovaných na východ sa oproti doobedi výrazne nezvýšili, dokonca, ráno výrazne prehriatej tmavej fasáde sa popoludní povrchová teplota znížila a bola vyrovnaná s ostatnými typmi fasád. Pri tejto orientácii po 14:00 ostali najteplejšími asfalt a dlažba, avšak ich nárast medzi doobedím a poobedím bol veľmi nízky, takmer žiadny. Severne orientovaná strana zostala aj počas poobedia jednoznačne najchladnejšou a jej povrchové teploty sa oproti ranným výrazne nezmenili. Medzi orientácie bez výraznejších extrémov patrili aj severovýchod a severozápad. Pri severovýchodnej orientácii povrchové teploty asfaltu, dlažby, tmavej fasády a skla klesli medzi ránom a poobedím o takmer 10°C. V poobedných hodinách boli teda najteplejšie orientácie širokých ulíc na Z, J, JZ a JV, pri úzkych to tiež boli J, JZ a JV, ale západne orientovaná ulica patrila medzi najchladnejšie.



Po zotmení je aj v prípade širokých ulíc teplota všetkých povrchov a orientácií pomerne vyrovnaná. Oproti priebehu v úzkych uliciach sa v mnohých prípadoch nočná povrchová teplota znížila aj pod úroveň teploty vzduchu.



4. Záver

Klimatická zmena v súčasnosti predstavuje jeden z najväznejších problémov obyvateľstva a ohrozuje všetky geografické lokality, klimatické pásma a sociálne vrstvy. Každým rokom je menej pravdepodobné, že sa podarí dosiahnuť potrebné zníženie teplôt, súčasné stratégie a opatrenia nebudú v budúcnosti dostačujúce. Je preto potrebné vyvíjať komplexné stratégie, ktoré obyvateľom pomôžu postupne sa na prichádzajúce zmeny adaptovať.

Prvou fázou našich meraní bolo zistiť priebehy povrchových teplôt typických materiálov ulíc v závislosti od ich geometrie a orientácie. Na základe vopred stanovených kritérií sme si určili záujmové ulice, v ktorých budeme priebeh teplôt monitorovať počas celého dňa v letných mesiacoch, kedy sú teplotné extrémny najvýraznejšie. Následne sme ulice v závislosti od ich geometrie rozdelili na dve skupiny – úzke a široké, a skúmali sme vplyv ich orientácií na teplotné pomery.

Prvé výsledky ukázali, že najteplejšími materiálmi sú asfalt, dlažba, tmavá fasáda a sklo. Dopoludnia boli najteplejšie V, SV a JV orientácie. Popoludní sa naopak zvýšila povrchová teplota materiálov J, Z a JZ orientácií.

Na základe týchto výsledkov budeme môcť v ďalších krokoch navrhnúť výsadbu stromov a iné opatrenia, ktoré budú efektívne z mikroklimatického, ale aj ekonomického hľadiska. Výskum definuje, kde je vegetáciu potrebné vysádzať, čím by sa mohlo predísť plytvaniu finančných zdrojov na miestach, kde to nie je efektívne, ba dokonca, kde môže byť hustá výsadba stromov kontraproduktívna z dôvodu blokovania prúdenia vzduchu. Výsledky tejto práce môžu byť aplikované v rôznych európskych mestách a môžu pomôcť samosprávam optimalizovať svoje zdroje a sústrediť modrozelenú infraštruktúru tam, kde je to vhodné z ekonomického aj mikroklimatického hľadiska.

5. Podakovanie

Tento výskum je realizovaný s pomocou grantu Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej Republiky (VEGA No. 1/0067/23) a Programu na motiváciu a podporu zvyšovania kvality a efektívnosti vedecko-výskumnej činnosti mladých vedecko-výskumných pracovníkov.

6. Zdroje

- [1] PRITIPADMAJA ; GARG, RAHUL DEV ; SHARMA, ASHOK K.: Assessing the Cooling Effect of Blue-Green Spaces: Implications for Urban Heat Island Mitigation. In: *Water (Switzerland)* Bd. 15, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (2023), Nr. 16, S. 2983
- [2] BAKARMAN, MOHAMMED A. ; CHANG, JAE D.: The Influence of Height/width Ratio on Urban Heat Island in Hot-arid Climates. In: *Procedia Engineering* Bd. 118, No longer published by Elsevier (2015), S. 101–108
- [3] MARANDO, FEDERICA ; HERIS, MEHDI P. ; ZULIAN, GRAZIA ; UDÍAS, ANGEL ; MENTASCHI, LORENZO ; CHRYSOULAKIS, NEKTARIOS ; PARASTATIDIS, DAVID ; MAES, JOACHIM: Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. In: *Sustainable Cities and Society* Bd. 77, Elsevier (2022), S. 103564
- [4] FERRARI, A. ; KUBILAY, A. ; DEROME, D. ; CARMELIET, J.: The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation. In: *Urban Climate* Bd. 31, Elsevier (2020), Nr. August 2019, S. 100534
- [5] WANG, CHENGHAO ; WANG, ZHI HUA ; KALOUSH, KAMIL E. ; SHACAT, JOSEPH: Perceptions of urban heat island mitigation and implementation strategies: survey and gap analysis. In: *Sustainable Cities and Society* Bd. 66, Elsevier Ltd (2021), Nr. October 2020, S. 102687
- [6] BALANY, FATMA ; NG, ANNE W.M. ; MUTTIL, NITIN ; MUTHUKUMARAN, SHOBHA ; WONG, MAN SING: Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy—a review. In: *Water (Switzerland)* Bd. 12 (2020), Nr. 12, S. 1–22
- [7] KLEEREKOPER, LAURA ; TALEGHANI, MOHAMMAD ; VAN DEN DOBBELSTEEN, ANDY ; HORDIJK, TRUUS: Urban measures for hot weather conditions in a temperate climate condition: A review study. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Bd. 75, Pergamon (2017), S. 515–533
- [8] ZAŤOVIČOVÁ, MIRIAM ; MAJOROŠOVÁ, MARTINA: The Use of Vertical Gardens as a Network of Urban Navigation Elements with a Positive Impact on Biodiversity and Microclimate in a Dense Urban Environment. In: *Slovak Journal of Civil Engineering* Bd. 31 (2023), Nr. 4, S. 47–56
- [9] BAGHAEIPOOR, GOLNAR ; NASROLLAHI, NAZANIN: The Effect of Sky View Factor on Air temperature in High-rise Urban Residential Environments. In: *Journal of Daylighting, Vol. 6, Issue 2, pp. 42-51* Bd. 6, SolarLits (2019), Nr. 2, S. 42–51
- [10] PARK, CHAE YEON ; LEE, DONG KUN ; KRAYENHOFF, E. SCOTT ; HEO, HAN KYUL ; HYUN, JUNG HEE ; OH, KYUSHIK ; PARK, TAE YOON: Variations in pedestrian mean radiant temperature based on the spacing and size of street trees. In: *Sustainable Cities and Society* Bd. 48, Elsevier (2019), S. 101521
- [11] ALI-TOUDERT, FAZIA ; MAYER, HELMUT: Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. In: *Building and Environment* Bd. 41, Pergamon (2006), Nr. 2, S. 94–108
- [12] VENTER, ZANDER S. ; CHAKRABORTY, TIRTHANKAR ; LEE, XUHUI: Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms. In: *Science Advances* Bd. 7, American Association for the Advancement of Science (2021), Nr. 22
- [13] HOFIERKA, JAROSLAV ; GALLAY, MICHAL ; ONAČILLOVÁ, KATARÍNA: Physically-based land surface temperature modeling in urban areas using a 3-D city model and multispectral satellite data. In: *Urban Climate* Bd. 31, Elsevier (2020), Nr. February 2019, S. 100566
- [14] WONG, NYUK HIEN ; TAN, CHUN LIANG ; KOLOKOTSA, DIONYSIA DENIA ; TAKEBAYASHI, HIDEKI: Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. In: *Nature Reviews Earth & Environment* Bd. 2, Springer US (2021), Nr. 3, S. 166–181
- [15] TANG, HAIFANG ; LIU, JUNYOU ; ZHENG, BOHONG: Study on the Green Space Patterns and

- Microclimate Simulation in Typical Urban Blocks in Central China. In: *Sustainability (Switzerland)* Bd. 14, MDPI (2022), Nr. 22
- [16] BELČÁKOVÁ, INGRID ; ŠWIADER, MAŁGORZATA ; BARTYNA-ZIELIŃSKA, MAŁGORZATA: The Green Infrastructure in Cities as A Tool for Climate Change Adaptation and Mitigation: Slovakian and Polish Experiences. In: *Atmosphere* (2019), S. 1–23
- [17] DEGIRMENCI, KENAN ; DESOUZA, KEVIN C. ; FIEUW, WALTER ; WATSON, RICHARD T. ; YIGITCANLAR, TAN: Understanding policy and technology responses in mitigating urban heat islands: A literature review and directions for future research. In: *Sustainable Cities and Society* Bd. 70, Elsevier Ltd (2021), Nr. March, S. 102873
- [18] KONRAD INGRID ; BOGEN MANFRED ; KOZOVÁ MÁRIA ; LUCKERATH DANIEL ; PAUDITŠOVÁ EVA ; PECHO JOZEF ; REHAČKOVÁ TAMARA ; STREBEROVÁ EVA ; U. A.: *Atlas hodnotenia zraniteľnosti a rizík nepriaznivých dôsledkov zmeny klímy*. URL https://cdn-api.bratislava.sk/strapi-homepage/upload/Atlas_hodnotenia_zranitelnosti_8fe102452e.pdf. - abgerufen am 2024-02-09. — Hlavné mesto SR Bratislava
- [19] STU BRATISLAVA, SVF: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering SPEKTRUM SPEKTRUM* — ISBN 9788022753784
- [20] CHATZIDIMITRIOU, ANGELIKI ; YANNAS, SIMOS: Microclimate design for open spaces: Ranking urban design effects on pedestrian thermal comfort in summer. In: *Sustainable Cities and Society* Bd. 26, Elsevier (2016), S. 27–47

**THEORY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY
OF BUILDINGS**

Lucia Hrnčárová

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 3.ročník

VPLYV VYUŽITIA ODPADOVÉHO TEPLA Z KANALIZÁCIE NA ENERGETICKÝ CERTIFIKÁT RODINNÉHO DOMU

IMPACT OF WASTE HEAT RECOVERY FROM SEWERAGE ON THE ENERGY CERTIFICATE OF A FAMILY HOUSE

Abstract

Insulating buildings improves the quality of the building envelope, reducing heat loss and the energy demand for heating or cooling, but the energy demand for hot water remains the same. A large amount of waste water with a relatively high temperature is discharged daily into the sewerage system. It is the temperature of the waste water that has a high energy potential. The thermal energy that is normally discharged into the sewer contains energy that can be used, for example, to produce hot water in a building using a heat exchanger.

Kľúčové slová / Key Words

sprchový výmenník tepla, príprava teplej vody, úspora energie

1. Úvod

Zatepl'ovanie budov zlepšuje kvalitu obalových konštrukcii, znižujú sa tepelné straty objektov a potreba tepla na vykurovanie, avšak potreba energie na prípravu teplej vody ostáva stále rovnaká. Potreba teplej vody nespočíva len vo vykonávaní osobnej hygieny, ale aj každodennom umývaní kuchynského riadu, používaní umývačiek riadu a automatických práčok. Do kanalizačného systému je z rôznych zariadení predmetov každý deň odvádzané veľké množstvo odpadovej vody s pomerne vysokou teplotou. Práve v teplote odpadovej vody sa nachádza vysoký energetický potenciál, nakoľko teplota odpadovej vody v budovách môže častokrát dosahovať 50 °C. Získavanie a využívanie odpadového tepla, ktoré vzniká v kanalizačných potrubiach vie efektívne prispieť k zníženiu energetickej náročnosti budov. Zmenší sa množstvo potrebnej energie na prípravu teplej vody (ďalej TV) a tiež klesnú aj finančné náklady na bežnú prevádzku, keďže ceny energií dosahujú v dnešnej dobe kvôli viacerým faktorom svoje historické maximum.

2. Energetický potenciál odpadových vôd v budove

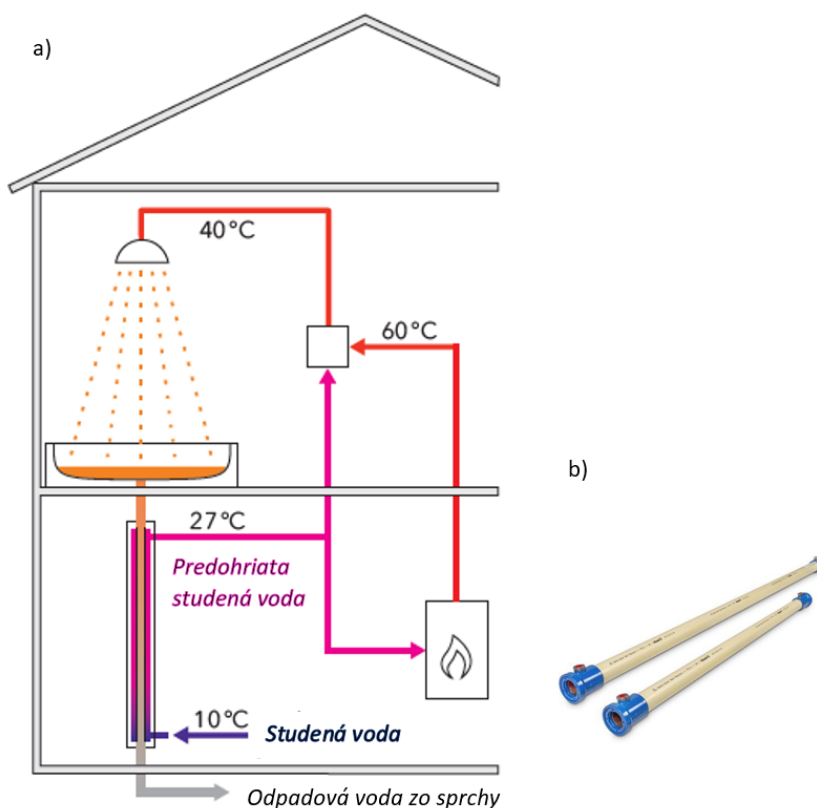
Pri súčasnom zlepšovaní tepelnotechnických vlastností obalových konštrukcií objektov sa znižuje potreba energie na vykurovanie. Podľa normy STN 73 0540-2+Z1+Z2 z roku 2019 sú prísňované požadované normové hodnoty tepelného odporu a súčiniteľa prechodu tepla stavebnými konštrukciami, čo výrazne dopomohlo k zatepl'ovaniu budov a tým aj znižovaniu potreby energie jednotlivých objektov [1]. Avšak spotreba vody neustále narastá, nakoľko potreba ľudstva dodržiavať určitý hygienický štandard je čím ďalej tým väčšia. Podľa STN 06 0320 [2] počítame so spotrebou teplej vody 45 l/(osoba.deň), takže priemerná ročná spotreba teplej vody na obyvateľa je 16 m³, resp. 16 000 litrov.

Ekonomicky najzaujímavejším zdrojom odpadového tepla sú predovšetkým sivé odpadové vody, ktorých takmer polovicu tvorí práve odpadová voda zo sprchy s priemernou teplotou 34 až 39 °C. Tepelnú energiu odpadových vôd vo vnútornej kanalizácii je vhodné využívať priamo po jej

produkcii za zariadením predmetom, pretože vtedy odpadová voda dosahuje najvyššie teploty a prenos energie je najefektívnejší. Technicky dostupné a nenáročné riešenie je v súčasnosti využitie tepelnej energie odpadovej vody zo sprchy, ktorú je následne možné opätovne využiť, resp. rekuperovať na prípravu teplej vody v mieste odberu [5].

3. Možnosti prípravy teplej vody v sprche odpadovým teplom

Princíp rekuperácie odpadového tepla za sprchou spočíva v prenášaní tepelnej energie z odpadovej vody na teplotonosnú látku vo výmenníku tepla, ktorou je spravidla studená voda. Obe látky prúdia v protismere a k prenosu tepelnej energie dochádza podľa STN EN 1717 cez dvojité steny [3]. Umiestnenie výmenníka tepla a miesto rekuperácie závisí od priestorových možností riešeného objektu. Odpadové teplo zo sprchy je možné rekuperovať **vertikálne** (Obr.1) alebo **horizontálne** (Obr.2).



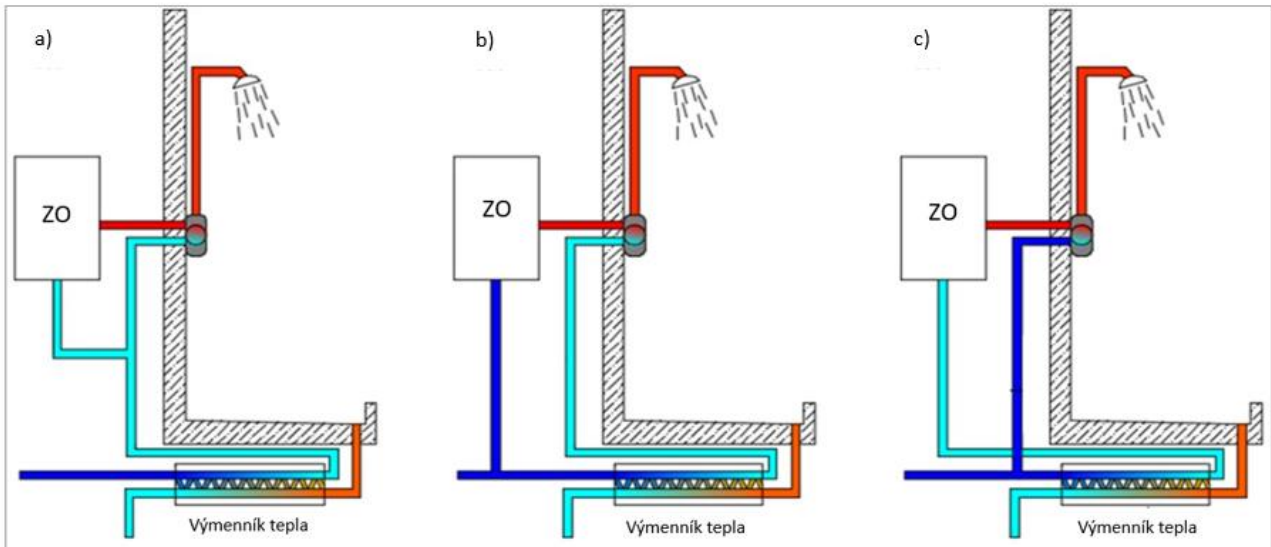
Obrázok 1 Umiestnenie vertikálneho výmenníka tepla, [8]
a) schéma zapojenia, b) vertikálny výmenník tepla AS-ECOSHOWER-PIPE

Umiestnenie vertikálneho výmenníka tepla na odpadové potrubie za sprchou je veľmi efektívne a jeho účinnosť výrobcovia častokrát uvádzajú 50 - 60 %, avšak nevýhoda tohto riešenia je práve v náročnosti na priestorové podmienky. Výmenník tepla sa musí nachádzať o podlažie nižšie na zvislom odpadovom potrubí, rovnako ako aj prívod studenej vody do potrubia samotného výmenníka. Tento systém je výhodný hlavne pri novostavbách, nakoľko by pri rekonštrukciách nestačila samotná rekonštrukcia kúpeľne, ale muselo by ísť aj o rekonštrukciu šachty a odpadových potrubí. Z tohto dôvodu je vertikálny rekuperátor doposiaľ menej využívaný na území Slovenskej a Českej republiky.

V súčasnosti sa dostáva do povedomia horizontálny sprchový výmenník tepla, nakoľko je jeho technické riešenie podstatne jednoduchšie. Zapojenie horizontálneho výmenníka tepla je výhodné hlavne kvôli priestorovým možnostiam, keďže je výmenník tepla možné umiestniť pod sprchovú

vaničku, alebo priamo v sprche ako súčasť sprchového žľabu. Výmenník tepla a aj prívod studenej vody do výmenníka sa nachádzajú v rámci jedného a toho istého podlažia ako samotná kúpeľňa.

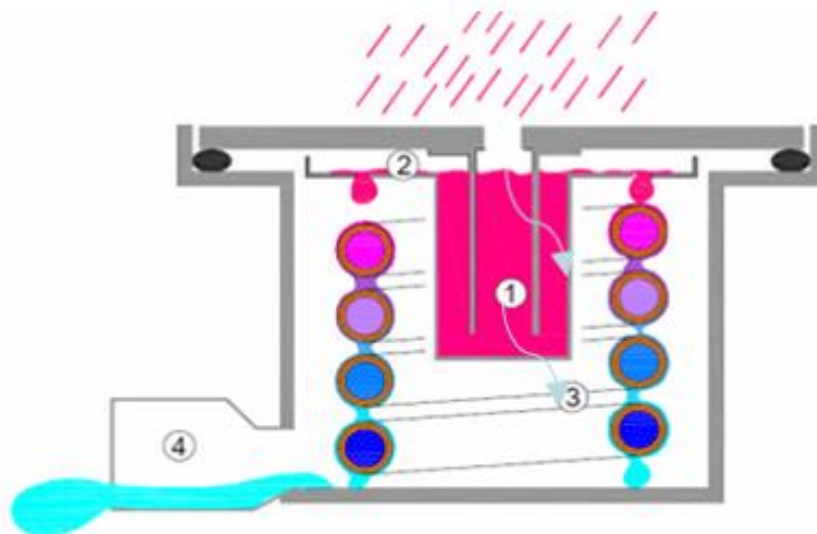
K prenosu tepelnej energie dochádza na odtokovom potrubí zo sprchy. Studená voda vo výmenníku tepla po prijatí tepelnej energie z odpadovej vody môže prúdiť **do termostatickej zmiešavacej výtokovej armatúry, zásobníkového ohrievača, alebo do oboch súčasne** (Obr.2).



Obrázok 2 Spôsoby zapojenia horizontálneho sprchového výmenníka do sprchy [6]

a - predohrev studenej a teplej vody, b – predohrev studenej vody, c – predohrev teplej vody

Úspora energie spočíva v menšom množstve energie na dosiahnutie požadovanej teploty vody v sprchovej batérii, alebo v zásobníkovom ohrievači. Studená voda vo výmenníku tepla dokáže navýšiť svoju teplotu o 7 až 15 °C v závislosti od relatívnej účinnosti výmenníka, ktorú udáva výrobca. Výrobcom horizontálnych sprchových výmenníkov tepla vedia prispôbiť ich technické riešenie sprche so **sprchovým vpustom** (Obr.3 a Obr.4), ale aj so **sprchovým žľabom** (Obr.5).

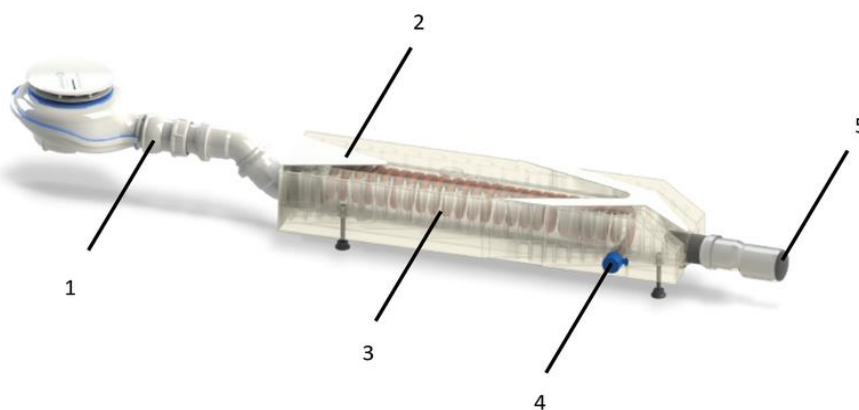


Obrázok 3 Schematický rez výmenníka AS – DRAINCHANNEL ako súčasť sprchového žľabu [8]
1 – odpadová voda zo sprchy, 2 – zásobník odpadovej vody/teplovýmenná plocha, 3 – potrubia výmenníka tepla s teplonosnou látkou, 4 – odtok ochladenej odpadovej vody zo sprchy



Obrázok 4 Príklad výmenníka tepla zabudovaného v sprchovom žľabe [8]

Technické riešenie výmenníkov tepla so zapojením na sprchu s vpustom spočíva v plastovom boxe umiestnenom na odtokovom kanalizačnom potrubí, do ktorého je privádzaná studená voda v potrubí z ušľachtilej ocele obtočenom okolo odtokového potrubia, ktorým preteká vypúšťaná odpadová voda zo sprchy (Obr.5).



Obrázok 5 Horizontálny sprchový výmenník s napojením na sprchový vpust [7]
1 – odtokové potrubie zo sprchy (teplá odpadová voda zo sprchy), 2 – výstup predhriatej vody z výmenníka tepla, 3 – medené potrubie výmenníka tepla, 4 – prívod studenej vody do potrubia výmenníka, 5 – odtok ochladenej odpadovej vody zo sprchy do kanalizácie.

Účinnosť sprchových výmenníkov tepla závisí od prietoku odpadovej vody cez zariadenie a od jeho veľkosti. Z fyzikálneho hľadiska platí pravidlo, že čím je výmenník tepla väčší (potrubie s teplonosnou látkou, resp. studenou vodou dlhšie), tým je jeho účinnosť vyššia. Lokálne výmenníky tepla sú pasívny prvky, na ich prevádzku nie je potrebný žiadny mechanický stroj, resp. čerpadlo.

4. Energia na prípravu teplej vody v rodinnom dome

V rámci energetického potenciálu odpadového tepla v prípade inštalovania sprchového výmenníka do bežných domácností by sa úspora energie mala odzrkadliť aj v energetickom certifikáte. Teoretický výpočet sa uvažuje aplikovať v rodinnom dome z roku 2010. Rodinný dom pozostáva z keramikového muriva hr. 380 mm s kontaktným zatepl'ovacím systémom s izoláciou na báze expandovaného polystyrénu hr. 50 mm. Strešná konštrukcia pozostáva zo sadrokartónového podhľadu, parozábrany, tepelnej izolácie z expandovaného polystyrénu hr. 200 mm, nevykurovaného podstrešného priestoru, nosnou konštrukciou krovu, poistnou hydroizoláciou, kontralatovaním, latovaním a strešnou krytinou.

Podlaha na teréne je pod nášľapnou vrstvou podlahy a betónovou mazaninou so samonivelizačným poterom takisto izolovaná expandovaným polystyrénom hr. 100 mm, ktorý je umiestnený medzi separačnými polyetylénovými fóliami na hydroizolácii proti zemnej vlhkosti a podkladovom betóne. Otvorové konštrukcie riešeného objektu sú z plastových viackomorových profilov zasklené izolačným trojsklom. Zdrojom tepla na vykurovanie rodinného domu je kotol na pelety a ohrev teplej vody je zabezpečený elektrickým zásobníkovým ohrievačom.

Celková podlahová plocha vybraného objektu je 236,26 m² a celkový obostavaný objem budovy je 720,31 m³. Na základe tepelno-technických vlastností objektu, zdroja tepla a prípravy teplej vody, potreba energie na vykurovanie a teplú vodu pri štandardnej prevádzke (bez výmenníka tepla) vychádza nasledovne (Tab.1).

Tab. 1 Výpočet potreby energie pri štandardnej prevádzke – bez výmenníka tepla [autor]

Potreba energie							
Názov budovy:	Rodinný dom						
Účel spracovania energetického certifikátu:	Iný účel						
Miesto spotreby	Vykurovanie			Teplá voda			Spolu
Zdroj/energetický nosič	1	2	3	1	2	3	
Potreba tepla/energie v kWh/(m².a)	51	0	0	16			67
Straty vykurovacieho systému v budove:							
Straty pri odovzdávaní tepla a regulácii	4,80	0,00	0,00				5
Straty pri rozvoде tepla	0,52	0,00	0,00	5,18			6
Straty pri akumulácii tepla	0,00	0,00	0,00	0,78			1
Spätne získané teplo v kWh/(m².a)	1,04	0,00	0,00	0,00			
Vlastná energia v budove:							
Elektrická energia na čerpadlá, ventilátory, rekuperačnú jednotku	0,06	0,00	0,00	0,54			
Potreba energie bez strát pri výrobe tepla v kWh/(m².a)	55,23	0,00	0,00	22,52			77,75
Straty mimo budovy alebo v budove:							
Straty pri výrobe tepla (transformácia)							
Straty pri distribúcii							
Vlastná elektrická energia:							
Potreba energie so stratami pri výrobe tepla v kWh/(m².a)	63,52	0,00	0,00	22,52			86,04
Energia z obnoviteľných zdrojov (solárna a iná)	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00
Dodaná energia bez energie z obnoviteľných zdrojov v kWh/(m².a):	63,52	0,00	0,00	22,52			86,04

Ohrev teplej vody v objekte je v pôvodnom stave zabezpečený elektrickým zásobníkovým ohrievačom. V tomto rodinnom objekte je celková potreba energie so stratami pri výrobe tepla 22,52 kWh/(m².a).

Pri energetickej certifikácii sa budovy zatriedujú do energetických tried podľa globálneho ukazovateľa, resp. primárnej energie. Na základe zapracovania požiadavky Ministerstva dopravy Slovenskej republiky je od 1.2.2022 nevyhnutné, aby objekty spĺňali nielen hornú hranicu energetickej triedy A0 pre globálny ukazovateľ pre budovy s takmer nulovou potrebou energie, ale takisto musí byť v objekte navrhnutý obnoviteľný zdroj energie aspoň v jednom mieste spotreby [4]. Nakoľko je vykurovanie v objekte zabezpečené kotlom na pelety, podmienka obnoviteľného zdroja energie aspoň v jednom mieste spotreby je splnená, avšak je potrebné vyčíslit' primárnu energiu. Hodnota vypočítanej primárnej energie je zobrazená v Tab.2.

Tab. 2 Rekapitulácia a potenciál úspor energie po zhotovení navrhovaných úprav – bez VT [autor]

Č.r.	ZÁKLADNÉ ÚDAJE O BUDOVE				
1	Názov budovy:	Rodinný dom			
6	Účel spracovania energetického certifikátu:	Iný účel			
Potenciál úspor energie po vykonaní navrhovaných úprav					
	Veličina	Potreba tepla / energie - aktuálny stav v kWh/(m ² .a)	Potreba tepla / energie - po realizácii navrhovaných úprav v kWh/(m ² .a)	Úspora tepla / energie v kWh/(m ² .a)	Potenciál úspor v %
7	Potreba tepla na vykurovanie	50,88			
Potreba energie:					
8	na vykurovanie	55			
9	na prípravu teplej vody	23			
10	na chladenie/vetranie	Nehodnotí sa			
11	na osvetlenie	Nehodnotí sa			
12	Celková potreba energie kWh/(m².a):	78			
13	Primárna energia kWh/(m².a):	63			
Odpočítateľná tepelná a elektrická energia:					
14	Odpočítateľná tepelná a elektrická energia:				
15	solárna tepelná	0,00			
16	solárna fotovoltaická	0,00			
17	kogenerácia	0,00			
18	Tepelná energia z iného obnoviteľného zdroja	0,00			

Horná hranica globálneho ukazovateľa pre budovy s takmer nulovou potrebou energie je pre rodinné domy ≤ 54 kWh/(m².a) [4]. Podľa hodnoty primárnej energie 63 kWh/(m².a) v Tab.2 vyplýva, že riešený rodinný dom nespĺňa požiadavku na splnenie energetickej triedy A0.

Ak uvažujeme, že pri rekonštrukcii rodinného domu sa majitelia rozhodli rekonštruovať kúpeľňu s aplikovaním sprchového výmenníka tepla, úspora energie by sa mala zobrazit' aj v energetickom certifikáte. Pri výpočte energetického certifikátu vychádzame z údajov, že približne 40 % teplej vody je spotrebovanej práve na sprchovanie všetkými obyvateľmi rodinného domu. Navrhujeme inštaláciu výmenníka tepla, ktorý je zabudovaný priamo v sprchovom žľabe a výrobca udáva jeho relatívnu účinnosť 46 %. Odvádzaná odpadová voda je pred odtokovým potrubím akumulovaná pod sprchovým žľabom, okolo ktorého je vedené potrubie výmenníka tepla z ušľachtilej ocele. V tomto potrubí prúdi teplonosná látka – studená voda, ktorá sa ohrieva a následne privádza priamo do termostatickej zmiešavacej výtokovej armatúry v sprche, kde sa mieša s teplou vodou zo zásobníkového ohrievača. Úspora spočíva v menšom množstve potrebnej teplej vody vo výtokovej armatúre, nakoľko sa teplá voda nemieša so studenou vodou, ktorá má štandardnú teplotu 10 až 12°C, ale s predohriatou vodou, ktorá môže mať teplotu 24 až 27 °C. Inštalácia výmenníka tepla na prípravu teplej vody v sprche sa v certifikáte zobrazí v Tab.3 a následne aj v Tab.4 pri výpočte globálneho ukazovateľa, resp. primárnej energie s hodnotou 54 kWh/(m².a).

Tab.3 Výpočet potreby energie pri aplikovaní sprchového výmenníka tepla [autor]

Potreba energie							
Názov budovy:	Rodinný dom						
Účel spracovania energetického certifikátu:	Iný účel						
Miesto spotreby	Vykurovanie			Teplá voda			Spolu
Zdroj/energetický nosič	1	2	3	1	2	3	
Potreba tepla/energie v kWh/(m ² .a)	51	0	0	10	6		67
Straty vykurovacieho systému v budove:							
Straty pri odovzdávaní tepla a regulácii	4,80	0,00	0,00				5
Straty pri rozvode tepla	0,52	0,00	0,00	3,11	2,07		6
Straty pri akumulácii tepla	0,00	0,00	0,00	0,47	0,31		1
Spätne získané teplo v kWh/(m².a)	1,04	0,00	0,00	0,00	0,00		
Vlastná energia v budove:							
Elektrická energia na čerpadlá, ventilátory, rekuperačnú jednotku	0,06	0,00	0,00	0,32	0,22		
Potreba energie bez strát pri výrobe tepla v kWh/(m².a)	55,23	0,00	0,00	13,51	9,01		77,75
Straty mimo budovy alebo v budove:							
Straty pri výrobe tepla (transformácia)							
Straty pri distribúcii							
Vlastná elektrická energia:							
Potreba energie so stratami pri výrobe tepla v kWh/(m².a)	63,52	0,00	0,00	13,51	9,01		86,04
Energia z obnoviteľných zdrojov (solárna a iná)	0,00	0,00	0,00	0,00	4,14		4,14
Dodaná energia bez energie z obnoviteľných zdrojov v kWh/(m².a):	63,52	0,00	0,00	13,51	4,86		81,90

Tab. 4 Rekapitulácia a potenciál úspor energie po zhotovení navrhovaných úprav – VT [autor]

Č.r.	ZÁKLADNÉ ÚDAJE O BUDOVE				
1	Názov budovy:	Rodinný dom			
6	Účel spracovania energetického certifikátu:	Iný účel			
Potenciál úspor energie po vykonaní navrhovaných úprav					
	Veličina	Potreba tepla / energie - aktuálny stav v kWh/(m ² .a)	Potreba tepla / energie - po realizácii navrhovaných úprav v kWh/(m ² .a)	Úspora tepla / energie v kWh/(m ² .a)	Potenciál úspor v %
7	Potreba tepla na vykurovanie	50,88			
	Potreba energie:				
8	na vykurovanie	55			
9	na prípravu teplej vody	23			
10	na chladenie/vetranie	Nehodnotí sa			
11	na osvetlenie	Nehodnotí sa			
12	Celková potreba energie kWh/(m².a):	78			
13	Primárna energia kWh/(m².a):	54			
14	Odpočítateľná tepelná a elektrická energia:				
15	solárna tepelná	0,00			
16	solárna fotovoltická	0,00			
17	kogenerácia	0,00			
18	Tepelná energia z iného obnoviteľného zdroja	0,00			

Po aplikovaní sprchového výmenníka tepla sa časť odpadového tepla zo sprchy rekuperuje a opätovne využije. Aká časť odpadového tepla bude využitá uvádza výrobca na základe uvedenej relatívnej účinnosti, s ktorou sme v tomto prípade uvažovali 46 %. Rekuperované odpadové teplo môžeme v energetickom certifikáte uvažovať ako energiu z obnoviteľných zdrojov, aj keď je to zdroj alternatívny.

Z tohto teoretického výpočtu môžeme skonštatovať, že v prípade objektov, ktoré sú na hranici energetickej triedy A0 a A1 vie inštalácia aj jedného sprchového výmenníka tepla naozaj pomôcť. Toto opatrenie nie je až tak finančne náročné, pretože investičné náklady sa pohybujú od 500 € do 2 000 € v závislosti od výrobcu a technického riešenia. Týmto riešením sa primárna energia znížila až o 9 kWh/(m².a), čo pri rodinných domoch nie je zanedbateľná hodnota. Celkovo bude týmto riešením ušetrených 978,12 kWh na prípravu teplej vody, čo pri elektrickej energii možno odhadnúť na sumu približne 173 €/rok. Inštalovaním sprchového výmenníka s ohľadom na investičné náklady sa návratnosť pohybuje v rozmedzí 4 až 10 rokov. Úspora energie, investičné náklady a aj návratnosť je však pre každý objekt a domácnosť individuálna.

5. Záver

Využitie odpadového tepla z kanalizácie je jednou z možností, ako ušetriť primárnu energiu. Na uvedenom príklade je vidieť, že použitím rekuperačného výmenníka tepla v sprche je možné dosiahnuť to, že sa objekt pri energetickom hodnotení zaradí do požadovanej energetickej triedy A0. V objektoch, kde sa využívajú hromadné sprchy, ako napr. hromadné umyvárne, bazény, telocvične, fitness centrá, rekreačné objekty, a pod. bude aj návratnosť investícií do rekuperačných výmenníkov v sprchách takmer okamžitá.

Príspevok bol podporovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantov VEGA 1/0118/23 .

6. Literatúra

- [1] STN 73 0540-2+Z1+Z2: 2019, Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov Časť 2 Funkčné požiadavky. Konsolidované znenie.
- [2] STN 06 0320, Ohrievanie úžitkovej vody. Navrhovanie a projektovanie.
- [3] STN EN 1717, Ochrana pitnej vody pred znečistením vo vnútornom vodovode a všeobecné požiadavky na zabezpečovacie zariadenia na zamedzenie znečistenia pri spätnom prúdení.
- [4] Zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov.
- [5] PERÁČKOVÁ, J.; PODOBEKOVÁ, V.: Jak využit teplo z kanalizace na přípravu teplé vody v budovách?. TZB-info. cz, 2014, 35-38.
- [6] ŠVELA, P.: Zpětné získávání tepla z odpadní vody - ZZTOV: Principy a doporučení pro plánování pro lokální jednotky. Asionále 2018 [online]. 12.4.2018, s. 10
- [7] Zypho, dostupné: <https://www.zapcarbon.com/zypho/>
- [8] ASIO NEW, spol. s.r.o., dostupné: <https://www.asio.cz/cz/recyklace-vody-energie>

Veronika Mučková¹, Daniel Kalús²

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 4. ročník

VÝSKUM A VÝVOJ FASÁDY S AKTÍVNOU TEPELNOU OCHRANOU

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF FACADE WITH ACTIVE THERMAL PROTECTION

Abstract

In this article, we investigate the implementation of a facade with energy-active elements (active thermal protection) on a building. This building is a part of the Central Laboratories of the Slovak University of Technology in Bratislava. The methodology is divided into a description of the fragment and the object with active thermal protection, a detailed procedure for the implementation of the facade and a conclusion, in which partial results and first recommendations for practice are presented. The aim of this study is the implementation of active thermal protection, parametric study and subsequent experimental measurements on a test object. The aim of the implementation of a facade with ATP is to investigate the function of active thermal protection in different energy functions.

Kľúčové slová / Key Words

aktívna tepelná ochrana; tepelná bariéra; vykurovanie; chladenie; schéma zapojenia.

1. Úvod

Integrovaný energeticky aktívny prvok v obvodovej stenovej konštrukcii nazývame aj aktívna tepelná ochrana (ATO). Môže mať rôzne energetické funkcie, ako napríklad: tepelná bariéra, veľkoplošné sálavé nízkotepelné vykurovanie/vysokotepelné chladenie, akumulácia tepla/chladu, zachytávanie solárnej a okolitej energie, prípadne rekuperácia tepla/chladu. Tieto energetické funkcie závisia od typu konštrukcie. To znamená, že konštrukcia, ktorá má vysokú tepelnú vodivosť je vhodná na funkciu tepelnej bariéry, ale vo funkcii vykurovania a chladenia by strácala zmysel. Aplikovaním aktívnej tepelnej ochrany dokážeme eliminovať hrúbku tepelnej izolácie a to riadeným prestupom tepla. Funkcia tepelnej bariéry vychádza hlavne zo znalosti teplôt medzi staticky zaťaženu – nosnou a tepelnoizolačnou vrstvou stavebnej konštrukcie. Túto teplotu vieme ručne vypočítať a overiť ju aj počítačovou simuláciou. V tomto príspevku sa venujeme konštrukcii, ktorá je vhodná pre ATO vo funkcii vykurovania, chladenia a aj tepelnej bariéry[1-5].

Cieľom tejto štúdie je realizácia aktívnej tepelnej ochrany, parametrická štúdia a následné experimentálne merania na testovacom objekte. Cieľom realizácie fasády s ATO je výskum funkcie aktívnej tepelnej ochrany v rôznych energetických funkciách. Tento výskum nadväzuje na predošlé parametrické štúdie a počítačové simulácie. Vyhotovenie takejto testovacej fasády je vhodné aj na ďalšie možnosti výskumu, prípadne pre výuku. Získané experimentálne merania sa budú kontrolovať a porovnávať s rôznymi výpočtami a aj počítačovými simuláciami[6].

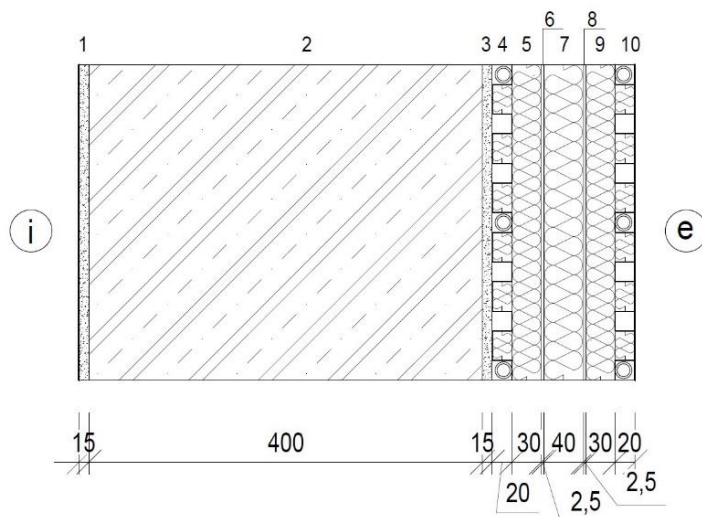
¹ Ing. Veronika Mučková; STU SvF, Katedra TZB, Radlinského 11, Bratislava, 810 05

² prof. Ing. Daniel Kalús, PhD.; STU SvF, Katedra TZB, Radlinského 11, Bratislava, 810 05

2. Opis fragmentu a objektu s aktívnou tepelnou ochranou

V tejto kapitole popisujeme fragment obvodovej steny a budovu testovacieho objektu v Bratislave v Centrálnych laboratóriách STU na Trnávke. Na tomto objekte sú plánované merania a ďalšia štúdia rôznych funkcií aktívnej tepelnej ochrany.

Pôvodná obvodová stena zo železobetónových panelov je omietnutá vápennocementovou omietkou. Fragment obvodovej steny je znázornený na *Obrázku 1*.



Obrázok 1: Fragment stenovej obvodovej konštrukcie [Autor]

i – interiér (interiérová teplota $\theta_i = 20\text{ °C}$), *e* – exteriér (exteriérová teplota $\theta_e = -11\text{ °C}$). Skladba konštrukcie je uvedená v *Tabuľke č. 1*.

Tabuľka 1: Tepelno – technické vlastnosti konštrukcie [Autor]

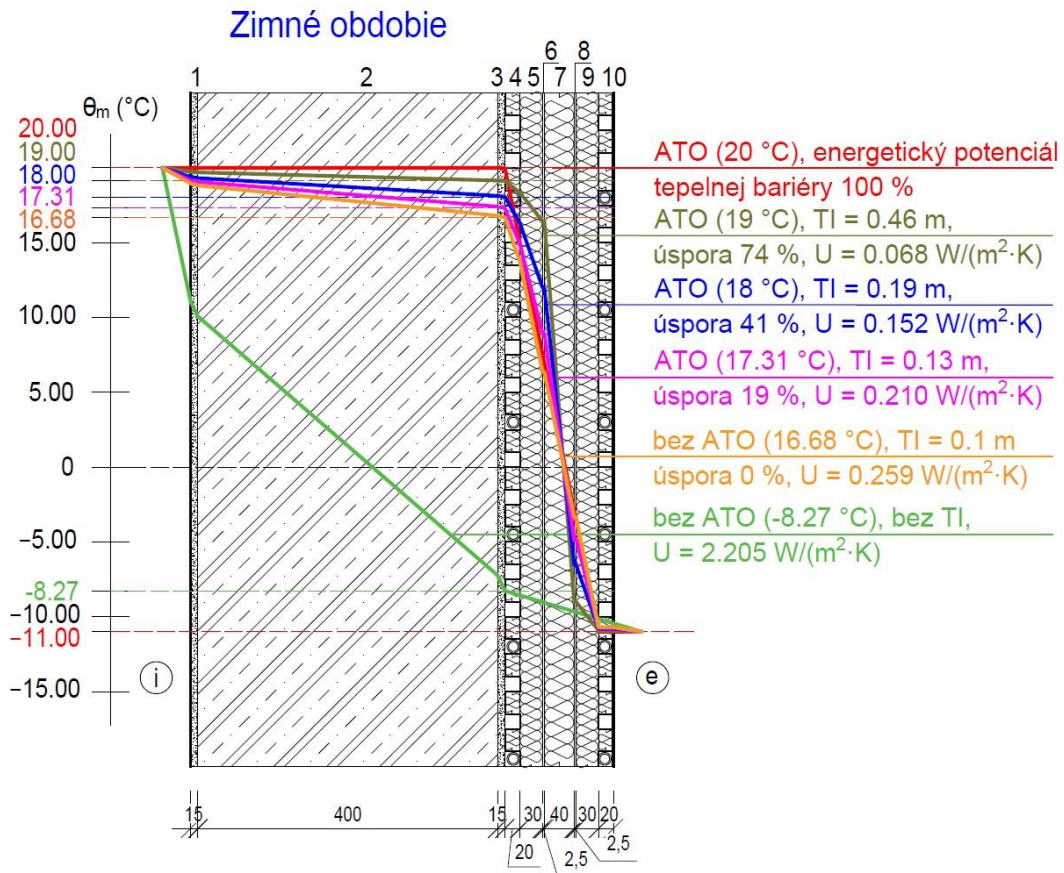
č.	Názov materiálu	Hrúbka	Objemová hmotnosť	Súčiniteľ tepelnej vodivosti	Tepelný odpor
	Symbol Jednotka	d m	ρ kg/m ³	λ W/(m.K)	R (m ² .K)/W
1.	Vápennocementová omietka	0,015	2000	0,990	0,015
2.	Železobetónový panel	0,400	2400	1,580	0,253
3.	Vápennocementová omietka	0,015	2000	0,990	0,015
4.	Systémová doska	0,020	15,6	0,054	0,370
5.	Tepelná izolácia EPS	0,030	30	0,033	0,909
6.	Lepiacia stierka	0,0025	1300	0,800	0,003
7.	Tepelná izolácia EPS	0,040	30	0,033	1,212
8.	Lepiacia stierka	0,0025	1300	0,800	0,003
9.	Tepelná izolácia EPS	0,030	30	0,033	0,909
10.	Systémová doska*	0,020	15,6	0,054	0,370
Tepelný odpor konštrukcie $R_{konštrukcie}$					3,690
Celkový tepelný odpor $R_{100} = R_{si} + R_{konštrukcie} + R_{se}$					3,860
Celkový súčiniteľ prechodu tepla $U_{100} = 1/ R_{celkové}$ W/(m².K)					0,259

* táto vrstva sa do tepelnotechnického posudku nezapočítava, kvôli styku so vzduchom (vrstva nie je uzavretá)

Táto konštrukcia s hrúbkou tepelnej izolácie 100 mm nespĺňa normovú požiadavku na tepelnotechnické parametre:

- normová hodnota tepelného odporu:
 - $R_{norma} = 4,40 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W} > R_{100} = 3,690 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$,
- normová hodnota súčiniteľa prechodu tepla:
 - $U_{norma} = 0,220 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} < U_{100} = 0,259 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.

Aby táto konštrukcia splnila normové požiadavky pre tepelnotechnické parametre, hrúbka tepelnej izolácia by musela byť 130 mm, $R_{130} = 4,769 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ a $U_{130} = 0,210 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.

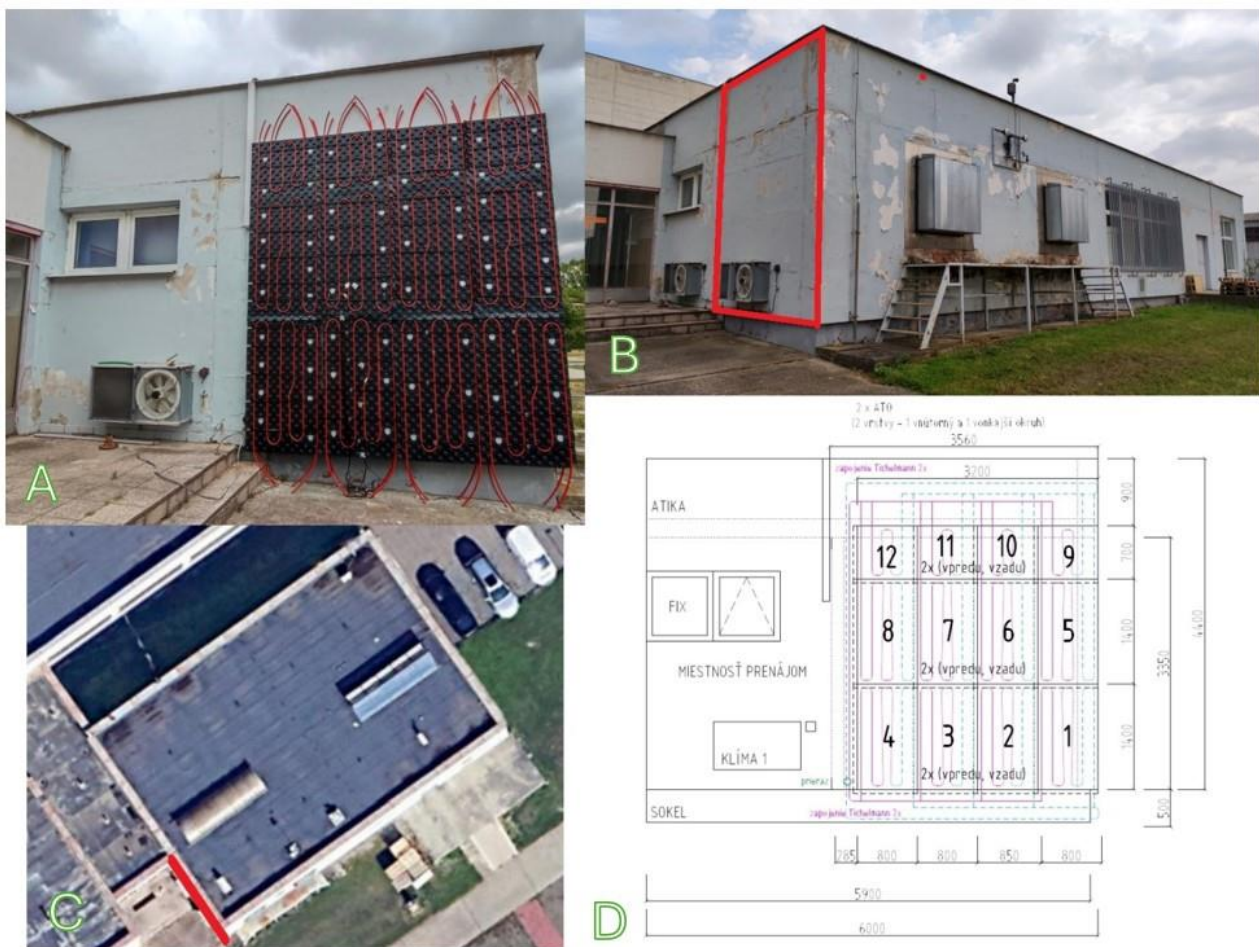


Obrázok 2: Priebeh teplôt vo fragmente obvodovej steny a energetický potenciál ATO [Autor]
i – interiér (interiérová teplota $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), *e* – exteriér (exteriérová teplota $\theta_e = -11 \text{ }^\circ\text{C}$),
 θ_m – teplota v konštrukcii ($^\circ\text{C}$), ATO – aktívna tepelná ochrana, TI – tepelná izolácia, *U* – súčiniteľ
 prechodu tepla ($\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$). Skladba konštrukcie je uvedená v Tabuľke č. 1.

Na Obrázku č.2 sú znázornené priebehy teplôt v konštrukcii, uvádzame energetický potenciál ATO a súčiniteľa prechodu tepla. Ako prvú uvádzame základnú konštrukciu, ktorá je zateplená, ale ATO je vypnuté (oranžová farba). Teplota v tejto konštrukcii je $16,68 \text{ }^\circ\text{C}$, čo prislúcha hrúbke tepelnej izolácii 100 mm a súčiniteľ prechodu tepla $U_{100} = 0,259 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Tento stav je základný stav pre výpočet úspory energie (úspora 0%). Ružovou farbou je uvedený stav, kedy konštrukcia vyhovuje normovým požiadavkám. Ak do aktívnej tepelnej ochrany dodáme teplotu teplonosnej látky $18 \text{ }^\circ\text{C}$, ekvivalentná hrúbka tepelnej izolácie je 190 mm a $U_{190} = 0,152 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, čo je 41 % úspora. To znamená, že ak do ATO privedieme teplonosnú látku s teplotou $18 \text{ }^\circ\text{C}$, ušetríme $190 \text{ mm} - 100 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$ hrúbky tepelnej izolácie.

Podobne sa konštrukcia a parametra správajú, keď dodáme do ATO teplonosnú látku s teplotou 19 °C. Tu ale úspora je viditeľne vyššia, až 74 %. Teplota 19 °C prislúcha hrúbke tepelnej izolácie 460 mm. To znamená, že ak do ATO dodáme teplotu teplonosnej látky 19 °C, ušetríme až 460 mm – 100 mm = 360 mm hrúbky tepelnej izolácie. Pri teplote 20 °C v potrubíach ATO je energeticky vyvážený stav bez tepelných strát z interiéru do exteriéru, t.j. energetický potenciál tepelnej bariéry predstavuje 100 %. Cirkuláciu teplonosnej látky v ATO zabezpečujú obehové čerpadlá. Elektrickú energiu pre ich pohon budú v budúcnosti zabezpečovať fotovoltaické panely inštalované na tejto fasáde a na streche, čím prispievajú k zvýšeniu jej energetického potenciálu.

Objekt na Trnávke je staršia budova, ktorej na fasádu sme aplikovali zateplenie s integrovanými energetickými prvkami, *Obrázok 3*. Obvodová stena je pôvodne z omietnutých o železobetónových panelov hrúbky 400 mm. Strecha je plochá a zhotovená z panelov PZD hrúbky 240 mm, vyrovnávacieho poteru a asfaltových pásov. Podlaha je zhotovená z linolea a betónu hrúbky 100 mm.



Obrázok 3: Juhozápadná fasáda s aplikovanými panelmi ATO [Autor]

Z exteriérovej strany boli pripevnené vyhotovené tepelnoizolačné panely, *Obrázok 3A*. Popis vyhotovenia panelov je v *Kapitole 3*. Na tomto paneli sú upevnené potrubia ATO (vnútorný okruh) a na exteriérovej strane panelu sú potrubia, ktoré budú slúžiť ako pasívne chladenie v letnom období (vonkajší okruh). Panely sú umiestnené na juhozápadnej fasáde, *Obrázok 3B* a *Obrázok 3C*. Jeden takýto základný panel má rozmery 1400 x 800 mm, *Obrázok 3D*.

3. Vývoj a realizácia fasády s aktívnou tepelnou ochranou

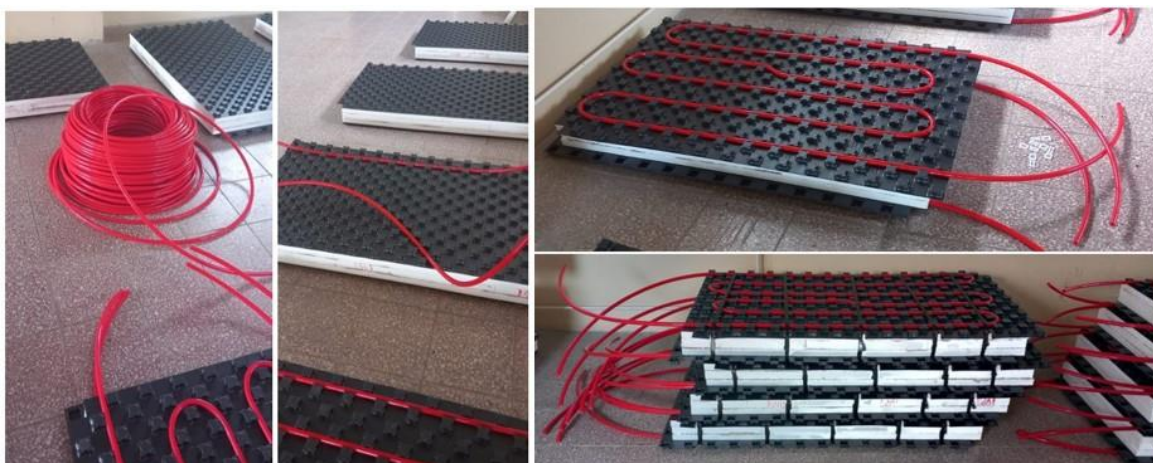
V tejto kapitole popisujeme samotné vyhotovenie panelov a ich aplikáciu na fasádu objektu v areáli Centrálnych laboratóriách STU na Trnávke.

V júli 2024 sme začali pracovať na skladaní panelov. Tieto panely sú vyhotovené zo systémových dosiek Rehau Varionova 30-2, čo je systémová doska pre uchytenie potrubí so zabudovaním tepelnej izolácie EPS hrúbky 30 mm. Na ňu sa naniesla lepiaca stierka 0,5 mm (Obrázok 4A) a prilepil sa tepelnoizolačný panel EPS hrúbky 40 mm (Obrázok 4B). Opäť sa naniesla lepiaca stierka a prilepila (Obrázok 4C) sa druhá systémová doska Varionova 30-2 (Obrázok 4D). Hotové panely sú zobrazené na Obrázku 4E a Obrázku 4F.



Obrázok 4: Vyhotovenie panelov [Autor]

Ďalším krokom bolo podkladanie potrubí z oboch strán panelu do systémových dosiek, Obrázok 5. Dôležité bolo, aby vnútorné a vonkajšie okruhy potrubí lícovali. V opačnom prípade by nebolo možné bezpečné kotvenie panelov na obvodovú stenovú konštrukciu. Potrubia sú použité Rautherm S 17 x 2,0 mm. Osovú vzdialenosť potrubí sme zvolili 150 mm, pričom sme vychádzali z predchádzajúcich parametrických štúdií a počítačových simulácií. Umiestnenie potrubí sme vyhotovovali podľa výkresu, kde bol uvedený postup pokladania panelov a presné umiestnenie potrubí, Obrázok 3D. Potrubia boli následne upevnené páskami každých 200 mm.



Obrázok 5: Inštalácia potrubí [Autor]

Po inštalácii potrubí sa na panely sa inštalovali snímače teploty v počte 8 ks. Pre vnútorný okruh boli umiestnené štyri (horný okruh medzi potrubiami, horný okruh na potrubí, dolný okruh medzi potrubiami a dolný okruh na potrubí). Obdobne boli snímače umiestnené pre vonkajšie okruhy potrubí, *Obrázok 6*.



*Obrázok 6: Umiestnenie snímačov teplôt [Autor]
a) na potrubie, b) medzi potrubiami.*

Následne sa panely pripevnili na juhozápadnú fasádu objektu. Na panely sa na šiestich miestach aplikovala PUR pena, *Obrázok 7A*. Potom sa panel prilepil na fasádu a následne ukotvil kotvami na tepelnú izoláciu, *Obrázok 7B*. Každý panel sa ukotvil šiestimi kotvami tak, aby neboli poškodené potrubia a snímače. Panely boli ukladané od pravého spodného rohu fasády tak, aby sme mohli dodržať prekryvanie sa systémovej dosky krycou fóliou s výstupkami na dvoch stranách panelu, *Obrázok 7C*. Horný okruh panelov sa musel ešte pred umiestnením na fasádu spojiť, lebo sa skladal z jeden a pol klasického panelu, *Obrázok 7D-1* a *Obrázok 7D-2*. Po spojení panelov sa zrealizovala fasáda, *Obrázok 8A* až *Obrázok 8C*.



Obrázok 7: Aplikácia panelov ATO na fasádu objektu [Autor]

Ďalším postupom prác bude zapojenie panelov do rozdeľovačov/zberačov a následné zapojenie celého systému na zdrojov tepla/chladu. Panely ATO musia byť zapojené do systému Tichelmann, *Obrázok 8C*. Nachádzajú sa tu štyri okruhy:

- horný rad panelov, vnútorný okruh ATO,
- horný rad panelov, vonkajší okruh chladenie/predohrev teplej vody,
- dolný rad panelov, vnútorný okruh ATO,
- dolný rad panelov, vonkajší okruh chladenie/predohrev teplej vody.

Okruhy budú napojené na dva rozdeľovače/zberače (vykurovanie a chladenie), *Obrázok 8D*. Zdroje tepla/chladu budú monoblokové tepelné čerpadlo a fotovoltaické panely.



Obrázok 8: Finalizácia fasády objektu s ATO [Autor]

4. Záver

V súčasnosti sa realizujú hlavné rozvody systému a vyhotovuje sa technická miestnosť. V najbližších mesiacoch je naplánované uvedenie systému do prevádzky. Experimentálne merania sa budú realizovať v priebehu zimného obdobia 2024/25. Tieto experimentálne budeme vyhodnocovať a následne porovnávať s počítačovými simuláciami a parametrickými štúdiami[1-6].

Vo fáze realizovania fasády s aktívnou tepelnou ochranou vyplýva:

- aplikáciou aktívnej tepelnej ochrany vieme na tejto fasáde eliminovať hrúbku tepelnej izolácie až o 360 mm (pri teplote ATO 19 °C), čím ušetríme náklady na tepelnú izoláciu,
- aby sme dosiahli normovú požiadavku na súčiniteľ prechodu tepla, hrúbku telenej izolácie vieme eliminovať o 30 mm (pri teplote ATO 17,31 °C),
- systém ATO má vysoký potenciál úspory energie a akumulácie energie,
- aplikáciou ATO získame úsporu energie vzhľadom na skladbu konštrukcie vonkajšej steny,
- teplota v konštrukcii rastie v závislosti od narastajúcej hrúbky tepelnej izolácie,
- súčiniteľ prechodu tepla v konštrukcii sa znižuje v závislosti od narastajúcej hrúbky tepelnej izolácie,
- aktívna tepelná ochrana pri teplote teplonosnej látky 18 °C je postačujúca, ak je teplota vnútorného okolitého vzduchu ($\theta_i = 20$ °C) a θ_e je teplota vonkajšieho okolitého vzduchu ($\theta_e = -11$ °C). Táto teplota teplonosnej látky je ekvivalentom 190 mm telenej izolácie,
- vonkajší okruh potrubí bude aktívny v letnom období a bude slúžiť ako pasívne chladenie, resp. na predohrev teplej vody.

Túto fasádu sme začali realizovať v letnom období 2024. Niektoré dni bola vonkajšia teplota až 35 °C, pričom na priamom slnku to bolo aj takmer 40 °C. Fasáda s ATO je orientovaná na juhozápadnú svetovú stranu. Po aplikácii panelov ATO na fasádu sme zistili, že čierna farba systémovej dosky nie je vhodná. Vhodnejšia by bola svetlá farba, ktorá tak neakumuluje slnečné žiarenie. Taktiež v prvotnej fáze by bolo vhodné fasádu zakryť aspoň geotextíliou, aby sa zabránilo priveľkej tepelnej rozťažnosti potrubí, čo by mohlo potrubia poškodiť a v extrémnych prípadoch by vysoká teplota na priamom slnku mohla potrubia popraskať.

Cieľom realizácie fasády s ATO je výskum funkcie aktívnej tepelnej ochrany v rôznych energetických funkciách. Realizácia takéhoto výskumu má vysoký potenciál[1-6]. Okrem plánovaných experimentálnych meraní, bude takéto laboratórium aktívnej tepelnej ochrany vhodné na ďalší výskum a aj na výuku študentov.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantu **VEGA 1/0118/23** a **VEGA 1/0229/21**.

Literatúra

[1] Mučková, V., Kalús, D., Koudelková, D., Kurčová, M., Straková, Z., Sokol, M., Ingeli R., Šťastný P. & Janík, P. (2023). Contribution to Active Thermal Protection Research—Part 1 Analysis of Energy Functions by Parametric Study. *Energies*, 16(11), 4391

[2] Mučková, V., Kalús, D., Koudelková, D., Kurčová, M., Straková, Z., Sokol, M., Ingeli R. & Šťastný, P. (2023). Analysis of the Dynamic Thermal Barrier in Building Envelopes. *Coatings*, 13(3), 648.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Yang, Y., Chen, S., Zhang, J., Zhang, Z., Li, S., Chen, K., & Xiao, X. (2024, September). Thermal performances and invisible thermal barrier formation mechanism of arc-shaped metal-fin-enhanced thermally activated building envelopes with directional heat charging feature. In *Building Simulation* (Vol. 17, No. 9, pp. 1461-1489). Tsinghua University Press.

[6] Muhič, S., Čikić, A., & Perić, M. (2024, June). Building with an Active Thermal Protection in Combination with High Share of Renewable Energy Sources Use. In *2024 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)* (pp. 1-4). IEEE.

Martin Sokol¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, ročník: 4

EXPERIMENTÁLNE MERANIE ODPAROVANIA VODY Z VODNÉHO UZÁVERU ZÁPACHOVEJ UZÁVIERKY S VYUŽITÍM 3D TLAČE

EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF WATER EVAPORATION FROM WATER SEAL OF ODOR TRAP USING 3D PRINTING

Abstract

The design of foul water stacks with direct ventilation in high-rise buildings is accompanied by hydraulic assessment, based on calculating the pressure resistance of the odor trap with the smallest water seal height. One of the important factors in this calculation is also considering the evaporation of water from the trap, which significantly reduces its pressure resistance. This article deals with the experimental measurement of water evaporation from a trap in a high-rise building and a family house, including a detailed analysis of water replenishment in the trap due to the condensation of water vapor.

Kľúčové slová

zápachové uzávierky, odparovanie vody, kanalizácia v budove, 3D tlač

1. Úvod

Odparovanie vody zo zápachovej uzávierky ovplyvňuje vo veľkej miere jej tlakovú odolnosť a pri návrhu odpadových potrubí s priamym vetraním vo vysokých budovách je nutné ho zohľadniť. V 80 rokoch minulého storočia, kedy sa táto problematika intenzívne riešila bol stanovený priemerný denný pokles vody v zápachovej uzávierke pri teplote vnútorného vzduchu 20 °C na hodnotu $h_0 = 1,0$ mm/deň. Táto hodnota sa však neskôr upravila na hodnotu $h_0 = 0,5$ mm/deň z dvoch dôvodov:

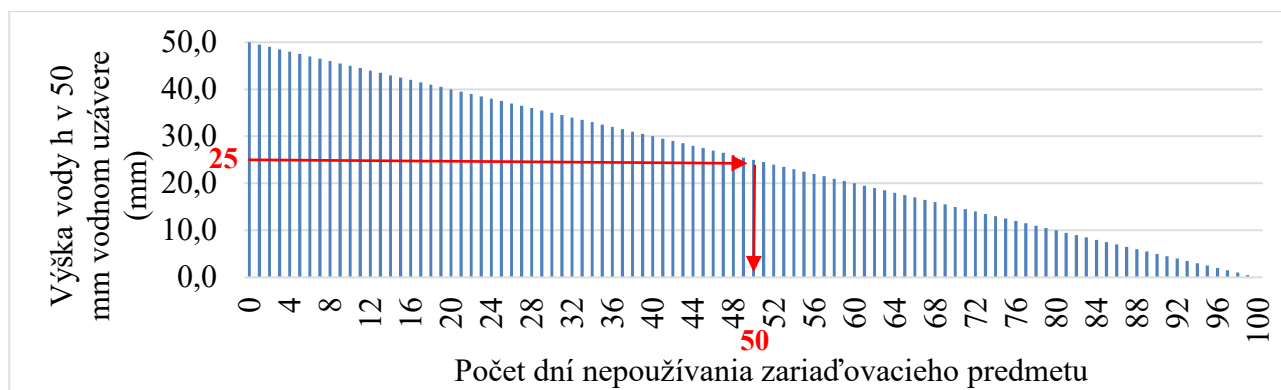
- nebola zohľadnená kondenzácia vodnej pary z interiéru na vnútornom povrchu zápachovej uzávierky, ktorá sa následne vracia späť a dopĺňa jej hladinu ($h_{zisk,zu}$),
- nebolo zohľadnené pôsobenie plynov z pripájacieho potrubia s veľkým obsahom vodnej pary, ktoré kondenzujú v blízkosti zápachovej uzávierky a dopĺňajú jej hladinu ($h_{zisk,ks}$) [1, 2, 3].

Cieľom experimentálneho merania bolo overiť priemerný denný pokles vody v zápachovej uzávierke vplyvom odparovania h_0 (mm/deň) z dôvodu, že zaužívaná hodnota už nemusí byť aktuálna. V súčasnej dobe sú vnútorné priestory prekurované a priemerná teplota priestoru je väčšia ako 25 °C, čo jednoznačne ovplyvňuje množstvo odparovanej vody. Taktiež sa zmenil aj počet obyvateľov miest, čo ovplyvňuje množstvo vodnej pary v kanalizačných systémoch (verejnej kanalizácie a kanalizácie v budove), ktorá svojou kondenzáciou dopĺňa vodu v zápachovej uzávierke. Zmenili sa aj zariadenia, ktoré majú spotrebu vody menšiu. Rovnako je nutné spomenúť, že experimentálne merania sa v 80 rokoch uskutočňovali v Rusku, kde sú iné okrajové podmienky a na našom území sa táto hodnota nikdy neoverovala. Z tohto dôvodu je nutné konštatovať, že je vhodné zaužívanú hodnotu experimentálne overiť pre aktuálne podmienky. Experimentálne meranie súčasne prebiehalo na dvoch miestach v dvoch typoch budov a to v rodinnom dome v Bratislave v mestskej časti Dúbravka a výškovej budove SvF, STU tiež v Bratislave v Starom Meste.

¹ Martin Sokol, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra Technických zariadení budov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Matematická analýza poklesu vody v zápachovej uzávierke vplyvom odparovania

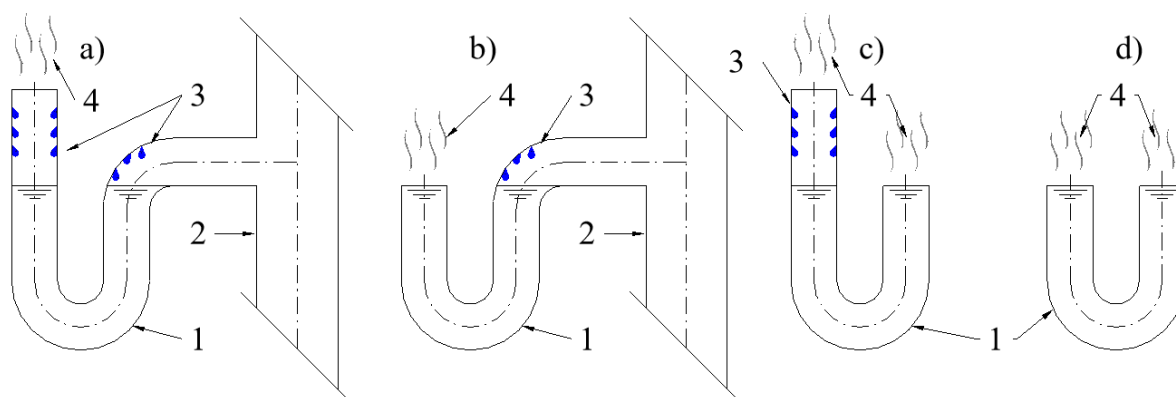
Na Obr. 1 je znázornený pokles vody v zápachovej uzávierke vplyvom odparovania počas nepoužívania zariadenia. Z grafu vytvoreného na základe starších výskumov je možné konštatovať, že pri odparovaní vody 0,5 mm/deň a predpokladu, že podtlak nevysaje žiadnu vodu, zápachová uzávierka začne strácať svoju tlakovú odolnosť po 50 dňoch od nepoužitia zariadenia. Po 100 dňoch stráca svoju funkciu brániť šíreniu vírusov a zápachu z kanalizačného systému budovy do interiéru [1, 2].



Obr. 1: Pokles vody v zápachovej uzávierke vplyvom odparovania pri zohľadnení $h_0 = 0,5 \text{ mm/deň}$
[Autor]

Aby bolo možné výsledky experimentu dobre matematicky rozanalyzovať, bolo potrebné vyhotoviť 4 nasledovné vzorky zápachových uzávierok:

- **Vzorka V1** – umožňovala kondenzáciu vodných pár z kanalizačného systému budovy v zápachovej uzávierke a zároveň aj kondenzáciu vodnej pary z interiéru na vnútornom povrchu zápachovej uzávierky (pripojená na kanalizáciu), Obr. 2a,
- **Vzorka V2** – umožňovala kondenzáciu vodných pár z kanalizačného systému budovy v zápachovej uzávierke (pripojená na kanalizáciu), Obr. 2b,
- **Vzorka V3** – umožňovala kondenzáciu vodnej pary z interiéru na vnútornom povrchu zápachovej uzávierky (nepripojená na kanalizáciu), Obr. 2c,
- **Vzorka V4** – neumožňovala žiadne zvyšovanie hladiny vody v zápachovej uzávierke (nepripojená na kanalizáciu), Obr. 2d.



Obr. 2: Teoretická analýza kondenzácie vodných pár a odparovania vody z uvažovaných vzoriek experimentálnych zápachových uzávierok [Autor]
a) vzorka V1, b) vzorka V2, c) vzorka V3, d) vzorka V4

Tým, že takéto experimentálne meranie s takouto podrobnou analýzou ešte do dnešnej doby nebolo uskutočnené, museli byť vymyslené pre toto meranie aj príslušné vzorce. Jedná sa o vzorce, ktoré

jednotlivé výsledky odparovania daných vzoriek porovnávajú a tým pádom je možné presne zistiť, koľko vody sa odparilo, koľko sa vody doplnilo kondenzáciou na vnútornom povrchu a koľko vody sa doplnilo kondenzáciou vodných pár. Dopĺňovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár z kanalizačného systému v blízkosti zápachovej uzávierky $h_{zisk,ks}$ (mm) sa vypočíta podľa vzorca:

$$h_{zisk,ks} = h_{pokles,V4} - h_{pokles,V2} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

kde:

- $h_{pokles,V4}$ – pokles vody v zápachovej uzávierke V4 vplyvom odparovania (mm),
 $h_{pokles,V2}$ – pokles vody v zápachovej uzávierke V2 vplyvom odparovania (mm).

Dopĺňovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár na vnútornom povrchu zápachovej uzávierky $h_{zisk,zu}$ (mm) sa vypočíta podľa vzorca:

$$h_{zisk,zu} = h_{pokles,V4} - h_{pokles,V3} \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

kde:

- $h_{pokles,V4}$ – pokles vody v zápachovej uzávierke V4 vplyvom odparovania (mm),
 $h_{pokles,V3}$ – pokles vody v zápachovej uzávierke V3 vplyvom odparovania (mm).

Overiť experimentálne meranie je možné pomocou zápachovej uzávierky V1, V4 a malo by platiť nasledovné:

$$h_{pokles,V4} = h_{pokles,V1} + h_{zisk,ks} + h_{zisk,zu} \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

kde:

- $h_{pokles,V4}$ – pokles vody v zápachovej uzávierke V4 vplyvom odparovania (mm),
 $h_{pokles,V1}$ – pokles vody v zápachovej uzávierke V1 vplyvom odparovania (mm),
 $h_{zisk,ks}$ – dopĺňovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár z kanalizačného systému v blízkosti zápachovej uzávierky (mm),
 $h_{zisk,zu}$ – dopĺňovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár na vnútornom povrchu zápachovej uzávierky (mm).

Overenie výpočtu by malo vyjsť s čo najmenšou odchýlkou, no treba rátať s tým, že napr. v zápachovej uzávierke V4 a V2 po určitom čase začína kondenzovať voda na vnútornom povrchu a tým pádom aj tam vzniká drobný zisk $h_{zisk,zu}$ (mm). Aby sa dalo vyhnúť tomuto zisku, musela by sa každý deň merania zápachová uzávierka zrezať o daný pokles vody.

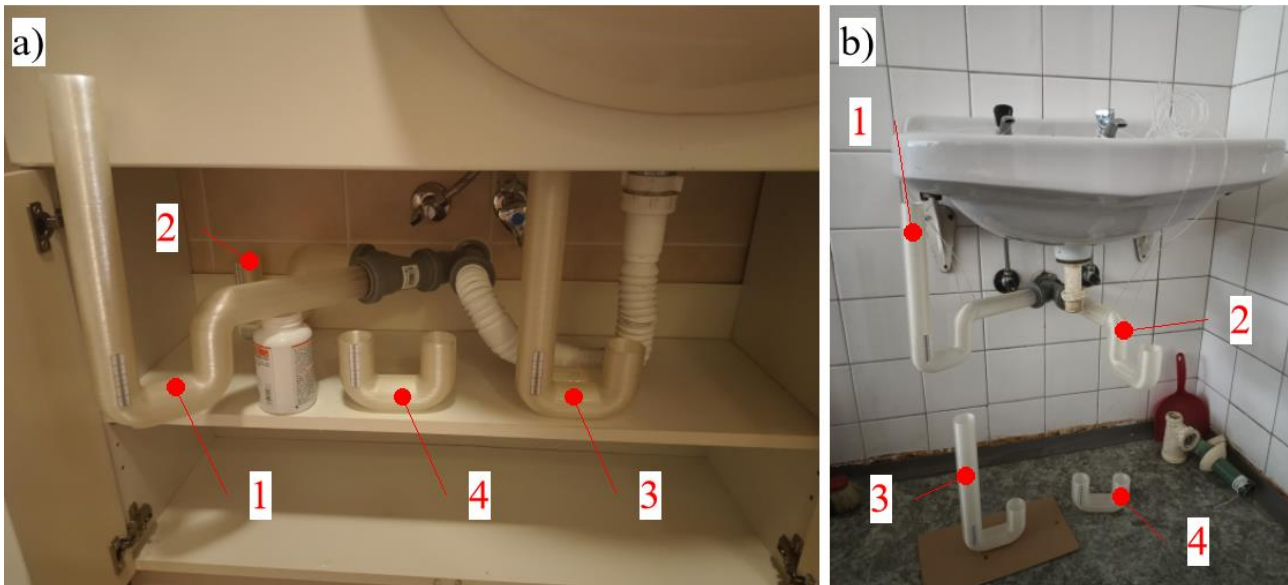
3. Metodika experimentálneho merania a použité vzorky

Na meranie odparovania vody zo zápachovej uzávierky sa nevzťahuje žiadna súčasná norma [5], takže nie je predpísaná žiadna metodika merania. Pre toto experimentálne meranie bola stanovená nasledovná metodika merania:

1. Zápachové uzávierky sa pripojili na kanalizačný systém a umiestnili na stanovené miesto, Obr. 3. Všetky spoje museli byť vodotesné a zodpovedať norme EN 476 [6].
2. Zápachové uzávierky pripojené na kanalizačné potrubie sa ponechali pripojené 2 dni v prevádzke, aby sa ustálila hladina vody v zápachovej uzávierke vplyvom hydraulických pomerov. Po tejto dobe už podtlak v odpadovom potrubí neodsáva vodu zo zápachovej uzávierky, maximálne ju rozkolíše.
3. Po uplynutí 2 dní od pripojenia zápachových uzávierok na kanalizačný systém sa meranie začalo. Hladina vody vo všetkých zápachových uzávierkach sa odčítavala každých 24 hodín v tú istú hodinu. Pokles vody v zápachovej uzávierke počas sviatkov a víkendov sa vypočítal ako priemerná hodnota z nameraného poklesu vody po uplynutí doby, kedy nebolo možné pokles vody odčítať.

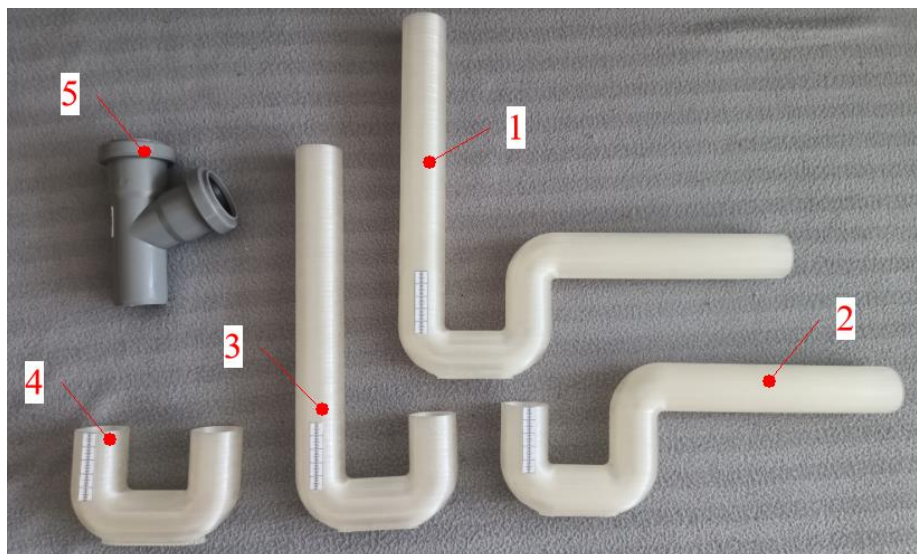
4. Meranie prebiehalo 14 dní, čo predstavuje dlhšiu dovolenku, počas ktorej nebudú zariadené predmety používané. Celú dĺžku merania sa zaznamenáva relatívna vlhkosť vnútorného vzduchu a teplota vnútorného vzduchu v miestnosti podľa ISO 7730 [4].

Testované zápachové uzávierky V1 a V2 sa pripojili na existujúci kanalizačný systém budovy v mieste umývadla a zápachové uzávierky V3 a V4 sa umiestnili pod umývadlo, Obr. 3.



Obr. 3: Umiestnenie testovaných zápachových uzávierok [Autor]

a) v kúpeľni rodinného domu, b) vo výškovej budove SvF, STU, 1 – zápachová uzávierka V1, 2 – zápachová uzávierka V2, 3 – zápachová uzávierka V3, 4 – zápachová uzávierka V4



Obr. 4: Vzorky zápachových uzávierok použité pre experimentálne meranie [Autor]

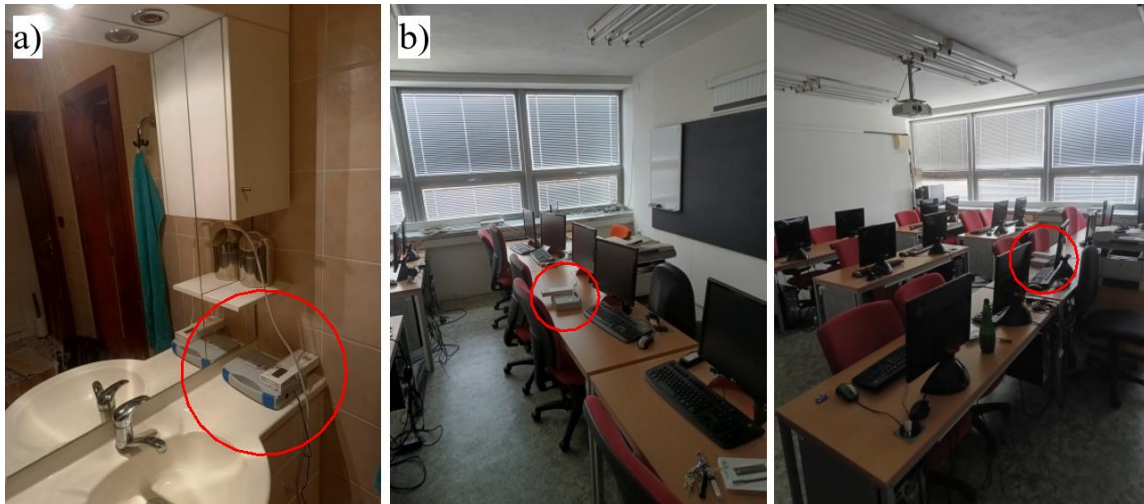
1 – zápachová uzávierka V1, 2 – zápachová uzávierka V2, 3 – zápachová uzávierka V3, 4 – zápachová uzávierka V4, 5 – T-kus

Vzorky sa museli vytlačiť na 3D tlačiarňi, pretože bolo potrebné, aby boli transparentné a v 4 experimentálnych vyhotoveniach, Obr. 4. Transparentné zápachové uzávierky sa nevyrábajú a rovnako aj nejaká úprava existujúcich zápachových uzávierok na trhu by bola skoro nereálna. Vytlačili sa z materiálu PLA (polylactic acid – kyselina polymliečna), čo je biologicky odbúrateľný materiál z kukuričného alebo zemiakového škrobu, prípadne cukrovej trstiny. Menovitá svetlosť

zápachových uzávierok bola DN 40, maximálna výška vody $h_{zu,tot}$ bola 50 mm a boli vybavené stupnicou pre odčítanie poklesu hladiny vody.

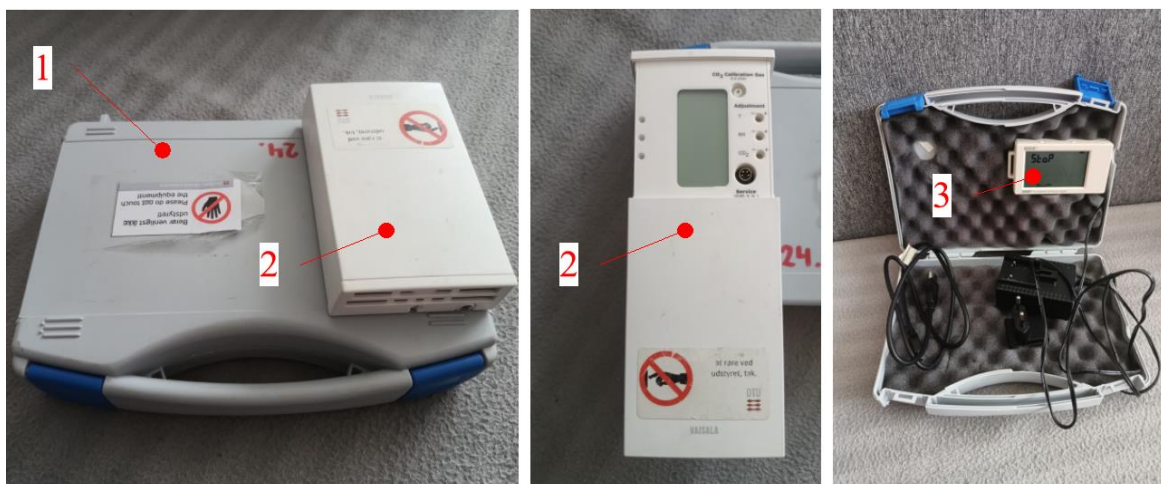
Experimentálne meranie súčasne prebiehalo na dvoch miestach:

- rodinný dom s 2.NP – Bratislava, Dúbravka, okrajová časť mesta, kúpeľňa, Obr. 5a,
- výšková budova SvF, STU s 23.NP – Bratislava, Staré Mesto, centrum mesta, učebňa na 16. NP, Obr. 5b.



Obr. 5: Umiestnenie meracích prístrojov [Autor]
a) v kúpeľni rodinného domu, b) vo výškovej budove SVF, STU

Relatívna vlhkosť vnútorného vzduchu φ_i (%) a teplota vnútorného vzduchu θ_i (°C) sa merala pomocou senzora Vaisala typ GMW90 a namerané údaje boli ukladané na záznamník údajov HOBO typ 4, Obr. 6. Rozsah prístroja pri meraní teploty vzduchu je od - 5 do + 55 °C s presnosťou pri teplote 10 °C až 30 °C $\pm 0,6$ °C. Relatívnu vlhkosť vzduchu dokáže prístroj merať v rozsahu od 0 % do 95 % s presnosťou $\pm 2,5$ % pri 0 – 60 %, $\pm 3,0$ % pri 60 – 80 %, $\pm 4,0$ % pri 80 – 95 %.

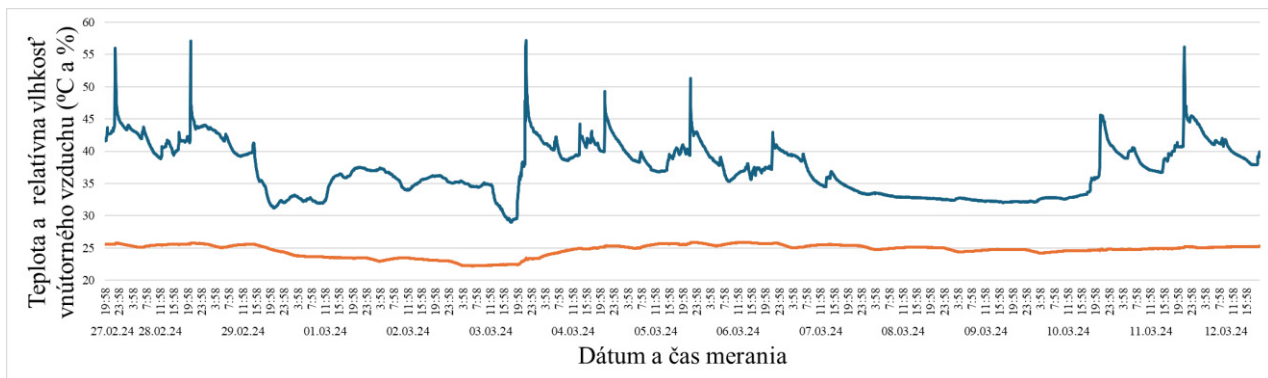


Obr. 6: Senzor značky Vaisala umiestnený na obale záznamníka údajov HOBO [Autor]
1 – ochranný obal prístroja, 2 – senzor Vaisala typ GMW90, 3 – záznamník údajov HOBO typ 4

4. Výsledok experimentálneho merania

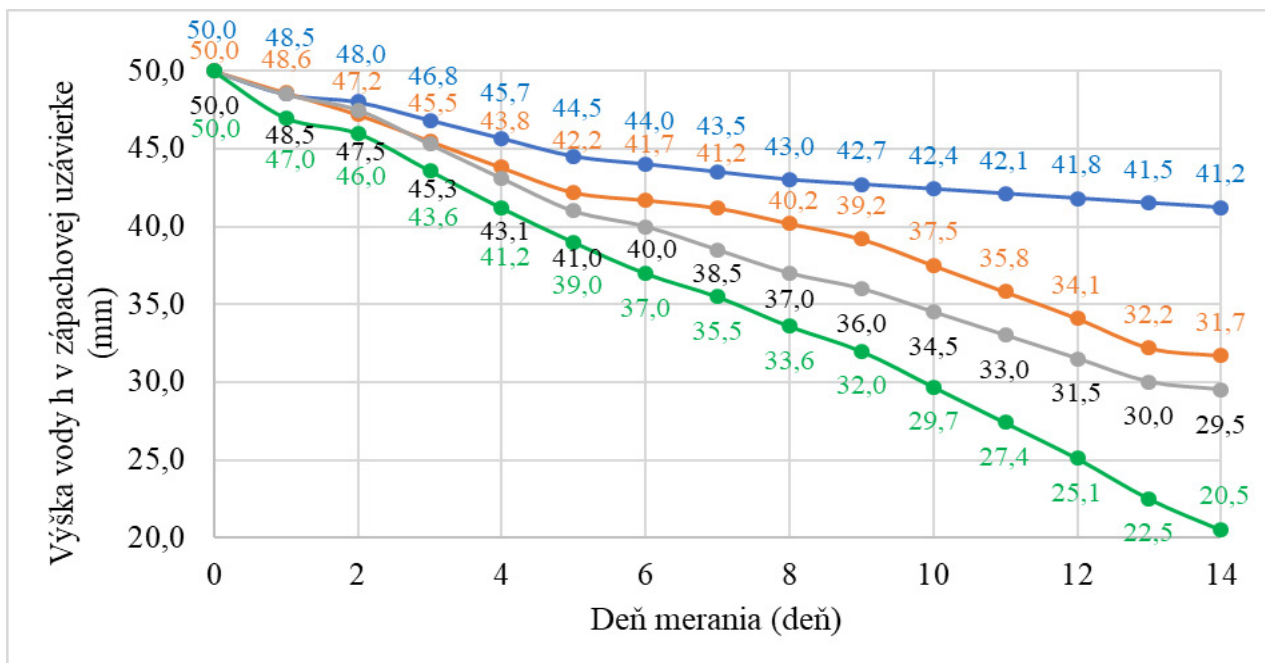
Výsledky experimentálneho merania poklesu vody v zápachovej uzávierke uskutočneného v rodinnom dome sú znázornené na Obr. 8. Počas doby merania v kúpeľni RD bola priemerná

relatívna vlhkosť vnútorného vzduchu $\varphi_i = 37,25 \%$ a priemerná teplota vnútorného vzduchu $\theta_i = 24,66 \text{ }^\circ\text{C}$, Obr. 7.



Obr. 7: Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v kúpeľni RD [Autor]

■ relatívna vlhkosť vnútorného vzduchu φ_i (%), ■ teplota vnútorného vzduchu θ_i ($^\circ\text{C}$)

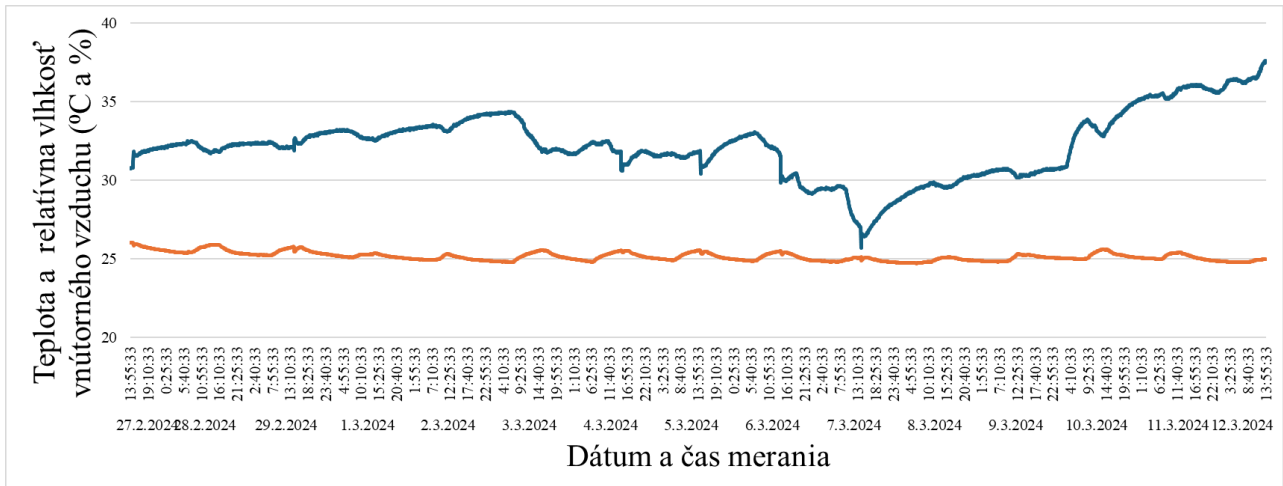


Obr. 8: Pokles vody vplyvom odparovania v zápachových uzávierkach V1 – V4 umiestnených v počítačovej učebni výškovej budovy [Autor]

■ vzorka V1, ■ vzorka V2, ■ vzorka V3, ■ vzorka V4

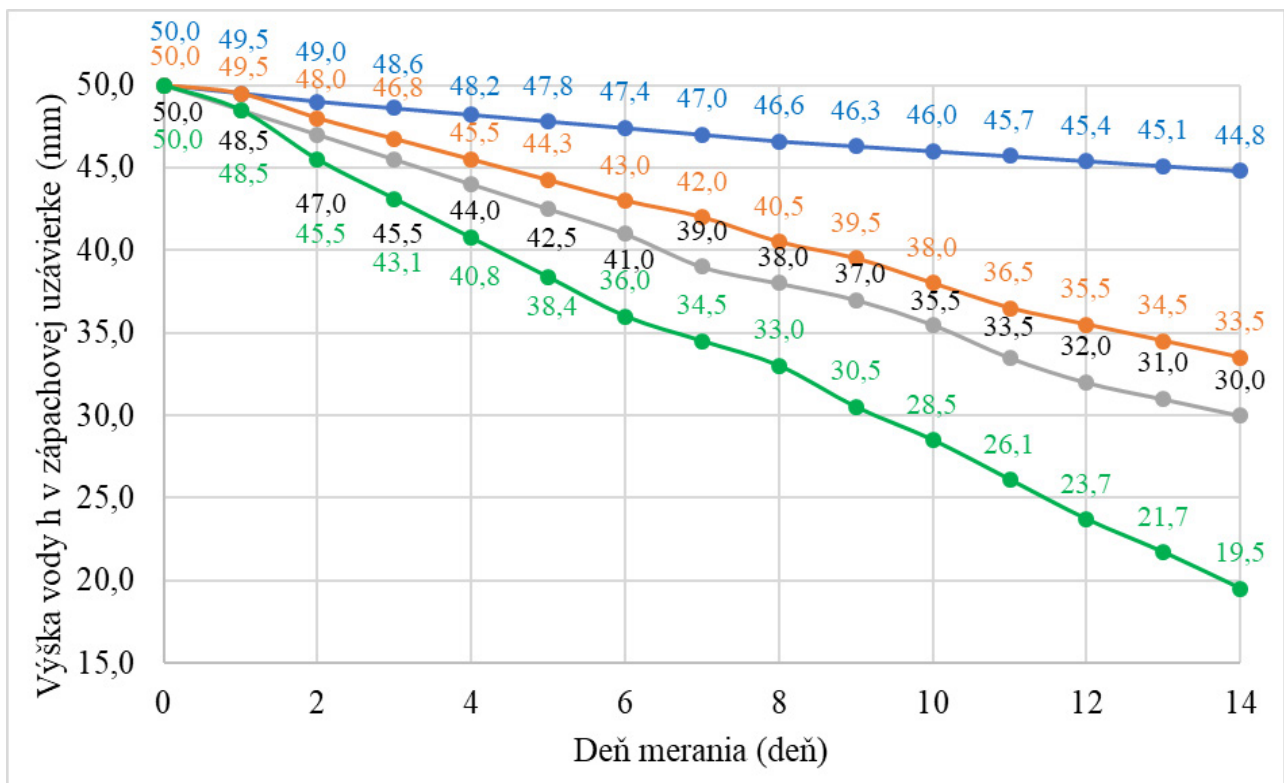
Obr. 8 znázorňuje pokles vody v zápachových uzávierkach vplyvom odparovania, ktoré boli umiestnené v kúpeľni RD. Priemerný pokles vody v zápachovej uzávierke V1 = 0,63 mm/deň, V2 = 1,31 mm/deň, V3 = 1,46 mm/deň a V4 = 2,11 mm/deň. Priemerné doplnovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár z kanalizačného systému v blízkosti zápachovej uzávierky bolo $h_{zisk,ks} = 0,80 \text{ mm/deň}$. Priemerné doplnovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár na vnútornom povrchu zápachovej uzávierky bolo $h_{zisk,zu} = 0,64 \text{ mm/deň}$. Priemerná odchýlka merania bola 0,036 mm/deň.

Výsledky experimentálneho merania poklesu vody v zápachovej uzávierke uskutočneného v rodinnom dome sú znázornené na Obr. 10. Počas doby merania v počítačovej učebni vo výškovej budove bola priemerná relatívna vlhkosť vnútorného vzduchu $\varphi_i = 32,20 \%$ a priemerná teplota vnútorného vzduchu $\theta_i = 25,13 \text{ }^\circ\text{C}$, Obr. 9.



Obr. 9: Priebeh teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v učebni výškovej budovy [Autor]

■ relatívna vlhkosť vnútorného vzduchu ϕ_i (%), ■ teplota vnútorného vzduchu θ_i (°C)



Obr. 10: Pokles vody vplyvom odparovania v zápachových uzávierkach V1 – V4 umiestnených v počítačovej učebni výškovej budovy [Autor]

■ vzorka V1, ■ vzorka V2, ■ vzorka V3, ■ vzorka V4

Počítačová učebňa bola počas doby merania minimálne využívaná, čo je možné vidieť aj z nameraných údajov teploty a vlhkosti vnútorného vzduchu. Experimentálne meranie to však vôbec neovplyvnilo, keďže priemerná teplota aj vlhkosť vnútorného vzduchu bola v optimálnych hodnotách. Priemerný pokles vody v zápachovej uzávierke V1 = 0,37 mm/deň, V2 = 1,16 mm/deň, V3 = 1,43 mm/deň a V4 = 2,18 mm/deň. Priemerné doplnovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár z kanalizačného systému v blízkosti zápachovej uzávierky bolo $h_{zisk,ks} = 1,01$ mm/deň. Priemerné doplnovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár na vnútornom povrchu zápachovej uzávierky bolo $h_{zisk,zu} = 0,75$ mm/deň. Priemerná odchýlka merania bola 0,044 mm/deň.

5. Záver

Odparovanie vody zo zápachovej uzávierky tvorí podstatnú časť výpočtu ich tlakovej odolnosti, ktorá zohráva dôležitú úlohu pri návrhu odpadových potrubí s priamym vetraním vo vysokých budovách. Z experimentálnych meraní môžeme vidieť (Tab. 1), že vnútorné priestory budov sú prekurované, najmä počítačová učebňa SvF, čo pre zápachové uzávierky predstavuje vyššie hodnoty odparovania vody. Z nameraných údajov môžeme vidieť, že lokalita umiestnenia rodinného domu a aj objemovo menší kanalizačný systém budovy ovplyvnili doplnovanie vody vplyvom kondenzácie vodných pár z kanalizačného systému budovy $h_{zisk,ks}$. Aj keď bola priemerná teplota vnútorného vzduchu v priestore počítačovej učebne výškovej budovy vyššia, dochádzalo v tomto priestore k väčšiemu doplnovaniu vody vplyvom kondenzácie vodných pár na vnútornom povrchu zápachovej uzávierky. Pravdepodobná príčina tohto javu bola z dôvodu, že v rodinnom dome bola zabezpečená lepšia výmena vzduchu v priestore.

Tab. 1: Zhrnutie nameraných údajov experimentálneho merania [Autor]

Typ budovy	Lokalita	Priemerná vlhkosť vnútorného vzduchu ϕ_i (%)	Priemerná teplota vnútorného vzduchu θ_i (°C)	Priemerné doplnovanie vody $h_{zisk,ks}$ * (mm/deň)	Priemerné doplnovanie vody $h_{zisk,zu}$ ** (mm/deň)	Priemerná odchýlka merania (mm/deň)
Rodinný dom	Dúbravka (odľahlejšia časť)	37,25	24,66	0,80	0,64	0,036
Výšková budova	Bratislava – Staré Mesto (centrum)	32,2	25,13	1,01	0,75	0,044

* kondenzácia vodných pár z kanalizačného systému budovy v zápachovej uzávierke

** kondenzácia vodnej pary z interiéru v zápachovej uzávierke.

Na základe experimentálneho merania je možné konštatovať:

- **zohľadnenie odparovania vody 0,5 mm/deň pri výpočte tlakovej odolnosti zápachovej uzávierky pre vysoké budovy umiestnené v centrách miest sa javí ako bezpečná hodnota a na základe experimentálneho merania bola táto hodnota približne 0,4 mm/deň,**
- **pri budovách s nižším počtom podlaží, umiestnených v odľahlejších častiach mesta sa odporúča použiť hodnotu odparovania vody zo zápachovej uzávierky 0,6 - 0,7 mm/deň, z dôvodu menšieho objemového prietoku splaškovej odpadovej vody v kanalizácii.**

Podakovanie

Príspevok bol podporovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantov VEGA 1/0118/23.

Literatúra

- [1] VALÁŠEK, J. Vnútorná kanalizácia. Komentár k ČSN 73 6760. Dimenzovanie potrubia vnútornej kanalizácie. Vydavateľstvá úradú pro normalizaci a měření, 1986. ISBN 59-313-83.
- [2] VALÁŠEK, J. Vodovody a kanalizácia vo vysokých budovách. Bratislava: Alfa, 1982. ISBN 63-021-82.
- [3] VRÁNA, J. Vnitřní kanalizace ve vysokých budovách. [online]. 2004, [cit. 2024-010-04]. Dostupné na internete: <https://voda.tzb-info.cz/vyskove-budovy/2029-vnitri-kanalizace-ve-vysokych-budovach>
- [4] ISO 7730 - Ergonómia tepelného prostredia — Analytické stanovenie a interpretácia tepelnej pohody pomocou výpočtu indexov PMV a PPD a miestnych kritérií tepelnej pohody, 2005.
- [5] STN EN 12056 - Gravitačné kanalizačné systémy vnútri budov, 2002.
- [6] STN EN 476 - Všeobecné požiadavky na súčasti používané na kanalizačné potrubia a stoky, 2022.

*Tomáš Strenk*¹

Teória a technika prostredia budov, 4. ročník

METODIKA MERANIA VNÚTORNÝCH PRIESTOROV OBYTNÝCH BUDOV POMOCOU LOKÁLNYCH VZDUCHOTECHNICKÝCH JEDNOTIEK

METHODOLOGY FOR MEASURING INDOOR SPACES OF RESIDENTIAL BUILDINGS BY LOCAL AIR HANDLING UNITS

Abstract

The article focuses on the planned evaluation of the efficiency and impact of decentralized ventilation of indoor spaces in residential buildings using local ventilation units. It analyses the advantages and disadvantages of this type of ventilation, with an emphasis on the penetration of external noise through open ventilation units, which will be experimentally measured under laboratory conditions. It also discusses the issue of cold air infiltration when the ventilation system is turned off during the winter season. The research will include a comparison of the effectiveness of mechanical and natural ventilation based on air age measurements and an analysis of the thermal-humidity microclimate in a reference room. The results will provide a comprehensive view of the acoustic, thermal, and humidity parameters of ventilation using local units.

Kľúčové slová

kvalita vnútorného prostredia; koncentrácia oxidu uhličitého; vek vzduchu; relatívna vlhkosť vzduchu; teplota vzduchu; tepelný most; akustická pohoda

1. Úvod

Vetranie vnútorných priestorov pomocou lokálnych (stenových) vzduchotechnických jednotiek je aktuálne veľmi často diskutovaná téma. Tieto vzduchotechnické jednotky sa často navrhujú ako náhrada za plnohodnotnú centrálnu vzduchotechnickú sústavu a taktiež za účelom zníženia tepelných strát vetraním vo výpočtoch energetickej hospodárnosti budovy, vďaka čomu posudzovaný objekt ľahšie dosiahne energetickú triedu požadovanú pre budovy s takmer nulovou potrebou energie. Diskutabilné ostáva, či je vetranie lokálnymi stenovými vetracími jednotkami v porovnaní s prirodzeným vetraním oknami dostatočne účinné a aké sú výhody a nevýhody pri použití tohto typu vetrania.

Príspevok sa zameriava na analýzu núteného vetrania lokálnymi vzduchotechnickými jednotkami, venuje sa diskusii o výhodách a nevýhodách použitia tohto typu vetrania a metodike pripravovaných meraní na overenie technických parametrov vzduchotechnických jednotiek deklarovaných výrobcom, ako aj ďalšími meraniami na porovnanie tepelno-technických parametrov vnútorného vzduchu pri použití prirodzeného a núteného spôsobu vetrania.

Na meranie vyššie uvedených parametrov budú použité konkrétne výrobky a merania budú prebiehať v laboratórnych priestoroch Stavebnej fakulty v Bratislave a v referenčnej miestnosti situovanej v laboratórnych priestoroch STU Bratislava – Trnávka, v ktorej bude inštalovaná tá istá vetracia jednotka.

¹ Autori: Ing. Tomáš Strenk, Stavebná fakulta STU Bratislava, Katedra TZB, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Legislatívne požiadavky na vnútorné prostredie obytných budov

Parametre, ktorými sa definuje tepelno - vlhkosťná pohoda vnútorných priestorov, sú predmetom tohto výskumu. Konkrétne sa jedná o teplotu vnútorného vzduchu, relatívnu vlhkosť vnútorného vzduchu, koncentráciu oxidu uhličitého, hladinu akustického hluku a rýchlosť prúdenia vzduchu v pobytovej oblasti človeka.

Požiadavky pre parametre vnútorného prostredia obytných budov vychádzajú z viacerých národných a európskych legislatívnych predpisov. Pre tento prípad sú podstatné Vyhláška MZ SR č. 124/2017 Z. z. [1], ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška MZ SR č. 259/2008 Z. z. [2] 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. [3]; odporúčané technické normy STN EN 16798-1:2019 [4] a STN 73 0532-2:2024 [5]. Súhrn požiadaviek na vnútorné prostredie obytných budov je uvedený v Tab. 1.

Tab. 1 Súhrn požiadaviek na parametre vnútorného prostredia obytných budov [1], [2], [3], [4], [5]

Trieda práce / Kategória obytnej budovy	Optimálna operatívna teplota θ_o pre chladné obdobie (°C)	Prípustná relatívna vlhkosť vzduchu φ (%)	Prípustná koncentrácia CO ₂ pre spálne (ppm) (nad koncentráciu v exteriéri)	Ekvivalentná hladina A zvuku (dB)		Maximálna rýchlosť prúdenia vzduchu v pobytovej oblasti človeka (m/s)
				Denný režim	Nočný režim	
0 / III	22 až 26	30 až 70	950	40	30	0,1 – 0,25

3. Decentrálne vetranie lokálnymi vzduchotechnickými jednotkami

Vetracia sústava je pri tomto spôsobe vetrania tvorená sústavou jednotkových vetracích zariadení so spätným ziskom tepla inštalovaných cez obvodovú stenu priamo vo vetranej miestnosti. Existujú dva typy decentrálnych stenových jednotiek: s permanentným ventilátorom (so zabudovaným krížovým protiprúdovým výmenníkom tepla a dvomi nepretržite pracujúcimi ventilátormi), a s kyvadlovým ventilátorom (so zabudovaným keramickým výmenníkom tepla a ventilátorom, ktorý mení smer prúdenia vzduchu do a z interiéru približne každých 70 sekúnd). Tento systém vetrania zabezpečuje potrebnú minimálnu výmenu vzduchu. Vďaka spätnému získavaniu tepla z odvádzaného vzduchu a jeho odovzdávaniu studenému privádzanému vonkajšiemu vzduchu je potrebné menej energie na vykurovanie interiéru ako pri zabezpečovaní výmeny vzduchu prirodzeným vetraním oknami [6].

Výhody systému:

- nízka obstarávacia cena,
- jednoduchá montáž vhodná pre obnovované budovy,
- jednoduchá regulácia,
- vhodná alternatíva k centrálnej vzduchotechnickej sústave.

Nevýhody systému:

- prestup hluku z exteriéru do interiéru,
- hlučnosť ventilátora vetracej jednotky,
- možný vznik tepelného mostu v mieste otvoru v obvodovej stene.

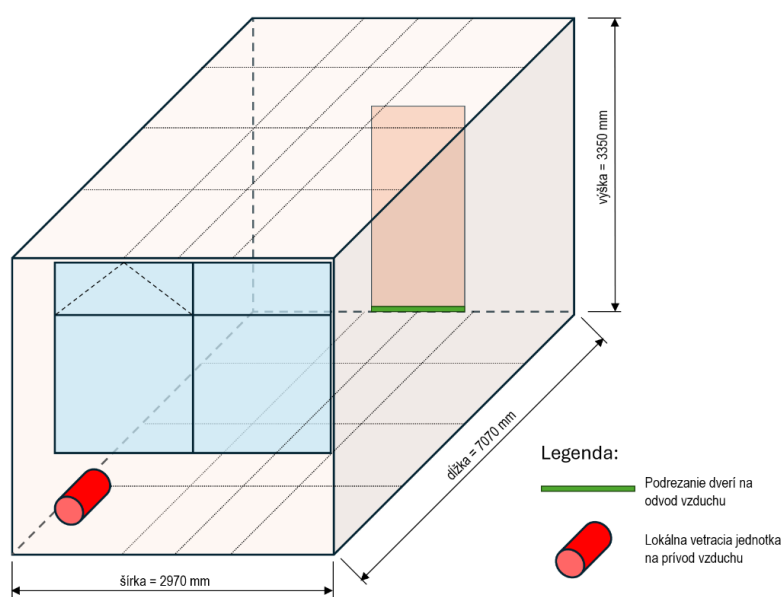
Nevýhody systému decentrálného spôsobu núteného vetrania uvedené vyššie sú podkladom na vykonanie experimentálnych meraní, na základe ktorých bude možné nevýhody potvrdiť alebo

vyvrátiť. Na experimentálne merania bude použitá decentrálna vetracia jednotka so spätným ziskom tepla od spoločnosti Inventer, typ IV-Smart+ [7].

4. Experimentálne merania

4.1 Miesto merania

Predmetná referenčná miestnosť pre experimentálne merania je situovaná v budove laboratórnych priestorov STU v Bratislave – Trnávke. Na obrázku 1 je znázornený schematický model referenčnej miestnosti. Merania hladiny zvuku prechádzajúceho cez vetracie zariadenie inštalované vo fasáde bude merané v laboratórnych priestoroch Katedry KPS, priamo na Stavebnej fakulte STU v Bratislave.



Obr. 1 Schéma referenčnej meranej miestnosti

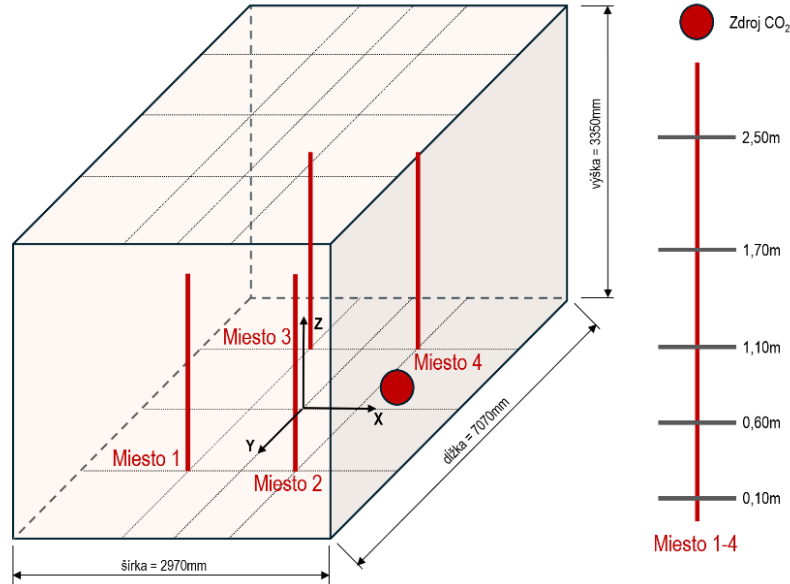
4.2 Metodika merania

Konfigurácia testu znečistenia vzduchu. Na znečistenie vzduchu v meranej miestnosti bude použitý oxid uhličitý CO₂. Do meranej miestnosti bude umiestnená tlaková nádoba s CO₂, pomocou ktorej sa do miestnosti privedie vo viacerých miestach pred samotným meraním množstvo plynu zodpovedajúce hodnote koncentrácie CO₂ znečisteného vzduchu pri pobyte osôb. Následne sa objemový prietok CO₂ nastaví na hodnotu približne 0,32 l/min [8], čo zodpovedá procesu dýchania bežného človeka [9].

Na obrázku 2 je znázornené plánované umiestnenie meracích prístrojov na zaznamenávanie teploty vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu, koncentrácie oxidu uhličitého a rýchlosti prúdenia vzduchu (Miesta 1-4). Zdroj produkcie CO₂ bude umiestnený v mieste predstavujúcom osobu ležiacu na posteli počas nočného spánku.

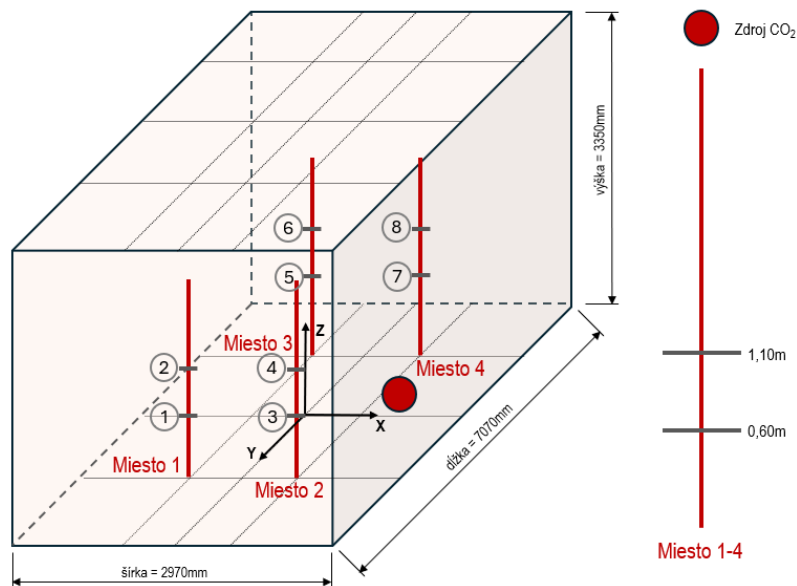
Na meranie parametrov vnútorného prostredia budú použité meracie senzory Protronix, Comet a Uho, ktoré snímajú teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu a koncentráciu oxidu uhličitého, na meranie objemového prietoku vzduchu bude použitá meracia a regulačná clona do kruhového potrubia a na meranie rýchlosti prúdenia vzduchu anemometer. Údaje o vonkajšom prostredí budú zbierané z meteostanice umiestnenej na streche objektu.

Konfigurácia priestoru pre meranie veku vzduchu. Na obrázku 3 je znázornené rozmiestnenie bodov slúžiacich na prívod CO₂ do priestoru. Pozícia meracích miest 1-4 zostane identická ako pri teste znečistenia vzduchu. Na každé miesto merania sa umiestni anemometer a snímače koncentrácie CO₂, pričom výšky 0,60 m a 1,10 m sú uvažované ako výšky bežne sediacej a stojacej osoby [10].



Obr. 2 Rozmiestnenie meracích prístrojov a umiestnenie zdroja produkcie CO₂

Do miestnosti sa umiestni stojaci elektrický ventilátor, pred ktorý sa umiestni trubica napojená na nádobu s CO₂, pričom sa prítok po dobu 45 minút nastaví na prítok 1 l/min, čím sa zabezpečí rovnomerná koncentrácia CO₂ v celom objeme miestnosti. Po tomto čase sa prívod CO₂ uzavrie a začne sa proces vetrania. Ďalšie snímače koncentrácie CO₂ sa umiestnia v blízkosti otvorov na prívod a odvod vzduchu, vďaka čomu sa bude sledovať koncentrácia CO₂ na vstupe a výstupe vzduchu z miestnosti.



Obr. 3 Konfigurácia priestoru pre meranie veku vzduchu

4.3 *Pripravované ciele merania*

4.3.1 *Meranie indexu veku vzduchu*

Index veku vzduchu je veličina, ktorou sa určuje čas, za ktorý sa vonkajší (privádzaný) vzduch z exteriéru presunie z miesta prívodu vzduchu do ľubovoľného bodu v miestnosti a je to zároveň spoľahlivý ukazovateľ čerstvosti vzduchu v miestnosti, ako aj ukazovateľ efektivity rozmiestnenia otvorov pre prívod a odvod vzduchu. Čím kratší tento časový údaj je, tým viac je vetrací systém účinnejší. Pred vykonaním merania indexu veku vzduchu je potrebné zabezpečiť adekvátnu vzduchotesnosť meranej miestnosti. Tento parameter sa bude meraný skúškou vzduchotesnosti tzv. Blower door testom, a jeho hodnota je vyjadrená ako výmena vzduchu za hodinu pri tlakovom rozdieli 50 Pa medzi vnútorným a vonkajším prostredím n_{50} . Pre nízkoenergetické budovy by táto hodnota mala byť $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$. Čím je táto hodnota nižšia, tým lepšia je vzduchotesnosť posudzovanej miestnosti.

4.3.2 *Meranie teploty, vlhkosti a koncentrácie oxidu uhličitého vnútorného vzduchu*

Merania parametrov vnútorného vzduchu budú vykonané v jednotlivých meracích bodoch referenčnej miestnosti viacerými typmi meracích prístrojov zapožičaných alebo zakúpených vďaka vedeckým grantom. Tieto merania budú slúžiť na porovnanie účinnosti a úrovne tepelno - vlhkovostnej pohody pri prirodzenom a nútenom vetraní. Zároveň tieto merania poslúžia na porovnanie výsledkov z jednotlivých meracích prístrojov a určenie korektných výsledkov prostredníctvom stanovenia chyby merania.

4.3.3 *Meranie možného vzniku tepelného mostu v mieste inštalácie lokálnej vetracej jednotky*

Meranie bude prebiehať v referenčnej miestnosti pri rôznych okrajových podmienkach vonkajšieho prostredia. Meranie sa bude vykonávať pomocou káblových teplotných senzorov (napr. PT100) inštalovaných v okolí otvoru v stene a pomocou termokamery s videozáznamom. Sledovaná bude povrchová teplota vnútorného krytu vetracej jednotky a taktiež teplota povrchu steny v okolí otvoru, do ktorého je jednotka inštalovaná. V rámci meraní možného vzniku tepelného mostu je vhodné uvažovať s konkrétnou skladbou obvodovej steny, preto je našim cieľom porovnanie rizika vzniku tepelného mostu, ak bude obvodová stena v pôvodnom nezateplenom stave so stavom, keď bude obvodová stena zateplená kontaktným zatepl'ovacím systémom.

4.3.4 *Meranie hladiny hluku*

Merania budú realizované ako v referenčnej miestnosti pri prevádzke lokálnej vetracej jednotky v rôznych režimoch výkonu ventilátora, tak aj v laboratórnych podmienkach v akustickej komore pri vypnutom stave vetracej jednotky. Hodnota hladiny akustického tlaku (hlučnosti) vo vzdialenosti 2 m od vonkajšej fasády deklarovaný výrobcom je 14 – 37 dB(A) a normalizovaný rozdiel úrovne hluku 38 – 49 dB v závislosti od akustického príslušenstva [7].

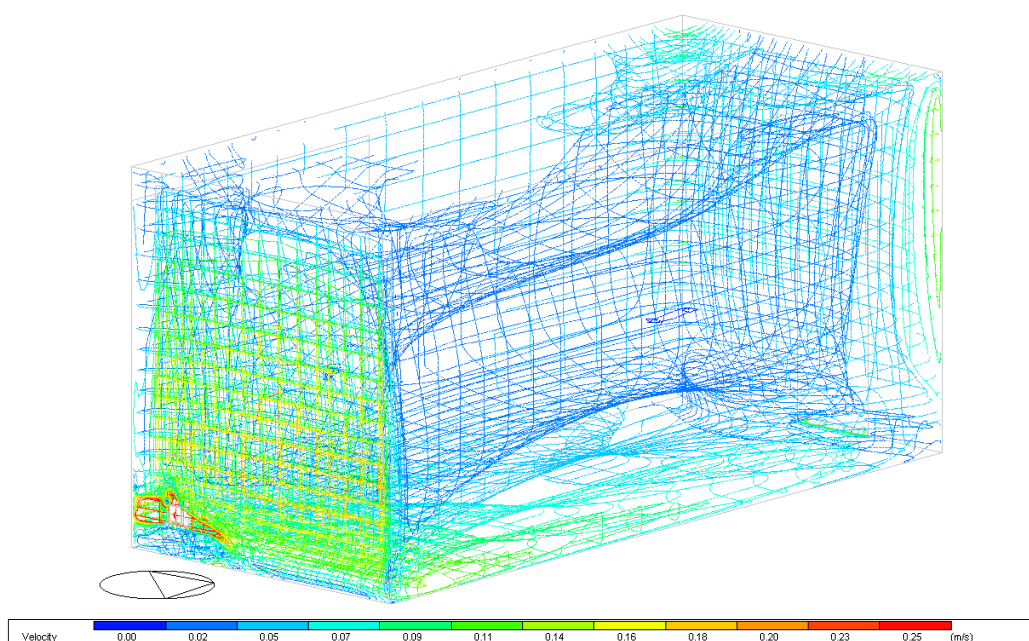
4.4 *Diskusia*

Použitie lokálnych vetracích jednotiek v obytných budovách spôsobuje u odbornej verejnosti aj obyvateľov mnohé otázky ohľadom ich funkčnosti, účinnosti a vplyvu na kvalitu vnútorného prostredia. Vyplývajú z toho viaceré obavy, na ktoré sa zameriame v pripravovaných meraniach. Ak budú spomínané negatívne tvrdenia o lokálnych vetracích jednotkách vyvrátené, môžeme považovať

tento systém vetrania za adekvátnu alternatívu k centrálnemu vzduchotechnickému systému. Tento systém by sa mohol stať vhodným riešením pre zabezpečenie kvalitného vnútorného prostredia v rekonštruovaných bytových domoch, kde nie je stavebne zabezpečený inštalčný priestor pre vedenie vzduchotechnických potrubí v rámci interiéru miestností.

Všetky experimentálne merania je vhodné verifikovať matematickými simuláciami, ktorými sa overia výsledky meraní a ak sú simulácie presné, môžu sa použiť aj na hodnotenie iných referenčných miestností. V našom výskume budú vypracované matematické simulácie softvérom Design Builder® [11], vytvorí sa matematický model referenčnej miestnosti s okrajovými podmienkami, vytvorí sa model núteného vetrania a vypočítajú sa hodnoty napr. teploty vzduchu, operatívnej teploty vzduchu, rýchlosti prúdenia vzduchu, tlaku vzduchu, vek vzduchu a iné. Tieto výsledky je možné zobrazit' v 3D geometrii modelu, ako aj v 2D rezoch.

Na obrázku 4 je znázornený príklad ilustračných výsledkov realizovaných simulácií pre model priestorov experimentálnych meraní.



Obr. 4 Ilustračné zobrazenie výsledkov CFD simulácií – rýchlosť prúdenia vzduchu

5. Záver

Cieľom príspevku je analýza decentrálneho spôsobu núteného vetrania, definovanie výhod a nevýhod tohto systému a definovanie metodiky experimentálnych meraní slúžiacich k overeniu možných nedostatkov, ktoré môžu vzniknúť pri použití decentrálnych stenových vetracích jednotiek so spätným ziskom tepla. Po vykonaní experimentálnych meraní budú výsledky verifikované pomocou matematických simulácií softvérom Design Builder [11].

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantu VEGA 2/0145/24.

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] 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.
- [3] Vyhláška MZ SR č. 210/2016 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.
- [4] STN EN 16798-1:2019 Energetická hospodárnosť budov. Vetrание 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.
- [5] STN 73 0532-2:2024 – Akustika. Hodnotenie zvukoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 2: Požiadavky.
- [6] Decentrálny vetrací systém – vlastnosti funkcia a financovanie. [online]. www.viessmann.sk, dostupné na: <https://www.viessmann.sk/sk/rady-a-tipy/technologie-a-systemy/decentralne-ventrianie.html>
- [7] Vetracia jednotka Inventer iV-Smart+. [online]. www.inventer.eu, dostupné na: <https://www.inventer.eu/products/heat-recovery/compact-ventilation/iv-smart/>
- [8] West, J.B. (2012). Respiratory Physiology: The Essentials. Lippincott Williams & Wilkins
- [9] Li, L., Chen, W., Zhang, H., He, Y., Arens, E., Fung, J. C., & Lau, A. K. (2023). Ceiling-Fan-Integrated Air Conditioning (CFIAC): Age-of-air, Air Pollution, and Airflow Distribution. E3S Web of Conferences, 396, 02039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339602039>
- [10] Damiano, L., & Dougan, D. (2007). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004. In CRC Press eBooks (pp. 50–62). <https://doi.org/10.1201/9780849338960.ch6>
- [11] Software Design Builder® (verzia 6.1.8.021) [Softvér]. (2021). DesignBuilder Software Ltd. Dostupné na <https://designbuilder.co.uk/>.

Angelika Václavová, Michal Krajčík¹
Teória a technika prostredia budov, 2. ročník

NÁSTROJE NA VÝPOČET ÚSPORY ENERGIE A UHLÍKOVEJ STOPY PRI OBNOVE BUDOV

TOOLS FOR CALCULATION OF ENERGY SAVINGS AND CARBON FOOTPRINT IN BUILDING RENOVATION

Abstract

Due to climate change and increasing pressure on resources, the demand for energy-efficient buildings is rising worldwide. Buildings are significant energy consumers, making them one of the primary contributors to global warming. The energy audit of buildings is the key tool in the energy-efficient retrofit of existing building stock. The current calculation methods used in energy audits are often inadequate, i.e., they lead to results with insufficient reliability. Using a virtual 3D model of the building to accurately estimate potential energy savings can be a better way to perform an energy simulation analysis. At the same time, by using simulation models, it is possible to calculate the environmental impacts related to the renovation processes. Reducing energy consumption leads to lower demand for energy production, which in turn can help reduce environmental impact and help reduce the carbon footprint.

Kľúčové slová / Key Words

Energetický audit, simulácia, životný cyklus, emisie, uhlíková stopa, DesignBuilder

1. Úvod

Budovy predstavujú viac ako 40 % celkovej svetovej konečnej spotreby energie a približne 39 % celkových emisií skleníkových plynov (angl. Greenhouse gases; GHG) [1]. V záujme kontroly koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére a zmiernenia vplyvu globálneho otepľovania, znižovanie emisií uhlíka sa stalo celosvetovým konsenzom. Parížska dohoda vyzýva na celosvetové opatrenia, aby sa čo najskôr dosiahlo „vrchol“ emisií skleníkových plynov a do roku 2050 sa dosiahla „uhlíková neutralita“. Preto je nevyhnutné znížiť ich spotrebu energie zlepšením návrhu nových budov alebo obnovou existujúcich budov [2].

2. Znižovanie spotreby energie

2.1 Energetické audity

Energetickú efektívnosť budovy možno dosiahnuť uplatnením procesu nazývaného energetický audit. Energetický audit sa používa ako efektívny metodický nástroj na posúdenie a štúdium energetického profilu objektu. Zároveň, vypracovaním energetického auditu a implementáciou navrhnutých opatrení na úsporu energie pomáha v znižovaní uhlíkovej stopy. Prispieva to ku globálnemu úsiliu v boji proti zmene klímy a je v súlade s cieľmi udržateľnosti [1].

¹Angelika Václavová, Ing., Michal Krajčík, prof., Ing., PhD., Stavebná fakulta STU Bratislava, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava, SR

Energetické audity sa rozsahovo môžu líšiť, avšak proces vypracovania zvyčajne pozostáva z nasledujúcich krokov:

- a) identifikácia predmetu energetického auditu
- b) zber a analýza údajov
- c) pozorovanie a preskúmanie prevádzkových postupov
- d) vyhodnotenie súčasného stavu
- e) návrh opatrení na zníženie spotreby energie
- f) ekonomické a environmentálne hodnotenie opatrení
- g) odporúčanie optimálneho variantu súboru opatrení [3].

V rámci procesu je dôležitý výber vhodného nástroja na vyhotovenie energetického auditu. K dispozícii je niekoľko nástrojov, od jednoduchých analytických výpočtov až po komplexné simulácie [3].

Ako hlavné faktory súvisiace so spotrebou energie a produkciou emisií v budove môžeme spomenúť technické systémy, teda systémy vykurovania, chladenia a vetrania (HVAC). Tieto systémy majú významný podiel na celkovom množstve energie spotrebovanej v budove [4].

Na analytický výpočet budov, spracovatelia energetického auditu používajú prevažne excelovské a iné výpočtové nástroje, ktoré sú väčšinou založené na výpočtovej báze s hrubým časovým krokom, napr. na báze mesačnej energetickej bilancie. Tento hrubý časový krok, predovšetkým pri výpočte bilancie technických systémov nie je dostatočný a výpočet neodráža realitu [3]. Na skvalitnenie výpočtu energetickej bilancie slúžia systémy energetickej simulácie. Tieto nástroje energetického modelovania sú založené na výpočtovej báze s hodinovým, alebo menším časovým krokom. Sú dobrými nástrojmi na vyhodnotenie vhodných možností na zníženie potreby energie pri súčasnom splnení požiadaviek na vnútorné prostredie a riešenie environmentálnych problémov [4].

2.2 Energetické modelovanie

Energetické modelovanie budov je užitočný nástroj, ktorý si získava čoraz väčšiu popularitu. Ponúka možnosť primerane riešiť problémy s energetickou hospodárnosťou budovy a navrhnuť vhodné modernizácie na dosiahnutie energetických požiadaviek [5].

Existuje množstvo faktorov, ktoré spôsobia, že skutočná spotreba energie budovy sa bude líšiť od projektovanej spotreby energie. Medzi nich patria abnormálne poveternostné podmienky; zmeny v harmonogramoch zariadení, systémov a obsadenosti [1].

Projektovanie energeticky efektívnych budov nemusí nevyhnutne viesť k nízkej spotrebe energie. Vždy, keď sú budovy navrhnuté tak, aby boli energeticky efektívne, sú tu ľudia, ktorí ich využívajú. Preto rozdiel medzi očakávanou a skutočnou spotrebou energie do veľkej miery súvisí s ľudským faktorom. Správanie obyvateľov k budove zahŕňa okrem používania systémov HVAC aj nastavenie požadovaných hodnôt termostatu, ovládanie okien a žalúzií, prepínanie svetiel a obsadenosť v priestoroch. Simulačné programy schopné zohľadniť správanie obyvateľov sa považujú za účinný nástroj na preklopenie rozdielu medzi predpokladanou a skutočnou spotrebou energie v budovách. Predpokladá sa, že zdokonalením energetických modelov, ktoré simulujú individuálne správanie ľudí, sa zvýši presnosť výpočtu energetickej hospodárnosti budov. Výskum ukázal, že obyvatelia bytov môžu až trikrát viac energie spotrebovať ako ich menej náročný susedia žijúci v bytoch s podobnými charakteristikami. Simulácia správania obyvateľov sa stáva kľúčovým faktorom pri hodnotení technológií pri navrhovaní a modernizácii budov. Pochopenie skutočného využívania energie, ako aj správania a preferencie užívateľov je základným prvkom na vytvorenie a implementáciu úspešných stratégií a monitorovania úspory energie [6].

3. Hodnotenie životného cyklu budovy

Klimatické zmeny, ktoré v súčasnosti výrazne pozorujeme, si vyžadujú zmenu prístupu spoločnosti k životnému prostrediu. Prejavuje sa to okrem iného aj znižovaním skleníkových plynov, znižovaním spotreby a produkcie odpadov, pri výbere alternatívnych materiálov a surovín, pri nových technologických postupoch, bezodpadových technológiách, prechodom na "zelenú" energetiku, väčším využitím prírodných síl, vetra, slnka. Jedným z krokov je aj hľadanie alternatívnych výrobkov a výrobkov s nižšou energetickou náročnosťou výroby, nižšou spotrebou materiálu, možnosťami recyklácie a aj menšou uhlíkovou stopou. Výpočet uhlíkovej stopy by mal vychádzať z dôkladnej LCA analýzy (angl. Life Cycle Assessment). Podrobná LCA analýza dáva skutočný reálny obraz o výrobku od ťažby surovínových zdrojov, cez ich transport, spracovanie až po koniec jeho životnosti [7].

3.1 Čo sú emisie skleníkových plynov?

Emisie skleníkových plynov z ľudskej činnosti zosilňujú skleníkový efekt. Fosílna palivá ako uhlie, ropa a zemný plyn sú hlavnými zdrojmi globálnej zmeny klímy, pričom predstavujú viac ako 75 % celosvetových emisií skleníkových plynov a takmer 90 % všetkých emisií oxidu uhličitého. Tieto emisie pokrývajú Zem a zachytávajú slnečné teplo, čo vedie ku globálnemu otepľovaniu a zmene klímy. Svet sa momentálne otepľuje rýchlejšie, ako kedykoľvek predtým. Budovy sa podieľajú na celosvetových emisiách skleníkových plynov približne jednou tretinou [8].

Emisie podľa typu skleníkového plynu:

- Oxid uhličitý (CO₂)
- Metán (CH₄)
- Oxid dusný (N₂O)
- Fluórované plyny (F-plyny; HFC, PFC a SF₆)
- Vodík (H₂) [8].

3.2 Uhlíková stopa

Najčastejšie rozoberaná téma v súvislosti so životným prostredím je v súčasnosti uhlíková stopa. Uhlíková stopa je dôležitým indikátorom environmentálnych dopadov, pretože nám pomáha identifikovať riziká spojené s nadmernou emisiou CO₂. Uhlíková stopa, ktorá je sumárom všetkých skleníkových plynov vypúšťaných do atmosféry sa kvantifikuje pomocou kilogramov ekvivalentu oxidu uhličitého (kgCO₂e). Umožňuje pomocou jednej metriky porovnať rôzne formy spotreby energie – elektrickej, tepelnej, hnacej [7], [9].

Celkovo možno emisie uhlíka merať tromi spôsobmi:

- 1) meranie len oxidu uhličitého
- 2) meranie šiestich plynov uvedených v Kjótskom protokole (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC a SF₆)
- 3) meranie mnohých emisií skleníkových plynov špecifikovaných v rámci Medzivládneho panelu pre zmenu klímy (IPCC) [10].

Stavebníctvo je dominantným sektorom zodpovedný za celkovú uhlíkovú stopu, najmä preto, že predstavuje priesečník troch hlavných znečisťovateľov: energetiky, dopravy a výstavby. Okrem toho k uhlíkovej stope prispieva aj množstvo rôznych každodenných činností, napríklad druh dopravy, ktorú ľudia používajú na cestu do práce, na plnenie domácich povinností alebo na trávenie voľného času [10].

3.3 Životný cyklus (LCA)

Presné meranie emisií je nevyhnutnou súčasťou účinnej reakcie na zmenu klímy. Hodnotenie životného cyklu (LCA) je vyspelý a medzinárodne uznaný užitočný nástroj na odhad celkových emisií produkovaných budovami počas celého životného cyklu [2].

Posudzovanie životného cyklu budov sa stalo základným nástrojom na minimalizáciu vplyvov výstavby a rekonštrukcii na životné prostredie a umožnilo stavebnému sektoru smerovať k udržateľnosti. Vzhľadom na čoraz častejšie sa vyskytujúce problémy globálneho otepľovania, v poslednom čase sa venuje väčšia pozornosť hodnoteniu emisií uhlíka počas životného cyklu (Life Cycle Carbon Emissions Assessment - LCCO₂A), ktoré je podsekciou tradičnej LCA [10].

LCA berie do úvahy všetky kroky, ktoré vedú od suroviny cez výrobu, distribúciu a použitie až po konečnú likvidáciu. LCA môže merať vplyvy počas životnosti budovy a zároveň kvantifikovať vplyv jedného materiálu v budove. LCA hodnotenie má mnoho výhod ako napríklad porovnanie vplyvov na životné prostredie pri renovácii namiesto búrania a novej výstavby a výber opatrení s najnižším dopadom [11].

Existujú štyri modely životného cyklu v LCA:

- 1) cradle-to-grave – analyzuje plný životný cyklus výrobku
- 2) cradle-to-gate – analyzuje vplyv výrobku len po opustení továrenskej brány
- 3) cradle-to-cradle – koniec životnosti výrobku je nahradený procesom recyklácie
- 4) gate-to-gate – hodnotenie jedného procesu [12].



Obrázok 1: Modely životného cyklu v LCA [12]

Väčšina nástrojov na hodnotenie životného cyklu budovy sa dodáva s databázou stavebných materiálov. To umožňuje používateľom mapovať výber materiálov z ich modelu do softvéru [11].

Existujú dva typy databáz materiálov životného cyklu :

- databáza LCA s environmentálnymi vyhláseniami o produktoch (EPD)
- databáza generických materiálov

Databáza EPD umožňuje vybrať si konkrétny materiál vyrobený konkrétnym výrobcom a získať prístup ku všetkým údajom tohto materiálu. Zatiaľ čo všeobecná databáza je založená na priemyselných priemeroch, čo znamená, že vysoko výkonné materiály sú vložené do rovnakého koša ako materiály, ktoré emitujú veľa CO₂ [11].

4. Ciele a metodika hodnotenia uhlíkovej stopy pri obnove budov

4.1 Softvér na energetické modelovanie budov: *DesignBuilder*

V poslednej dobe sa postupne rozvíja technika energetickej simulácie s použitím rôznych nástrojov. Najuniverzálnejší softvér na energetické modelovanie budov je simulačný program "DesignBuilder", ktorý je schopný analyzovať energetické a environmentálne vlastnosti budov. Dokáže poskytnúť plne integrovanú analýzu výkonnosti, vrátane energie a komfortu, HVAC systémov, denného osvetlenia, CFD simulácie, výpočty pre kredity BREEAM/LEED a správy v súlade s viacerými národnými stavebnými predpismi a certifikačných noriem. DesignBuilder umožňuje používateľovi porovnať účinnosť alternatívnych návrhov, optimalizovať budovu v ktorejkoľvek fáze návrhu alebo obnovy. Pri navrhovaní a posudzovaní budov podporuje ciele udržateľnosti, čím sa pripája k úsiliu v boji proti zmene klímy [5].

DesignBuilder je najvyspelejšie a najschopnejšie používateľské rozhranie pre simulačný motor EnergyPlus. EnergyPlus je široko používaný integrovaný program na simuláciu budov. Jeho zjednodušený model slúži na výpočet tepelnej odozvy budovy, pričom sú zohľadnené použité materiály, inštalované zariadenia, orientácia a geometria budovy, tienenie resp. bloky priesvitných komponentov a denné svetlo. Program DesignBuilder používa taktiež šablóny činností, využitia budovy pre model. Tieto údaje zahŕňajú obsadenosť, používanie zariadení, nastavenie údajov HVAC systémov a návrhových teplôt, úrovne osvetlenia, miery a spôsob vetrania [5].

4.2 Softvér hodnotenia LCA: *OneClick*

DesignBuilder kombinuje pokročilú energetickú simuláciu s nástrojmi na hodnotenie životného cyklu budovy. DesignBuilder poskytuje integráciu nástroja OneClick LCA, ktorý je určený na výpočet LCA. Je zabezpečený bezproblémový prenos energetického modelu pre ďalšie analýzy materiálov. Vďaka tomu je vykonávanie LCA jednoduchšie a rýchlejšie a je ekonomicky uskutočniteľnejšie integrovať do jednotlivých fáz návrhu [13].

OneClick LCA obsahuje environmentálne profily pre viac ako 8 000 materiálov, vrátane množstva špecifických a overených environmentálnych vyhlásení o produktoch od výrobcu. To umožňuje vypočítať presné výsledky vyprodukovaného uhlíka s konkrétnymi produktmi. Okrem toho poskytuje modelovať vplyvy na životné prostredie vyplývajúce z materiálov rekonštrukčných procesov, keď nastáva zmena len pri jednotlivých fázach životného cyklu materiálu [13].

4.3 Ciele

Hodnotenie vnútorných podmienok a vykonanie energetickej analýzy s určením miest neefektívnosti má veľký význam, pokiaľ ide o minimalizáciu spotreby energie a emisií skleníkových plynov. Navrhovaná metodika je v porovnaní s tradičnou metodikou vypracovania energetického auditu pomocou simulácií vylepšená kalibračnou fázou podľa skutočne nameraných hodnôt. Cieľom tejto štúdie je prispieť k obnove budov návrhom inovatívnej metodiky energetického auditu, ktorý sa implementuje pri reálnej obnove.

4.4 Metodika analýzy

V tejto kapitole je opísaný postup plánovaného merania a následnej energetickej analýzy budov. Na túto štúdiu budú použité tri typizované rodinné domy, každý v inom štádiu modernizácie. Všetky domy majú rovnaký charakter, nachádzajú sa v jednej lokalite a majú rovnakú orientáciu na svetové

strany. Prvý dom (A) je v pôvodnom stave, boli vymenené len otvorové konštrukcie. Druhý dom (B) bol rekonštruovaný pred 25 rokmi, čo zahŕňalo zateplenie fasády, výmenu strešnej krytiny a otvorových konštrukcií na drevené eurookná. Tretí dom (C) bol kompletne rekonštruovaný pred nedávnom. Rekonštrukčné práce začali pred piatimi rokmi a boli dokončené v roku 2023. Inštalovali sa nové otvorové konštrukcie, zateplili sa obvodové steny a modernizovali strešnú krytinu.



Obrázok 2 Rodinné domy, v ktorých sa plánujú merania

Meranie sa uskutoční za jeden mesiac, raz v zimnej a raz v letnej sezóne. Budú merané parametre vnútornej klímy, konkrétne teplota a vlhkosť interiérového vzduchu, a koncentrácia CO₂. Keďže rodinné domy sa nachádzajú blízko k sebe, vonkajšie tepelné podmienky budú zaznamenávané len pri budove B. Na začiatku a na konci meracieho intervalu, budú odčítané spotreby energie na jednotlivých meračoch, s čím určíme skutočnú spotrebovanú energiu v meranom období. S meraním sa zistí kvalita vnútorného vzduchu, hodnotí sa správanie užívateľov k budove, čo bude nápomocné pri rozhodovaní optimalizácie spotreby energie.

Prvoradá bude zber údajov, preskúmanie dostupných projektových dokumentácií, obhliadka rodinných domov a meranie chýbajúcich rozmerov konštrukcií. Pomocou modelovacieho nástroja DesignBuilder sa vytvorí 3D virtuálny model všetkých rodinných domov. Vytvorenie virtuálneho modelu zahŕňa špecifikáciu stien, strešných konštrukcií, okien, orientáciu budov, HVAC systémy a ich komponenty a model obsadenosti. Nastaví sa plán používania zariadení na základe ročného obdobia, prítomnosti a potrieb budovy. Na základe nameraných hodnôt sa model kalibruje tak, aby odrážal podobnú skutočnú spotrebu energie. Následne bude vykonaná energetická simulačná analýza, ktorá umožní presný odhad potenciálnych úspor súvisiace s realizáciou navrhnutých energeticky úsporných opatrení, napr.: zlepšenie plášťa budovy, výmena okien na okná s lepšími parametrami alebo zlepšenie účinnosti kotla. Vďaka integrovaného nástroja OneClick v DesignBuilder sa určí uhlíková stopa materiálov súvisiace s rekonštrukciou.

Zistenia získané z tejto analýzy budú slúžiť ako cenný sprievodca pre budúce energeticky efektívne opatrenia a vylepšenia v budovách s cieľom vybrať najudržateľnejšie riešenia na zníženie uhlíkovej stopy v domácnostiach.

5. Záver

V súčasnosti v EÚ je približne 35 % budov starších ako 50 rokov, z čoho len 0,4 až 1,5 % sa každoročne obnovuje. Odhaduje sa, že 14 miliárd m² existujúcich budov sa bude musieť obnoviť v priebehu nasledujúcich 30 rokov. Obnova existujúcich budov zohráva kľúčovú úlohu pri prechode na čistú energiu. Môže viesť k výrazným úsporám energie a k zníženiu emisie skleníkových plynov.

Energetické audity sú základnými nástrojmi na hodnotenie energetickej efektívnosti budov. Poskytujú cenné informácie o spotrebe energie a identifikujú oblasti na zlepšenie. Väčšina obytných budov, ktoré budú tvoriť bytový fond v roku 2050 je už dnes postavená. Preto je potrebné využiť nástroje na energetické modelovanie, ktoré sú schopné simulovať správanie obyvateľov a budov. Energetická účinnosť nie je len záležitosťou inštalovanej technológie, ale vo veľkej miere závisí od ľudského faktora. Záujem občanov o udržateľný rozvoj nie je dostatočne motivovaný a neuvedomujú vplyv svojho životného štýlu s čím v konečnom dôsledku sami určia spotrebu energie. Treba zdôrazniť, že obnova budov by sa nemala zameriavať len na znižovanie spotreby energie, ale aj na uhlíkovú stopu budov.

Literatúra

- [1] Taileb, A.; Sherzad, M.F. Energy Audits and Energy Modeling as a Tool towards Reducing Energy Consumption in Buildings: The Cases of Two Multi-Unit Residential Buildings (MURBs) in Toronto. *Sustainability* **2023**, *15*, 13983. <https://doi.org/10.3390/su151813983>
- [2] LUO, Xiaoyu, et al. Life cycle assessment for carbon emission impact analysis for the renovation of old residential areas. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 367: 132930.
- [3] DERMENTZIS, Georgios, et al. A comprehensive evaluation of a monthly-based energy auditing tool through dynamic simulations, and monitoring in a renovation case study. *Energy and Buildings*, 2019, 183: 713-726.
- [4] SEPEHR, Ali; DEGHANI, Shirin. Energy and Environmental Study of HVAC Systems for a High-rise Building using Simulation by DesignBuilder and RetScreen. In: *2024 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM)*. IEEE, 2024. p. 1-5.
- [5] LIAPOPOULOU, E.; THEODOSIOU, T. Energy performance analysis and low carbon retrofit solutions for residential buildings. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020. p. 012026.
- [6] SANTANGELO, Angela, et al. Renovation strategies for the Italian public housing stock: Applying building energy simulation and occupant behaviour modelling to support decision-making process. *Energy and Buildings*, 2018, 167: 269-280.
- [7] <https://www.ropoaobce.sk/sk/casopis/odpady/uhlikova-stop-a-zivotny-cyklus.m-4637.html>
- [8] <https://www.co2news.sk/2024/05/30/co-su-emisie-sklenikovy-ch-plynov/>
- [9] CLARK, David. *What Colour is your Building?: Measuring and reducing the energy and carbon footprint of buildings*. RIBA Publishing, 2019.
- [10] FENNER, Andriel Evandro, et al. The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 1142-1152.
- [11] <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/life-cycle-assessment-for-green-building-experts>
- [12] <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-lca-guide/>

[13] <https://designbuilder.co.uk/software/one-click-lca-building-life-cycle-assessment>

THEORY AND STRUCTURES OF BUILDINGS

Lubomír Adamec¹;

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník 3.

ŠTÚDIA POROVNANIA TROCH TYPOV ZASKLENÍ V RÁMCI PREHRIEVANIA BUDOV V SIMULAČNOM PROGRAME VOLTRA

A STUDY OF THE COMPARISON OF THREE TYPES OF GLAZING WITHIN THE OVERHEATING OF BUILDINGS IN SIMULATION PROGRAM VOLTRA

Abstract

The article compares three different types of glazing systems. One is standard double glazing with argon and the other ones are with low e coating on different position of glazing, one is close to interior and the last one is close to exterior. For simulation is used program Voltra from Physibel. Glazing system is part of model of one space or room and Glazing system represents facade of this room. This article shows how low e coating can help during hot summer days and what low e coating causes with interior temperature especially problem with overheating. The results can be used in further simulation.

Kľúčové slová / Key Words

Zasklenie, nízkoemisná vrstva, prehrievanie budov, Voltra

1. Úvod

V posledných rokoch narastá trend výstavby presklených budov, čo vedie k rôznym inovatívnym riešeniam. Zároveň vzniká problém ohľadom prehrievania budov v teplom období. A preto by sa mali hľadať vhodné riešenia, ktoré by boli efektívne a ekonomicky menej náročné.

Účelom tohto článku je porovnať vplyv nízkoemisnej vrstvy v rámci prehrievania v letnom období. Na porovnanie sa použili tri typy zasklení. Na účel tohto článku sa použil program od spoločnosti Physibel Voltra[1]. Modelovanie v programe Voltra prebieha za podmienok, ktoré sú zjednodušené, ale zároveň výsledky simulácie nám vedia poskytnúť vedomosti pre ďalšie modelovania.

1.1 Vstupné údaje

Na túto simuláciu sa použili tri varianty dvojitého zasklenia, prvý variant tvorí jednoduché dvojsklo vyplnené argónom, druhý variant je doplnený o nízkoemisnú vrstvu z vnútornej strany zasklenia a tretí variant z vonkajšej strany zasklenia. Dôvod, prečo zasklenie tvorí iba dvojsklo je, že ide o prototyp simulácie, ktorá má slúžiť ako podklad pre nasledujúce simulácie v rámci ďalšieho výskumu, kde budú zohľadnené zložitejšie možnosti zasklení. Všetky tri varianty majú rovnaké dispozičné riešenie priestoru 5 x 5 metra a všetky tri varianty majú presne rovnaký základ, okrajové podmienky. Ide o štúdiu, ktorá je značne zjednodušená, je to iba jednoduchý priestor, ktorý je tvorený železobetónovou konštrukciou a od exteriéru ho delí celoplošne presklená fasáda, ktorá je taktiež zjednodušená, keďže sa tam nenachádzajú žiadne rámy. Momentálne sa neuvažuje

¹ Lubomír Adamec, Ing., Stavebná fakulta, STU v Bratislave, SR, lubomir.adamec@stuba.sk

s tepelnoizolačnými materiálmi, pretože s tepelnoizolačnými materiálmi sa bude uvažovať v ďalšej štúdií, ktorá má nadväzovať na túto. Vstupné hodnoty sú zobrazené na obrázku 1.

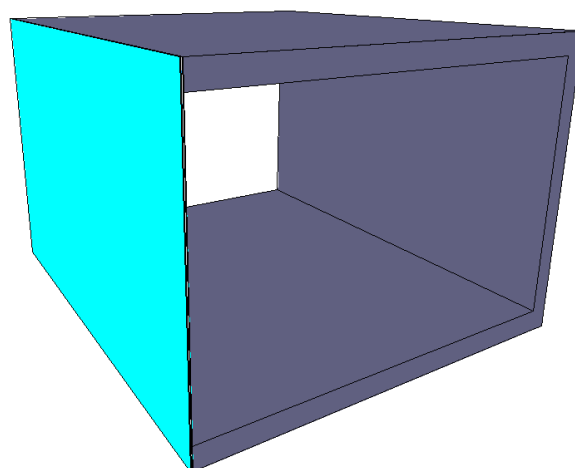
Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ϵ [-]	N [kg/m ³]	c [J/kgK]	τ [°C]	h [W/m ² K]	q [W/m ²]	τ_a [°C]	hc [W/m ² K]	Pc [W]	τ_r [°C]	C1	C2	C3	Sun	Ns [-]	τ_s [-]	
4	BC_FREE	NIHIL	lower zone				8900.0	380.0			0		3.00	0								
5	MATERIAL		zasklenie		1.000	0.90	1000.0	1000.0													0.01	0.80
6	BC_FREE	NIHIL	upper zone				1000.0	1000.0			0		3.00	0								
7	BC_FREE	NIHIL	back zone				1000.0	1000.0			0		3.15	0								
29	MATERIAL		low e		1.000	0.04	1000.0	1000.0													0.29	0.79
136	MATERIAL		reinforced concrete (steel 2%)		2.500	0.90	2500.0	1000.0													0.10	0.00
170	BC_SIMPL	NIHIL	exterior						T01	25.00	0									YES		
193	BC_FREE	NIHIL	indoors 2				1000.0	1000.0			0		3.15	0								
233	TRANSMAT		argon		0.017		1.2	519.0														

Obr. 1: Vstupné hodnoty v programe Voltra

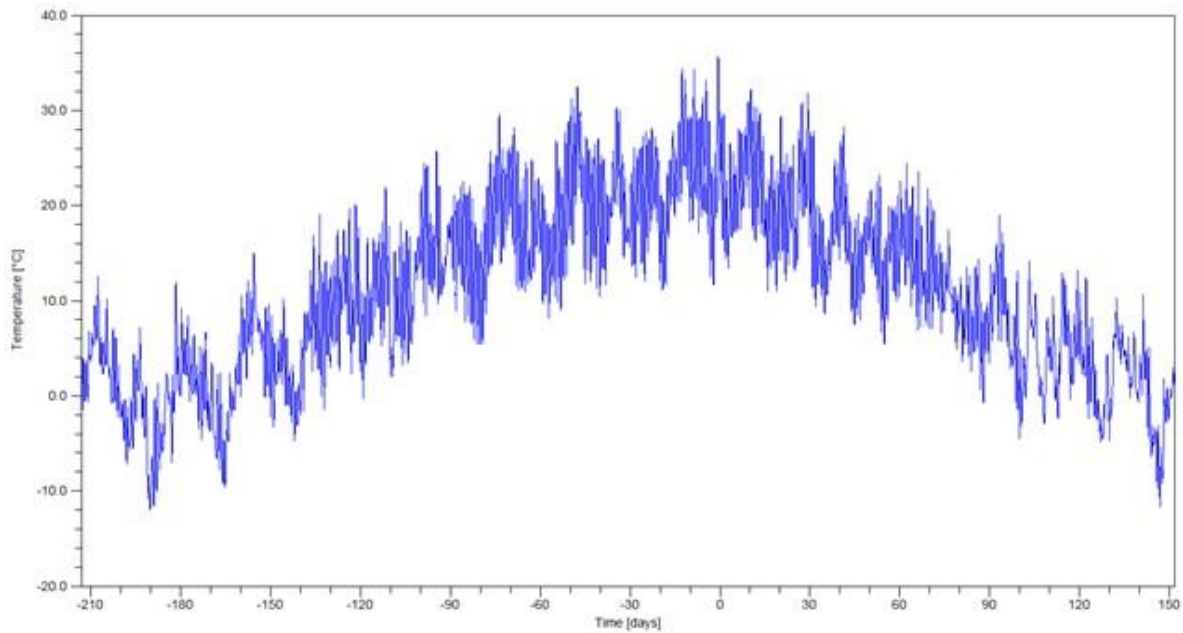
Všetky tri varianty sú modelované za predpokladu, že sa budú nachádzať v Bratislavskom kraji na Slovensku a zohľadnia priemerné teploty a počasie v tomto regióne. V programe Voltra sa použil klimatický rok Bratislavy, pričom na simuláciu sa vybral najteplejší deň v roku, v našom prípade 2. August. podľa grafu funkcie teplôt obrázok 3. Simulačný model je znázornený na obrázku 2.

Exteriér od interiéru delí presklená fasáda s dvojitým zasklením hrúbky 4 mm s vrstvou argónu 15 mm. Pri jednotlivých variantoch je pridaná iba nízkoemisná vrstva.

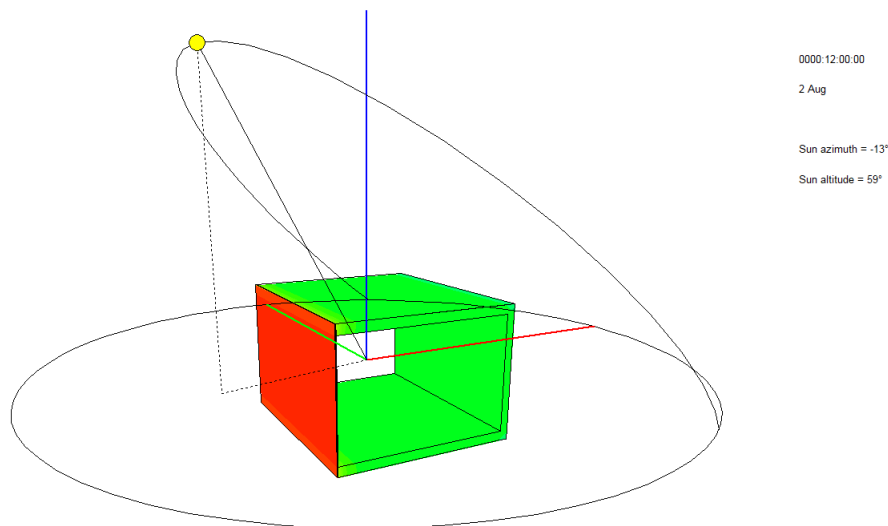
Orientácia fasády je na juh, čo znamená, že predpokladané značné prehrievanie modelovaného priestoru sa dá očakávať okolo obedňajších hodín, ktoré je znázornené na obrázku 4.



Obr. 2: Model miestnosti



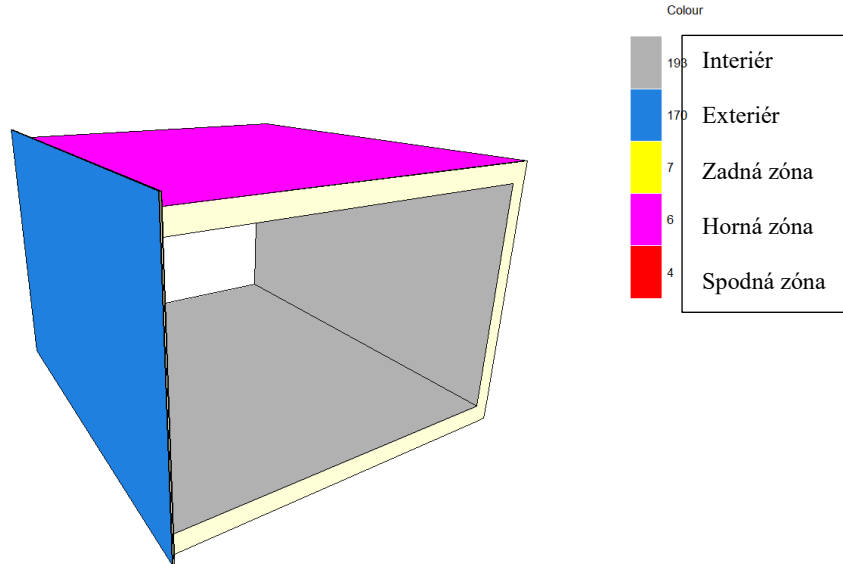
Obr. 3: Klimatický rok pre Bratislavu, ktorý sa vložil vo forme funkcie do programu Voltra



Obr. 4: Model a poloha slnka (12:00 poloha slnka na Juhu)

Okrajové podmienky sú v exteriéri nastavené na funkciu teploty klimatického roku v Bratislave. Čo sa týka interiéru, tak sa použila okrajová podmienka, ktorá nezahŕňa vnútornú teplotu v miestnosti, keďže ide o prehrievanie a cieľom bolo zistiť do akej miery dokáže teplo vyprodukované z exteriéru nahriať miestnosť - okrajová podmienka pre miestnosť je znázornená na obrázku 5 sivou farbou. V miestnosti sa neuvažuje ani s chladením vzduchu ani s použitím klimatizácie. Pridali sa ešte okrajové podmienky pre priestory ktoré ohraničujú danú miestnosť, keďže miestnosť sa nachádza v budove, takže sme neuvažovali ani so strechou. Ostatné okrajové podmienky pre okolité priestory sú znázornené na obrázku 5. Na konštrukcii, kde sa nenachádza okrajová podmienka exteriéru

a interiéru sa automaticky prideli adiabatická okrajová podmienka znázornená jemne žltou farbou na obrázku 5.

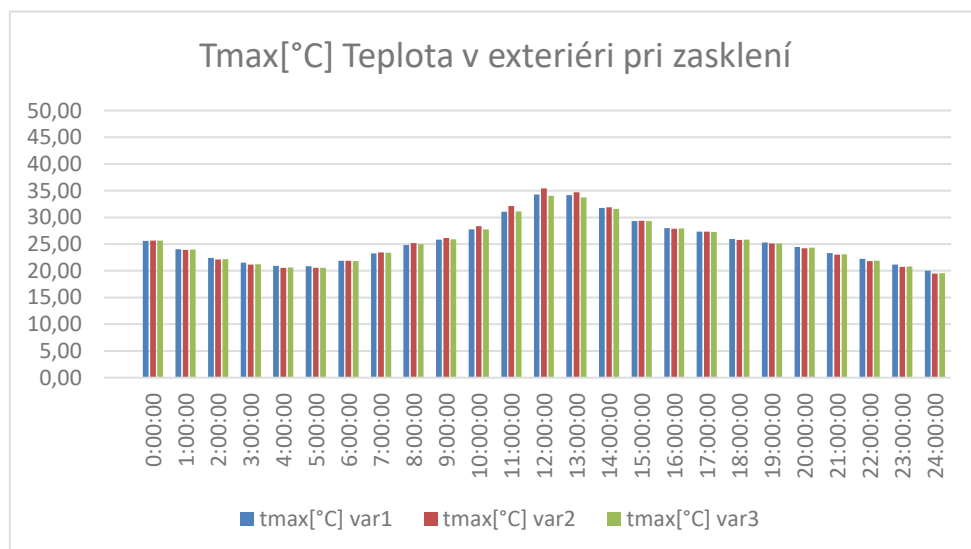


Obr. 5: Okrajové podmienky

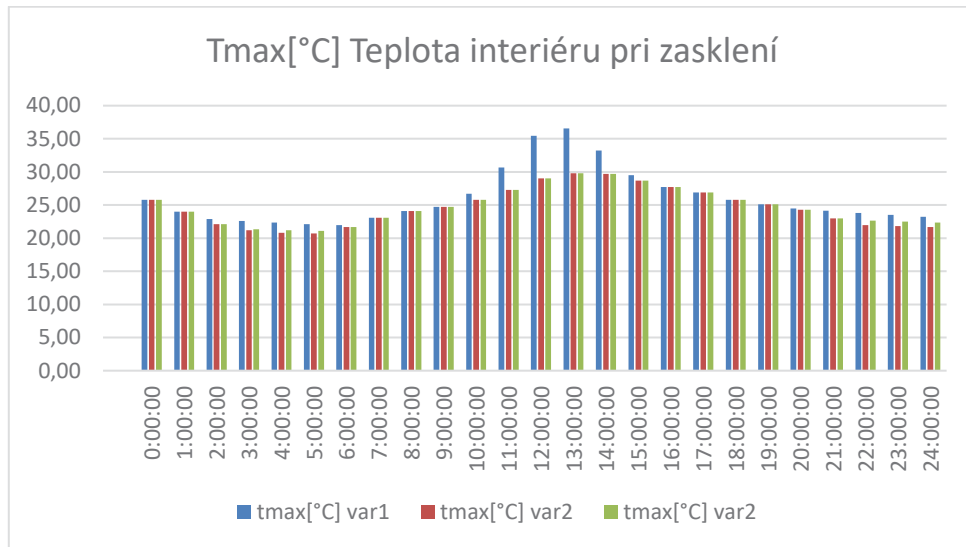
Simuluje sa celý jeden deň po hodinových krokoch, simulácia je nastavená tak, že najprv sa nasimuluje v predstihu jeden deň, aby sa dosiahli relevantnejšie výsledky určeného dňa.

1.2 Výstupné výsledky

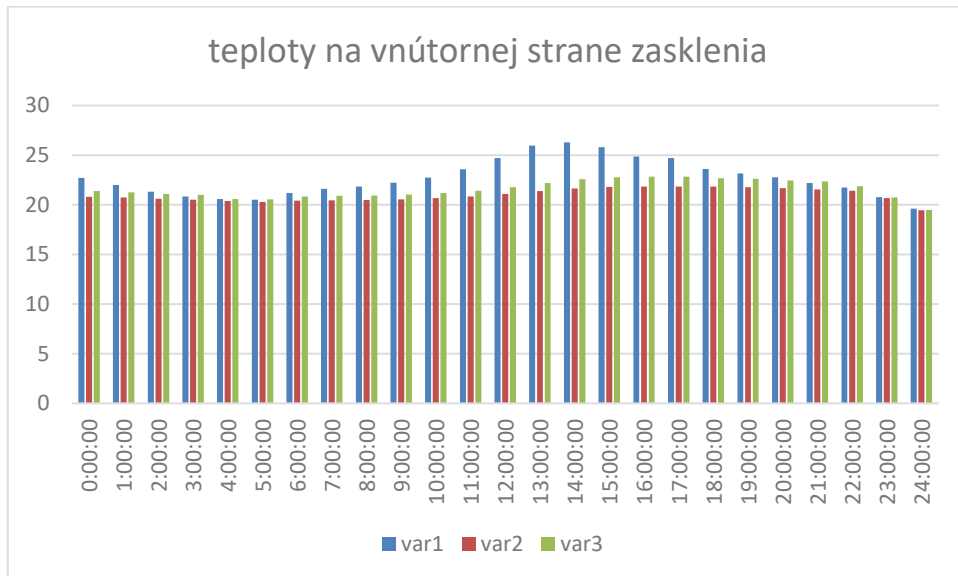
Na základe vyššie uvedených údajov boli získané nasledujúce výsledky pri povrchu zasklenie z exteriérovej časti (obr. 6).



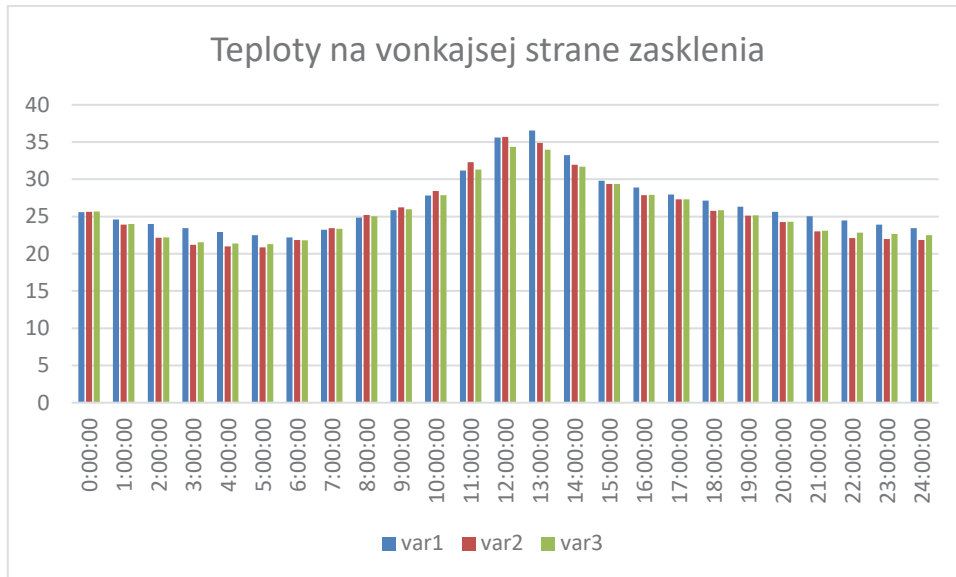
Obr. 6: Teplota na vonkajšom povrchu zasklenia



Obr. 7: Teplota interiéru pri zasklení



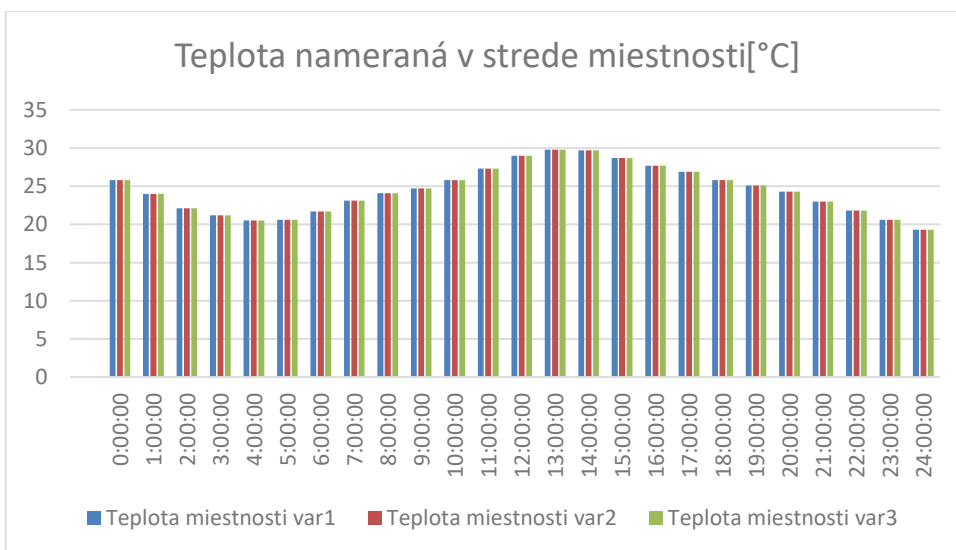
Obr. 8: Teplota na vnútornej strane zasklenia



Obr. 9: Teplota na vonkajšej strane zasklenia

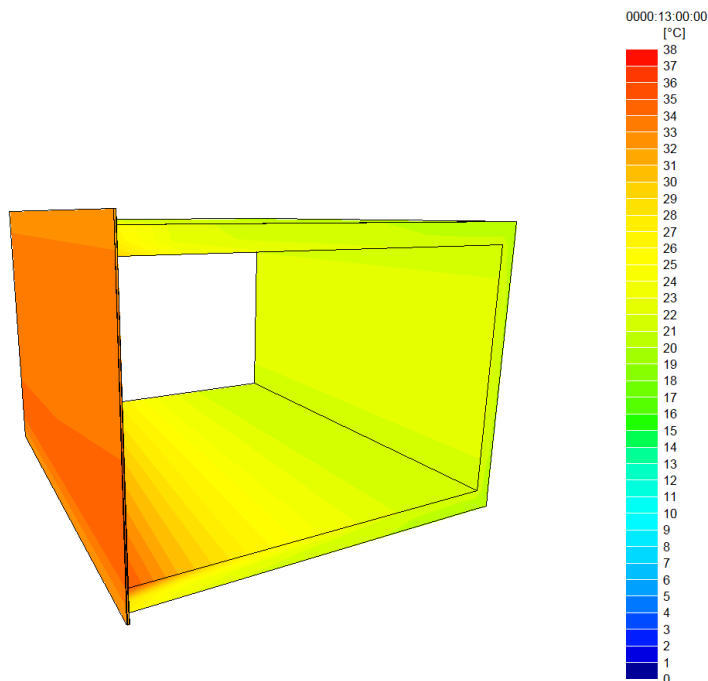
Na základe získaných údajov sa dá určiť, že ak porovnáme obyčajné dvojité zasklenie s dvojitém zasklením s nízkoemisnou vrstvou, tak nízkoemisná vrstva vie do určitej miery znížiť tepelnú záťaž na budovu. Najväčší rozdiel teplôt je vidieť pri exteriérovej časti zasklenia počas obedňajších hodín, kedy je v exteriéri najteplejšie. Pri vnútornom povrchu je rozdiel takmer konzistentný počas celého dňa. Zo všetkých troch možností je ťažko určiť najlepší výsledok, keďže nízkoemisná vrstva i z vnútornej i z vonkajšej strany ma takmer identické výsledky. Preto by bolo vhodné pokračovať v simulácii podrobnejšími vlastnosťami zasklenia ako sú priepustnosť, odrazivosť a pohltivosť žiarenia použitím rôznych variácií.

Pre teplotu miestnosti sa určil bod merania presne v strede miestnosti. Pri všetkých troch variantoch sa namerané hodnoty rovnali rovnakým hodnotám, čo sa dá pripísať veľkosťou priestoru a obyčajným dvoj sklom, kde nedochádza k značným rozdielom ani keď pridáme nízko emisnú vrstvu. Výsledné teploty sú zobrazené na obrázku 10.



Obr. 10: Nameraná teplota v strede miestnosti v simulácii

Z grafov sa dá určiť, predovšetkým z grafov na obrázkoch 7 a 8, že vplyvom nízkoemisnej vrstvy dochádza k zníženiu prehrievania.



Obr. 11: Priebeh teplôt v najteplejšom čase dňa

2. Záver

Zo simulácie vyplýva, že nízko emisná vrstva má vplyv na zabránenie prehrievania budov do určitej miery. Táto simulácia slúži ako podklad pre ďalšie simulácie, ktoré budú na túto nadväzovať. Určite sa zohľadnia všetky možné variácie typov zasklenia, taktiež detailnejšie namodelovanie modelu napríklad tým, že by sa v ňom zohľadnili skladby podláh, stien, rámy zasklenia, poprípade namodelovať ďalšiu miestnosť, ktorá by nebola spojená s exteriérom ale bola by súčasťou modelovanej miestnosti, ktorá by bola temperovaná.

Literatúra

[1] <https://portal.physibel.be/knowledge#m6-voltra-manual>;

[2] CHMÚRNÝ I. - TOMAŠOVIČ P. - HRAŠKA J.: Fyzika vnútorného prostredia budov. Vybrané kapitoly základov tepelnej ochrany budov, stavebnej akustiky, denného osvetlenia a insolácie budov. Bratislava: STU Bratislava 2013, s. 394, ISBN 978-80-227-3917-7;

[3] <https://www.agc-yourglass.com/configurator/app/request>;

[4] ISO 10456. Building materials and products – Hygrothermal properties;

[5] EN ISO 13792: 2005. Thermal performance of buildings – Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling – Simplified methods;

Alžbeta Danková¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: štvrtý

POSÚDENIE EXPERIMENTÁLNEJ DVOJITEJ TRANSPARENTNEJ FASÁDY Z HĽADISKA DOSTUPNOSTI DENNÉHO SVETLA

EVALUATION OF DAYLIGHT AVAILABILITY IN AN EXPERIMENTAL DOUBLE- SKIN TRANSPARENT FAÇADE

Abstract

This article investigates the impact of a double-skin façade on the indoor environment of a building from the perspective of daylighting. The concept of a newly designed experimental double-skin transparent façade is intended for administrative buildings and must therefore meet the corresponding requirements. For the purpose of simulation, the proposed façade was assumed to be installed on the south-facing side of a typical reference administrative building. Evaluated side-lit offices on three representative floors, receive light only through the studied façade. The results of the simulation assessment serve to verify the design performance and provide important information for further shaping of the final façade module.

Kľúčové slová / Key Words

Dvojitá transparentná fasáda; denné osvetlenie; činiteľ denného osvetlenia;

1. Úvod

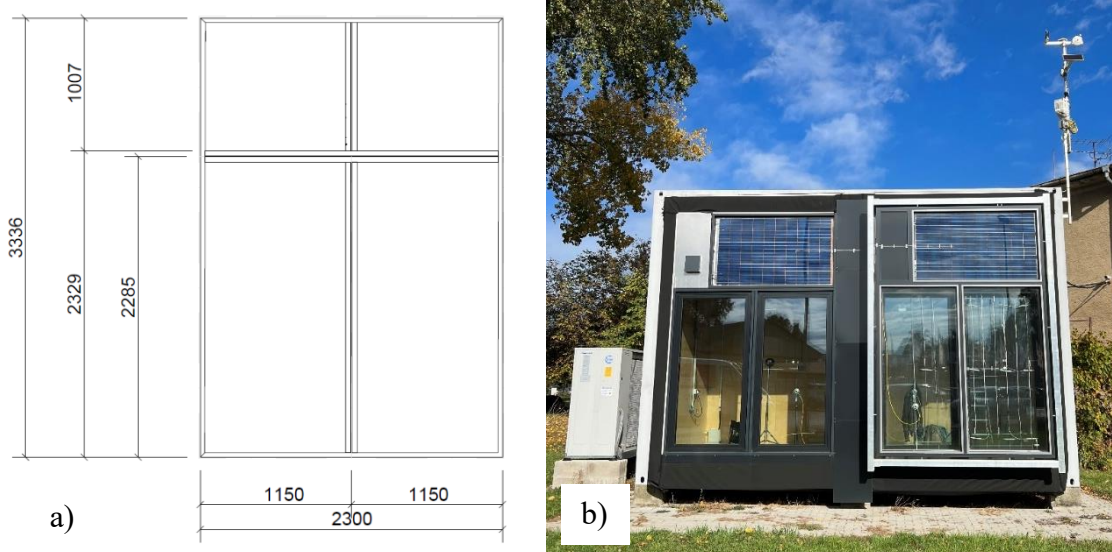
Dlhoročná tradícia využívania denného svetla v architektúre, podložená vedeckými dôkazmi o jeho pozitívnych účinkoch na ľudské zdravie a produktivitu, spolu s aktuálnymi trendmi v oblasti udržateľnosti a energetickej efektívnosti, robia z denného svetla jeden z najdôležitejších aspektov súčasného architektonického návrhu [1], [2], [3]. Denné svetlo nielenže prispieva k úspore energie, ale má aj pozitívne účinky na komfort a zdravie užívateľov. Denné svetlo zvyšuje pracovný výkon administratívnych pracovníkov a má pozitívny vplyv na úspešnosť študentov. Avšak nadmerné množstvo denného svetla môže spôsobiť oslnenie a negatívne ovplyvniť komfort užívateľov daného prostredia. Je preto potrebné využívať ho v čo najväčšom množstve pre zabezpečenie vizuálnych a nevizuálnych potrieb ako aj znižovanie energetickej bilancie, ale ponúknuť užívateľom aj možnosť jeho regulácie. [4].

Dvojité transparentné fasády (DTF) predstavujú moderné a efektívne riešenie pre budovy, ktoré kladú dôraz na energetickú úspornosť, komfort a estetiku. Vďaka schopnosti maximalizovať využívanie denného svetla spolu s jeho voliteľnou reguláciou, prispievajú k vytváraniu zdravšieho a príjemnejšieho vnútorného prostredia. Fungovanie DTF je založené na interakcii medzi slnečným žiarením, tepelnými tokmi a vzduchom v medzipriestore. Integrované systémy tienenia a vetrania umožňujú aktívnu reguláciu týchto procesov. Vďaka tomu sa dosiahne optimálna tepelná pohoda a vizuálny komfort v interiéri budovy.

¹ Alžbeta Danková, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, SvF, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Inovatívna dvojité transparentná fasáda

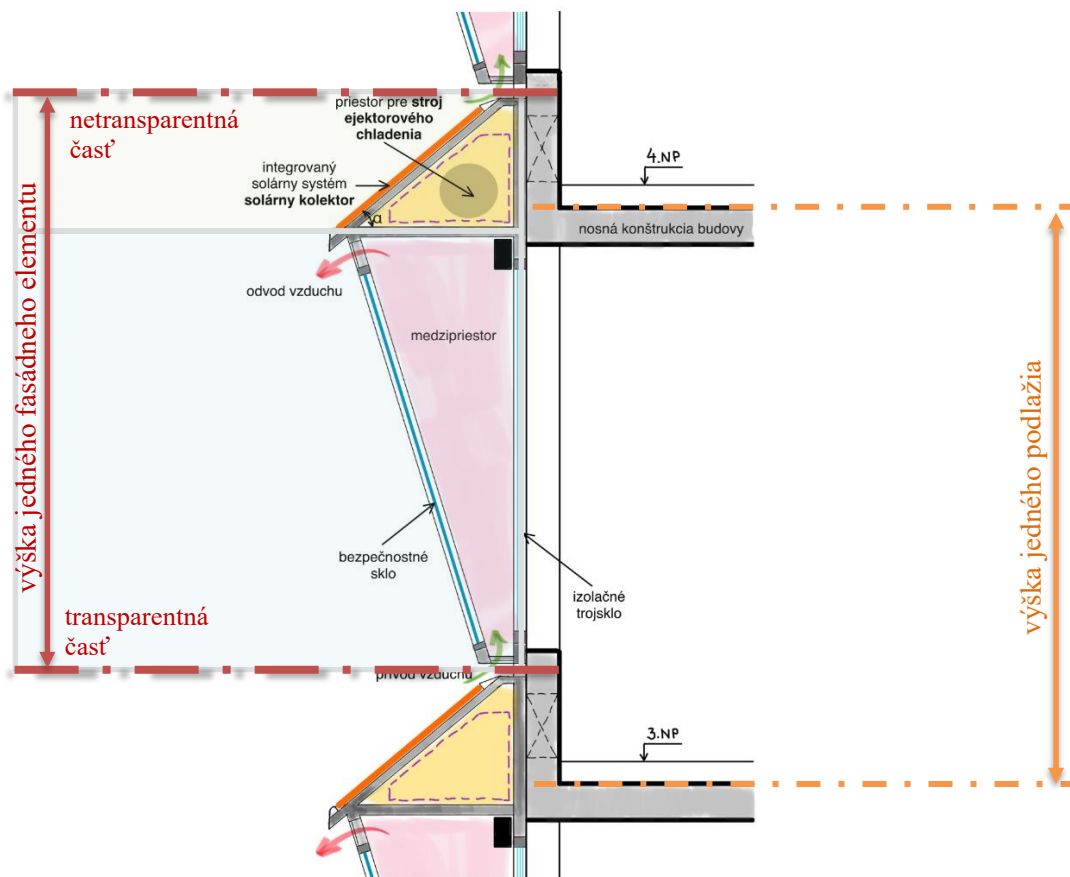
Geometria novo-navrhovanej dvojitej transparentnej fasády vychádza z rozmerov existujúcej jednoduchej transparentnej fasády, ktorá je osadená na experimentálnom zariadení Twin rooms v Centrálnych laboratóriách Stavebnej fakulty STU v Bratislave – Trnávke (Obr. 1). Základný modul skúmanej inovatívnej fasády má rozmery 2300×3360 mm. Konštrukcia fasády je navrhnutá z hliníkového modulového systému Schüco s prerušeným tepelným mostom, s tromi úrovňami funkčných tesnení, s kontrolovaným odvodom dažďovej vody a kondenzu v každom segmente fasádnych blokov.



Obrázok 1: a – základné rozmery fasádneho modulu, b – Twin rooms, jednoduchá fasáda je osadená vľavo.

Koncept novej adaptívnej fasády je riešený modulovo a má špecifický geometrický tvar (Obr. 2). Vonkajší plášť fasády je svojou konštrukciou a tvarom prispôsobený optimálnemu sklonu solárneho kolektora $\alpha = 40^\circ$ (plochý solárny kolektor orientovaný na južnú svetovú stranu). Vyroženie konzoly nad oknom má hodnotu 1,5 m.

Výplňou spodnej-šikmej (sklon 105° – medzi panelom so vstupnými otvormi medzipriestoru a šikmou spodnou časťou fasády) časti vonkajšieho plášťa je navrhované bezpečnostné sklo (vrstvené z dvoch skiel a s dvomi vrstvami fólie). Vnútorňý plášť má rovnaké vlastnosti ako jednoduchá fasáda. Vnútorňý plášť je tvorený hliníkovým rámom Schüco s dvomi integrovanými otváracími oknami s rozmerom krídla: $1,15 \text{ m} \times 2,285 \text{ m}$. Okná osadené do vnútorného plášťa sú zasklené izolačným trojsklom AGC Glass Thermobel TG Top s vysokou fyzikálnou kvantifikáciou (súčiniteľ prechodu tepla $U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, celková priepustnosť slnečného žiarenia $g = 53 \%$, svetelná priepustnosť $T_L = 76 \%$, index vzduchovej nepriezvučnosti $R_w = 35 \text{ dB}$). Horná nepriehľadná parapetná časť vnútorného plášťa fasádneho elementu je uzavretá oceľovým pozinkovaným plechom, za ktorým sa nachádza tepelnoizolačná výplň elementu z minerálnej vlny ($75 \text{ kg}/\text{m}^3$). Povrchová úprava jednotlivých materiálov je rôzna. Rámová konštrukcia fasády je tmavosivej farby z interiérovej aj exteriérovej strany. Okenné krídlo je z exteriérovej strany tmavosivej farby (tmavšie ako konštrukcia fasády) a z interiérovej strany svetlosivej farby.



Obrázok 2: Schematický rez fragmentom novo navrhovanej dvojitej transparentnej fasády.

3. Metodika

Pri navrhovaní denného osvetlenia, v zmysle platných noriem na Slovensku, sa vychádza zo štandardnej, rovnomerne zamračenej oblohy s gradovaným jasom 1:3 (STN 730580) [7]. Úroveň jasú takejto oblohy nezávisí od azimutálneho smeru, rovnomerne stúpa smerom od horizontu k zenitu. Pri navrhovaní veľkosti okien podľa tohto predpisu nezáleží na orientácii okna vzhľadom na svetové strany. Ďalšie vo svete používané metódy využívajú dynamické simulácie s generovaním oblohy (napr. podľa Pereza [8]) a so vstupmi v podobe celoročných klimatických dát.

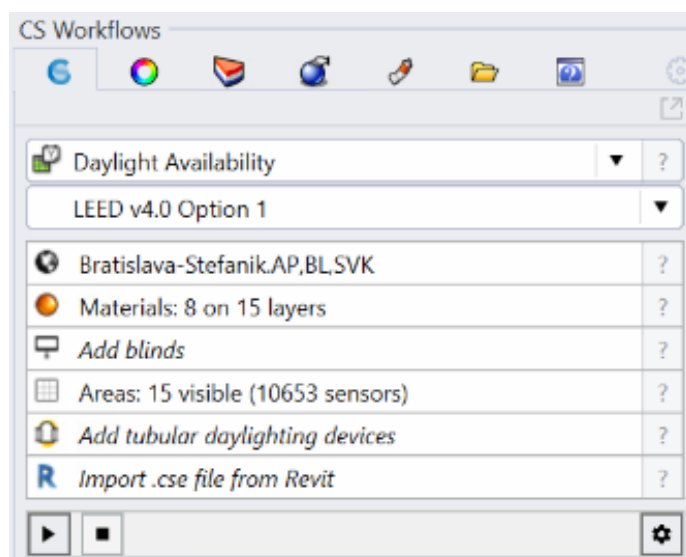
Vo všeobecnosti, podmienky zrakovej pohody sa musia zachovávať pri všetkých stavoch svetelnej klímy aby sme zabránili nepríjemným stavom. Normatívne sú parametre svetelného prostredia definované:

- činiteľom dennej osvetlenosti (č.d.o.),
- jasovými pomermi na plochách v interiéri [11].

Navrhovaná dvojité transparentná fasáda bola spolu s referenčnou budovou geometricky namodelovaná v počítačovom softvéri Rhino 7 a na výpočet bol použitý výpočtový modul ClimateStudio - časť Daylight Availability pre hodnotenie dostupnosti denného svetla. ClimateStudio používa progresívnu verziu metódy sledovania lúčov Radiance na simuláciu rozloženia osvetlenia. Počas simulácie sa akumulujú sledované svetelné dráhy až do dosiahnutia používateľom zadaného počtu iterácií [5], čo je v tomto prípade 100 (Max number of passes). Počet lúčov v jednej iterácii (Samples per pass) je 64. Počet odrazov (Ambient bounces) je 6. Navrhovaná DTF má v medzipriestore umiestnené žalúzie, ktoré v simulácii nie je uvažované, avšak budú zohľadnené v ďalších fázach výskumu experimentálnej DTF. Sledované sú typické kancelárie v 3 vybrané podlažia – 1.NP, 10. NP a 15.NP pre odstupňovanie vplyvu odrazu od okolitého terénu. V simulácii v tomto

kroku nebolo uvažované s okolitými tieniacimi prekážkami, ktoré v praxi majú na výsledok veľký vplyv. V tomto článku sme sa venovali samotnej geometrii fasády a jej vplyvu na vnútornú svetelnú klímu.

Základné nastavenia simulácie sú zobrazené na obr. 3. Osvetlenie sa hodnotí v pracovnej rovine, ktorá je štandardne vo výške 0,85 m nad úrovňou podlahy. Tabuľka 1 obsahuje činitele odrazu svetla pre vnútorné a vonkajšie povrchy. V tabuľke 2 sú optické hodnoty vlastnosti zasklení. Na základe daných vlastností boli vypočítané hodnoty činiteľa dennej osvetlenosti č.d.o. (%) pre posudzované priestory a kancelárie pomocou statickej metódy pri rovnomerne zamračenej oblohe.



Obrázok 3: Základné nastavenie v ClimateStudio Workflows (v prípade činiteľa denného osvetlenia bola použitá časť Daylight Factor a v prípade zrakovej pohody LEED v4.0 Option 1, lokalita: Bratislava, tienenie nebolo uvažované).

Tabuľka 1: Činiteľ odrazu svetla použitých materiálov

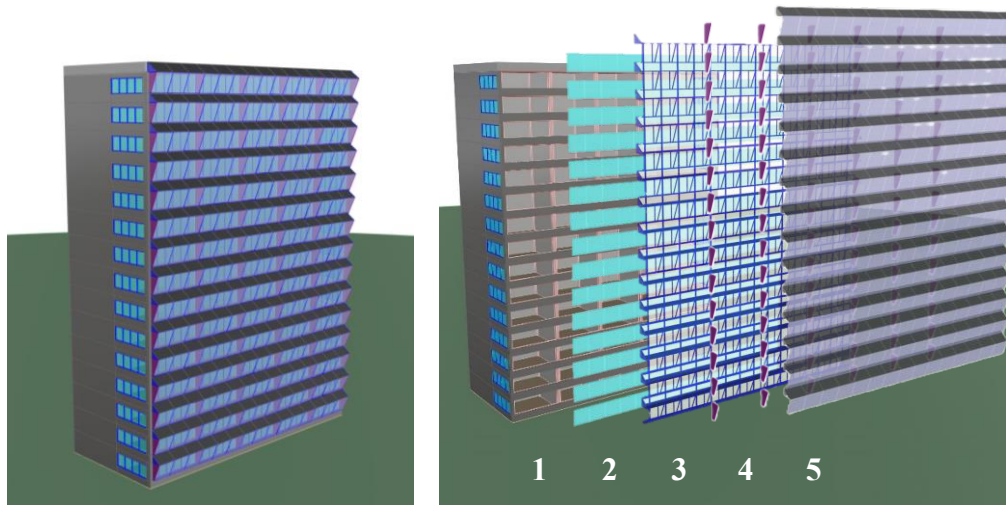
Názov povrchu/materiálu	Koeficient odrazu svetla
Terén	0,20
Exteriérová stena	0,35
Interiérová stena	0,60
Podlaha	0,35
Strop	0,80
Strecha	0,35
Rám fasády/okna	0,35
Predelenie modulov	0,35
Plocha pre solárny systém	0,10

Tabuľka 2: Optické vlastnosti zasklenia (τ_{ze} – vonkajší činiteľ znečistenia zasklenia, τ_{zi} – vnútorný činiteľ znečistenia zasklenia, τ_k – činiteľ priestupu svetla zohľadňujúci vplyv rámovej konštrukcie okna). Hodnoty znečistenia vychádzajú z tabuľky č.3 v STN 73 0580 s uvažovaním stredne znečisteného vonkajšieho a čistého vnútorného prostredia. Sklo, rámy a podporné konštrukcie boli modelované samostatne.

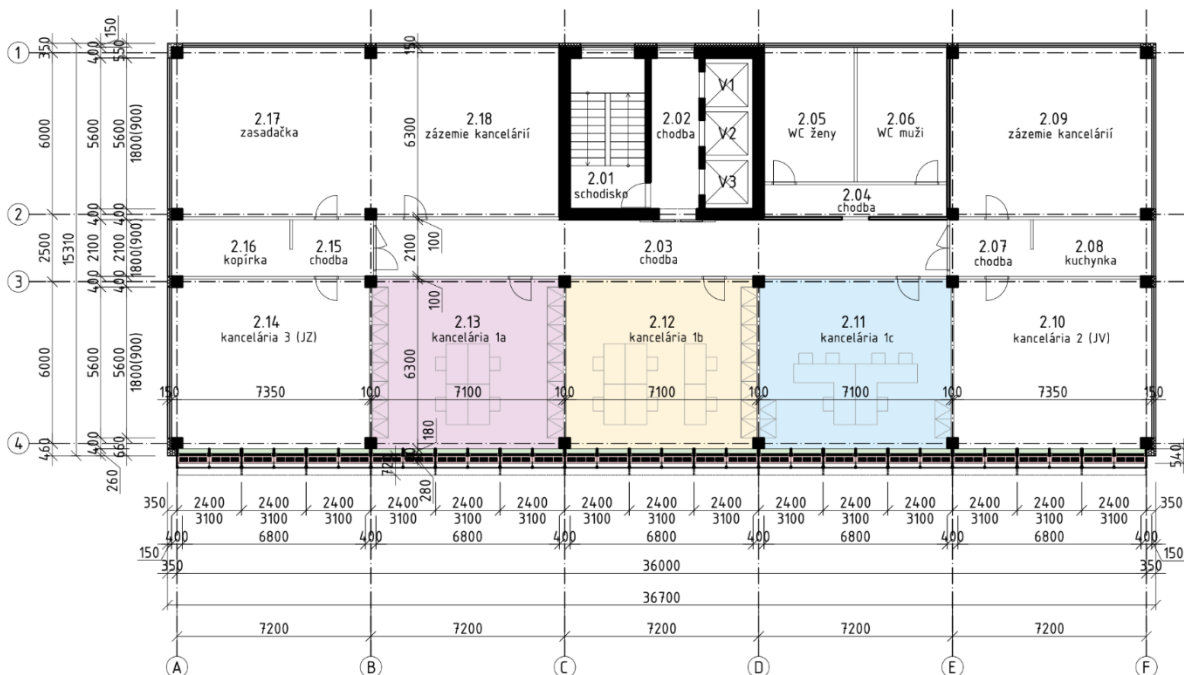
Zasklenie	τ_{ze}	τ_{zi}	τ_k	$\tau_{ze} \cdot \tau_{zi} \cdot \tau_k$	$\tau_{s,nor}$	τ
Izolačné trojsklo	0,90	0,95	1	0,855	0,898	0,7680
Bezpečnostné zasklenie	0,90	0,95	1	0,855	0,826	0,7063

3.1 Referenčná budova

DTF je primárne určená pre administratívne budovy, z tohto hľadiska je potrebné v praxi vykonať niekoľko posúdení – z požiarného hľadiska, z hľadiska energetickej bilancie, svetelnej techniky, a pod. Pre potreby týchto posúdení bola vytvorená referenčná administratívna budova (Obr. 4). Na jednom podlaží sa nachádzajú 3 skúmané referenčné kancelárie (Obr. 5). Jedna kancelária má rozmery $7,1 \times 6,3$ m (plocha = $44,73 \text{ m}^2$), exteriérová stena je zložená z 3 fasádnych modulov. Jednotlivé moduly sú uzatvorené v mieste priečok z bočnej strany netransparentnou konštrukciou. Svetlá výška miestnosti je 3,1 m.



Obrázok 4: 3D model referenčnej budovy (1 – administratívna budova; 2 – zasklenie izolačným trojsklom vnútorného plášťa DTF; 3 – nosná rámová konštrukcia DTF; 4 – predeľovacia konštrukcia medzi kanceláriami; 5 – vonkajší plášť DTF, bezpečnostné zasklenie a šikmá konštrukcia pre solárny systém).



Obrázok 5: Pôdorys typického podlažia 1.NP, 10.NP a 15.NP.

3.2 Činiteľ denného osvetlenia v zmysle STN 73 0580

Kancelárie patria do skupiny priestorov s dlhodobým pobytom ľudí, a preto musia spĺňať požiadavky na denné svetlo. Spôsob a kritériá posudzovania denného osvetlenia sú uvedené v Z.z. č. 541/2007 a v norme STN 73 0580-1 [6], [7]. Funkčne vymedzená časť priestoru s dostatočným osvetlením sa určuje tak, aby jej pôdorysná plocha tvorila najmenej 10 m² alebo najmenej 1/3 pôdorysnej plochy vnútorného priestoru. Funkčne vymedzená časť musí byť vyznačená v projektovej dokumentácii. Vo vnútornom priestore s nedostatočným denným osvetlením možno riešiť osvetlenie ako združené osvetlenie, ak sú splnené dané požiadavky na denné osvetlenie.

Požiadavky na denné osvetlenie pracovísk [6], [7], [10]

Vo vnútorných priestoroch, alebo v ich funkčne vymedzených častiach s dlhodobým pobytom zamestnancov, sú najnižšie prípustné hodnoty činiteľa dennej osvetlenosti:

- pri bočnom osvetlení $D_{min} = 1,5 \%$,
- pri hornom a kombinovanom osvetlení $D_{min} = 1,5 \%$ a $D_m = 3 \%$.

Požiadavky na združené osvetlenie pracovísk [6], [7], [10]

Združené osvetlenie sa používa vo vnútorných priestoroch, alebo v ich funkčne vymedzených častiach, v ktorých činitele dennej osvetlenosti sú nižšie, ako sú požadované podľa bodu 1, ale dosahujú najmenej 1/3 týchto hodnôt:

- pri bočnom osvetlení $D_{min} = 0,5 \%$,
- pri hornom a kombinovanom osvetlení $D_{min} = 0,5 \%$ a $D_m = 1 \%$.

3.3 Dostupnosť denného osvetlenia

Podľa normy STN EN 17 037 [14] sa dostupnosť denného svetla určuje mediánom horizontálnej difúznej osvetlenosti v danej lokalite. Denné svetlo má zabezpečiť úroveň prírodného osvetlenia vyššie ako sú kritické pre zrakové úlohy. Úroveň denného osvetlenia 300 lux je primeraná a minimum 100 lux ako akceptovateľná [9].

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) je systém hodnotenia zelených budov. Tento systém ponúka dve možnosti založené na simulácii na dosiahnutie jeho kreditu za denné svetlo. Možnosť 1 simuluje dostupnosť denného svetla počas celého roka, zatiaľ čo možnosť 2 simuluje dostupnosť denného svetla v dvoch konkrétnych časových okamihoch.

Ako dodatok k štandardnému posúdeniu činiteľa dennej osvetlenosti sme využili aj nové metódy hodnotenia dostupnosti denného osvetlenia (LEED v4 Daylight Option 1) založeného na nasledovných metrikách:

Ročná expozícia slnečnému žiareniu (ASE1000,250 - Annual Sunlight Exposure) [10]

Ročná expozícia slnečnému žiareniu sa vzťahuje na percento priestoru, ktorý dostáva príliš veľa priameho slnečného žiarenia (1 000 luxov alebo viac počas viac ako 250 hodín ročne), čo môže spôsobiť oslnenie alebo zvýšenú záťaž na systém chladenia budovy. Maximálne 10% využívaného priestoru môže presiahnuť túto hranicu.

Priestorová autonómia denného svetla (sDA300,50% – Spatial Daylight Autonomy) [10]

Priestorová autonómia denného svetla popisuje využitie denného svetla v budove a na pracovisku. Stanovená hodnota udáva percento plochy, ktorá má osvetlenie viac ako 300 luxov od denného svetla počas aspoň 50 % ročného času používania (sDA300,50 %). Táto analýza ukazuje, do akej miery je možné využívať bežné obsadené pracovné priestory bez dodatočného umelého osvetlenia. Požaduje sa minimálne 55% podlahovej plochy miestnosti s trvalým pobytom osôb.

Priemerná osvetlenosť z denného svetla (Average Illuminance from Daylight) [10]

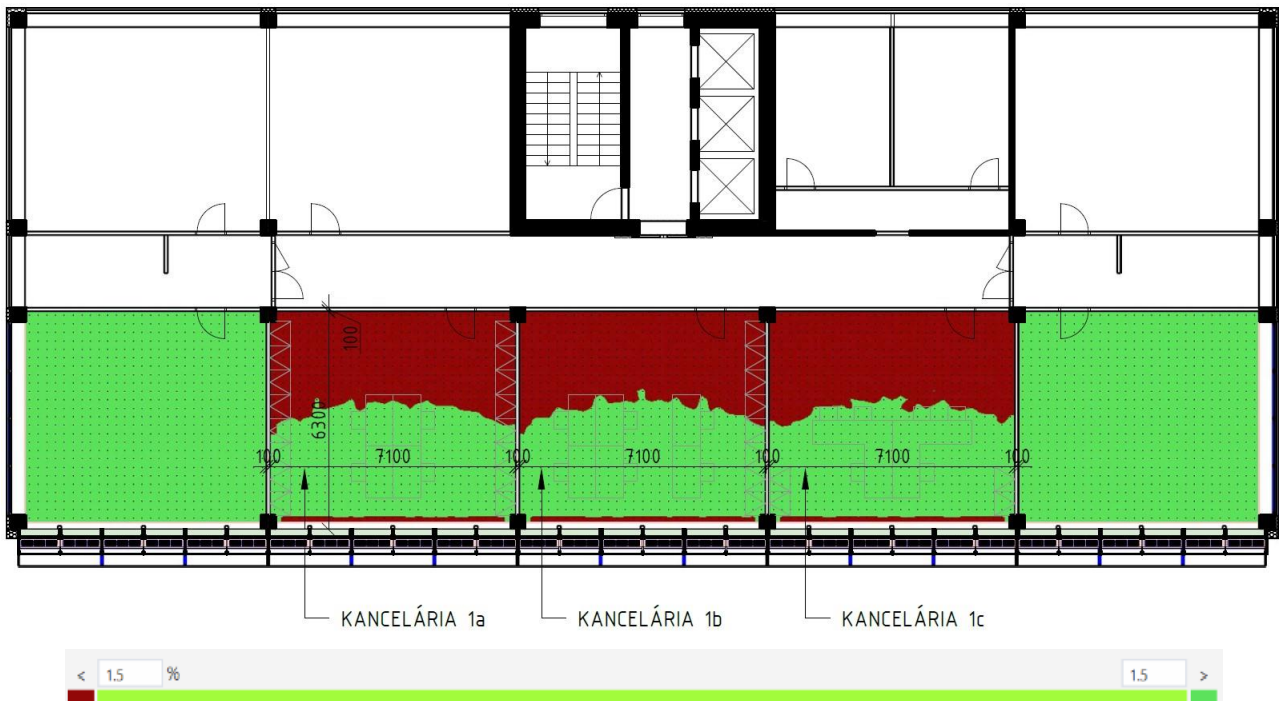
Priemerná osvetlenosť z denného svetla popisuje priemerné ročné množstvo denného svetla dopadajúceho alebo osvetľujúceho danú pracovnú rovinu, uvádza sa v luxoch. Sledujeme hodnotu min. 300 lx z denného osvetlenia ako cieľovú hodnotu.

4. Výsledky

V posudku bol použitý simulačný program globálnej osvetlenosti Radiance [12]. Hodnotené boli všetky kancelárie orientované na južnú svetovú stranu na 1. NP, 10. NP a 15. NP. Rohové kancelárie, ktoré disponovali oknami aj na bočnej fasáde, okrem dvojitej transparentnej fasády, poskytovali samozrejme ešte väčšiu dostupnosť denného svetla. Výsledky sú zobrazené pomocou grafických máp vložených do pôdorysov.

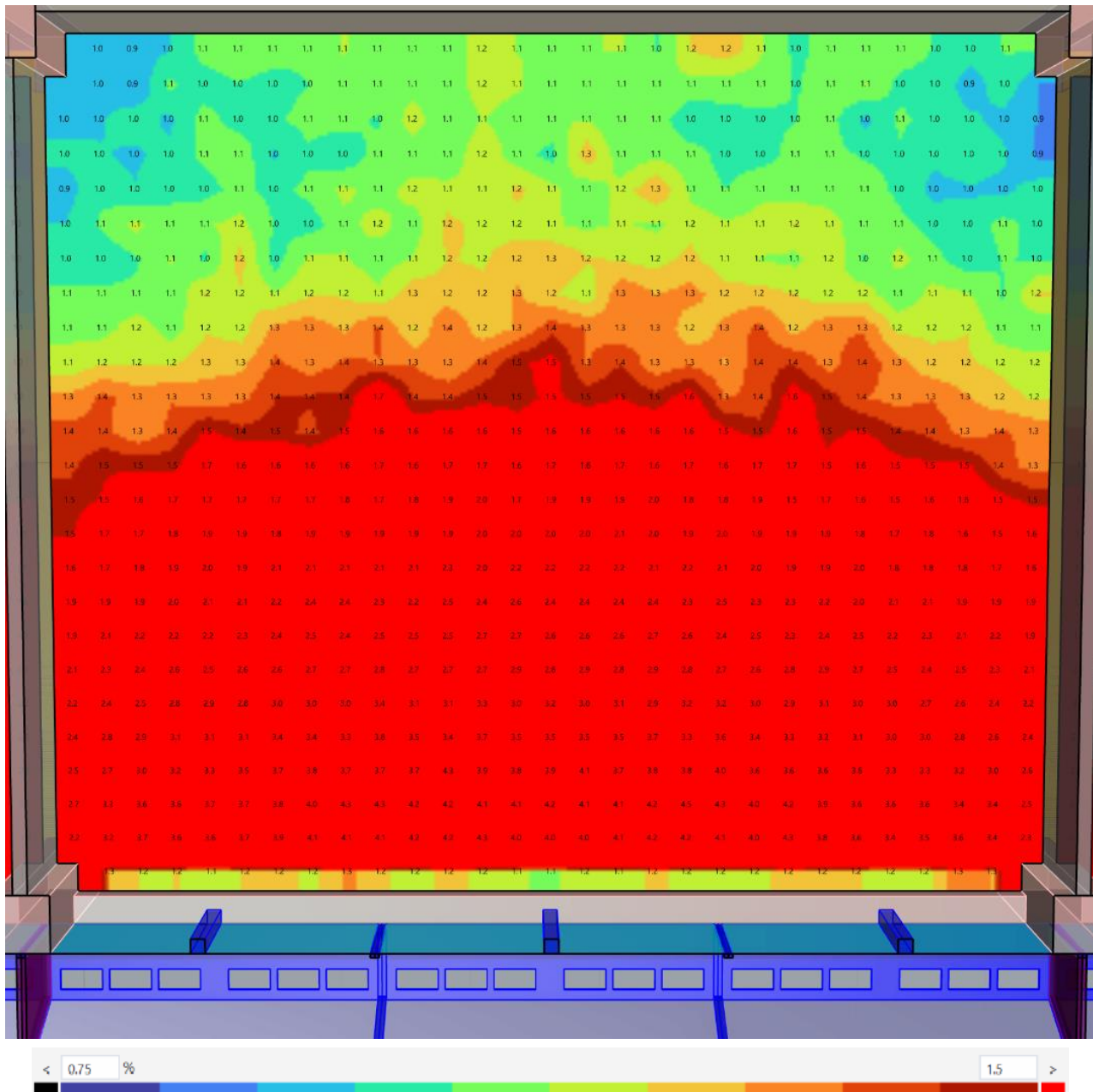
4.1 Výsledky výpočtu činiteľa denného osvetlenia

Na obrázkoch (obr. 6 až obr. 10) sú dokumentované rozloženia činiteľa dennej osvetlenosti (č.d.o.) (%) v posudzovaných priestoroch. Na obrázku č. 6 sú znázornené výsledky č.d.o. pre 1.NP pomocou grafickej mapy s izofotou nastavenou na požadovaných 1,5%. Z obrázku vyplýva, že v troch kritických kanceláriách v strede pôdorysu je hodnota č.d.o. pri bočnom osvetlení $D_{min} \geq 1,5 \%$ približne do polovice miestnosti (3,15 m). V kanceláriách je znázornené aj umiestnenie pracovných pozícií uvažovaných v architektonickej štúdii.



Obrázok 6: Výsledky č. d. o. na 1.NP.

Obrázok 7 zobrazuje farebnú mapu výsledkov č.d.o. 1NP s presnými vypočítanými hodnotami v kancelárii 1b. Rozsah hodnôt č.d.o. je v rozmedzí 4,7%-0,9%. Izofota 1,5% rozdeľuje miestnosť približne na polovicu a oddeľuje tak priestor na dostatočne presvetlený denným osvetlením a na priestor so združeným osvetlením. V prípade potreby využitia aj tejto časti priestoru na dlhodobý pobyt osôb je potrebné zabezpečenie trvalého doplnenia denného svetla umelým osvetlením na úroveň $E_m=500$ lux. Vzhľadom na skutočnosť, že v priestore nepoklesne úroveň č.d.o. pod 0,5 % (priestory bez denného osvetlenia), nie je potrebné zabezpečovať ďalšie navyšovanie úrovni intenzít umelého osvetlenia. Podľa normy sa č.d.o. hodnotí v bodoch umiestnených v pravidelnej sieti bodov 1 m od stien, pričom pre prehľadnejšie vykreslenie izofot sme využili celú plochu miestnosti.



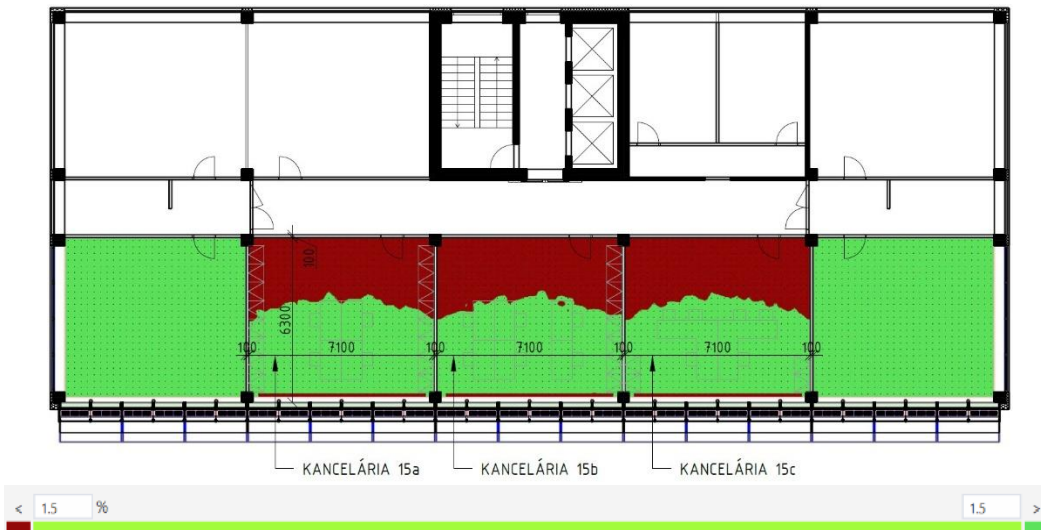
Obrázok 7: Výsledky č. d. o 1. pre kanceláriu 1b na 1.NP.

Výsledky činiteľa denného osvetlenia sú na vybraných podlažiach (1.NP, 10. NP a 15.NP) takmer totožné (vplyv vzdialenosti od terénu). Na obrázku 8 a obrázku 9 sú schematicky zobrazené výsledky v pôdorysoch typických podlaží, ktoré slúžia na vizuálne porovnanie. Výsledky činiteľa denného osvetlenia v kancelárii 1b na 10. NP a 15. NP sú na obrázku 10.

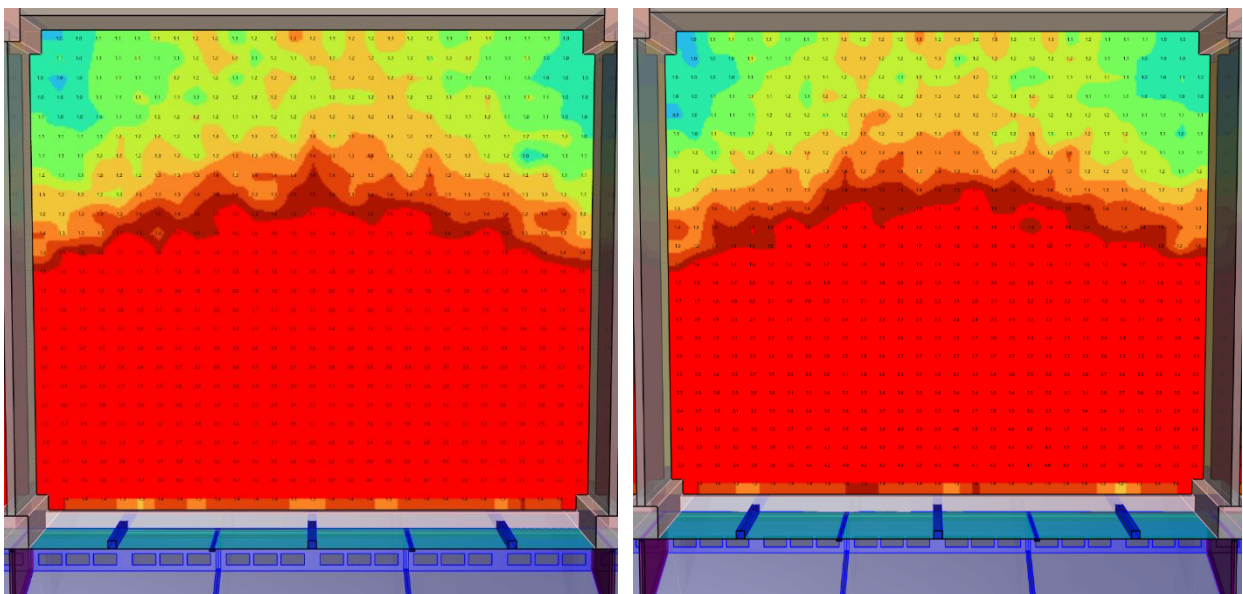
Výsledky činiteľa denného osvetlenia by boli na vybraných podlažiach (1.NP, 10. NP a 15.NP) rozličné vtedy, ak by sa v modeli vytvorila prekážka (s typickými ekvivalentnými uhlami tienenia 25°, 30°, 36° a 42°). Na nižších podlažiach bude prekážka blokovať výrazne viac oblohového svetla, ktoré obmedzí prienik denného svetla do vnútorných priestorov. Na vyšších podlažiach bude vplyv prekážky menej výrazný, pretože priame oblohové svetlo bude mať väčší podiel.



Obrázok 8: Výsledky č. d. o. na 10. NP.



Obrázok 9: Výsledky č. d. o. na 15. NP.

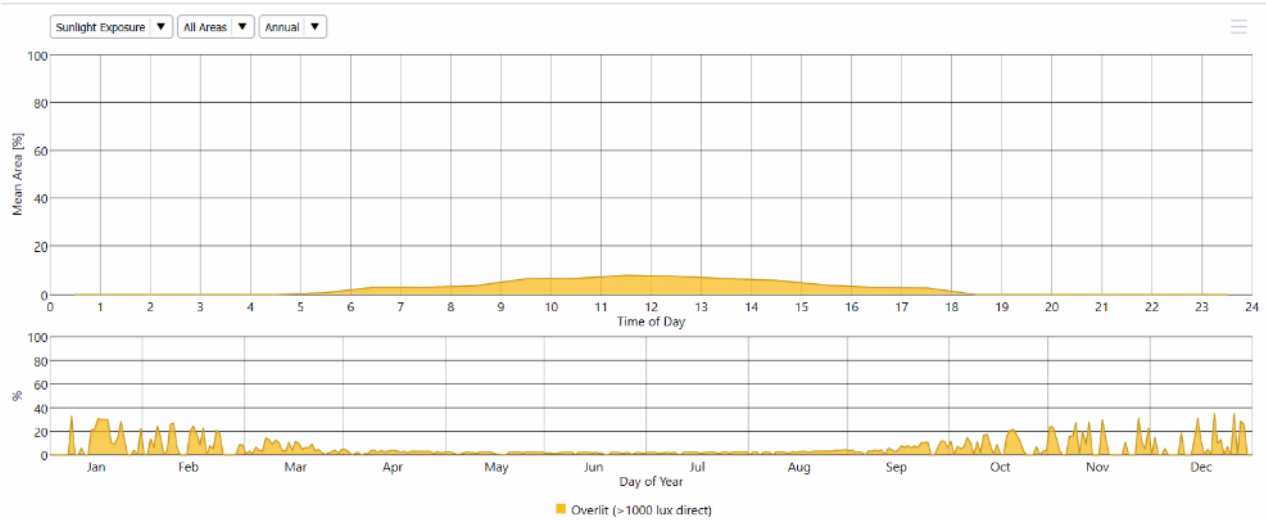


Obrázok 10: Výsledky č. d. o. pre kanceláriu 1b na 10.NP (vľavo) a na 15. NP (vpravo).

4.2 Výsledky dynamických simulácií na dostupnosť denného osvetlenia

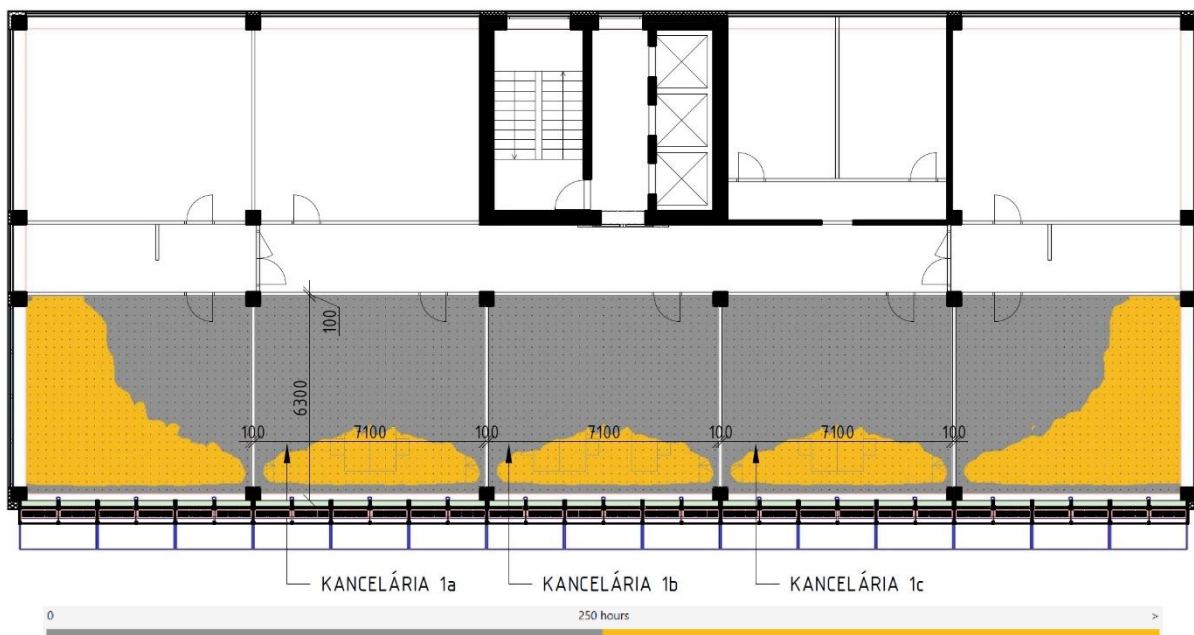
Na obrázkoch (obr. 11 až obr. 19) sú dokumentované výsledky simulácií na posúdenie zrakovej pohody - ročná expozícia slnečnému žiareniu ASE1000,250; priestorová autonómia denného svetla sDA300,50% a priemerná osvetlenosť denným svetlom.

Na obrázku 11 je graf ročnej expozície slnečnému žiareniu pre vybrané posudzované tri podlažia. Horný graf zobrazuje priemernú plochu vystavenú slnečnému žiareniu v rôznych časoch dňa. Vrchol expozície slnečnému žiareniu nastáva približne na poludnie (12:00) a postupne klesá smerom k východu a západu slnka. Množstvo expozície slnečnému žiareniu sa mení počas roka, pričom dlhšie dni a vyšší uhol slnka v lete vedú k väčšej expozícii slnečnému žiareniu v porovnaní s kratšími dňami a nižším uhlom slnka v zime. Dolný graf ukazuje percento celkovej plochy, ktorá prijíma priame slnečné žiarenie presahujúce 1000 luxov.



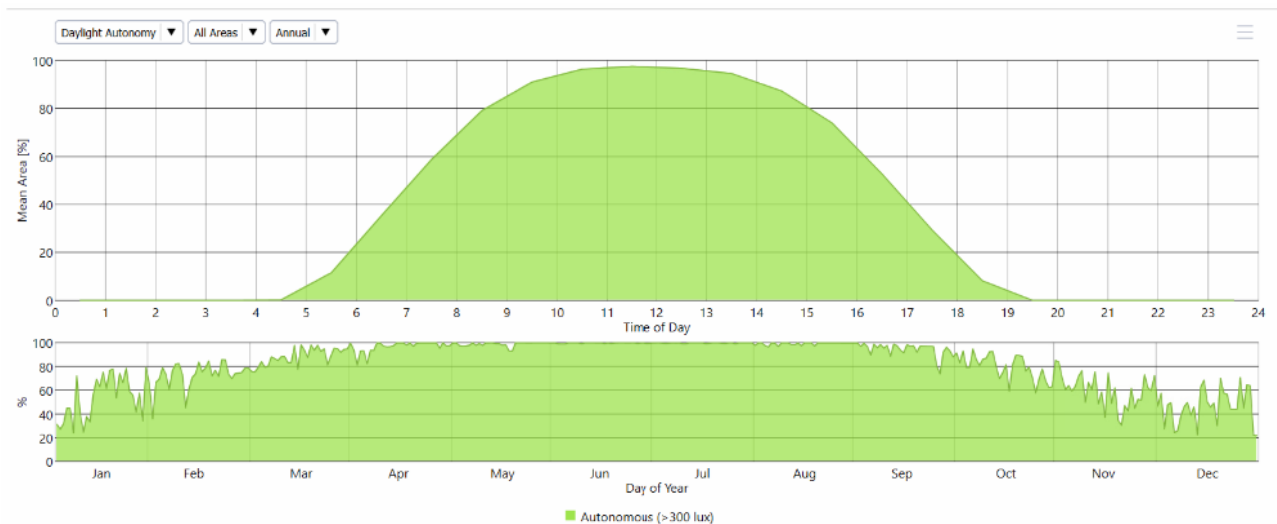
Obrázok 11: Graf ročnej expozície slnečnému žiareniu.

Podobne ako pri čítneli denného osvetlenia, tak aj tu sa výsledky medzi vybranými poschodiami prakticky nelíšia. Vzhľadom na túto skutočnosť sú v tomto článku zobrazené výsledky pre 1.NP (obr. 12 a obr. 16). Hodnota ASE na 1.NP je 32,44% a na 10.NP a 15.NP sa rovná 32,21%.



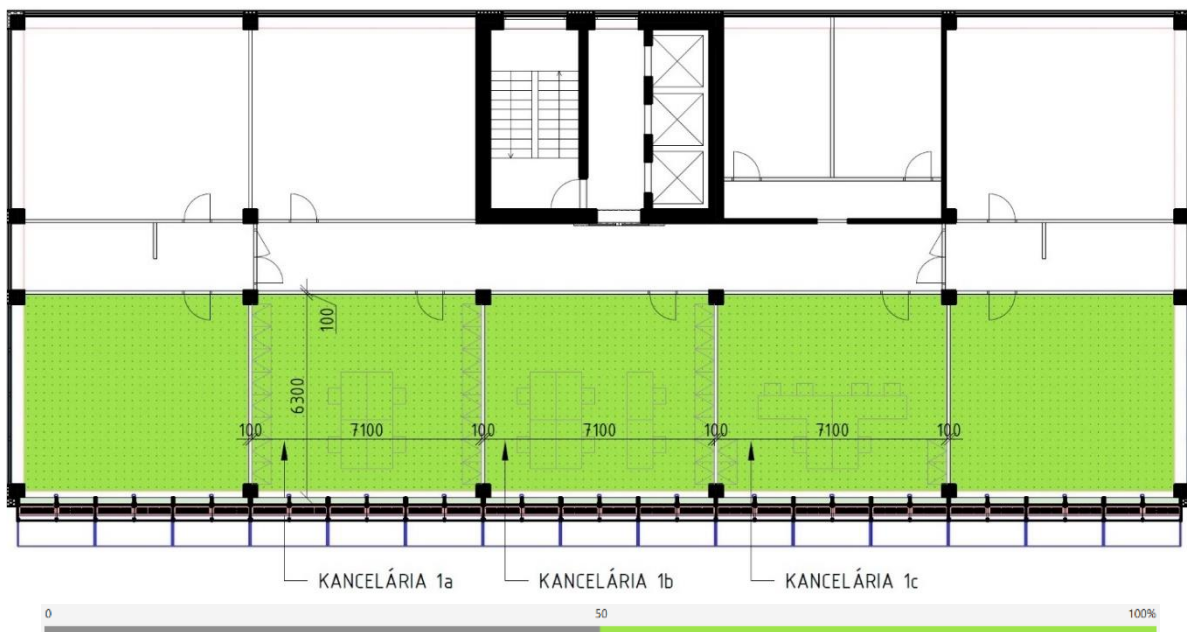
Obrázok 12: Výsledky ročnej expozície slnečnému žiareniu (ASE) na 1.NP.

Na obrázku 13 je graf priestorovej autonómie denného svetla pre vybrané posudzované tri podlažia. Horný graf zobrazuje priemernú plochu vystavenú slnečnému žiareniu v rôznych časoch dňa. Dolný graf ukazuje percento celkovej plochy, ktorá prijíma priame slnečné žiarenie presahujúce 300 luxov (čo sa považuje za autonómne denné svetlo). Množstvo autonómnych oblastí sa mení počas roka, pričom vrcholy sa vyskytujú v letných mesiacoch a minimálne autonómne oblasti v zime. Graf zdôrazňuje konkrétne obdobia dňa a roka, kedy je autonómia denného svetla dostatočná a umelé osvetlenie nemusí byť potrebné. Kancelárie sú vystavené významnej expozícii slnečného žiarenia počas väčšiny roka, najmä v letných mesiacoch.

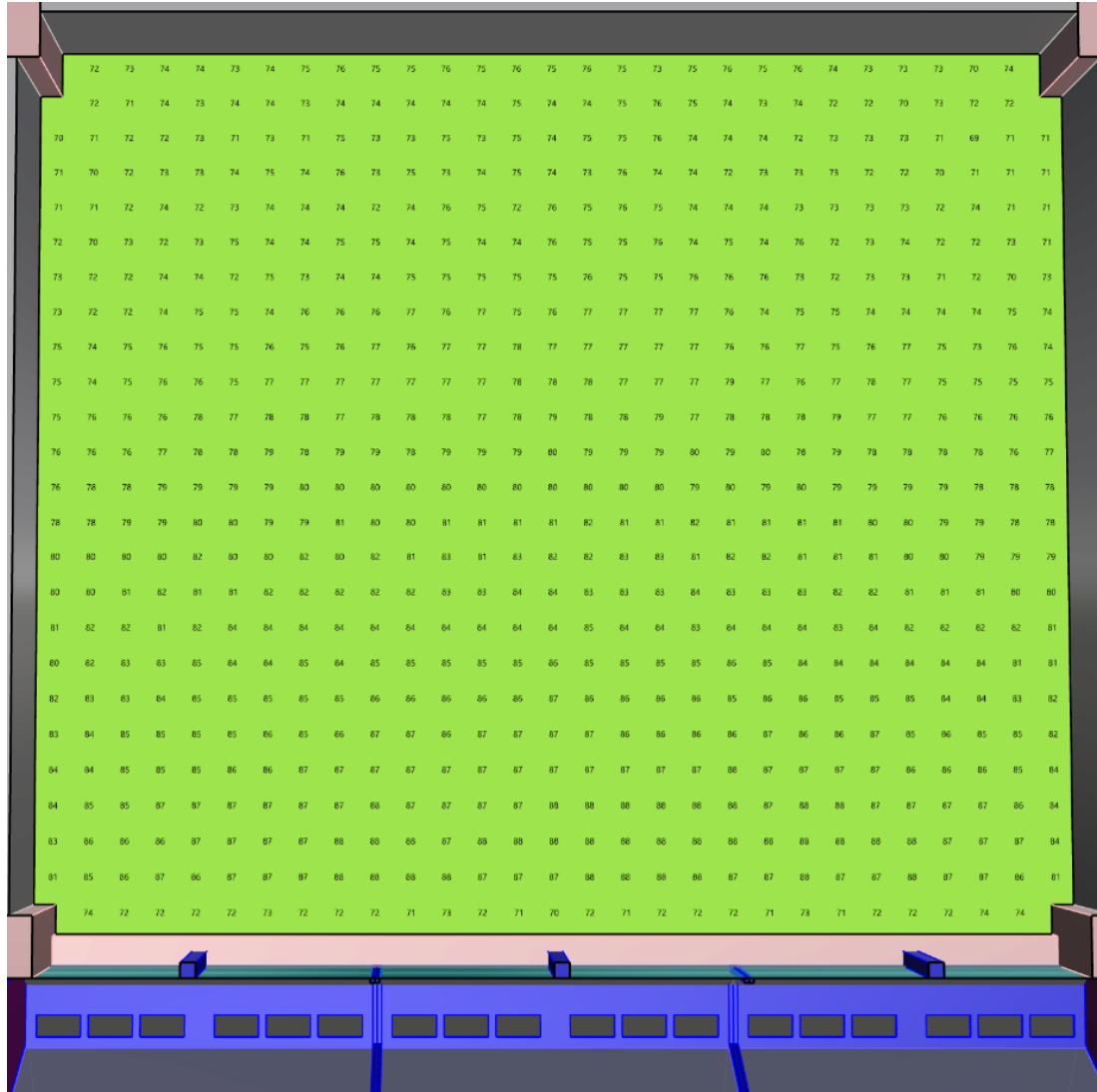


Obrázok 13: Graf priestorovej autonómie denného svetla.

Z výsledkov vyplýva, že všetky posudzované miestnosti spĺňajú podmienku osvetlenia viac ako 300 luxov od denného svetla počas aspoň 50 % ročného času používania. Rovnako ako pri číselni denného osvetlenia, tak aj tu sa výsledky medzi vybranými poschodiami prakticky nelíšia. Vzhľadom na túto skutočnosť sú v tomto článku zobrazené výsledky pre 1.NP (obr. 14, obr. 15 a obr. 19).

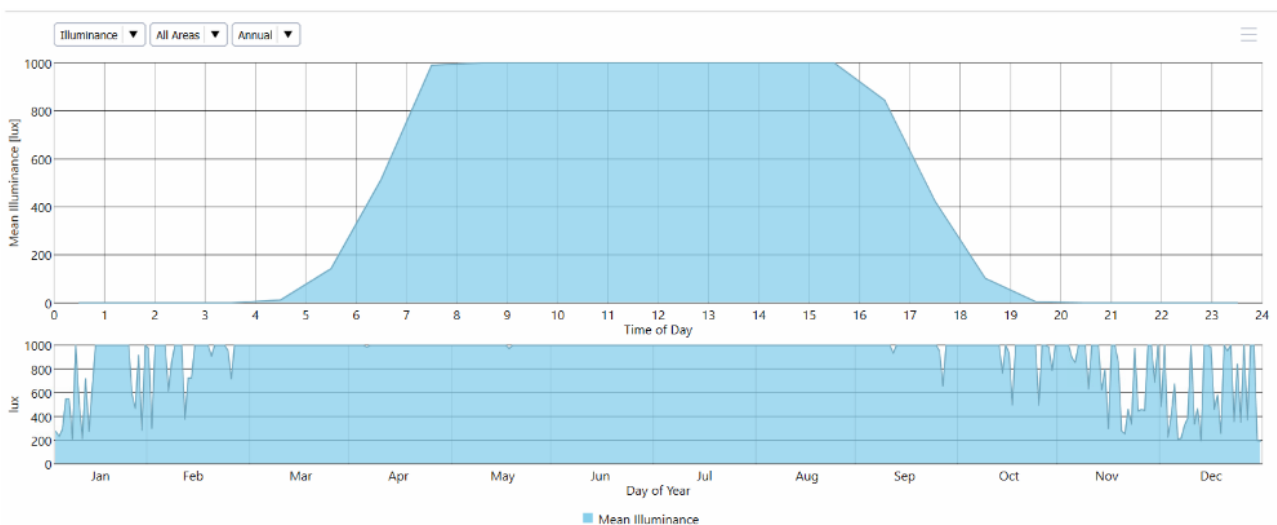


Obrázok 14: Výsledky priestorovej autonómie denného svetla na 1.NP.



Obrázok 15: Výsledky priestorovej autonómie denného svetla pre kanceláriu 1b na 1.NP.

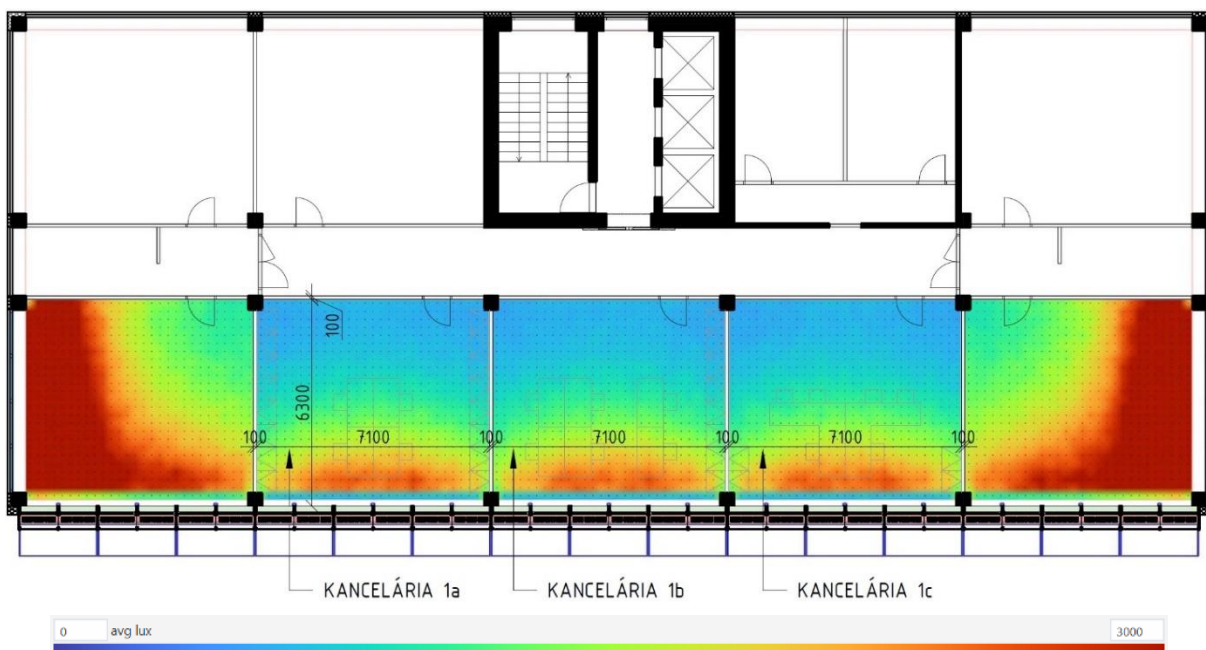
Na obrázku 16 je graf priemernej osvetlenosti z denného svetla pre vybrané posudzované tri podlažia.



Obrázok 16: Graf priemernej osvetlenosti z denného svetla.

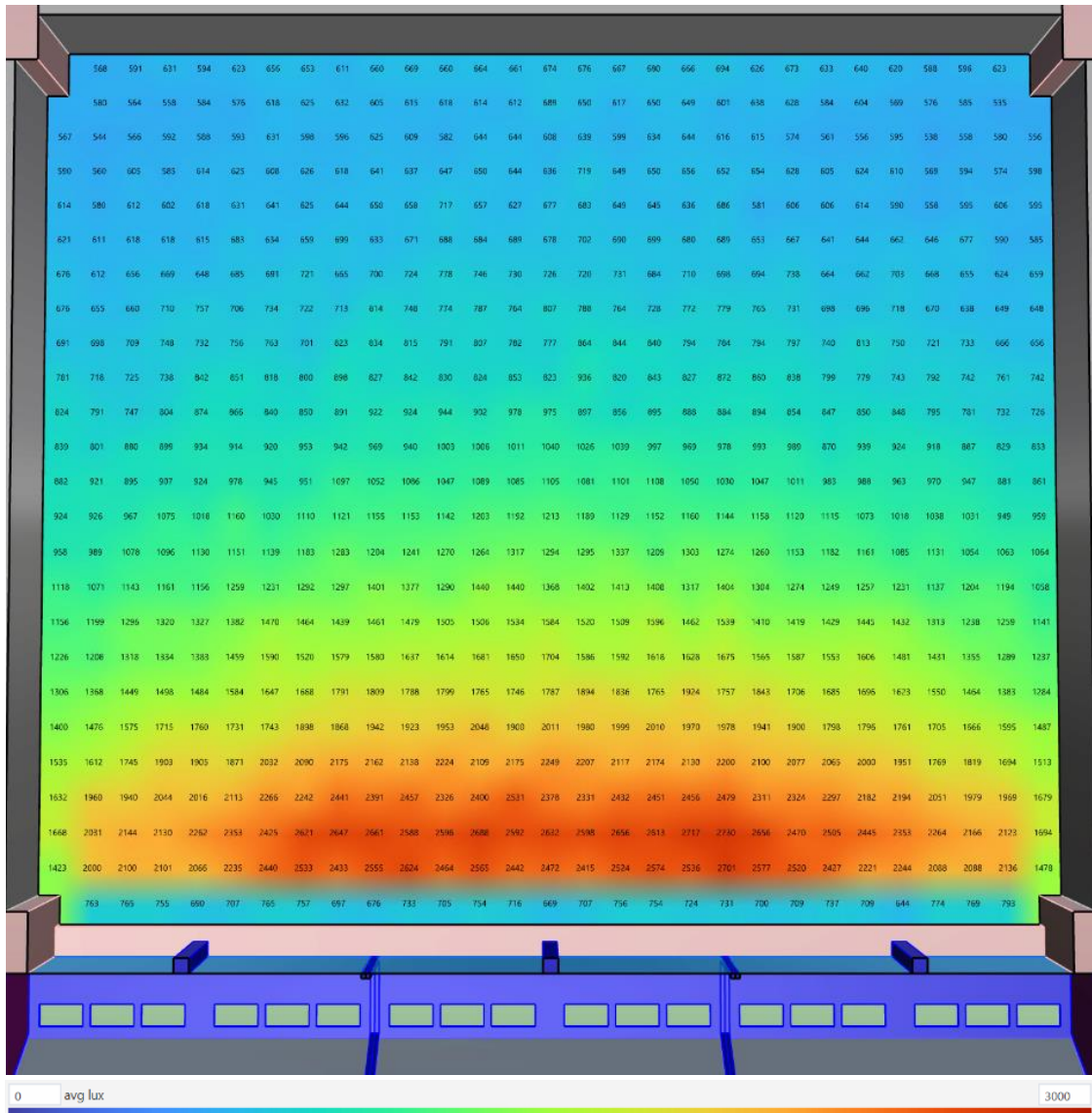
Horný graf na obrázku 16 jasne ukazuje typický denný cyklus osvetlenia. Osvetlenie ráno stúpa, dosahuje maximum okolo poludnia a potom klesá až do večera. Maximálna úroveň osvetlenia je pomerne vysoká, čo naznačuje, že priestor je počas dňa veľmi dobre osvetlený prirodzeným svetlom. Dolný graf ukazuje výrazné sezónne zmeny v úrovni osvetlenia. Najvyššie hodnoty sú zaznamenané v letných mesiacoch, najnižšie v zimných. Celková tendencia grafu naznačuje, že priestor má dostatok denného svetla počas väčšiny roka, najmä v letných mesiacoch. Aj keď je celková úroveň osvetlenia vysoká, môžu existovať možnosti na ďalšiu optimalizáciu, napríklad pomocou inteligentných systémov riadenia osvetlenia, ktoré by automaticky upravovali úroveň umelého osvetlenia podľa dostupnosti denného svetla.

Z výsledkov na obrázku č. 17 vyplýva, že priemerné ročné množstvo denného svetla dopadajúceho alebo osvetľujúceho danú pracovnú rovinu je od 525 luxov do 2730 luxov. Rovnako ako pri činiteli denného osvetlenia, tak aj tu sa výsledky medzi vybranými poschodiami prakticky nelíšia. Vzhľadom na túto skutočnosť sú v tomto článku zobrazené výsledky pre 1.NP (obr. 17 a obr. 18).

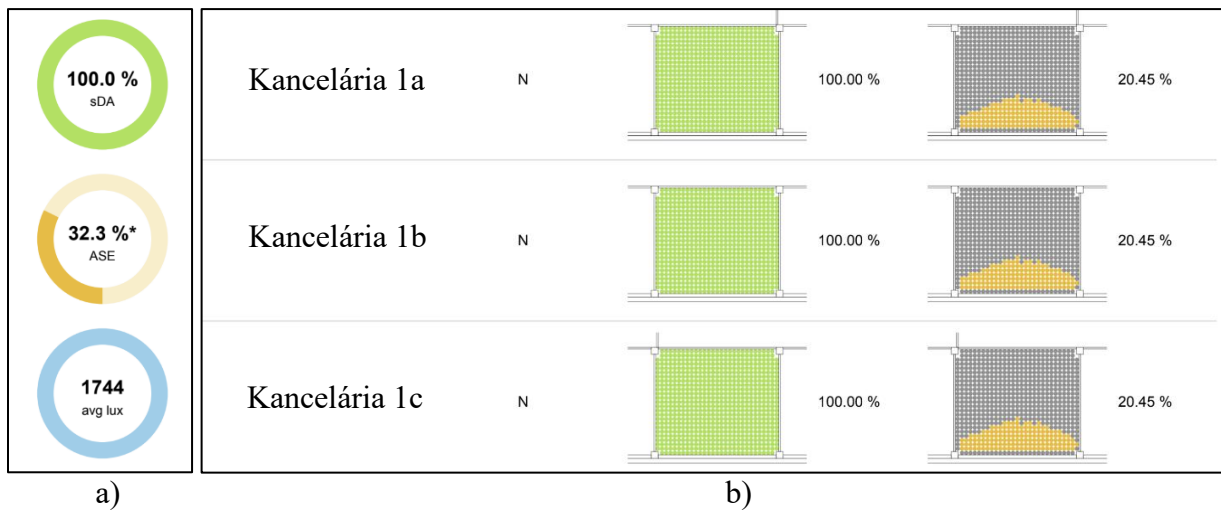


Obrázok 17: Výsledky priemernej osvetlenosti z denného svetla na 1.NP.

Na obrázku 19 sú zosumarizované výsledky dynamických simulácií na dostupnosť denného osvetlenia. Obrázok je rozdelený na dve časti: a) kruhy zobrazujú priemerné výsledky pre tri vybrané podlažia – zelený kruh = ročná expozícia slnečnému žiareniu 100%, žltý kruh = priestorová autonómia denného svetla 32,3% a modrý kruh = priemerná osvetlenosť z denného svetla 1744; b) 1.NP a tri skúmané kancelárie s výsledkami ASE a sDA, písmeno N označuje, že v simulácii neboli použité žiadne tieniace prvky. Priemerné hodnoty uvedené na obrázku 19a predstavujú výsledky z troch podlaží, pričom na každom podlaží je umiestnených 5 kancelárií (tri skúmané kancelárie a dve rohové kancelárie s DTF aj s oknami na bočnej fasáde).



Obrázok 18: Výsledky priemernej osvetlenosti z denného svetla pre kanceláriu 1b na 1.NP.



Obrázok 19: a) kruhy naľavo zobrazujú hodnoty výsledkov pre všetky posudzované kancelárie na troch podlažiach spolu. b) výsledky ročnej expozície slnečnému žiareniu a priestorovej autonómie denného svetla v troch vybraných kanceláriách na 1.NP.

5. Záver

Využitie prirodzeného svetla v administratívnych budovách predstavuje významný nástroj na zvyšovanie energetickej účinnosti prostredníctvom redukcie spotreby umelého osvetlenia, vykurovania a chladenia. Optimalizácia denného osvetlenia je jedným z najúčinnějších spôsobov, ako dosiahnuť vysokú energetickú účinnosť budov a znížiť ich ekologickú stopu. Okrem energetických úspor má denné svetlo pozitívny vplyv na kvalitu vnútorného prostredia, a to najmä vďaka svojmu spektrálnemu zloženiu a dynamike. Štúdie dokazujú [2], [3], že práca v prostredí s dostatočným denným osvetlením vedie k zvýšeniu produktivity, zníženiu únavy a zlepšeniu kognitívnych funkcií v porovnaní s prácou výlučne pri umelom osvetlení.

V zmysle hodnotenia dostupnosti dennej osvetlenosti statickou metódou, úrovne č.d.o. sú v priestoroch dostatočné, izofota 1,5% zasahuje do hĺbky miestnosti 3,15 m, čo predstavuje približne polovicu plochu jednostranne bočne osvetlených miestností. Zvyšné časti priestorov je potrebné dosvetliť umelým osvetlením pre splnenie požiadaviek združeného osvetlenia na celej ploche týchto miestností. Hodnotenie pomocou dynamickej simulácie je komplexnejšie. Percento plochy priestoru priemernej ročnej expozície slnečnému žiareniu (ASE) je relatívne vysoké 32,3 %, čo je možné upraviť pridaním regulovateľných žalúzií, respektíve úpravou vyloženia vodorovnej netransparentnej časti konštrukcie. Posudzované miestnosti spĺňajú podmienku osvetlenia viac ako 300 luxov od denného svetla počas aspoň 50 % ročného času používania (sDA) na 100 % plochách miestnosti; priemerné ročné množstvo denného svetla dopadajúceho alebo osvetľujúceho danú pracovnú rovinu je od 525 luxov do 2730 luxov. Pričom 300 luxov je minimálna hodnota intenzity osvetlenia pre bežné kancelárske práce [13]. Táto hodnota predstavuje množstvo svetla dopadajúceho na posudzovanú referenčnú rovinu v úrovni výšky pracovných stolov a je považovaná za dostatočnú pre vykonávanie väčšiny kancelárskych úloh.

Dvojitá transparentná fasáda v predkladanej forme spĺňa stanovené svetelnotechnické požiadavky a simulácie potvrdili, že jej implementácia, ako náhrada za klasický fasádny systém nemá negatívny vplyv na kvalitu vnútorného prostredia z hľadiska svetelnej klímy. Naopak, optimalizovaný návrh fasády môže zabezpečovať dostatočné denné osvetlenie a pozitívne ovplyvniť zrkovú pohodu pracovníkov v kancelárskom prostredí pomocou integrovaného tieniaceho systému, ktorého návrh podlieha ďalšiemu skúmaniu.

PodĎakovanie

Tento výskum bol podporený Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVŠ SR a SAV v projekte VEGA 1/0322/23: „Fasádne koncepty ako zdroj obnoviteľnej energie pre udržateľnú architektúru“ a Agentúrou na podporu výskumu a vývoja v projekte APVV-21-0144: „Vývoj a experimentálne overenie klimaticky adaptívnej transparentnej fasády s viacstupňovým využívaním obnoviteľných zdrojov energie pre nízkoenergetické sálavé systémy“.

Literatúra

- [1] HRASKA, J.: Nonvisual aspects of daylight in the built environment. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1252. 012063. [online]. 2022. [cit. 2.11.2024]. doi: [10.1088/1757-899X/1252/1/012063](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1252/1/012063)
- [2] MEAD, M. N.: Benefits of sunlight: a bright spot for human health. In: *Environmental health perspectives: Vol. 116*, 4 [online]. 2008: s. 160-167 [cit. 30.9.2024]. doi: [10.1289/ehp.116-a160](https://doi.org/10.1289/ehp.116-a160)
- [3] ARIES, M. et al.: Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment. In: *Lighting Research and Technology: Vol. 47*, 1 [online]. 2015: s. 6-27 [cit. 30.9.2024]. doi: [10.1177/1477153513509258](https://doi.org/10.1177/1477153513509258)

- [4] ÜNLÜTÜRK, M. et al.: The Effective Use of Daylight in Double Skin Facade Buildings. In: *INTERNATIONAL GRADUATE RESEARCH SYMPOSIUM - IGRS'22*. [online]. 2022 [cit. 30.9.2024]. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/375861477_The_Effective_Use_of_Daylight_in_Double_Skin_Facade_Buildings
- [5] ClimateStudio. [cit. 30.9.2024] Dostupné online: <https://climatestudiodocs.com/docs/daylightAvailability.html>
- [6] Z.z. č. 541/2007. Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky zo 16. augusta 2007 o podrobnostiach o požiadavkách na osvetlenie pri práci.
- [7] STN 73 0580-1 Denné osvetlenie budov. Časť 1: Základné požiadavky. Zmena 2: Vydanie Október 2000
- [8] PEREZ, R. et al.: *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*. In: *Solar Energy, Volume 44, Issue 5*. [online]. 1990: s. 271-289 [cit. 2.11.2024]. Dostupné na: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- [9] doc. Ing. Stanislav Darula, CSc. - Denné osvetlenie budov v návrhu európskych noriem (2015) [cit. 30.9.2024]
- [10] Ing. Milan Janák, PhD. - Integrované plánovanie udržateľných budov prednáška pre SKSI 2024 [cit. 30.9.2024]
- [11] Ing. Milan Olšavský - Základné kritériá denného osvetlenia budov. [cit. 30.9.2024] Dostupné na: <https://svetloposudok.sk/svetlotechnika/zakladne-kriteria-denneho-osvetlenia-budov/>
- [12] Program Radiance v. 5.2, <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>
- [13] STN EN 12464-1 Svetlo a osvetlenie. Osvetlenie pracovísk. Časť 1: Vnútorne pracoviská Vydanie Marec 2023
- [14] STN EN 17 037 Denné svetlo v budovách. Vydanie Júl 2022

*Peter Dúbravka*¹

Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 2. ročník

ANALÝZA ALTERNATÍV UMIESTNENIA HYGIENICKÉHO ZÁZEMIA V KONTEXTE MODERNIZÁCIE LÔŽKOVEJ ČASTI NEMOCNICE, S OHĽADOM NA DOCHÁDZKOVÚ VZDIALENOSŤ OŠETROVATEĽSKÝCH SESTIER K LÔŽKAM

ANALYSIS OF ALTERNATIVES FOR THE PLACEMENT OF SANITARY FACILITIES IN THE CONTEXT OF MODERNIZING THE INPATIENT SECTION OF THE HOSPITAL, WITH REGARD TO THE WALKING DISTANCE OF NURSES TO THE BEDS

Abstract

This paper analyzes the impacts of different alternatives for the placement of sanitary facilities in the context of modernizing the hospital's inpatient section, aiming to compare these alternatives for future simulations of nurses' walking distances. The goal is to quantify the time required for walking during the morning medication routine and to identify ways to improve bed arrangement and increase the efficiency of nursing care. The study focuses on specific modernization possibilities for the ward at the Ružinov University Hospital in Bratislava. Different alternative approaches, such as the extension of sanitary facilities or the use of loggias, can have varying effects on staff efficiency and patient comfort. The paper also emphasizes the need for further research before embarking on extensive modernization of hospital wards.

Kľúčové slová / Key Words

Modernizácia nemocníc; dochádzkové vzdialenosti; lôžkové oddelenie; simulácia dochádzky; architektúra 20. storočia.

1. Úvod a metodika

Čas, ktorý zdravotné sestry trávia so svojimi pacientmi, je kľúčový pre zlepšenie kvality starostlivosti. Už z histórie nemocničnej architektúry vieme, že architekti pri návrhu venovali výraznú pozornosť na dochádzkovú vzdialenosť sestier k lôžkam. Okrem zefektívnenia procesov samotnej liečby bol dôležitý dozor sestier nad pacientmi či možnosť promptne reagovať na nepredvídané okolnosti. Dochádzka k lôžkam zo stanice sestier a následne medzi lôžkami tvorí značnú časť ich pracovného času. Príspevok má za cieľ ponúknuť podrobnejší náhľad do problematiky dochádzkových vzdialeností ošetrovateľských sestier v lôžkových častiach v lokálnom kontexte nemocničných objektov. Cieľom je analyzovať vplyv prítomnosti hygienického zázemia na izbe pacientov, vplyv jeho konkrétnej polohy v rámci izby, či poloha stanice sestier voči izbám. Rôzne dispozičné schémy modernizácie lôžkových jednotiek analyzujem z historických príkladov nemocničných objektov, pozorovacích štúdií v tejto problematike a nemocničných budov na území

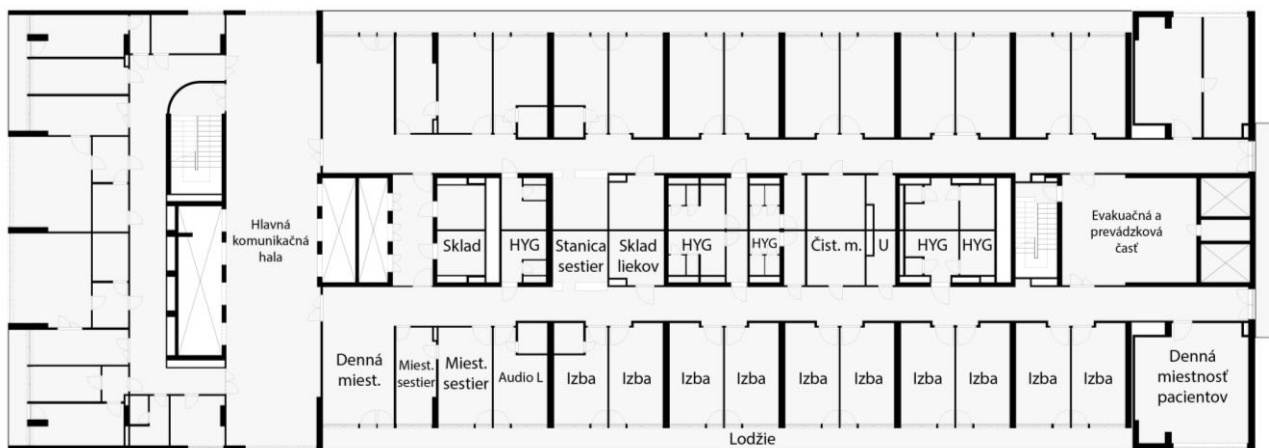
¹ Peter Dúbravka, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 2766/11, 810 05, Bratislava

Slovenska. Práca skúma viaceré alternatívy umiestnenia hygienického zázemia a počtu lôžok na konkrétnom objekte. Zároveň preveruje vplyv záberu existujúcich lodžii na zväčšenie priestorovej kapacity izby.

Bežne využívaný konštrukčný modul $7,2 \times 6$ m v 3-traktovej alebo 5-traktovej typológii nemocničných budov na území Slovenska má za následok podobnú veľkosť a dispozíciu lôžkových častí, čo predikuje jej aplikovateľnosť vo viacerých nemocniciach. Pripravovaná simulácia bude analyzovať dochádzkové vzdialenosti sestier v lôžkovej časti v rámci výškového bloku v objekte Fakultnej Nemocnice Ružinov v Bratislave². Izby momentálne nemajú súkromné hygienické zázemie. V čase písania príspevku je nemocnica vo fáze overovacej štúdie, kedy sa preverujú viaceré možnosti modernizácie lôžkových častí práve rôznymi polohami hygienického zázemia pridaného do jednotlivých izieb. Momentálne sa vo väčšine izieb nachádzajú 3 lôžka.

Svetovým trendom je postupné znižovanie počtu lôžok v rámci jednej izby, ideálne na 1-2 lôžka, prevažne v súkromných nemocniciach. Ministerstvo Zdravotníctva SR vzhľadom na súčasný posteľový fond nemá záujem znižovať celkový počet lôžok v posteľovom fonde Slovenska. To znamená, že pri zachovaní úžitkovej plochy a dispozície nemocnice bude nutné ponechať 3 lôžka v jednej izbe. Pri zmene dispozície bude možné znižovať počet lôžok, avšak na úkor iných priestorov (denné miestnosti pre pacientov, lodžie, atď.) alebo za cenu prístavby objektu.

V overovacej štúdií na modernizáciu FN Ružinov-Bratislava sú načrtnuté rôzne alternatívne riešenia typického podlažia. Uvažuje sa v nej s nasledujúcimi možnosťami: presunutia stanice sestier do centrálnej polohy, zníženia počtu lôžok v jednej izbe, so zabratím dennej miestnosti pacientov na južnej strane pre vytvorenie ďalších izieb, s možnosťou zabratia lodžii a s alternatívnym usporiadaním hygienického zázemia. [1] Na základe týchto možností, ktoré prirodzene vznikli, nadefinujem simulované varianty, na ktorých bude možné porovnávať sledované veličiny dochádzkovej trasy, počtu krokov a pod.



Obr. 1: Pôdorys typického podlažia lôžkovej časti FN Ružinov-Bratislava s popismi miestností

2. Analýza dispozície v rámci POJ³ vplývajúcej na dochádzkové trasy sestier

2.1. Dispozičné nadväznosti lôžkových izieb

Priamou dispozičnou nadväznosťou lôžkových izieb sú ostatné zložky patriace do POJ,

² ďalej iba FN Ružinov-Bratislava

³ POJ – posteľová ošetrovacia jednotka. Zahŕňa viacero lôžkových miestností pacientom, o ktoré sa starajú zdravotné sestry. Jednotlivé POJ bývajú oddelené od ostatných častí nemocnice, ako aj od ostatných POJ. Spravidla má do 30 lôžok.

napr. spoločná komunikácia, stanica sestier (ktoré nahrádza recepciu v rámci POJ), hygienické zázemie a návštevnícke priestory. Súčasťou sú aj hlavné a vedľajšie únikové schody či výtahy s požiarnymi predsieňami.

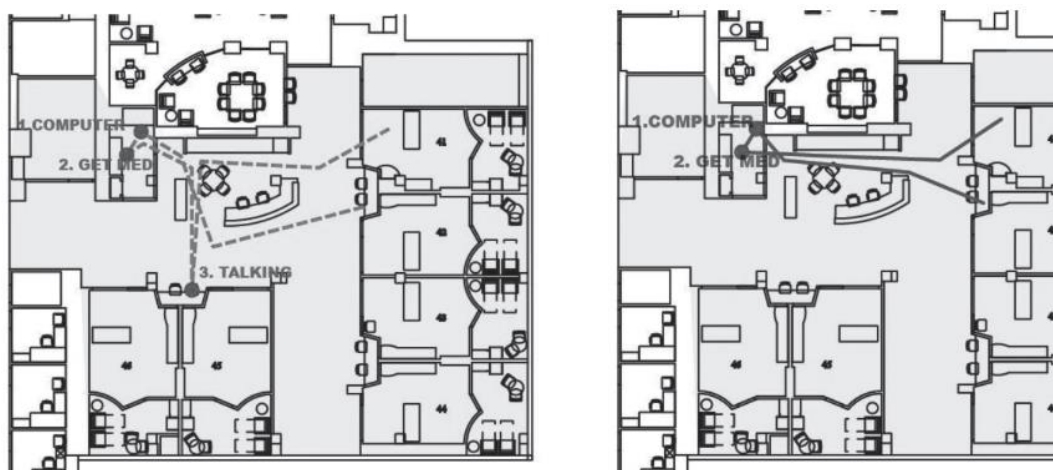
Nepriamou dispozičnou nadväznosťou je dostupnosť ambulantných zložiek, širších a užších komplementov nemocnice, prístup do exteriéru vo forme záhrady, átria alebo pobytových balkónov/lodží.

Pre zabezpečenie psychickej pohody pacienta je vhodné zabezpečiť aj zdanlivo zanedbateľné prvky. Autor článku, ktorý sa venuje psychológií v architektúre, vyzdvihol okrem spomínaných aj dôležitosť orientácie pacienta v priestore. Vedomie toho, kde sa pacient v danom momente nachádza, priamo súvisí s psychologickou pohodou človeka. Nemenej dôležitý je návrh biofilných prvkov⁴ v interiéri a exteriéri, ktorý má rovnako vplyv na rýchlosť zotavovania pacienta a množstvo podaných medikamentov proti bolesti. [2] [3]

2.2. Poloha stanice sestier v POJ

V existujúcich výskumných štúdiách v danej problematike sa autori zamerali na viacero súvisiacich faktorov. Sestričky strávia veľkú časť svojej pracovnej doby chodením, čo výrazne ovplyvňuje efektivitu starostlivosti o pacienta. V starších štúdiách v r. 2012 sa skúmala dĺžka trasy meraním vo fungujúcej fakultnej nemocnici v Atlante, GA [4].

Autori pozorovali dennú rutinu 12 sestier pri podávaní liekov, v rôznych časových intervaloch. Niektoré sestry boli pozorované viackrát a ich pracovné skúsenosti sa líšili od 2 mesiacov do 7 rokov. Autori porovnávali radiálne usporiadanie izieb s trojtraktovým usporiadaním a výsledky prekvapivo nasvedčovali, že ich samotné usporiadanie síce zohrávalo celkový vplyv na trasu, avšak významný vplyv mala práve poloha stanice sestier voči izbám pacientov s možnosťou súkromných návštev pacientov na lôžko. Ak sa nachádzala miestnosť sestier centrálna, tak práve skúsenejšie sestry boli prerušované v činnosti častejšie, čo viedlo k nejasným výsledkom.



Obr. 2: Pozorované skutočné trasy sestry, vpravo efektívna trasa sestry. Rozdiel v trasách bolo v pozorovanom príklade 14 m [4]

⁴ Biofilný dizajn (biophilic design) je prístup k navrhovaniu budov a priestorov, ktorý sa zameriava na prepojenie ľudí s prírodou. Tento koncept sa opiera o myšlienku, že ľudia majú prirodzenú potrebu byť v kontakte s prírodou, čo môže pozitívne ovplyvniť ich fyzickú a duševnú pohodu. [10]

Nakoľko sa zameriavam na čistý čas, dĺžku trasy a počet krokov v jednotlivých situáciách, budem simuláciu týchto nepredvídateľných interakcií zanedbávať. Skúsenosť sestier rovnako v skúmanom prípade nehrá rolu, nakoľko dané POJ obsluhuje rovnaký personál, ktorý nemá bezprostredný kontakt s externými návštevníkmi počas rannej rutiny, alebo so sestrami z druhej časti POJ na rovnakom podlaží.

V pozorovacej štúdií, ktorá sa uskutočnila s 57 sestrami počas 191,3 hodín na dvoch oddeleniach v austrálskej nemocnici bolo zistené, že pri úlohách spojených s podávaním medikamentov a vysvetľovaním sestry trávili približne 45 s, pričom sa priemerná hodnota ani počas rokov výrazne nemenila. V simulácií preto budem uvažovať s použitím času zastavenia po dobu 45 s/lôžko. [5] Pre následný výpočet krokov budem uvažovať so zdravotnou sestrou s výškou 165 cm a dĺžkou kroku 0,685 m. [6] Rýchlosť kroku sestry je odvodený na základe štúdií porovnávajúc rýchlosť chôdze zdravotníckych sestier v rôznom veku a s rôznymi rokmi praxe. [7] [8]

2.3. Maximálna odporúčaná kapacita lôžok v POJ

Celkový počet lôžok na momentálnom POJ je 29. Tento počet považovali architekti za najefektívnejší. Počas smeny musia byť prítomné na POJ minimálne dve sestry, hlavná sestra a pomocná sestra. Podľa vyhlášky č. 225/2017 Z.z. [9] sa v tabuľke č. 3 uvádza, že na jednu ošetrovaciú sestru pripadá v bežných nemocničných zariadeniach 13-16 pacientov. V minulosti architekti pri návrhu uvažovali na základe vtedy dostupných legislatívnych dokumentov a vedeckých zdravotníckych dát 25-30 lôžok v jednej POJ. Toto číslo vychádzalo taktiež z efektívnej práce sestier, nakoľko pri vyššom počte by museli uvažovať s treťou sestrou. Už v r. 1958 v časopise „Bauen und Wohnen 5/1958. THEMA: Bauten der Gesundheitspflege“, ktorý architekti pokladali za jeden zo smerodajných, uvádzali, že viac ako 32 lôžok v jednej POJ je nežiadúce z technických a personálnych dôvodov. [10]

Počet pacientov na lôžku pripadajúcich na jednu sestru na oddeleniach

Oddelenie	Počet lôžok na jednu sestru	
	Denná zmena	Nočná zmena
Oddelenie vnútorného lekárstva	13	19
Psychiatrické oddelenie	15	39*
Oddelenie pneumológie a ftizeológie	16	22
Oddelenie neurológie a iných špecializovaných odborov	13	28
Chirurgické oddelenie - väzenská časť	9	15

Obr. 3: Tabuľka č. 4 v platnej Vyhláške č. 225/2017 Z.z. [9]

V súčasnosti prevláda kapacita do 30 lôžok v rámci jednotky POJ, ktorá je aj u zvoleného reprezentanta.

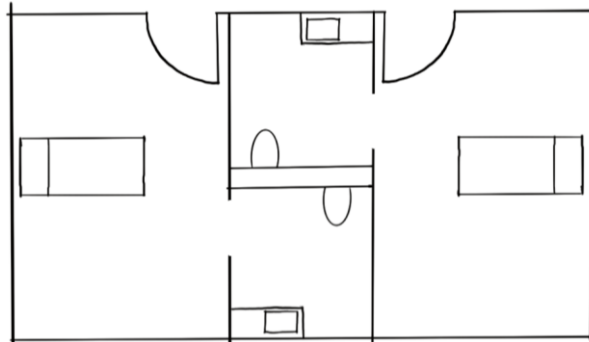
2.4. Počet lôžok v izbe pacientov

Architekt Černý sa vo svojich pripravovaných skriptách o navrhovaní nemocníc [2] vyjadril, že ideálny počet lôžok v izbe sú 3 vzhľadom na efektívnosť výstavby, spotreby materiálu, komfortu pacienta a zároveň aj personálne obsadenie sestier. Tento názor je v súčasnom navrhovaní nemocníc neaktuálny. Vo FN Ružinov-Bratislava je práve väčšina izieb trojlôžkových, čo k zvolenému konštrukčnému modulu s pavlačovými lôžkami nie je možné zachovať pri dobudovaní hygieny.

Bežným efektívnym štandardom sú dvoj lôžkové izby, ktoré majú samostatné hygienické zázemie

alebo zázemie zdieľané so susednou dvojlôžkovou izbou. Dvojlôžkové izby sú efektívne z hľadiska využitia ekonomických konštrukčných modulov so zachovaním lôžkovej kapacity POJ 25-30 lôžok s dvomi sestrami.

Opačným príkladom je plánovaná Martinská nemocnica, ktorá uvažuje s vybudovaním 381 jednolôžkových izieb. Návrh porota ocenila na základe nápaditého konceptu a vhodne zvolenej ľudskej mierky objektu. Diskutabilnou bol práve prevádzkový poriadok zázemia lôžkových častí. „...potreby posilnení provozního zázemí lůžkových pater a otázek možností dalšího rozvoje a růstu, porota vidí návrh jako perspektivní pro další rozpracování.“ [3]

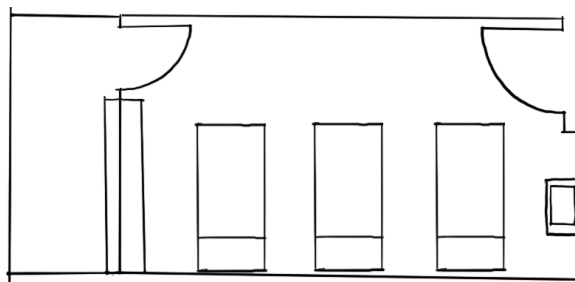


Obr. 4: Autorská schéma z pôdorysu dvoch jednolôžkových izieb s hygienou. Víťazná architektonická štúdia v súťaži o “Nemocnicu budúcnosti“ v Martine, organizovanou Jesseniovou lekárskou fakultou v Martine Univerzity Komenského v Bratislave [3]

2.5. Poloha hygienického zázemia

2.5.1. Bez hygienického zázemia v lôžkovej izbe

Usporiadanie už nevyhovuje dnešným štandardom. Hygienickým zázemím sa v tomto prípade rozumelo minimálne vlastné umývadlo na každú izbu, ktoré sa začali vyskytovať v 20. storočí ako reakcia na germicídnu teóriu z 19. storočia, ktorú propagovali vedci ako Ignác Semmelweis, Louis Pasteur a Robert Koch. Existujúci stav v lôžkovej časti FN Ružinov-Bratislava je vo väčšine práve bez hygienického zázemia.

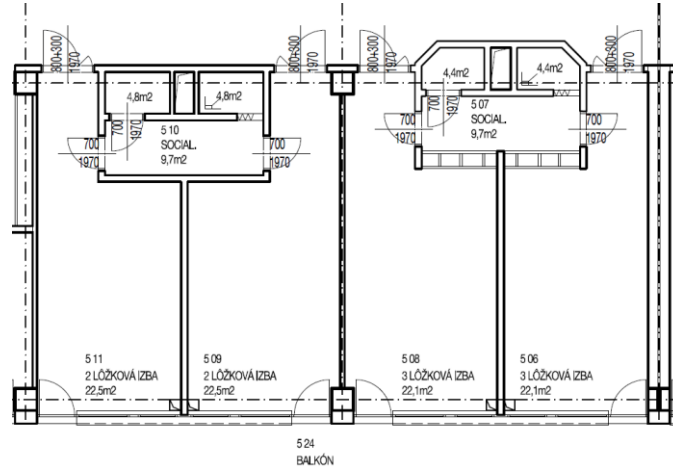


Obr. 5: Autorská schéma typickej trojlôžkovej izby vo FN Ružinov-Bratislava, vpravo umývadlo miesto plnohodnotného hygienického zázemia [1]

2.5.2. Hygienické zázemie v izbe pacientov, v blízkosti chodby

Datovanie tohto riešenia nie je momentálne známe, nakoľko dispozičná schéma tohto riešenia je veľmi podobná aj iným typológiám. Je to bežne zaužívané dispozičné riešenie pri nemocničných izbách, ale aj pri pôdorysoch garzóniek a hotelových izieb. Ich výhodou je

pri zachovaní kompaktnej dispozície poskytnúť možnosť dostatočného preslnenia a vetrania pobytovej časti interiéru a zároveň lepší prístup k rozvodom zo spoločných priestorov. Dopad tohto riešenia na predĺženie trasy sestier nie je sú známe. S týmto variantom uvažujú navrhované situácie, nakoľko je v dnešnej dobe priam štandardom.

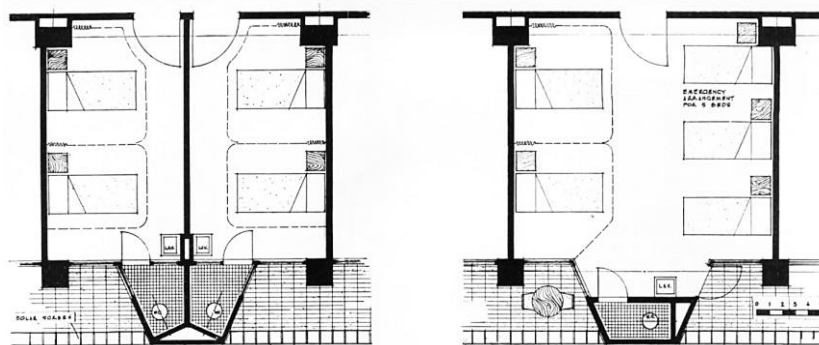


Obr. 6: Pôdorys dvojice dvojlôžkových izieb so spoločným hygienickým zázemím a dvojica trojlôžkových izieb so spoločným hygienickým zázemím. Univerzitná nemocnica Antolská - Bratislava, lôžková časť 5.NP [1]

2.5.3. Hygienické zázemie v izbe pacientov, na fasáde

Samostatné hygienické bunky v lôžkových izbách na fasáde boli podľa dostupných informácií ako prvé použité v objekte U.S. Air Force Hospital na Filipínach z r. 1957. Budova bola napriek svojmu účelu inovatívna aj typológiou výškového lôžkového monobloku s ambulatnou podnožou. Tento príklad, spomenutý v časopise Progressive architecture [10] bol rovnako pre našich architektov inšpiratívny, čo môžeme vidieť aj v nemocniciach navrhovaných na našom území po r. 1960.

Stavba reagovala na tropické klimatické podnebie, obsahovala 200 až 300 lôžok podľa potreby a zaujímavá bola práve umiestnením hygienického zázemia na fasáde budovy. Ten mal za úlohu skrátiť trasy sestier k pacientom a zároveň zjednodušiť vedenie rozvodov a odvodnenia. Pozícia hygienického zázemia spolu s murovanou predstenou balkónov vytvárala tienenie izieb, čím zabezpečila chladnejší vnútorný priestor pre vojakov v tropickom podnebí.



Obr. 7: Pôdorys lôžkových izieb v nemocnici U.S. Air Force Hospital na Filipínach, v oboch prípadoch je hygienický box na fasáde z dôvodu skrátenia trás sestier a lekárov [10]

3. Nastavenie východiskových situácií pre simuláciu

3.1. Definovanie konkrétnych východiskových situácií

Pre možnosť relevantného porovnania pre budúcu simuláciu som určil 5 východiskových situácií (A-E). Tieto východiskové situácie reflektujú skúmané alternatívy modernizácie v prebiehajúcej overovacej štúdií [1] pre FN Ružinov-Bratislava. Nakoľko v overovacej štúdií sa tieto situácie riešia komplexne aj s nadväznosťami na iné priestory v rámci POJ, zjednodušil som situácie tak, aby bolo možné ich navzájom porovnávať. Každá situácia sleduje možnosť porovnania inej veličiny.

Sledované situácie sú definované nasledovne:

- Situácia A - Existujúci stav typického lôžkového podlažia vo FN Ružinov-Bratislava, počet lôžok 29
- Situácia B - Existujúci stav typického lôžkového podlažia s presunutím stanice sestier, počet lôžok 29
- Situácia C - hygiena v blízkosti chodby, zabratie dennej miestnosti pacientov, počet lôžok 24
- Situácia D - hygiena v blízkosti fasády, zabratie dennej miestnosti pacientov, počet lôžok 24
- Situácia E - hygiena v blízkosti chodby, zabratie lodží, počet lôžok 29

Z takto definovaných situácií bude možné porovnať:

- vplyv presunu stanice sestier do centrálnej polohy (porovnanie situácií A a B)
- vplyv polohy hygienického zázemia v blízkosti chodby a na fasáde (porovnanie situácií C a D)
- vplyv polohy hygienického zázemia v blízkosti chodby, pri ponechaní existujúceho počtu lôžok na úkor lodží (porovnanie situácií A a E)
- vplyv zníženia počtu lôžok v izbe na 2, na úkor dennej miestnosti pacientov (porovnanie situácií A a C)

Situácia A - Existujúci stav typického lôžkového podlažia vo FN Ružinov-Bratislava, počet lôžok 29

- existujúci stav obsahuje v typickej POJ 9 izieb s tromi lôžkami a 1 izbu s dvomi lôžkami
- miestnosť v pravej časti pôdorysu plnila funkciu dennej miestnosti pacientov (v existujúcom stave pacientom neprístupná)
- celkový počet lôžok v POJ je 29



- Poloha pracovného pultu sestry - - - - - Bežná trasa ranného podávania liekov - - - - - Najvzdialenejšia trasa k lôžku

Obr. 8: A - Existujúci stav, schematické vyznačenie trasy sestry

Situácia B - Existujúci stav typického podlažia s presunutím stanice sestier, počet lôžok 29

- existujúci stav obsahuje v typickej POJ 9 izieb s tromi lôžkami a 1 izbu s dvomi lôžkami
- miestnosť v pravej časti pôdorysu plnila funkciu dennej miestnosti pacientov (v existujúcom stave pacientom neprístupná)
- celkový počet lôžok v POJ je 29



- Poloha pracovného pultu sestry - - - - - Bežná trasa ranného podávania liekov - - - - - Najvzdialenejšia trasa k lôžku

Obr. 9: B - Existujúci stav s posunom stanice sestier, schematické vyznačenie trasy sestry

Situácia C - hygiena v blízkosti chodby, zabratie dennej miestnosti pacientov, počet lôžok 24

- existujúca poloha stanice sestier
- vloženie hygienického zázemia v blízkosti chodby
- zníženie počtu lôžok v izbe na 2, zníženie celkového počtu lôžok v POJ na 24
- dostavba lôžkových izieb v dnešnej dennej miestnosti pacientov
- otočenie vstupných dverí
- zachovanie lodžíí



- Poloha pracovného pultu sestry - - - - - Bežná trasa ranného podávania liekov - - - - - Najvzdialenejšia trasa k lôžku

Obr. 10: Situácia C - schematické vyznačenie trasy sestry

Situácia D - hygiena v blízkosti fasády, zabratie dennej miestnosti pacientov, počet lôžok 24

- existujúca poloha stanice sestier
- vloženie hygienického zázemia v blízkosti fasády
- zníženie počtu lôžok v izbe na 2, zníženie celkového počtu lôžok v POJ na 24
- dostavba lôžkových izieb v dnešnej dennej miestnosti pacientov
- otočenie vstupných dverí
- zachovanie lodžíí



- Poloha pracovného pultu sestry - - - - - Bežná trasa ranného podávania liekov - - - - - Najvzdialenejšia trasa k lôžku

Obr. 11: Situácia D - schematické vyznačenie trasy sestry

Situácia E - hygiena v blízkosti chodby, zabratie lodží, počet lôžok 29

- existujúca poloha stanice sestier
- zabratie lodží
- vloženie hygienického zázemia v blízkosti chodby
- bez zmeny počtu lôžok oproti existujúcim lôžkam, posun ich polohy o hygienické zázemie
- bez dostavby lôžkových izieb v dennej miestnosti pacientov
- otočenie vstupných dverí



- Poloha pracovného pultu sestry - - - - - Bežná trasa ranného podávania liekov - - - - - Najvzdialenejšia trasa k lôžku

Obr. 12: Situácia E - schematické vyznačenie trasy sestry

3.2. Zanedbané aspekty v simulácii

V simulácii budú zanedbané nasledujúce aspekty:

- pohybujúci sa pacienti a personál v simulovaných priestoroch
- nepredvídateľné interakcie s pacientmi alebo inými sestrami, ktoré zohľadňovala štúdia správania sestier počas rutinného podávania liekov. Bližšie popisuje bod 2.2
- typové a atypické nábytky, ktoré nie sú existujúcou súčasťou na lôžkovej izbe. V prípade umiestňovania predmetov by sa malo dbať na ich osadenie v priestore tak, aby sa efektívna trasa sestry nepredĺžila, čím môže byť táto veličina zanedbaná
- tento príspevok neposudzuje iné faktory vstupujúce do finálneho rozhodovania architektov, napr. dopad na preslnenie priestorov lôžkových častí, schopnosť efektívnej výmeny vzduchu, psychologické vnímanie priestoru alebo fyzikálne procesy pacientov v danom dispozičnom usporiadaní

3.3. Sledované veličiny v simulácii

V simulácii budú sledované nasledujúce veličiny:

- čas, ktorý je potrebný pre dokončenie jedného okruhu sestry v POJ, simulujúce napríklad ranné podávanie liekov [min.]
- celková dĺžka trasy a dĺžka trasy k najvzdialenejšiemu lôžku [m]
- počet krokov pri jednotlivých trasách [-]

4. Hypotézy

V prípade užšej spolupráce s projekčným tímom modernizácie skúmanej nemocnice by bolo možné aplikovať obdobný postup aj na iné oddelenia POJ, iné časti nemocnice s dochádzkovými simuláciami, alebo na iné nemocničné objekty vo všeobecnosti. Posudzovanie dochádzkových trás má veľký dopad pri efektívnosti typológie a lokalitného programu objektu. Namodelované situácie je možné priamo posudzovať aj v iných aspektoch, napr. na komplexnejšiu analýzu požiarnej evakuácie pacientov.

Predpokladám nasledovné:

- hygienické zázemie v podobe, ktoré rieši overovacia štúdia neuvažuje s bezbariérovým wc. Uvažuje s bežným wc a sprchovým kútom. Rozmer hygienického zázemia je odlišný v prípade jeho polohy pri chodbe a pri fasáde. V pozícií pri chodbe je možné toto hygienické zázemie dispozične zariadiť aj ako bezbariérové (1900 × 1900 mm), avšak v pozícií na fasáde je jeho rozmer (1250 × 2500 mm) pre bezbariérové wc nevyhovujúci. Už z tohto dôvodu je pre vybraného reprezentanta situácia D z hľadiska reverzibility nevyhovujúca
- poloha dostavovaného hygienického zázemia pri chodbe alebo na fasáde nemá vážnejší vplyv na dochádzkové vzdialenosti
- počet lôžok a zabratie dennej miestnosti pacientov/lodží budú mať vážnejší vplyv na dochádzkové vzdialenosti
- poloha stanice sestier má najväčší vplyv na dochádzkovú vzdialenosť k najvzdialenejšiemu lôžku, ale nemá vážnejší dopad na celkovú dĺžku trasy. Nevýhodou môže byť fakt, že pri spôsobe modernizácie s jednotnou stanicou sestier pre dve POJ (spojenie dvoch POJ na podlaží, s centrálnou stanicou sestier), môže dochádzať k nepravidelným interakciám sestier s návštevami pacientov alebo s inými sestrami, čo môže mať výraznejší vplyv na efektívnosť sestier
- centrálna poloha stanice sestier môže mať rovnako nepraktickú dispozíciu s ohľadom na prijímanie návštev, kedy sa nachádza výrazne ďalej od hlavného vchodu do POJ
- alternatíva s prístavbou hygienického zázemia pri fasádu nepredpokladá zásadnejší vplyv na dochádzkovú vzdialenosť sestier. Poloha zázemia však môže negatívne ovplyvniť preslnenie priestoru, čo môže byť predmetom ďalšieho skúmania
- alternatíva so zabratím lodží umožňuje dosiahnuť trojlôžkové usporiadanie aj s umiestnením hygienického zázemia. Otázkou môže byť absentujúci prístup pacientov do exteriéru a možnosť vetrania, ktorá môže mať výraznejší vplyv na psychológiu a celkový komfort pacientov, čo môže byť predmetom ďalšieho skúmania. Zároveň môže nepriaznivo staticky pôsobiť na existujúci skelet, čo by bolo predmetom ďalšieho skúmania
- znižovanie počtu lôžok v jednej lôžkovej izbe je trendom v navrhovaní nemocníc s cieľom dosiahnuť vyšší komfort pacientov a tým aj zrychliť ich rehabilitácie

5. Literatúra

- [1] podkladové dokumenty z archívu UNB, overovaciu štúdiu vyhotovil Zdravoprojekt Bratislava s.r.o., 12.2022, Ing. arch. Rastislav Lesay, AA 1017, digitalizované autorom
- [2] archív STU, budova Rektorátu STU, fond Ing. arch. O. Černý, ml.
- [3] Martin “Nemocnica budúcnosti” výsledky súťaže a ocenené návrhy. ARCHINFO SPOL. S R. O. www.archinfo.sk [online]. 2017 [cit. 2024-6-25]. Dostupné na internete: <https://www.archinfo.sk/diskusia/blog/sutaze/martin-nemocnica-buducnosti-vysledky-sutaze-a-ocenene-navrhy.html>
- [4] YI, Lu a Hyun-Bo SEO. The Effect of Hospital Unit Layout on Nurse Walking Behavior. *HERD: Health Environments Research & Design Journal* [online]. 2012, 6(1), 66-82 [cit. 2024-6-25]. DOI: 10.1177/193758671200600104. ISSN 1937-5867. Dostupné na internete: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/193758671200600104>
- [5] WESTBROOK, Johanna I, Christine DUFFIELD, Ling LI a Nerida J CRESWICK. How much time do nurses have for patients? a longitudinal study quantifying hospital nurses' patterns of task time distribution and interactions with health professionals. *BMC Health Services Research* [online]. 2011, 11(1) Figure 4, str. 7, [cit. 2024-6-25]. DOI: 10.1186/1472-6963-11-319. ISSN 1472-6963. Dostupné na internete: <https://bmchealthservres.biomedcentral.com/articles/10.1186/1472-6963-11-319>
- [6] Average Height by Country 2024. *WORLD POPULATION REVIEW*. World Population Review [online]. 2024 [cit. 2024-6-25]. Dostupné na internete: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/average-height-by-country>
- [7] SCHIMPL, Michaela, Carmel MOORE, Christian LEDERER, et al. Association between Walking Speed and Age in Healthy, Free-Living Individuals Using Mobile Accelerometry—A Cross-Sectional Study. *PLoS ONE* [online]. 2011, 6(8) [cit. 2024-6-25]. DOI: 10.1371/journal.pone.0023299. ISSN 1932-6203. Dostupné na internete: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0023299>, Figure 2, str. 6
- [8] RASMUSSEN, Line Jee Hartmann, Avshalom CASPI, Antony AMBLER, et al. Association of Neurocognitive and Physical Function With Gait Speed in Midlife. *JAMA Network Open* [online]. 2019, 2(10) [cit. 2024-6-25]. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2019.13123. ISSN 2574-3805. Dostupné na internete: <https://jamanetwork.com/journals/jamanetworkopen/fullarticle/2752818>
- [9] Vyhláška č. 225/2017 Z.z. Ministerstva spravodlivosti Slovenskej republiky o minimálnych požiadavkách na personálne zabezpečenie a materiálno – technické vybavenie zdravotníckych zariadení v pôsobnosti Ministerstva spravodlivosti Slovenskej republiky v účinnosti od 01.01 2018
- [10] Health Facilities, Progressive Architecture. New York, 1977, 1960(07), str. 137-163

Tomáš Hakszer¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb D-TKPS4, 2. ročník

VPLYV LISTNANÝCH STROMOV V SIMULAČNÝCH METÓDACH BUDOV – ŠTÚDIA KANCELÁRSKEJ BUDOVY

EFFECT OF DECIDUOUS TREES IN SIMULATION METHODS OF BUILDINGS - STUDY OF AN OFFICE BUILDING

Abstract

This study investigates the impact of tree placement on daylighting performance within interior spaces of buildings, focusing on key metrics that affect occupant comfort and well-being. Daylighting is essential for reducing reliance on artificial lighting, improving energy efficiency, and enhancing the aesthetic quality of environments. However, excessive glare from direct sunlight can negatively impact visual comfort. To address this, we analyzed two main daylighting metrics: Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE) under four conditions: building without the effect of the trees placement and with placement of the trees at distances of 10m, 15m, and 20m. Moreover, the study includes available monthly solar radiation. By analyzing these metrics, we suggest that trees should be an integral part of daylighting simulations, as they can enhance occupant satisfaction through improved visual comfort while also impacting natural light availability.

Kľúčové slová

Administratívna budova; denné osvetlenie; opadavé stromy

1. Úvod

Globálnym a naliehavým environmentálnym problémom v súčasnosti je klimatická zmena. Dôsledky zmeny klímy sú prejavom dlhodobých zmien teplôt a klimatických vzorcov resp. globálneho otepľovania. Globálne otepľovanie spôsobuje extrémny v počasi ako sú: intenzívne suchá, nedostatok vody, silné požiare, stúpajúce hladiny morí a intenzívne dažde, ktoré spôsobujú povodne, veľkú búrkovú činnosť, topenie ľadovcov, veľké rozdiely v teplotách, klesajúcu biodiverzitu a narušenie ekosystémov. Zmena klímy má negatívny dopad na zdravie ľudí a ohrozuje súkromný aj verejný majetok.^[1,2] Viacero faktorov a príčin negatívne pôsobí na zmenu klímy. Jedným z týchto faktorov, ktoré celosvetovo negatívne ovplyvňujú klímu sú emisie skleníkových plynov, ktoré sú tvorené ľudskou činnosťou. Spaľovanie fosílnych palív uvoľňuje skleníkové plyny, čím viac skleníkových plynov z rôznym odvetví hospodárstva sa vypustí do atmosféry, tým viac sa planéta otepľuje. Celosvetovo celkových emisií skleníkových plynov v roku 2019 pochádzalo z hospodárskeho priemyslu tvoreného: 34% zo sektora energetika, 24% z priemyslu, 22% z poľnohospodárstva a lesníctva, 15% zo sektora doprava a 6 % z budov. Samotný stavebný sektor a údržba chodu budov predstavuje až 39% tvorených emisií skleníkových plynov.^[3,4]

Reakciou stavebného priemyslu je hľadať nové a inovatívne riešenia, materiály a technológie, ktoré znížia produkciu emisií skleníkových plynov a tým aj negatívny dopad na klimatickú zmenu. Budovy spotrebujú najvyššiu časť energie na zabezpečenie tepelnej pohody a osvetlenia pre

¹ Tomáš Hakszer, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

užívateľov, čo predstavuje až 70% podiel z celkových prevádzkových nákladov na objekty. Pre dosiahnutie zníženia týchto nákladov je potrebné navrhnuť a zakomponovať moderné technológie do fasád budov, ktoré budú zohľadňovať charakter a účel budov a zabezpečiť vnútorný režim v jednotlivých miestnostiach na základe ich využitia a obsadenosti.^[5] Priemerný človek strávi vo vnútorných priestoroch približne 80 až 95 % času, preto okrem znižovania nákladov na prevádzku budov je potrebné venovať veľkú pozornosť problematike kvality ich vnútorného prostredia a ich vplyvom na zdravie človeka.^[6]

Reakciou na negatívny dopad výstavby na klimatickú zmenu, sú štúdie, ktoré sa venujú skúmaniu vplyvu ekologizácie^[7,8,9]. Skúmanie lokálnej mikroklímy budovy ukazuje, že vegetácia má vplyv na okolité prostredie a môže podporiť znižovanie samotnej spotreby energie. Ako jedno z opatrení na zníženie dopadu na klimatickú zmenu je budovanie vegetačných striech a fasád.^[10,11]

Interakcie medzi vegetáciou a okolitým prostredím sú početné.^[12] Výsadba vegetácie do osídlených miest na zmiernenie dopadu na klimatickú zmenu sa stáva celosvetovou kľúčovou témou. Mestá a obce sa venujú tejto problematike, príkladom je publikácia Bratislavského samosprávneho kraja - Katalóg adaptačných opatrení BSK na nepriaznivé dôsledky zmeny klímy. Príručka slúži ako adaptácia na zmenu klímy v urbanizovanom prostredí.^[2]

Začlenením výsadby stromov a zelene do obývaných oblastí sa významne zlepšuje nielen kvalita životného prostredia ale aj estetický vplyv na krajinu a rekreačný účinok. Stromy majú schopnosť znižovať emisie CO₂ do ovzdušia, zachytávajú zrážkovú vodu, ochladzujú a zvlhčujú vzduch, poskytujú tieň, znižujú rýchlosť vetra, hladinu hluku a prašnosť čo sú pozitíva, ktoré vplyvajú na zdravie a psychickú pohodu ľudí.^[10,13] Strategicky umiestnené stromy okolo budov vytvárajú tieň, čím v letných mesiacoch zamedzujú priamemu dopadu slnečného žiarenia na fasádu a tak ovplyvňujú potrebu chladenia a tienenia vnútorných priestorov. Potenciál tienenia stromov je závislý od viacerých faktorov: druh stromov - neopadavé a opadavé dreviny, veľkosť a hustota koruny stromu, tvar a veľkosť listov, umiestnenie a orientácia stromov vzhľadom na budovu a okolie.^[11,14,15]

V simuláciách vykonávaných v praxi sa vplyv stromov na vnútorné prostredie budov často zanedbáva, vzhľadom na skutočnosť, že stromy sa nepovažujú za trvalé tieniace prekážky. Existujú početné štúdie o simulovaní vplyvu stromov na potrebu vykurovania a chladenia^[10,11,16,17,18]. Je ale zrejmé, že stromy v dlhodobom horizonte ovplyvňujú mikroklímu v danom okolí budovy a ich výsadba má potenciál na zmiernenie teplôt a tým je ovplyvnená aj spotreba energie blízkych budov.

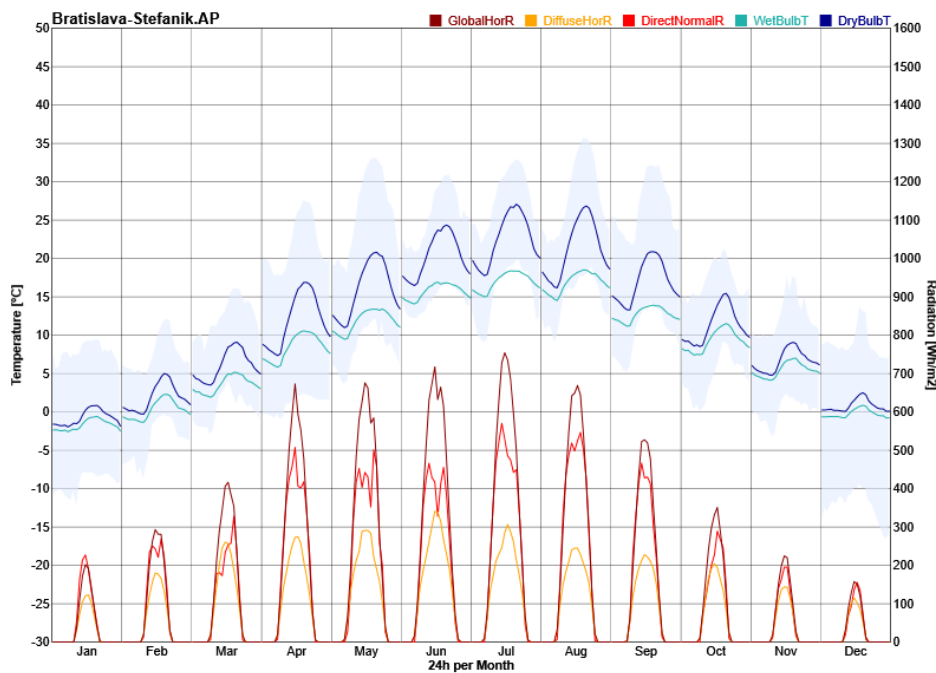
Vplyvu stromov na kvantitu a kvalitu denného osvetlenia vo vnútorných priestoroch budovy bola doposiaľ venovaná mala pozornosť, nakoľko stromy majú charakteristickú komplexnosť, ktorá vedie k rôznym javom svetelnej priepustnosti - odraz, difúzia a rôzne stupne tienenia svetla - ktoré sa menia v závislosti od polohy slnka, ročnej doby a poveternostných podmienok. Napríklad množstvo svetla, ktoré prechádza korunami stromov, závisí od uhla dopadu slnečného žiarenia, ako aj od rozmerov koruny, hustoty a plochy listov a podielu medzier pozdĺž slnečného vektora. Pri hodnotení svetla prechádzajúceho korunami stromov je nevyhnutné zohľadniť sezónne zmeny a relatívnu polohu stromov voči povrchom budov. Listnaté stromy predstavujú osobitnú výzvu vzhľadom na ich fenologické zmeny a opadanie listov, ktoré ovplyvňujú hustotu a farbu ich listov počas jednotlivých ročných období. Okrem toho rozmanitosť rodov a druhov stromov zvyšuje zložitosť modelovania, keďže vykazujú širokú škálu sezónnych a morfológických charakteristík. Vzdialenosť stromu od budovy a jeho výška taktiež výrazne ovplyvňujú tienenie.^[19]

Denné osvetlenie je základným aspektom architektonického návrhu, ktorý ovplyvňuje estetickú aj funkčnú kvalitu vnútorných priestorov. Integrácia denného svetla nielen zlepšuje vizuálny komfort obyvateľov, ale prispieva aj k ich celkovému zdraviu a pohode.^[20] A práve uvažovanie stromov ako vonkajších tieniacich prekážok, dokáže výrazne ovplyvniť vonkajšiu priamu, ako aj odrazenú zložku denného svetla a teda vo výsledku výslednú kvalitu denného osvetlenia vo vnútri budov.

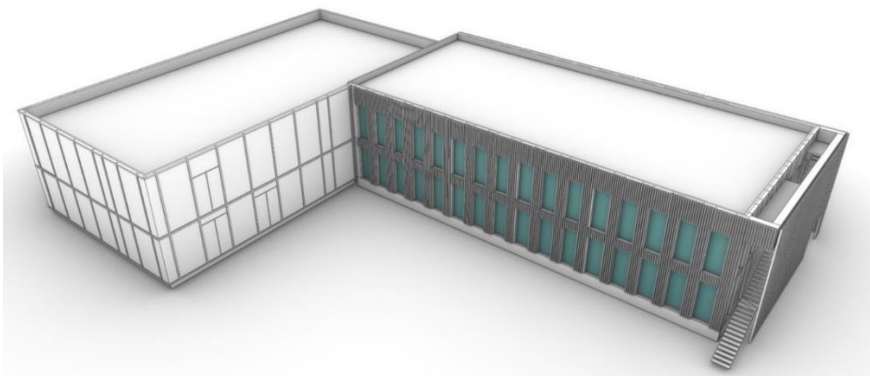
2. Metodológia

Hlavným cieľom tejto práce je určiť vplyv opadavých listnatých stromov na denné osvetlenie kancelárskej budovy nachádzajúcej sa v Bratislave (48,15°N, 17,11°E) pomocou počítačových simulačných metód. Konkrétne sa práca zameriava na analyzovanie vplyvu tienenia opadavých stromov počas rôznych ročných období na fasáde budovy a vyhodnotenie zmeny dostupnosti kvantity a kvality denného osvetlenia v kancelárskych priestoroch s prítomnosťou listnatých stromov z rôznym odstupom od fasády budovy. Denné osvetlenie vnútorného priestoru je hodnotené pomocou metrík, ktoré sú založené na hodinových meteorologických údajoch za obdobie celého roka.^[21]

Model objektu bol vytvorený v softvéri na 3D modelovanie Rhinoceros V8^[22], ako simulačný nástroj na výpočet rozloženia a dostupnosti denného svetla sa použil softvér ClimateStudio V 2.0.^[23] Klimatické dáta pre Bratislavu (Obr.1) boli v simulácii zohľadnené v podobe referenčného klimatického roka (SVK_BL_Bratislava-Stefanik.AP.118160_TMYx.2004-2018) s hodinovým časovým krokom, ktorý bol vybraný z knižnice softvéru ClimateStudio. Ako reprezentatívny objekt bola zvolená plánovaná výstavba dvojpodlažnej administratívnej budovy pôdorysného tvaru L (Obr. 2). Dostupnosť denného osvetlenia bola simulovaná v otvorenom administratívnom priestore nachádzajúcom sa na prvom nadzemnom podlaží s orientáciou východ-západ (Obr. 3). Kancelársky priestor je určený pre 32 zamestnancov s celkovou plochou 260 m².

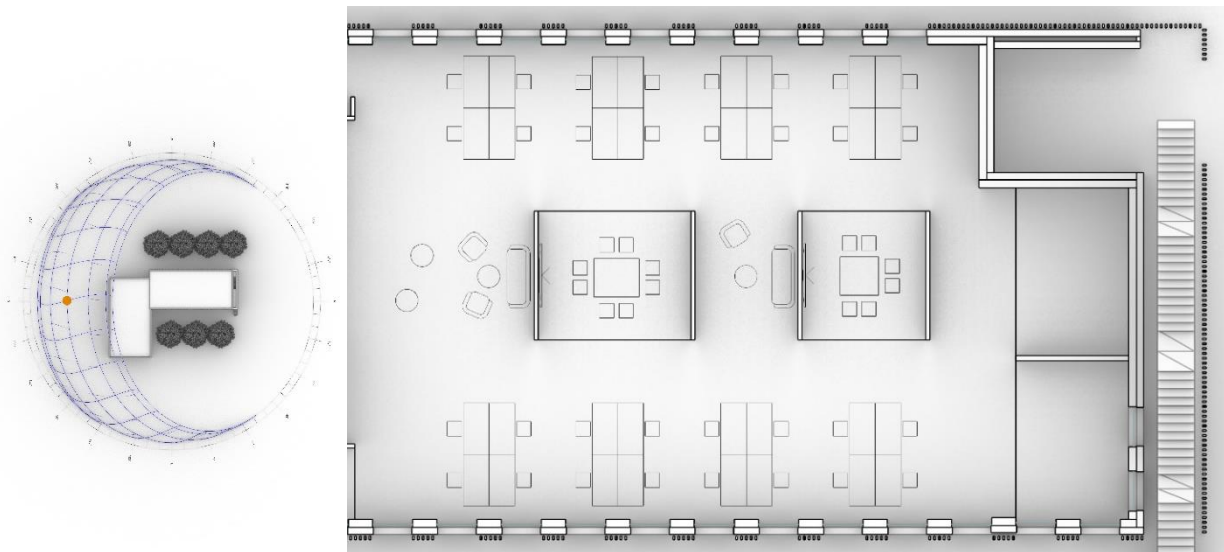


Obr. 1 – Ročné klimatické dáta pre Bratislavu (Climate Studio)



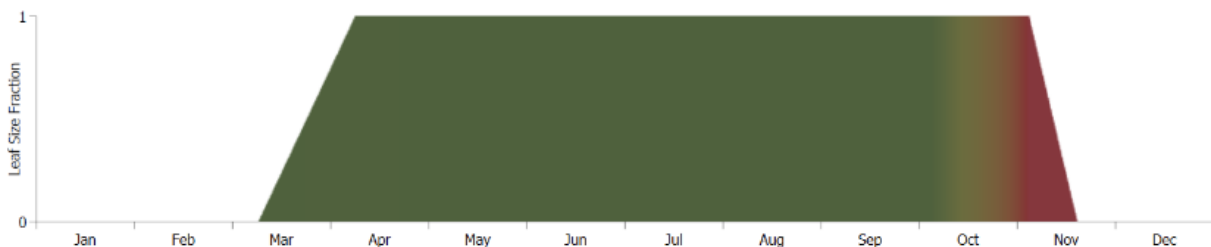
Obr. 2 – Model objektu administratívnej budovy

Okenné konštrukcie v riešenom priestore majú rozmer 1,2 m x 3,25 m (š x v). Zasklenie bolo uvažované ako číre izolačné trojsklo s hodnotou svetelnej priepustnosti $\tau = 0.6$ ako aj s dynamickým tienením – textilnou roletou (neprepúšťajúcou svetelné žiarenie). Ovládanie tieniaceho zariadenia bolo nastavené ako manuálne, zodpovedajúce sa správaniu užívateľov priestoru, podľa metodiky LM-83 v štandarde IES-NA LM-83.^[24] Dynamické tieniace zariadenie sa vo výpočtovom modeli aplikuje počas celoročnej simulácie vždy vtedy, keď viac ako 2 % kontrolných bodov v miestnosti dostáva priame slnečné svetlo (definované ako priame horizontálne osvetlenie presahujúce 1000 luxov). Kontrolné body boli umiestnené na vodorovnej referenčnej ploche v rozstupe 250 mm, vo výške 850 mm nad podlahou. Zmena započítania tieniacej rolety do otvorenej pozície v rámci simulácie nastane následne až v časovom kroku v ktorom už táto podmienka nie je splnená.^[25]



Obr. 3 – Pohľad zhora so svetovými stranami (vľavo) a pôdorys riešeného priestoru (vpravo)

Stromy boli namodelované ako bloky, kde listy predstavujú dynamický materiál, umožňujúci zohľadniť ich meniaci sa stav na stromoch počas roka. V každom časovom kroku výpočtu softvér prepína medzi farbami a veľkosťami listov v závislosti od zemepisnej šírky a ročného obdobia. Výsledky celoročnej simulácie v sebe teda zohľadňujú prítomnosť listov v lete, zmeny farieb na jeseň ich opadnutia v zime a následný postupný nárast listov s rozvrhom podľa obr. 4.^[26]



Obr. 4 – Rozvrh: dynamický materiál aplikovaný na listy

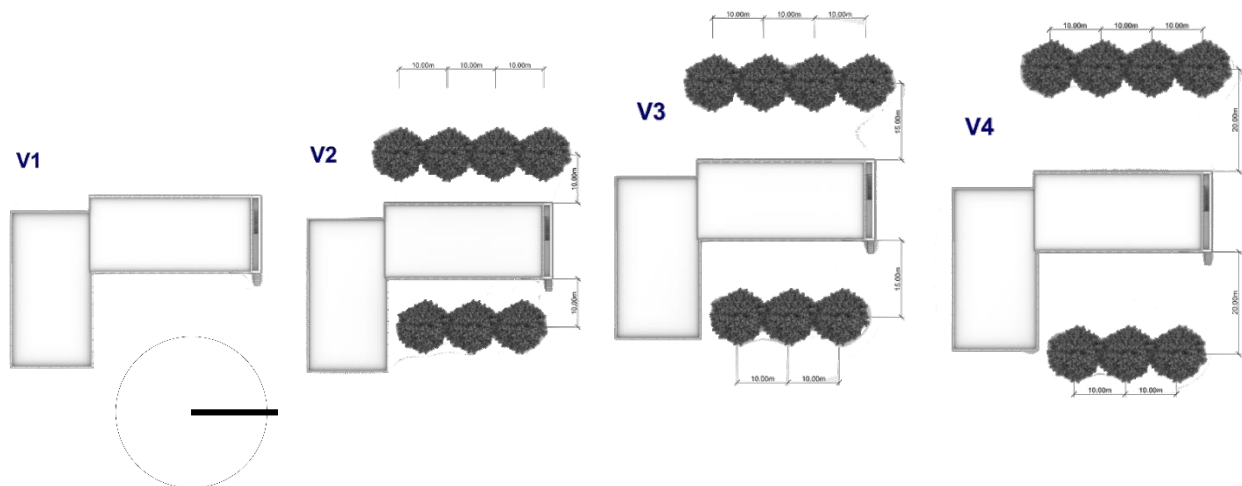
V práci boli posúdené nasledovné varianty (Obr. 5) rozmiestnenia stromov vo vzťahu k riešenej budove:

Variant 1 (V1) – Budova bez uvažovania okolitých stromov

Variant 2 (V2) – Stromy umiestnené 10 m od východenej a západnej fasády budovy

Variant 3 (V3) – Stromy umiestnené 15 m od východenej a západnej fasády budovy

Variant 4 (V4) – Stromy umiestnené 20 m od východenej a západnej fasády budovy



Obr. 5 – Varianty rozmiestnenia stromov

Rozmiestnenie stromov vo variantoch bolo zvolené na základe štúdia publikovanej literatúry v tejto oblasti, z ktorého vyplynulo že, stromy majú najväčší vplyv na vnútorné prostredie, ak tvoria tienenie z východnej alebo západnej strany a vo vzdialenosti 10-15 m.^[11,27] Horná hrana atiky posudzovanej budovy je vo výške 8,4 m nad terénom. Spodná hrana koruny použitých stromov v simulácii je vo výške 3,5 m nad terénom, horná hrana koruny je vo výške 14 m, polomer koruny má približne 5,5 m.

Pre určenie vplyvu tienenia opadavých stromov bola vykonaná analýza celkového slnečného žiarenia na plášť budovy za rok pre jednotlivé varianty. Na porovnanie kvantity a kvality denného svetla vo vybranom administratívnom priestore boli vybrané nasledovne dynamické metriky:

sDA - priestorová autonómia denného svetla (Spatial Daylight Autonomy) udáva účinnosť využitia denného svetla v pracovných priestoroch. sDA udáva percentuálny podiel plochy, na ktorú dopadá aspoň 300 luxov denného svetla počas aspoň 50 % hodín využívania priestoru užívateľmi. To určuje vhodnosť návrhu priestoru z hľadiska denného osvetlenia počas bežného používania, čím sa minimalizuje závislosť od umelého osvetlenia.

ASE - Ročné vystavenie slnečnému žiareniu (Annual Sunlight Exposure) je metrika, ktorá opisuje potenciál zrakového nepohodlia vo vnútornom pracovnom prostredí. Vzťahuje sa na percento plochy priestoru, na ktorú dopadá príliš veľa priameho slnečného svetla a je všeobecne stanovená ako 1000 luxov alebo viac počas viac ako 250 hodín ročne.

Priemerná osvetlenosť pracovnej roviny denným svetlom opisuje priemerné ročné množstvo denného svetla v luxoch, ktoré dopadá na danú pracovnú rovinu (štandardná výška 850 mm nad podlahou).

ASE a sDA sú v zahraničí rozšírené metriky v analýze a návrhu denného osvetlenia. Sú súčasťou hodnotiaceho systému budov Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) - certifikačného programu pre udržateľné budovy, ktorý je rozšírený po celom svete.^[28] Z hľadiska metodiky výpočtu, parameter ASE pracuje len s priamym slnečným žiarením a neuvažuje difúzne a oblohové svetlo. Výpočet parametru sDA v sebe zahŕňa komplexnú osvetlenosť – priamu, difúznu aj odrazenú zložku. Výpočet oboch metrík je založený na Perezovom modeli oblohy podľa IES LM83-23.^[24,29] Obe metriky by sa mali uvádzať spoločne, aby bolo možné posúdiť vhodnosť návrhu denného osvetlenia v budove alebo v danom priestore.^[21]

3. Výsledky a diskusia

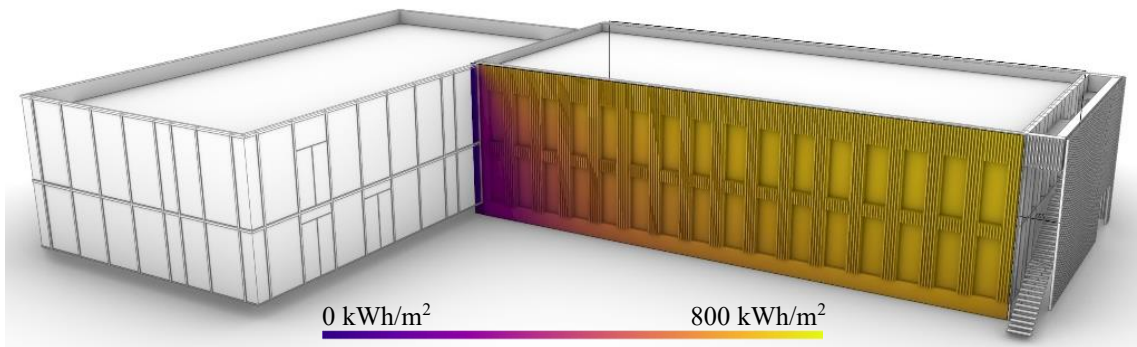
V Tabuľke 1 je zhrnutie výsledkov a analýza rozdielov v celkovom slnečnom žiarení v rámci jednotlivých mesiacov na východnej a západnej fasáde v závislosti od umiestnenia stromov v rôznych vzdialenostiach od objektu. Na Obr. 6 až 9 sú znázornené celoročné dostupné hodnoty slnečného žiarenia na východnej fasáde objektu pre jednotlivé varianty.

Tabuľka 1: Celkové dopadajúce slnečné žiarenie v rámci jednotlivých mesiacov na východnej a západnej fasáde pre jednotlivé varianty

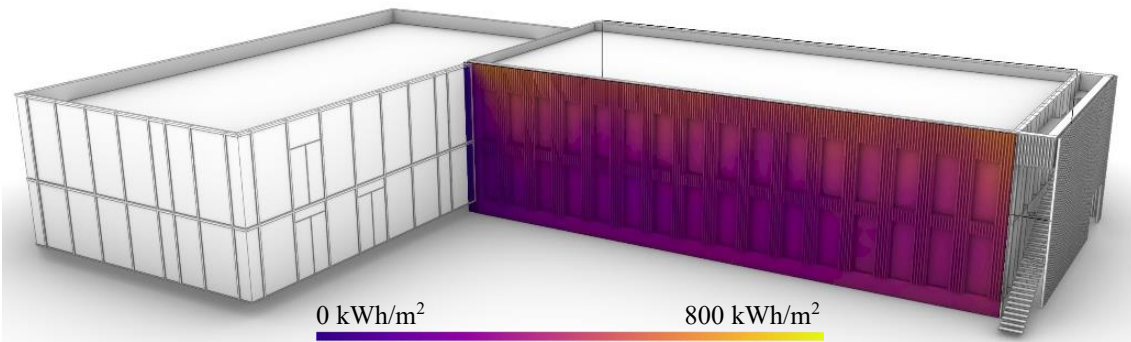
Mesiac	V1	V2		V3		V4	
	Celkové slnečné žiarenie na fasáde [kWh/(m ²)]	Celkové slnečné žiarenie na fasáde [kWh/(m ²)]	Redukcia oproti V1 [kWh/(m ²)]	Celkové slnečné žiarenie na fasáde [kWh/(m ²)]	Redukcia oproti V1 [kWh/(m ²)]	Celkové slnečné žiarenie na fasáde [kWh/(m ²)]	Redukcia oproti V1 [kWh/(m ²)]
Január	17	13	- 4	14	- 3	15	- 2
Február	29	22	- 7	25	- 4	26	- 3
Marec	50	33	- 17	39	- 11	43	- 7
Apríl	76	34	- 42	48	- 28	57	- 19
Máj	91	42	- 49	60	- 31	70	- 21
Jún	95	45	- 50	63	- 32	74	- 21
Júl	101	47	- 54	66	- 35	78	- 23
August	88	40	- 48	56	- 32	66	- 22
September	60	27	- 33	38	- 22	45	- 15
Október	37	16	- 21	23	- 14	27	- 10
November	19	12	- 7	14	- 5	16	- 3
December	13	10	- 3	11	- 2	12	- 1

Prítomnosť opadavých stromov výrazne znižuje slnečné žiarenie na fasáde, najmä v jarných, letných a jesenných mesiacoch. Stromy umiestnené najbližšie (V2-10 m) spôsobujú najväčšie zníženie slnečného žiarenia, zatiaľ čo stromy umiestnené vo vzdialenosti 20 m – V4 umožňujú relatívne viac slnečného žiarenia. Problematické je najmä zníženie dostupnosti slnečného žiarenia v mesiacoch apríl (pokles 55% vo V2), máj (pokles 54% vo V2) a október (pokles 57% vo V2). Väčší výskyt zamračených dní a miernejšie vonkajšie teploty môžu spôsobiť vplyvom opadavých stromov väčšiu spotrebu energie na vykurovanie a umelé osvetlenie v objekte. Starostlivé navrhovanie rozmiestnenia stromov vo vzťahu k koncepcii budovy je zásadné pre optimalizáciu denného osvetlenia a energetickej hospodárnosti.^[30]

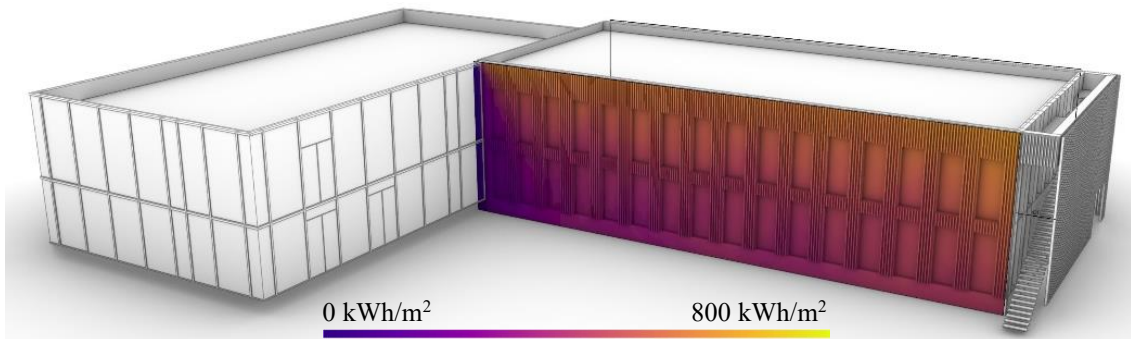
Pre vybraný vnútorný administratívny priestor bol spracovaný výpočet hodnôt ASE, sDA, priemernej osvietenosti pracovnej roviny denným svetlom a percentuálny pomer času roku bez potreby využitia tieniaceho zariadenia pre posúdenie, ako prítomnosť opadavých stromov v rôznych vzdialenostiach ovplyvňuje dostupnosť denného osvetlenia a pohodlie používateľov počas roka. Celoročné výsledky sú uvedené v Tabuľke 2 a na Obr. 10 až 25 je znázornený ročný priebeh metrik.



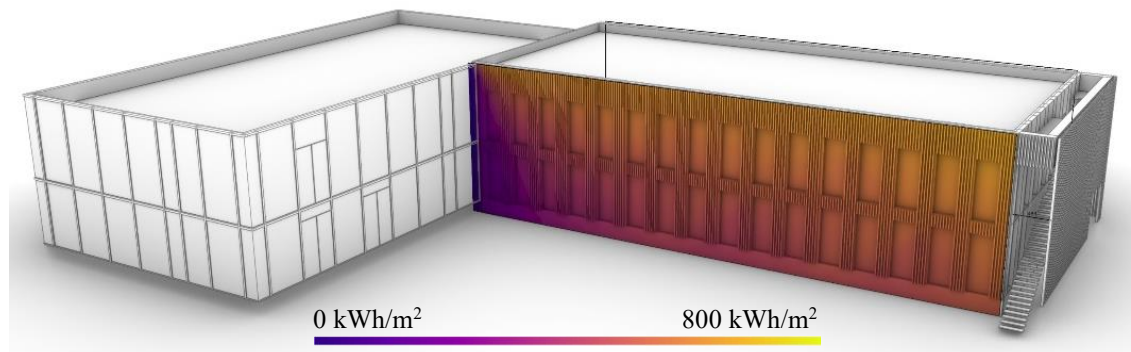
Obr. 6 – Celkové slnečné žiarenie na fasáde budovy - východná fasáda V1



Obr. 7 – Celkové slnečné žiarenie na fasáde budovy - východná fasáda V2



Obr. 8 – Celkové slnečné žiarenie na fasáde budovy - východná fasáda V3



Obr. 9 – Celkové slnečné žiarenie na fasáde budovy - východná fasáda V4

Metrika ASE vyžaduje, že maximálne 10% posudzovaného priestoru môže prekročiť 1000 luxov alebo viac počas viac ako 250 hodín ročne.^[28] V1 bez vplyvu stromov nespĺňa túto požiadavku nakoľko ASE dosahuje hodnotu 13.8%, čo môže spôsobovať oslnenie pracovníkov alebo zvýšenú

záťaž na chladenie v priestore. V2 vykazuje drastické zníženie na hodnotu 0.3%, čo svedčí o značnom ovplyvnení priameho slnečného žiarenia vplyvom stromov. Zväčšujúcim sa odstupom stromov od fasády sa zväčšuje aj hodnota ASE, avšak aj pri odstupe stromov 20 m vo V4 je hodnota stále pod požadovaným maximom 10 %. Prítomnosť stromov výrazne znižuje presnené plochy, čo môže byť prospešné z hľadiska ochrany pred oslnením, ale zároveň ovplyvňujú pasívne solárne zisky.

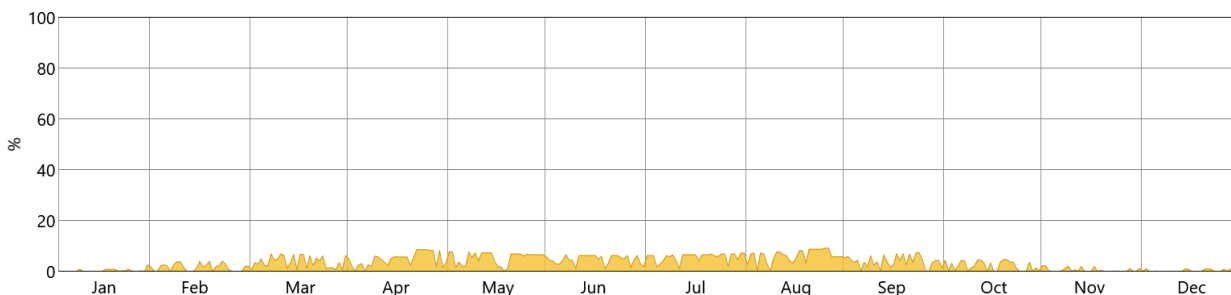
sDA ukazujúca využitie denného svetla v priestore. Vo V1 bez vplyvu stromov dosahuje hodnotu 90.3%, čo predstavuje pomer plochy splňujúci cieľovú úroveň osvetlenia 300 luxov len s použitím denného svetla a to svedčí o vysokej dostupnosti denného osvetlenia. Prítomnosť stromov výrazne znižuje hodnotu sDA, najmä ak sú umiestnené bližšie k budove. Pri použití metriky sDA sa vyžaduje, aby aspoň 55% podlahovej plochy miestností dosahovalo viac ako 300 luxov z denného svetla počas aspoň 50% ročného času používania.^[28] K splneniu tejto požiadavky sa približuje iba V4 s odstupom stromov 20 m od fasády budovy.

Priemerná intenzita osvetlenia výrazne klesá vstupom stromov do výpočtu, čo naznačuje, že umiestnenie stromov môže mať rozhodujúci vplyv na úroveň denného svetla v interiéri počas roka.

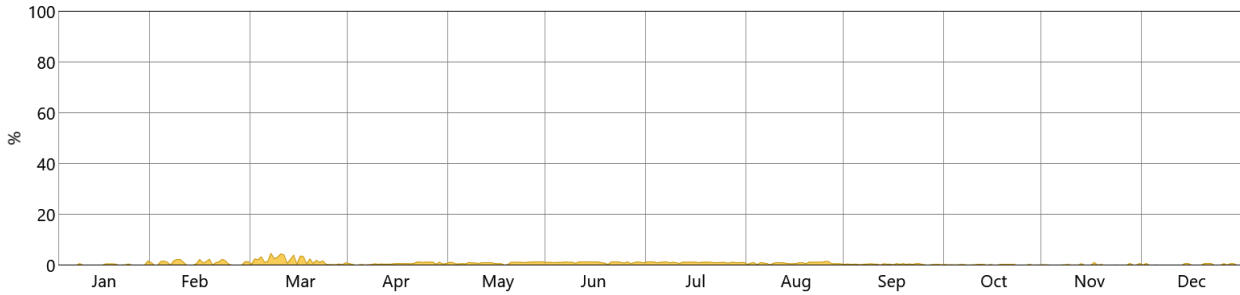
Z výsledkov času potreby používania tieniaceho zariadenia v administratívnom priestore možno pozorovať, že stromy v tesnej blízkosti – 10 m od fasády výrazne znižujú potrebu používania tieniaceho zariadenia. Vo vzdialenosti 15 a 20 m sú rozdiely času používania dynamického tienidla oproti variantu bez stromov zanedbateľné.

Tabuľka 2: Výsledky ASE, sDA, priemernej osvietenosti pracovnej roviny a času roku bez potreby využitia tieniaceho zariadenia pre rôzne varianty

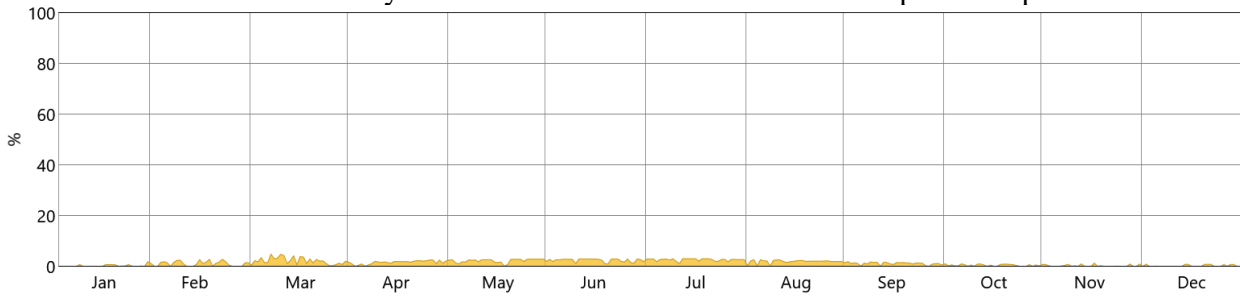
Variant	Popis varianty	ASE [%]	sDA [%]	Priemerná osvetlenosť pracovnej roviny [lux]	Čas bez potreby použitia tieniaceho zariadenia [%]
1	Budova bez okolitých stromov	13.8	90.3	717	84.9
2	Stromy osadené 10 m od fasády budovy	0.3	39.4	413	95.8
3	Stromy osadené 15 m od fasády budovy	2.7	44.8	469	87.9
4	Stromy osadené 20 m od fasády budovy	6.6	54.5	530	85.1



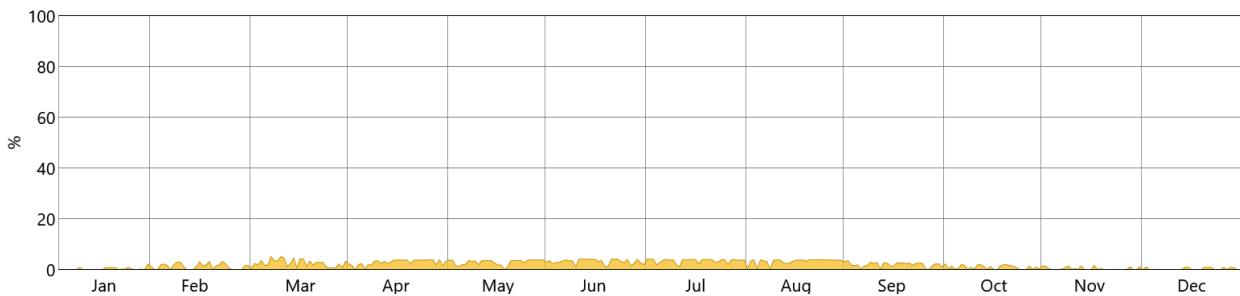
Obr. 10 – ASE - Ročné vystavenie slnečnému žiareniu riešeného priestoru počas roka -V1



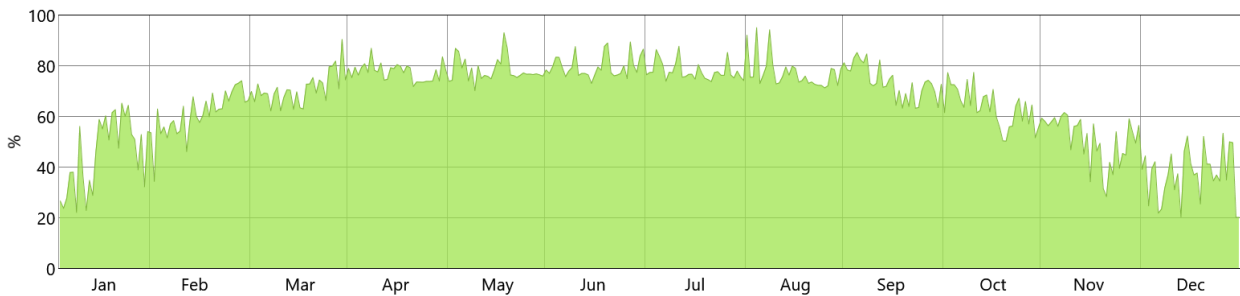
Obr. 11 – ASE - Ročné vystavenie slnečnému žiareniu riešeného priestoru počas roka -V2



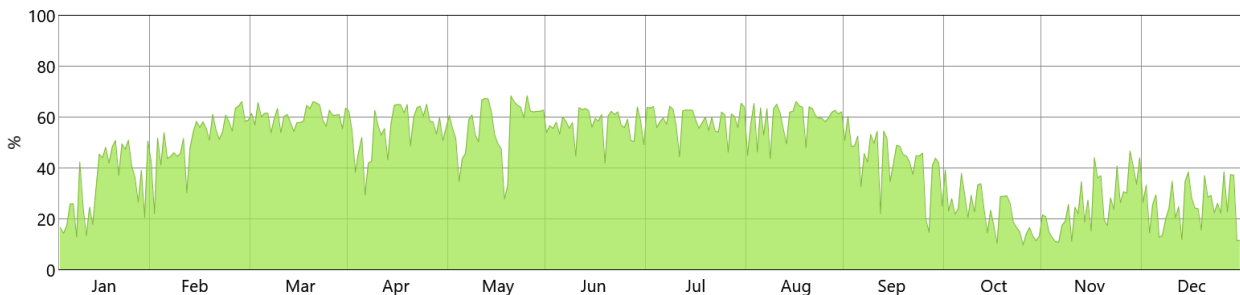
Obr. 12 – ASE - Ročné vystavenie slnečnému žiareniu riešeného priestoru počas roka -V3



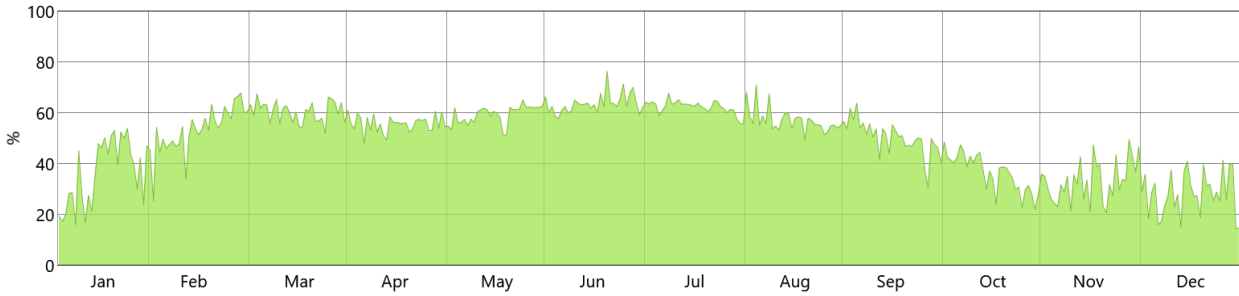
Obr. 13 – ASE - Ročné vystavenie slnečnému žiareniu riešeného priestoru počas roka -V4



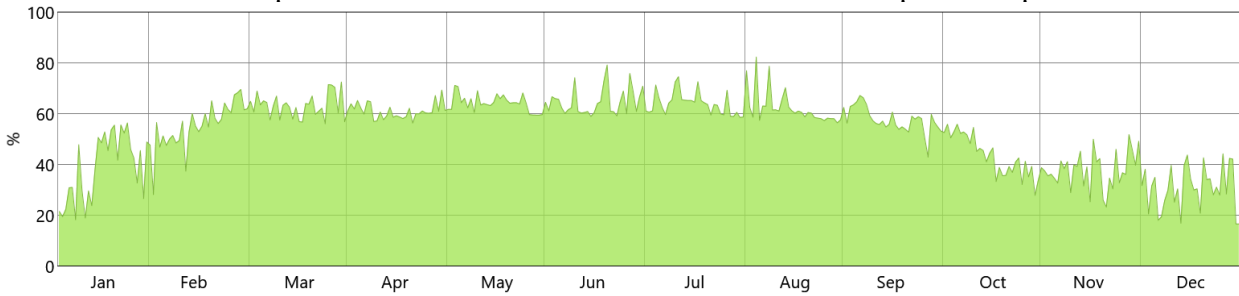
Obr. 14 – sDA - priestorová autonómia denného svetla riešeného priestoru počas roka -V1



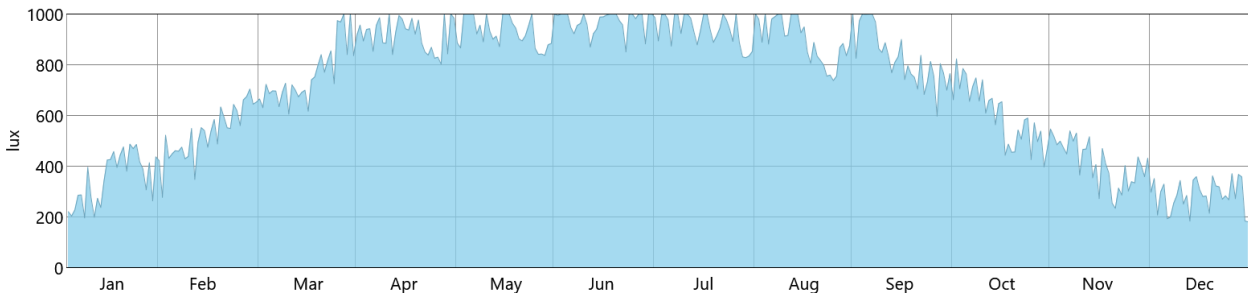
Obr. 15 – sDA - priestorová autonómia denného svetla riešeného priestoru počas roka -V2



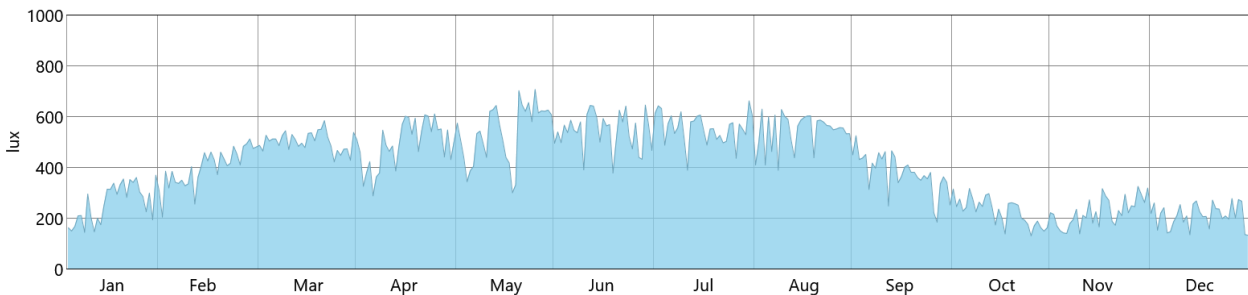
Obr. 16 – sDA - priestorová autonómia denného svetla riešeného priestoru počas roka -V3



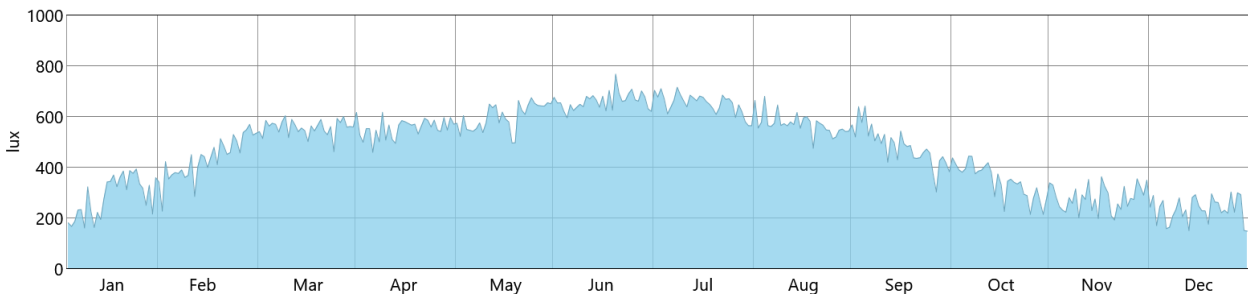
Obr. 17 – sDA - priestorová autonómia denného svetla riešeného priestoru počas roka -V4



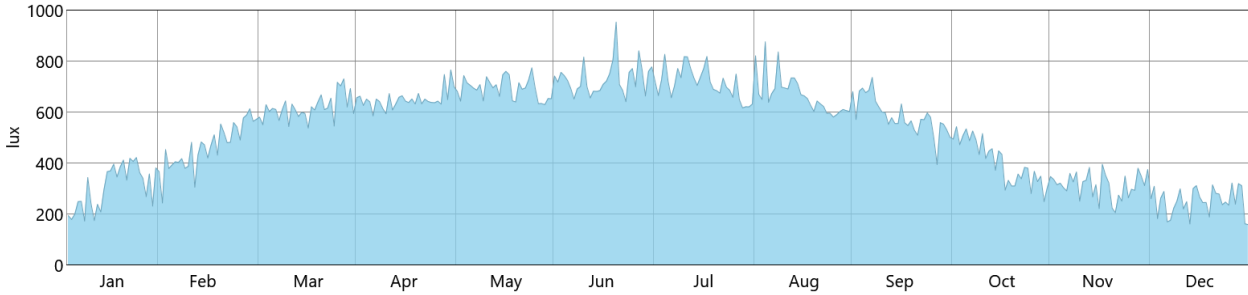
Obr. 18 Priemerná osvetlenosť pracovnej roviny denným svetlom počas roka -V1



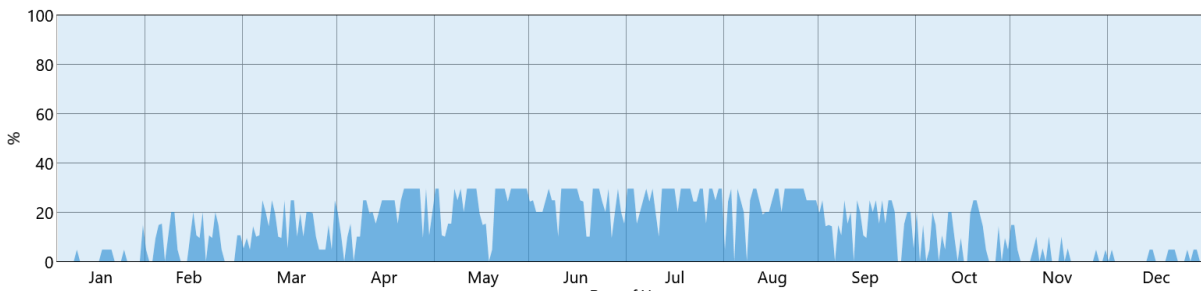
Obr. 19 Priemerná osvetlenosť pracovnej roviny denným svetlom počas roka -V2



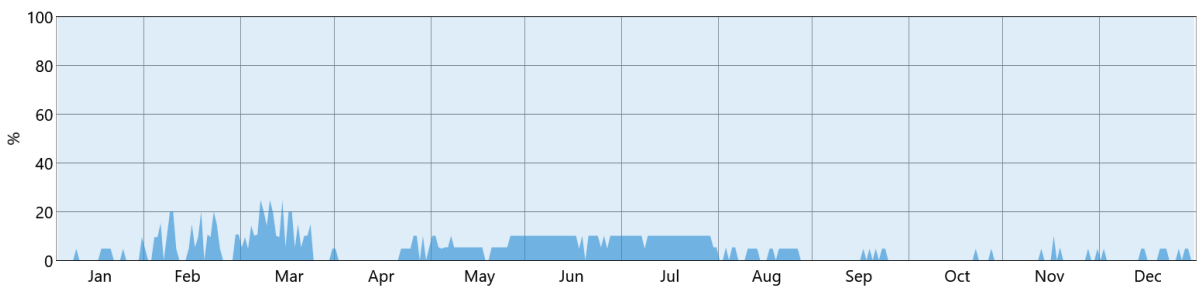
Obr. 20 Priemerná osvetlenosť pracovnej roviny denným svetlom počas roka -V3



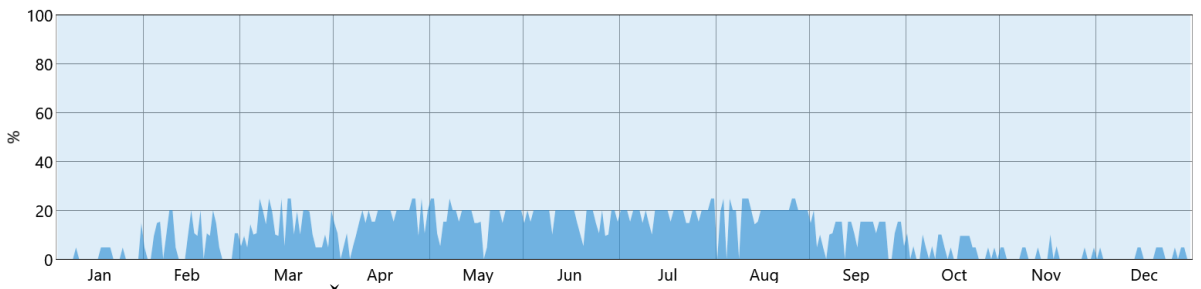
Obr. 21 Priemerná osvetlenosť pracovnej roviny denným svetlom počas roka -V4



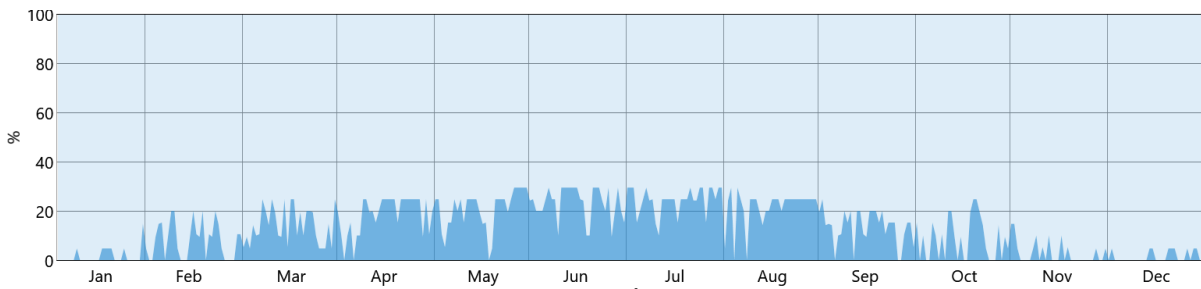
Obr. 22 Čas potreby využitá tieniaceho zariadenia počas roka -V1



Obr. 23 Čas potreby využitá tieniaceho zariadenia počas roka -V2



Obr. 24 Čas potreby využitá tieniaceho zariadenia počas roka -V3



Obr. 25 Čas potreby využitá tieniaceho zariadenia počas roka -V4

Z grafov zobrazujúcich celoročný priebeh metrik (Obr. 10 až 25) je zrejmé, že stromy majú malý vplyv na denné osvetlenie vnútorného priestoru počas mesiacov v ktorých majú opadnuté listy: január, február, marec, november a december. V ostatných mesiacoch roka je ich vplyv výrazný.

4. Záver

Táto práca zdôrazňuje rozhodujúcu úlohu, ktorú stromy zohrávajú v oblasti denného osvetlenia v budovách. Prítomnosť opadavých listnatých stromov výrazne znižuje slnečné žiarenie na fasáde budovy. Správne umiestnenie stromov je rozhodujúce pre optimalizáciu denného osvetlenia a energetickej účinnosti. Z analýzy vyplýva, že uvažovanie aplikácie stromov v simulačnom výpočte podstatne znižuje hodnoty ASE a sDA pri hodnotení návrhu vnútorného priestoru. Hodnoty sDA sa približujú k splneniu stanovenej požiadavky danej metriky až vo vzdialenosti stromov 20 metrov od fasády. Ako sa predpokladá, celkovo stromy výrazne ovplyvňujú úroveň denného svetla v interiéri, najmä v mesiacoch, keď sú stromy olistené, čo zdôrazňuje potrebu premysleného urbanistického plánovania.

Literatúra

- [1] Klimatická zmena a jej dopady. In *Fakty o klíme* [online]. Dostupné na internete: <<https://faktyoklime.sk/temy/klimaticka-zmena>>.
- [2] Katalóg adaptačných opatrení miest a obcí BSK na nepriaznivé dôsledky zmeny klímy. In [online]. Dostupné na internete: <<https://bratislavskykraj.sk/regionalny-rozvoj/strategie/katalog-adaptacnych-opatreni-miest-a-obci-bsk-na-nepriaznive-dosledky-zmeny-klimy/>>.
- [3] VOIGT, M.P. et al. Decision Support for Defining Adaptive Façade Design Goals in the Early Design Phase. In *Energies* . 2023. Vol. 16, no. 8, s. 3411. .
- [4] SHMÚ.sk - Meteo / Počasie / Hydrológia / Kvalita ovzdušia. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.shmu.sk/sk/?page=1>>.
- [5] UPVISION.SK [online]. 2023. Dostupné na internete: <<https://www.iqrc.sk/ako-znizit-prevadzko-ve-naklady-budovy-na-minimum/>>.
- [6] MIHINOVÁ, D. - PIECKOVÁ, E. Syndróm chorých budov – nešpecifické zdravotné ťažkosti obyvateľov problémových budov a ich príčiny. In . .
- [7] UNIVERSITY OF WASHINGTON et al. Deploying living walls as kinetic facades. In *Journal of Living Architecture* . 2017. Vol. 4, no. 2, s. 17–31. .
- [8] WANG, W. et al. Green roofs and facades with integrated photovoltaic system for zero energy eco-friendly building – A review. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments* . 2023. Vol. 60, s. 103426. .
- [9] LOONEN, R.C.G.M. et al. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2013. Vol. 25, s. 483–493. .
- [10] HSIEH, C.-M. et al. Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. In *Energy and Buildings* . 2018. Vol. 159, s. 382–397. .

- [11] Comfort, Cooling loads, Energy saving, Passive cooling, Shading, Mediterranean climate. In *American Journal of Environmental Engineering* . 2015. .
- [12] TAN, Z. et al. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. In *Energy and Buildings* . 2016. Vol. 114, s. 265–274. .
- [13] SIMPSON, J.R. - MCPHERSON, E.G. Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. In *Atmospheric Environment* . 1998. Vol. 32, no. 1, s. 69–74. .
- [14] MCPHERSON, E.G. et al. [online]. .Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 2016. [cit. 2024-09-08]. Dostupné na internete: <<https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/52933>>.
- [15] GREGORY MCPHERSON, E. - ROWNTREE, R.A. Geometric solids for simulation of tree crowns. In *Landscape and Urban Planning* . 1988. Vol. 15, no. 1–2, s. 79–83. .
- [16] SRIVANIT, M. - HOKAO, K. Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer. In *Building and Environment* . 2013. Vol. 66, s. 158–172. .
- [17] CALCERANO, F. - MARTINELLI, L. Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption. In *Energy and Buildings* . 2016. Vol. 112, s. 234–243. .
- [18] SIMÁ, E. et al. Tree and neighboring buildings shading effects on the thermal performance of a house in a warm sub-humid climate. In *Building Simulation* . 2015. Vol. 8, no. 6, s. 711–723. .
- [19] PAN, J. - JAKUBIEC, J.A. Simulating the Impact of Deciduous Trees on Energy, Daylight, and Visual Comfort: Impact Analysis and a Practical Framework for Implementation. In . .
- [20] HRAŠKA, J. - HARTMAN, P. KOLKO DENNÉHO SVETLA MÁ BYŤ V OBYTNÝCH MIESTNOSTIACH BYTOV? In *Mladá veda* . 2022. Vol. 10, no. 6, s. 17. .
- [21] ERSHOV, S.V. et al. Effective Simulation of Spatial Daylight Autonomy and Annual Sunlight Exposure. In *Proceedings of the 32nd International Conference on Computer Graphics and Vision* [online]. [s.l.]: Keldysh Institute of Applied Mathematics, 2022. s. 64–72. Dostupné na internete: <https://www.graphicon.ru/html/2022/papers/paper_005.pdf>.
- [22] ASSOCIATES, R.M.& Rhinoceros 3D. In *www.rhino3d.com* [online]. Dostupné na internete: <<https://www.rhino3d.com/>>.
- [23] ClimateStudio. In *Solemma* [online]. Dostupné na internete: <<https://www.solemma.com/climatestudio>>.
- [24] *Approved method: IES spatial daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE)*. . New York, N.Y.: Illuminating Engineering Society of North America, 2012. ISBN 978-0-87995-272-3.
- [25] Exterior Glass (with Dynamic Shade (optional)) — ClimateStudio latest documentation. In [online]. Dostupné na internete: <https://climatestudiodocs.com/docs/materials_exteriorGlass.html>.

- [26] Dynamic Leaf — ClimateStudio latest documentation. In [online]. Dostupné na internete: <https://climatestudiodocs.com/docs/materials_dynamicLeaf.html>.
- [27] HWANG, W.H. et al. Simulation of Shade Tree Effects on Residential Energy Consumption in Four U.S. Cities. In . 2016. .
- [28] LEED v4.1 | U.S. Green Building Council. In [online]. Dostupné na internete: <<https://www.usgbc.org/leed/v41>>.
- [29] PEREZ, R. et al. All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation. In *Solar Energy* . 1993. Vol. 50, no. 3, s. 235–245. .
- [30] HRASKA, J. *TIENIACA_TECHNIKA_BUDOV, Typologia, navrhovanie_a_hodnotenie*. . 1. vyd. [s.l.]: SPEKTRUM STU, 2020. 102 s. ISBN 978-80-227-5006-6.

Patricia Jánošková¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb D-TKPS4, 2. ročník

VPLYV VONKAJŠÍCH TIENIACICH PRVKOV NA TEPELNÚ POHODU

THE IMPACT OF EXTERNAL SHADING ELEMENTS ON THERMAL COMFORT

Abstract

Overheated dwellings can lead to thermal discomfort and negatively impact occupants. It's important to understand how indoor overheating occurs, its effects on residents and energy consumption, and how to design buildings to improve thermal comfort and reduce cooling needs during warm weather. While warmer winters may slightly reduce heating needs, higher summer temperatures increase reliance on cooling systems, which can lead to higher costs for installation and maintenance that some may be unable to afford. Passive cooling use free, renewable sources of energy such as sun, wind to provide cooling, ventilation, lighting needs for household, reduce greenhouse gas emission, improve indoor air quality. Effective shading - either static or movable - can significantly limit solar gain. Shading devices help control daylight, reducing issues like glare, and necessitate a balance between energy savings and occupant comfort.

Kľúčové slová / Key Words

Prehrievanie / Overheating; vnútorná pohoda / indoor comfort; pasívne chladenie / passive cooling; tienenie / shading

1. Úvod

K prehrievaniu v miernych oblastiach dochádza najmä v lete v dôsledku vysokej vonkajšej teploty a solárnych tepelných ziskov. Predpokladá sa, že prehrievanie vnútorných priestorov sa bude zvyšovať najmä vo veľkých mestských sídlach. Tepelné vlastnosti (tj absorpcia tepla, kapacita, vodivosť a albedo²) povrchov a materiálov nachádzajúcich sa v mestskej krajine, znížená evapotranspirácia³ zo zníženej prirodzenej vegetácie a zvýšených nepriepustných povrchov (napr. dláždené cesty, betónové budovy) a produkcia odpadového tepla, všetky činnosti súvisiace s človekom prispievajú k efektu UHI⁴ [1]. Hlavnou charakteristikou UHI je, že centrum mestských oblastí je za normálnych okolností výrazne teplejšie ako okolitá krajina [2]. Obyvatelia vo veľkých mestských centrách zažívajú okrem vyšších denných teplôt aj vyššie nočné teploty. Veľké množstvo tepla, ktoré je absorbované a akumulované nepriepustnými povrchmi okolitých budov a ciest, sa v noci pomaly uvoľňuje.

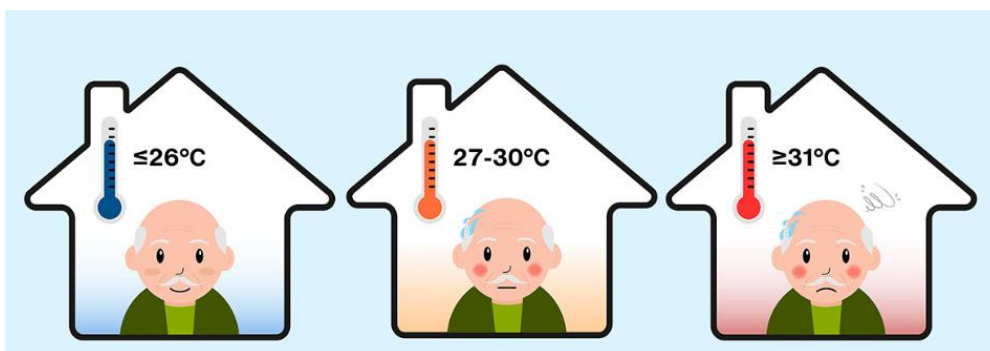
Zvyšovanie letných extrémov je spojené s nárastom úmrtností. Dlhodobé vystavenie tepelnému stresu je spojené s degradáciou fyzických schopností (*Obr. 1*), ovplyvňuje duševné zdravie, kognitívne funkcie, vytvára kumulatívny fyziologický stres na ľudskom tele, ktorý zhoršuje úmrtnosť ľudí s chronickými ochoreniami. [1].

¹ Patricia Jánošková, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

² Albedo - schopnosť povrchu odrážať slnečné žiarenie

³ Evapotranspirácia - predstavuje celkové množstvo vody vyparené z pôdy

⁴ UHI - angl. Urban heat island, mestský tepelný ostrov



Obr.1: Vplyv teploty na človeka [1]

Odhaduje sa, že priemerný moderný človek trávi 80-90 % času vo vnútorných priestoroch [3]. Je dôležité vytvárať vnútorné prostredie, ktoré je nie len pohodlné a zdravé, spĺňa požiadavky a smernice energetickej hospodárnosti, ale je aj prepojené s prírodným prostredím. Presvetlené prostredie poskytuje ľuďom estetické potešenie, zrakový komfort, zabezpečenie vysokej kvality vzduchu v spálňach má za následok zlepšenie kvality spánku a lepšiu kognitívnu výkonnosť na ďalší deň, môže znížiť intenzitu a prevalenciu akútnych zdravotných symptómov, medzi ktoré patrí podráždenie slizníc, problémy s dýchacími cestami, bolesti hlavy, ťažkosti so sústredením, únava, alergie, astma [4].

Cieľom je hľadať riešenia ako zlepšiť vnútorné prostredie obyvateľov už v úrovni projektovania (Obr.2). Pasívne chladenie využíva bezplatné obnoviteľné zdroje energie, ako je slnko, vietor, na zabezpečenie chladenia, vetrania, osvetlenia domácností, znižovania emisií skleníkových plynov a zlepšovania kvality vzduchu v interiéri [5]. Naopak používanie chladiacich systémov pravdepodobne povedie k zvýšeným nákladom domácnosti na inštaláciu, údržbu a ich prevádzku [6].

Slnčné tieniace systémy predstavujú jednu z pasívnych dizajnových stratégií používaných na ochranu budov pred intenzívnym slnečným žiarením. [7]. Solárne tieniace systémy ovplyvňujú úroveň denného svetla v budove a výhľad do exteriéru, tiež znižujú ročné solárne zisky. Tienenie ovplyvňuje spotrebu energie na osvetlenie, vykurovanie, chladenie, ako aj vizuálny a tepelný komfort obyvateľov. Tieniace zariadenia umožňujú kontrolovať vstup denného svetla do budovy, čím predchádzajú oslneniu. Typy tieniacich systémov sú pevné, pohyblivé a iné (napr. integrované fotovoltické zariadenie) [8].



Obr.2: Eliminácia tepelných ziskov [1]

Sú dve kategórie vnútornej pohody, tepelná bilancia a adaptívny prístup. Tepelná rovnováha (bilancia) využíva dáta z rozsiahlych a prísnych experimentov uskutočnených v klimatických komorách, zatiaľ čo adaptívne modely sú založené hlavne na nameraných údajov z terénnych štúdií. Tepelná bilancia zohľadňuje faktory ako vedenie tepla, konvekcia, žiarenie a metabolická aktivita osôb. Ľudia neustále interagujú s prostredím, v ktorom sa nachádzajú, prispôbujú sa mu, cítia sa pohodlne pri rôznych vnútorných teplotách, to rieši adaptívny prístup, uznáva, že tepelné pohodlie je subjektívne.

Aj pri tepelnej neutralite môže byť 5 % ľudí stále nespokojných. Podľa Fangeru by malo byť cieľom skúmanie tepelného komfortu, aké tepelné podmienky by sa mohli odchyľovať od optima a aké percento nespokojných by bolo prijateľné. Širší rozsah tepelných podmienok má tendenciu potrebovať menej energie na vykurovanie/chladenie [9]. Je potrebný kompromis medzi úsporou energie a vnútornou pohodou užívateľov [8].

V teplotnickej norme STN 73 05 40-2/Z1+Z2, 2019 v tab.8 sa uvádza, že teplota vzduchu v miestnosti v letnom období $\theta_{ai,max,N}$ má byť pre bytové a nebytové nevýrobné budovy 26 °C, pričom sa môže prekročiť požadovaná hodnota súvislo najviac 10 % z prevádzkového času, ak s tým prevádzkovateľ súhlasí [10].

2. Metodika výskumu

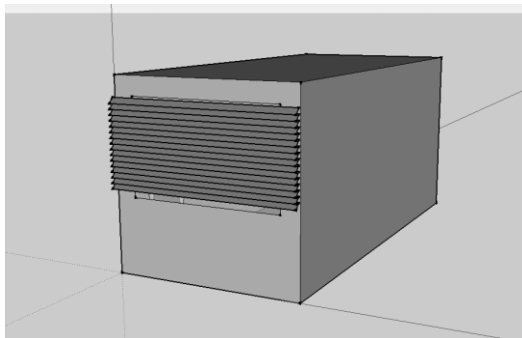
Hlavným cieľom tejto práce je vybrať jedno najefektívnejšie zo štyroch zvolených exteriérových pevných tienení a porovnať výsledky medzi nimi, pomocou počítačových simulačných metód. Práca sa zameriava na analyzovanie vplyvu exteriérového tienenia počas leta na vnútornú teplotu miestnosti, tepelnú pohodu. Model miestnosti bol vytvorený v softvéri na 3D modelovanie SketchUp [11], ako simulačný nástroj na analýzu vnútorného prostredia sa použil softvér EnergyPlus [12].

- a) Samostatná miestnosť, kancelária administratívnej budovy s rozmermi 2,5 x 5,5 m a s výškou 2,5 m, s jedným oknom 2 x 1,25 m vo výške 1 m sa namodelovala v programe SketchUp. Miestnosť je zasklenenou plochou orientovaná na juh.
- b) Vlastnosti materiálov sa zadefinovali v EnergyPlus a vytvorili sa obalové konštrukcie: a) podlaha, strop (pvc, poter, Isover N, železobetón, vápenná omietka), b) SDK priečka (sdk, sdk, IsoverAku, sdk, vápenná omietka), c) ľahký obvodový plášť (ĽOP) (sdk, IsoverFassil, hliník), d) transparentná konštrukcia – izolačné trojsklo – $U_{okno} = 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, viac o materiáloch v *tabuľke č.1*
- c) Okrajové podmienky sú adiabatické okrem strany fasády – vonkajšie prostredie.
- d) Nastavili sa *režimy* – časový rozvrh – kedy sú v miestnosti ľudia a vytvárajú vnútorné zisky. Kanceláriu budú využívať dvaja ľudia = zisky od ľudí, v miestnosti bude *osvetlenie* = zisky zo svietenia (70 W), v miestnosti sa bude používať 2 x PC + 2 x monitor - *spotrebiče* = zisky zo spotrebičov. Nastavil sa režim *chladenie*, ak teplota dosiahne 26° začne sa chlaďiť, ak sú tam ľudia, keď nie, chladenie nastane pri 30°. Posledné nastavenie je vetranie (infiltrácia).
- e) Exteriérové tienenia, 4 typy na *Obr.3 - Obr.6* sa vymodelovali v SktechUp.
- f) Ďalej sa robili nastavenia v EnergyPlus ako napríklad zemepisná šírka, dĺžka, časové pásmo, nadmorská výška pre danú lokalitu - Bratislavu, čo vyplýva z TRKR⁵, zadefinovalo sa simulačné obdobie - leto. Simulácia bola spustená.
- g) Výsledky

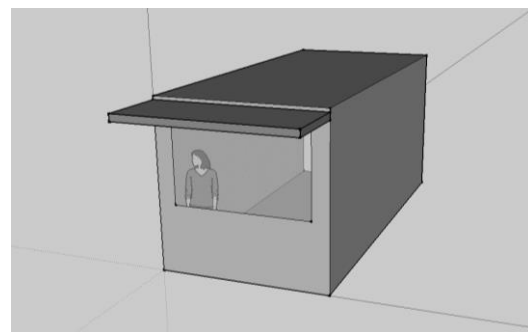
⁵ TRKR - testovací referenčný klimatický rok, súbor fyzikálnych veličín, reprezentujúcich vonkajšiu klímu danej lokality, údaje z programu Meteororm – merané dáta za obdobie 2000 - 2020

Tab.1: Fyzikálne veličiny stavebných materiálov

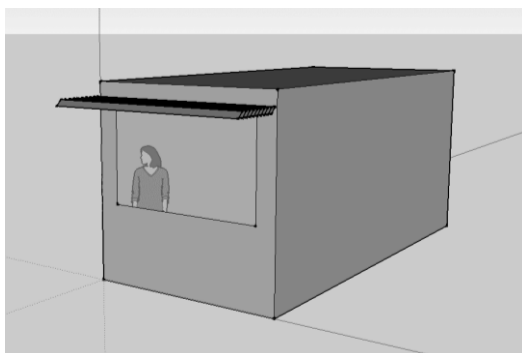
Materiál	Hrúbka m	Objemová hmotnosť ρ kg/m ³	Tepelná vodivosť λ W/(m.K)	Merná tepelná kapacita c J/(kg.K)
PVC	0.003	1400	0.160	1100
Poter	0.050	2100	1.050	1020
Isover N	0.050	100	0.039	800
Železobetón	0.200	2300	1.220	1020
Vápenná omietka	0.010	1600	0.700	840
SDK	0.0125	750	0.150	1060
Isover Aku	0.050	40	0.039	800
Isover Fassil	0.180	50	0.038	800
Hliník	0.0015	2700	160	880
Porotherm 30	0.300	800	0.155	1000
Vápenocementová omietka	0.020	1850	0.970	840
Isover Clima 034	0.100	60	0.038	1030
Lepiaca malta	0.005	1550	0.070	840



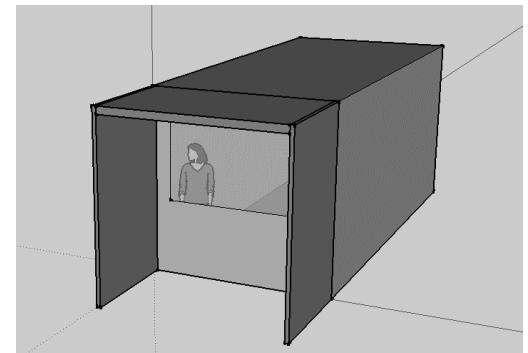
Obr.3: Model A: Exteriérové pevné žalúzie



Obr.4: Model B: Konzola 1 m



Obr.5: Model C: Pergola 1 m



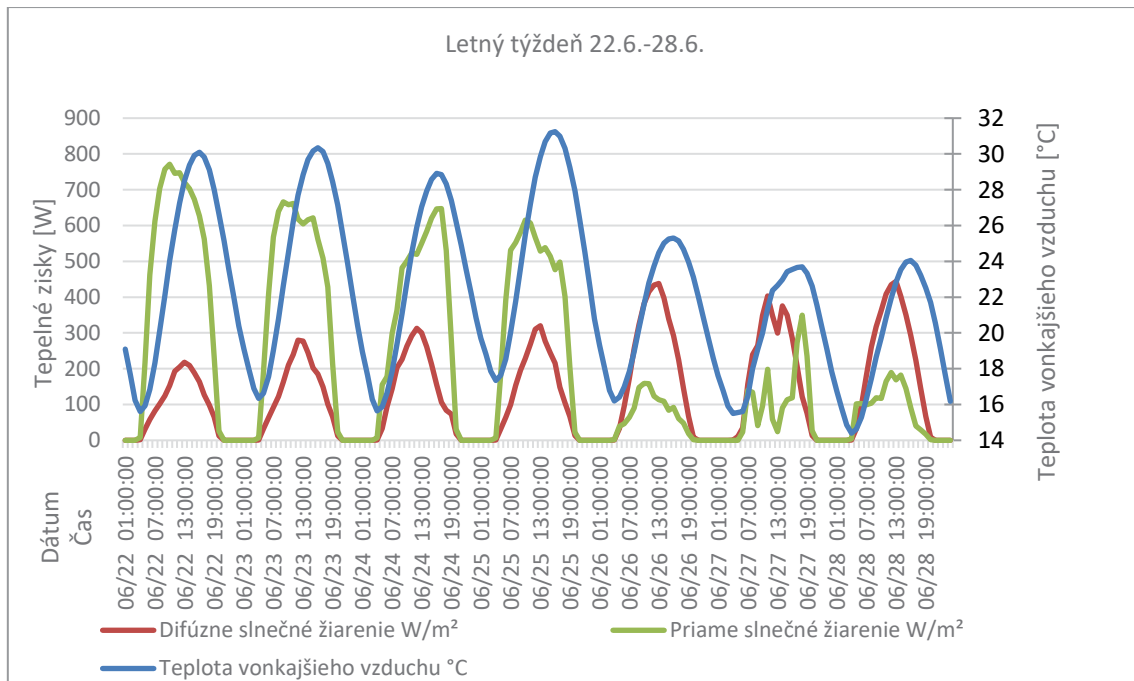
Obr.6: Model D: Lodžia

3. Výsledky a analýza

V príspevku sú analyzované viaceré typy tienenia, ako reagujú na vonkajšie podmienky, konkrétne v letnom období, počas letného extrému a vo zvolenej lokalite. Robili sa rôzne porovnania medzi tieneniami, vybral sa najefektívnejší typ tienenia z použitých typov. Na simuláciu sa využívali programy SketchUp a EnergyPlus.

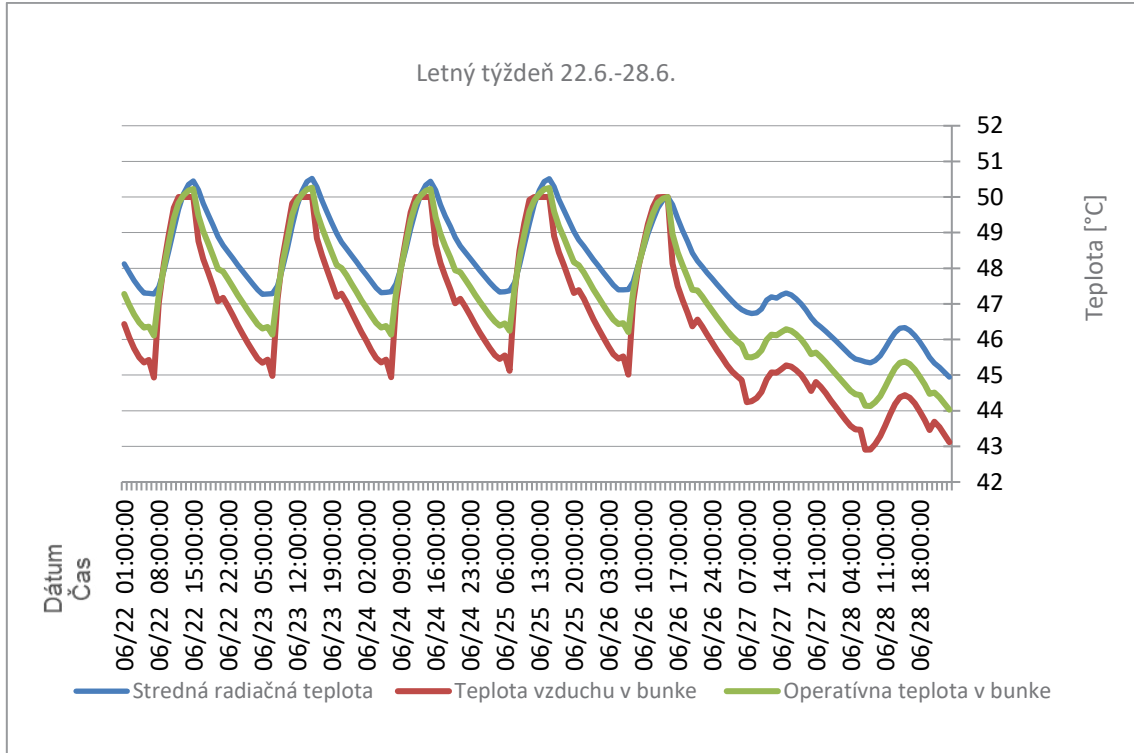
Simulácia prebehla za použitia chladenia aby sa dosiahla optimálna vnútorná teplota. Z výsledkov pre potrebu tepla na chladenie sa vybral denný extrém za obdobie leto od 1.6 – 30.9., a zdefinoval sa letný týždeň, čo je 22.6.-28.6. Výsledky sú spracované pomocou grafov a tabuľky, sleduje sa letné obdobie, kedy efekt prehrievania ovplyvňuje vnútornú teplotu miestnosti najvýraznejšie.

Na Obr.7 je zobrazený graf vonkajších klimatických podmienok oblasti Bratislava, vyplýva z TRKR.



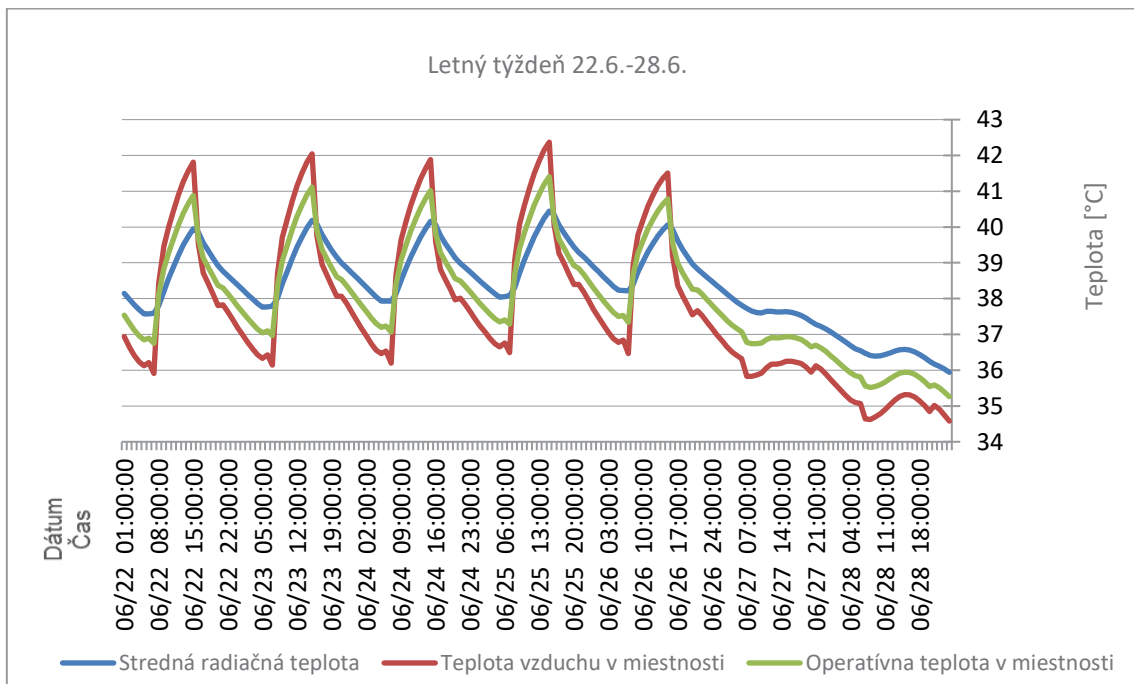
Obr.7: Priebeh vonkajších klimatických podmienok

Dôležité je poznať výsledky - priebeh teploty v miestnosti bez použitia tienenia a bez použitia chladenia (Obr.8), keď zasklenie je orientované na juh, aby sa mohli porovnať vnútorné teploty s miestnosťou chránenou tieniacimi prvkami.

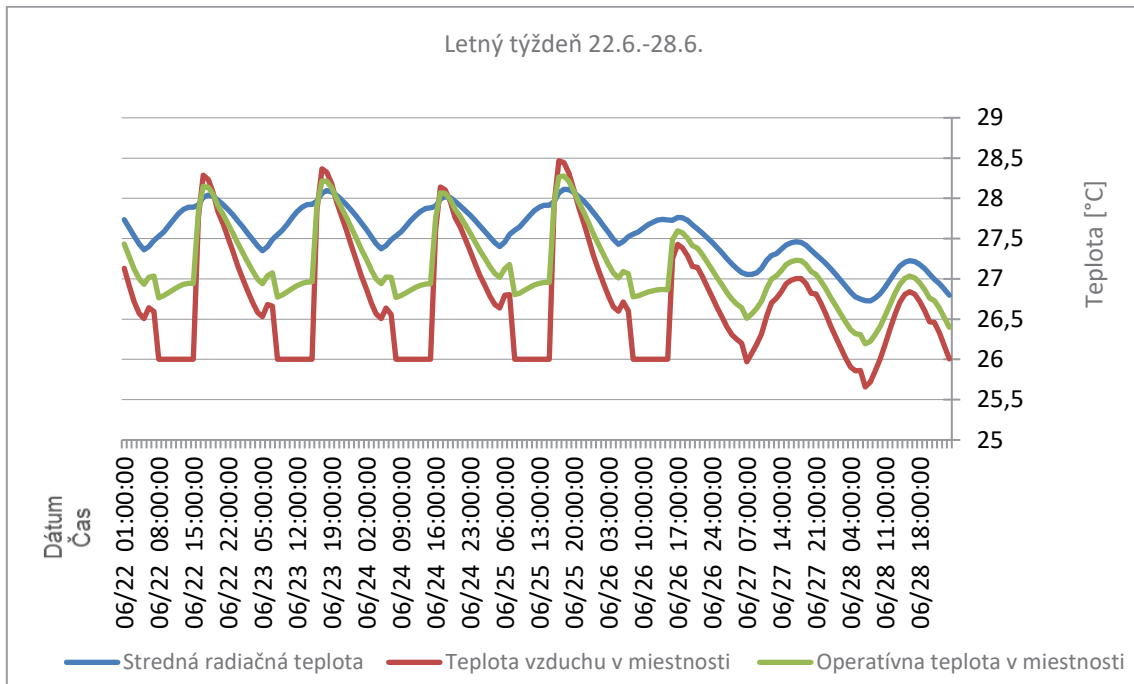


Obr.8: Priebeh teploty v miestnosti bez tienenia a bez chladenia

Operatívna teplota v miestnosti bez exteriérového tienenia, bez chladenia, 25.6. o 13:00 je 50°, operatívna teplota v miestnosti s exteriérovými žalúziami bez chladenia v tento deň je 41° na Obr.9 a operatívna teplota s exteriérovými žalúziami za pomoci chladenia, 25.6. o 13:00 je 27 ° na Obr.10. Teplota v bunke je cez víkend nižšia, pretože sa tam nenachádzajú ľudia a nevyužívajú osvetlenie a spotrebiče.

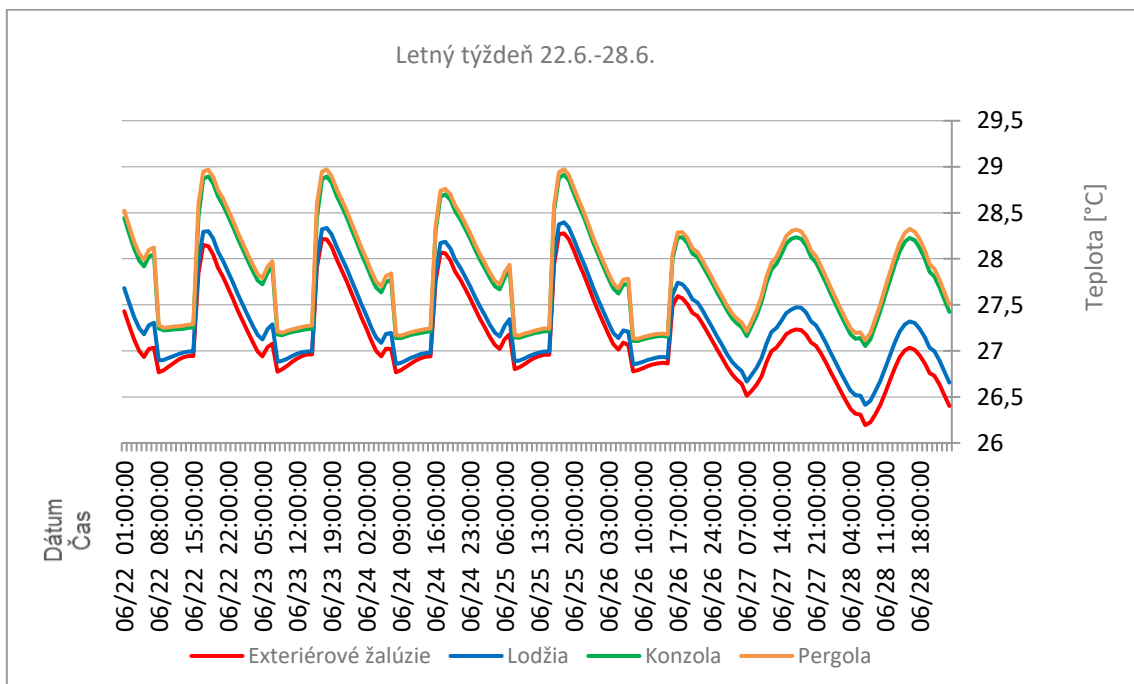


Obr.9: Priebeh teploty v bunke s ex. pevnými žalúziami bez chladenia



Obr.10: Priebeh teploty v bunke s ex. pevnými žalúziami

Na Obr.11 sa nachádza priebeh operatívnej teploty, ktorá zohľadňuje teplotu vzduchu a radiačnú teplotu, pre jednotlivé typy exteriérových tienení. 25.6. o 20:00 teplota v miestnosti s exteriérovými žalúziami je 28°, s lodžiou je 28,2°, s konzolou je 28,7° a s pergolou je 28,8°.

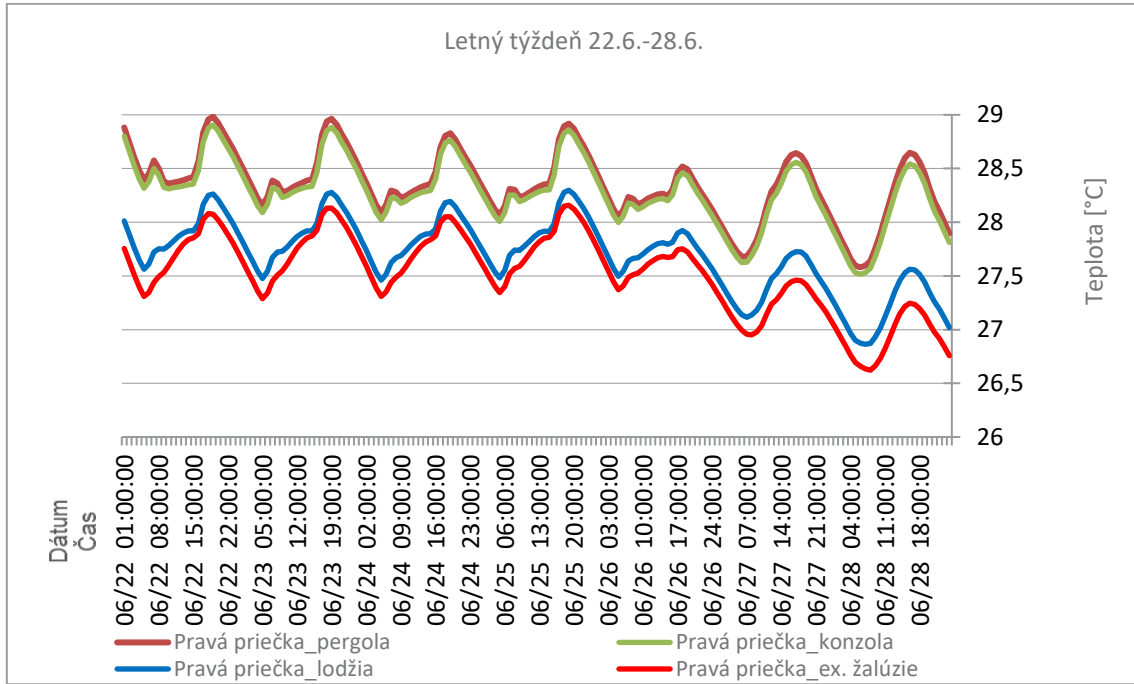


Obr.11: Priebeh operatívnej teploty

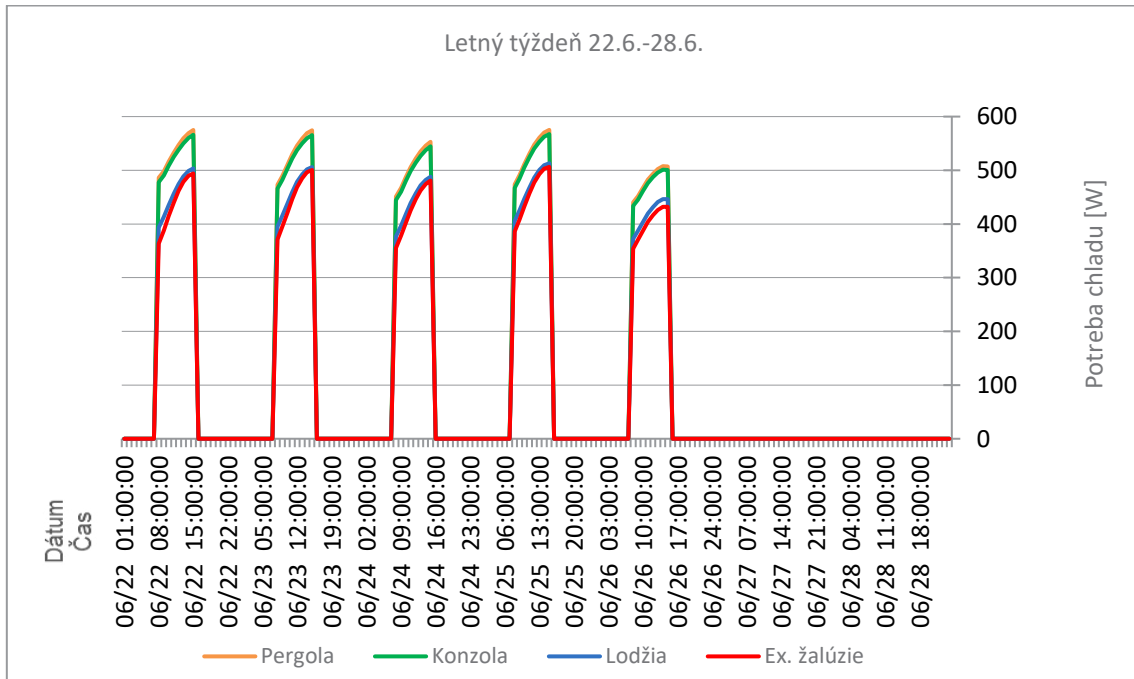
Najnižšie teploty spolu s najnižšou potrebou tepla na chladenie dosiahne referenčná miestnosť za použitia **exteriérových pevných žalúzií**, z navrhnutých tienení. Najbližšie výsledky k exteriérovým

žalúziám má *lodžia*. Vyššie teploty v bunke nastanú za použitia *konzoly* a najhoršie podmienky nastanú pri použití *pergoly*. Tieto výsledky by sa dali ovplyvniť šírkou tieniaceho prvku.

Nakoniec sa porovnávajú povrchové teploty priečky pri použití chladenia medzi jednotlivými tieneniami na *Obr.12* a potreby tepla na chladenie na *Obr.13*.



Obr.12: Povrchové teploty priečky pre jednotlivé tienenia



Obr.13: Potreba tepla na chladenie pre jednotlivé tienenia

V tabuľke č.2 sú výsledky potreby energie na chladenie a celkovej potreby energie za letné obdobie pre jednotlivé typy exteriérového tienenia porovnaní s bunkou bez tienenia. Úspora energie pri použití exteriérového tienenia je v priemere okolo 38 %, čo ma pozitívny ekonomický vplyv pre užívateľov.

Tab.2: Potreba energie na chladenie za letné obdobie

Typ tienenia	Potreba energie na chladenie kWh	Celková potreba energie kWh*	Úspora %
Miestnosť bez tienenia	481.2	716.1	0
Exteriérové žalúzie	266.61	501.51	45
Lodžia	273.34	508.24	43
Konzola	328.32	563.22	32
Pergola	337.08	571.98	30

*Celková potreba energie predstavuje súčet energií potrebnej pre osvetlenie, spotrebiče a energie na chladenie

4. Záver

Z výsledkov je zrejme, že najefektívnejším tienením zo štyroch typov pevného exteriérového tienenia žalúzie, lodžia, konzola, pergola sú *exteriérové pevné žalúzie*. Keďže použité exteriérové žalúzie sa nemení podľa svetelných podmienok, zhoršuje zrakový komfort, simulácia sa zaoberala len tepelnou pohodou, žalúzie sa využili na maximum, čo by v realite ovplyvnilo použitie osvetlenia v miestnosti a naopak by sa zvýšil dopyt energie na osvetlenie. Lodžia, ktorá má podobné výsledky dokáže znížiť potrebu energie na chladenie o 43%, čo má priaznivý výsledok pre používateľov.

Bez použitia chladenia je v miestnosti s oknom orientovaným na juh, pri použití ľahkého obvodového plášťa, len ťažko dosiahnuť priaznivé teploty, tepelnú pohodu, počas letného obdobia. Preto je dôležité využívať pasívne chladenie, riešiť elimináciu prehrievania už v počiatočnej fáze projektovania. Alternatívne riešenia, obnoviteľná energia a technológie premeny energie môžu mať pozitívne sociálne, ale najmä ekonomické dopady.

Ďalšie opatrenia sú napríklad zmena povrchov na svetlé, odrazivé povrchy. Rôzne povrchy majú rôzne albedo. V rámci vonkajšieho prostredia oceány, jazerá a lesy odrážajú relatívne malé časti dopadajúceho slnečného svetla a majú nízke albedá, sneh, morský ľad a púšte odrážajú relatívne veľké časti dopadajúceho slnečného svetla a majú veľké albedá [13]. Albedo tmavých spevnených plôch je 0,1 - 0,3, svetlé povrchy majú 0,5 - 0,9. Tmavé povrchy vedú v letnom období počas dňa k zvýšenému prehrievaniu, v noci vyžarujú absorbované teplo [14].

Literatúra

- [1] Kenny, G. P., Tetzlaff, E. J., Journeay, W. S., Henderson, S. B., & O'Connor, F. K. (2024). Indoor overheating: A review of vulnerabilities, causes, and strategies to prevent adverse human health outcomes during extreme heat events. *Temperature*, 11(3), 203–246, <https://doi.org/10.1080/23328940.2024.2361223>

- [2] Lafuente, Juan & Brotas, Luisa. (2014). The impact of the Urban Heat Island in the energy consumption and overheating of domestic buildings in London.
- [3] Stéphane Quefelec (EEA). Briefing no. 20/2022, Title: Cooling buildings sustainably in Europe: exploring the links between climate change mitigation and adaptation, and their social impacts, EN HTML: TH-AM-22-022-EN-Q - ISBN: 978-92-9480-511-9 - ISSN: 2467-3196 - doi: 10.2800/61355 EN PDF: TH-AM-22-022-EN-N - ISBN: 978-92-9480-512-6 - ISSN: 2467-3196 - doi: 10.2800/36810
- [4] Sergio Altomonte, Joseph Allen, Philomena M. Bluysen, Gail Brager, Lisa Heschong, Angela Loder, Stefano Schiavon, Jennifer A. Veitch, Lily Wang, Pawel Wargocki, Ten questions concerning well-being in the built environment, *Building and Environment*, Volume 180, 2020, 106949, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106949>.
- [5] A.Y. Freewan A (2019) *Advances in Passive Cooling Design: An Integrated Design Approach. Zero and Net Zero Energy.* IntechOpen. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.87123>.
- [6] Jonathon Taylor, Robert McLeod, Giorgos Petrou, Christina Hopfe, Anna Mavrogianni, Raúl Castaño-Rosa, Sofie Pelsmakers, Kevin Lomas, Ten questions concerning residential overheating in Central and Northern Europe, *Building and Environment*, Volume 234, 2023, 110154, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110154>.
- [7] AL-MASRANI, Salwa M. and AL-OBAIDI, Karam (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in construction*, 102, 195-216, <http://shura.shu.ac.uk/information.html>
- [8] Laura Bellia, Concetta Marino, Francesco Minichiello, Alessia Pedace, An Overview on Solar Shading Systems for Buildings, *Energy Procedia*, Volume 62, 2014, Pages 309-317, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.392>.
- [9] Liu Yang, Haiyan Yan, Joseph C. Lam, Thermal comfort and building energy consumption implications – A review, *Applied Energy*, Volume 115, 2014, Pages 164-173, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>.
- [10] STN 73 05 40-2/Z1+Z2, 2019 – Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 2: Funkčné požiadavky. Júl 2019.
- [11] Vizualizačný, grafický program SketchUp 8.0, <https://www.sketchup.com/>
- [12] Energetický simulačný program EnergyPlus 7.2.0, <https://energyplus.net/>
- [13] J.A. Coakley, REFLECTANCE AND ALBEDO, SURFACE, Editor(s): James R. Holton, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Academic Press, 2003, Pages 1914-1923, ISBN 9780122270901, <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00069-5>.
- [14] <https://www.klimaspaja.sk/klimaticke-prvky/>

Martina Kalivodová¹

Študijný program: D_TKPS, 4. ročník

VPLYV ENERGETICKEJ HOSPODÁRNOSTI BUDOV NA VYBRANÉ CHARAKTERISTICKÉ PRVKY VERNAKULÁRNEJ ARCHITEKTÚRY V PROCESE JEJ OBNOVY

THE IMPACT OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE ASSESSMENT ON
SELECTED CHARACTERISTIC ELEMENTS OF VERNACULAR ARCHITECTURE IN
THE RESTORATION PROCESS

Abstract

The paper addresses the issue of vernacular architecture (VA) restoration in Slovakia, balancing between the requirements for building energy efficiency and the preservation of cultural and historical values. This review article analyzes existing challenges and defines key factors influencing the restoration process, providing a framework for further research on the harmonious adaptation of VA. It takes into account EU energy regulations, Slovak legislation, and traditional construction practices, establishing a foundation for a methodology that integrates quantitative and qualitative aspects of restoration to ensure the sustainability of vernacular architecture.

Keywords

vernacular architecture, building energy performance assessment, cultural and historical values, harmonious adaptation, sustainability

Abstrakt

Príspevok sa venuje problematike obnovy vernakulárnej architektúry na Slovensku, ktorá balansuje medzi požiadavkami na energetickú hospodárnosť budov (EHB) a ochranou kultúrno-historických hodnôt. Tento rešeršový článok analyzuje existujúce výzvy a vymedzuje kľúčové faktory, ktoré ovplyvňujú proces obnovy, pričom predstavuje rámec pre ďalší výskum v oblasti harmonickej adaptácie VA. Zohľadňuje energetické predpisy EÚ, slovenskú legislatívu a tradičné stavebné postupy, čím vytvára základ pre metodiku, ktorá spája kvantitatívne a kvalitatívne aspekty obnovy a zabezpečuje udržateľnosť vernakulárnej architektúry.

Kľúčové slová

vernakulárna architektúra, energetická hospodárnosť budov, kultúrno-historické hodnoty, harmonická adaptácia, udržateľnosť

1. Úvod

Problematika obnovy vernakulárnej architektúry na Slovensku predstavuje komplexnú výzvu, ktorá sa ocitá na priesečníku medzi požiadavkami na energetickú hospodárnosť budov (EHB) a potrebou zachovania jej kultúrno-historických hodnôt. Vplyvom zmeny klímy a rastúcim tlakom na redukciu emisií skleníkových plynov dochádza k sprísňovaniu energetických požiadaviek v celej Európskej únii, pričom smernica 2002/91/EC o energetickej hospodárnosti budov, a jej následné

¹ Martina, Kalivodová, Ing. Ing. arch., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

revízie 2010/31/EU a 2018/844/EU kladú dôraz na znižovanie energetickej náročnosti existujúceho fondu budov. [12][13][14] Tieto predpisy boli na Slovensku implementované prostredníctvom Zákona č. 555/2005 Z. z. a jeho novelizácií, ktorý zavádza povinné minimálne požiadavky na EHB nielen pre novostavby, ale aj pre existujúce stavby uvedené do prevádzky po roku 1947. [7]

Aj keď Zákonom 555/2005 Z. z. priamo nezasahuje budovy postavené pred rokom 1947, ktoré nespádajú pod zákonnú povinnosť energetickej certifikácie, tieto stavby tvoria významnú časť slovenského stavebného fondu a ich obnova je z dôvodu ich zhoršeného technického stavu často nevyhnutná. Súčasná legislatíva však nezohľadňuje špecifické kultúrno-historické hodnoty, ktoré tieto stavby reprezentujú, a ktoré sú výsledkom regionálnych architektonických tradícií, použitia lokálnych prírodných materiálov a reagovania na lokálne klimatické podmienky. Zároveň mnohé dotačné schémy viažu finančnú podporu na zlepšenie EHB, čím obnova vernakulárnej architektúry riskuje stratu autenticity prostredníctvom unifikovaných zásahov, ktoré nerešpektujú jej jedinečné vlastnosti. [9]

Tento príspevok poukazuje na nerovnováhu medzi kvantitatívnymi a kvalitatívnymi parametrami v procese obnovy vernakulárnej architektúry na Slovensku. Kým požiadavky na energetickú hospodárnosť sú jednoznačne kvantifikovateľné, kultúrno-historické hodnoty zahŕňajú ťažšie merateľné kvalitatívne aspekty, ako sú kompozícia, použité materiály a tradičné stavebné techniky, ktoré sú jedinečné pre každý región a sú významným nositeľom identity slovenského vidieka. [6] Absencia metodiky, ktorá by umožňovala synergické spojenie týchto dvoch dimenzií, má za následok buď nízku energetickú efektivitu, alebo zásahy, ktoré neprimerane narúšajú pôvodné charakteristické prvky vernakulárnej architektúry.

Príspevok analyzuje možnosti spojenia kvantitatívnych a kvalitatívnych aspektov v procese obnovy vernakulárnej architektúry a navrhuje kroky k tvorbe metodiky, ktorá by reflektovala miestne podmienky, historické charakteristiky a zároveň by plnila požiadavky energetickej hospodárnosti. Zámerom je podporiť udržateľný prístup k obnove, ktorý by rešpektoval kultúrnu identitu a dedičstvo slovenského vidieka, pričom by sa využívali ekologicky udržateľné materiály a technológie.

2. Vernakulárna architektúra

Vernakulárna architektúra (VA) predstavuje viac než len stavebnú hmotu, je to odkaz predchádzajúcich generácií, ktoré vytvárali svoje domovy v súlade s miestnou klímou, krajinou a kultúrou. Tieto objekty nesú v sebe nehmotné hodnoty, ktoré sú ťažko merateľné, avšak o to významnejšie – predstavujú identitu obcí, regiónov a národa ako celku. Ako uvádza Olukoya (2021), hodnoty VA sú kontextuálne, zakorenené v špecifických sociálnych a environmentálnych podmienkach, ktoré formovali architektúru daného miesta. [3] VA je teda omnoho viac než len funkčný priestor, je prejavom života komunity a súčasťou jej kultúrneho dedičstva.

Príspevok sa zameriava na dve dimenzie obnovy VA – kultúrno-historické hodnoty a energetickú hospodárnosť budov (EHB). Hoci existujú aj ďalšie dôležité aspekty, akými sú ekonomický a sociálny rozmer, tieto dve dimenzie majú kľúčový význam, pretože súčasný trend obnovy je silne ovplyvnený požiadavkami EHB. Tieto požiadavky, ak nie sú prispôbené kontextu VA, môžu viesť k nenávratnému poškodeniu kultúrno-historických hodnôt, ktoré VA nesie. Ak obnova VA podľa štandardizovaných energetických normám bez ohľadu na jej unikátne vlastnosti, hrozí riziko, že stratí svoju autenticitu a spojenie s historickým a sociálnym kontextom, ktorý je kľúčový pre jej pochopenie a ochranu.

Tento príspevok preto zdôrazňuje potrebu harmonického prístupu k obnove VA, resp. k adaptácii ktorá by zabezpečila, že energetická efektivita bude dosahovaná spôsobom, ktorý rešpektuje

kultúrno-historické hodnoty a zachováva autenticitu stavieb. Kombinácia týchto dvoch dimenzií nám umožňuje vidieť VA nielen ako historické objekty, ale aj ako živé prvky kultúrneho dedičstva, ktoré vyžadujú citlivý a regionálne prispôsobený prístup.

3. Charakteristické prvky vernakulárnej architektúry

Charakteristické prvky vernakulárnej architektúry (VA) sú formované súhrou kultúrnych, klimatických a krajinných faktorov, ktoré odrážajú životné podmienky a hodnoty danej komunity. VA je pevne zakorenená v miestnej tradícii a materiálovej kultúre, a preto ju definujú špecifické znaky, ktoré ju odlišujú od iných stavebných typológií a robia z nej nenahraditeľnú súčasť kultúrneho dedičstva. Aby sme dosiahli metodologickú jednoznačnosť, v tomto príspevku sa sústreďíme výlučne na teplovýmennú obálku stavieb VA. Týmto abstrahujeme od ďalších prvkov, ako sú spôsoby vykurovania či chladenia, a koncentrujeme sa len na konštrukčné a materiálové časti obálky, ktoré priamo ovplyvňujú energetickú efektívnosť a sú merateľné v kontexte EHB. Pri formulácii harmonickej adaptácie VA je kľúčové rozdeliť tieto prvky podľa ich vzťahu k EHB a kultúrno-historickým hodnotám. Metóda harmonickej adaptácie VA preto pracuje s dvomi hlavnými kategóriami: charakteristické prvky VA a ich adaptácia, ktoré majú vplyv na EHB a prvky, ktoré sú z hľadiska kultúrno-historického významu dôležité, avšak neovplyvňujú merateľné parametre EHB.

1. Prvky prepojené s EHB

- Tektonika konštrukčná: Tieto konštrukčné prvky ovplyvňujú hodnoty EHB a zahŕňajú výber materiálov, skladbu konštrukcií a typ výplňových konštrukcií. Pri obnove je možné tieto prvky optimalizovať tak, aby zachovali kultúrnu identitu stavby, ale zároveň prispeli k zlepšeniu energetickej efektívnosti.

- o Steny: Ide o materialitu a skladbu obvodových stien. Tradičné steny v slovenských vidieckych domoch sú často hrubé a zhotovené z materiálov, ako sú hlina, kameň či drevo. Tieto materiály majú dobré tepelnoizolačné vlastnosti a regulujú vlhkosť v interiéri, čo prispieva k udržaniu tepelného komfortu. Pri obnove je možné použiť podobné prírodné materiály, ako sú drevovláknité dosky či celulóza, ktoré sú ekologické a podporujú autenticitu VA.

- o Strecha a krytina: Strecha so strmým sklonom zodpovedá miestnym klimatickým podmienkam a je často pokrytá materiálmi, ako sú drevené šindle či slama. Pri obnove môže byť vhodné používať materiály, ktoré vzhľadom a funkčnosťou nadväzujú na pôvodné prvky, čím sa zachováva estetická kontinuita a zároveň sa zlepši energetická efektívnosť.

- o Okná a zasklenie: Tradičné drevené okná so štandardným rámom môžu byť optimalizované tak, aby poskytovali lepšiu izoláciu bez výrazného zásahu do historickej podoby stavby. Dôležité je pri tom dbať na to, aby zachovali proporcie a rozmery typické pre VA.

- Proporcía: Táto kategória zahŕňa hrúbku stien, pomer plnej steny a otvorov fasády a sklon strechy. Tieto proporcie prispievajú k estetike a harmónii stavby, pričom v kontexte EHB umožňujú efektívne využitie solárnych ziskov a minimalizáciu tepelných strát.

- o Hrúbka stien: Hrubé steny zabezpečujú stabilnú vnútornú teplotu a sú kľúčovým prvkom pri zabezpečení tepelných ziskov a strát. V procese obnovy by sa mala zachovať pôvodná hrúbka, prípadne zvoliť zateplovací systém, ktorý nenaruša autentický vzhľad stien.

- o Pomer fasády a otvorov: Tradičná VA má často nízky pomer otvorov k plnej stene, čo minimalizuje tepelné straty a zvyšuje stabilitu konštrukcie. Táto proporcia je dôležitá pre zachovanie energetickej efektívnosti a zároveň estetického výrazu stavby.

- o Sklon strechy: Sklon strechy prispôsobený miestnym podmienkam nielenže zabezpečuje lepšie odvádzanie dažďovej vody a snehu, ale aj optimalizuje slnečné zisky v zimnom období.

2. Prvky, ktoré nie sú prepojené s EHB, ale sú kľúčové pre kultúrno-historické hodnoty

- Farebnosť: Farba fasády a strechy má estetický a symbolický význam, ktorý vychádza z regionálnych tradícií a materiálových možností. Napríklad tradičné biele omietky alebo hlinené povrchy prispievajú k jedinečnosti stavieb a k ich vnímaniu ako súčasti krajiny. Farebnosť nie je priamo prepojená s energetickou efektívnosťou, ale zohráva významnú úlohu v rámci identity miesta a autenticity VA.

- Tektonika povrchová: Povrchová štruktúra, zrnitosť omietky a členenie fasády sú vizuálne aspekty, ktoré vypovedajú o remeselných tradíciách a majú historickú hodnotu. Ornamenty, zdobenie fasády a rozličné povrchové úpravy pridávajú hodnotu, ktorú by neregulované zásahy mohli ľahko zničiť. Analýza týchto prvkov by mala vychádzať z dostupných archívnych prameňov, prieskumov a socio-kultúrnych analýz.

3. Ďalšie prvky: Orientácia, tienenie a ventilácia

- Orientácia na svetové strany: Tradičné usporiadanie obytných a hospodárskych priestorov s orientáciou na svetové strany podporuje pasívne zisky tepla v zimných mesiacoch a prirodzené ochladzovanie v lete. Tento prvok zohráva významnú rolu v energetickej efektívnosti bez potreby technologických zásahov.

- Tienenie a ventilačné prvky: Tradičné stavebné prvky, ako sú gánok, portikus alebo podstrešie, poskytujú prirodzené tienenie a ochranu pred poveternosťnými podmienkami. Tieto prvky sú typické pre slovenskú vidiecku architektúru a okrem praktických vlastností odrážajú spôsob života obyvateľov a ich adaptáciu na miestne podmienky.

4. Udržateľnosť existujúcej architektúry

Vernakulárna, architektúra Udržateľnosť vernakulárnej architektúry (VA) na Slovensku vychádza z jej prirodzenej adaptability na miestne podmienky a využívania lokálnych materiálov s nízkou uhlíkovou stopou, ako sú hlina, drevo a kameň. Tieto materiály podporujú environmentálnu udržateľnosť, pretože sú obnoviteľné a znižujú energetickú náročnosť budov. VA využíva aj pasívne princípy regulácie teploty a vlhkosti, čím prispieva k ekologickej rovnováhe a znižuje potrebu mechanických systémov. [1][4]

Ekonomická dimenzia obnovy VA sa opiera o tradičné remeselné techniky, ktoré majú vyššiu počiatočnú investíciu, no dlhú životnosť a nízke nároky na údržbu. Pri podpore obnovy VA je nevyhnutné, aby sa financovanie nesústredilo len na energetické hodnotenie, ale zahŕňalo aj podporu kultúrno-historických hodnôt. [3]

Sociálna dimenzia VA spočíva v jej prepojení s identitou a životom komunity. VA je súčasťou miestnej tradície a jej zachovanie posilňuje vzťah obyvateľov k ich prostrediu. [4] [6] Proces obnovy môže zahŕňať aj zapojenie miestnych remeselníkov a obyvateľov, čo prispieva k sociálnej udržateľnosti a k zachovaniu remeselných zručností pre budúce generácie.

Udržateľná obnova VA tak predstavuje komplexný prístup, ktorý zahŕňa nielen ekologické a ekonomické hľadiská, ale najmä ochranu kultúrno-historických hodnôt ako súčasti národnej identity a dedičstva.nesie.

5. Proces obnovy vernakulárnej architektúry a EHB

5.1 Situácia v Európe

Európska únia stanovila ambiciózne ciele na zníženie energetickej spotreby budov o 40 % a emisií skleníkových plynov o 87 % do roku 2050. Stratégia dekarbonizácie budov, ktorá je

súčasťou iniciatívy Renovačná vlna, si kladie za cieľ zdvojnásobiť mieru ročných hĺbkových renovácií budov do roku 2030 a obnoviť približne 35 miliónov budov. Renovačná vlna má nielen zlepšiť energetickú hospodárnosť budov, ale aj podporiť zamestnanosť a zlepšiť komfort bývania. Zároveň však nemá špecifické odporúčania pre kultúrno-historické objekty, ako je vernakulárna architektúra, ktorá predstavuje nenahraditeľnú hodnotu pre miestne komunity. [9][12][13][14]

5.2 *Situácia na Slovensku*

Na Slovensku bol zákon č. 555/2005 Z. z. zavedený na podporu zvyšovania energetickej hospodárnosti nových a existujúcich budov. [7] Tento zákon sa riadi európskymi požiadavkami a je zameraný na optimalizáciu energetických nárokov budov, najmä prostredníctvom minimálnych energetických požiadaviek, ktoré musia novostavby a významné renovácie spĺňať. V rámci Dlhodobej stratégie obnovy fondu budov Slovenska sú stanovené orientačné míľniky pre roky 2030, 2040 a 2050, ktoré zahŕňajú hlbokú renováciu budov s cieľom znížiť energetickú spotrebu v sektore stavebníctva. [9]

Plán obnovy a odolnosti Slovenskej republiky ponúka finančné stimuly na obnovu rodinných domov, kde sa kladie dôraz na zlepšenie EHB. V tejto oblasti však absentujú konkrétne pokyny, ako pri zvyšovaní energetickej efektívnosti citlivo pristupovať k budovám s kultúrno-historickou hodnotou. [11] Vernakulárna architektúra, ktorá bola väčšinou postavená pred rokom 1947, často nespadá pod zákonnú povinnosť energetickej certifikácie, no aj tak podlieha tlakom na modernizáciu a zvýšenie energetickej efektívnosti. Tieto unifikované opatrenia však môžu ohroziť jej autentický charakter.

5.3 *Hodnotenie EHB podľa zákona č. 555/2005 Z. z.*

Energetická hospodárnosť budov (EHB) sa hodnotí ako množstvo energie potrebnej na vykurovanie, chladenie, prípravu teplej vody, vetranie a osvetlenie, pričom sa vychádza z minimálnych požiadaviek stanovených zákonom č. 555/2005 Z. z. a vyhlášky č. 364/2012 Z. z. Hlavné kritériá hodnotenia EHB zahŕňajú nasledujúce ukazovatele:

Primárna energia: Tento globálny ukazovateľ je hlavným kritériom pre zatriedenie budovy do energetickej triedy (A0 až G). Zahŕňa množstvo energie potrebnej na prevádzku budovy s ohľadom na obnoviteľné zdroje, čím sa znižuje uhlíková stopa budovy a jej vplyv na životné prostredie. [7]

Merná potreba tepla na vykurovanie: Tento ukazovateľ reflektuje tepelnú stratu budovy a hodnotí sa na základe tepelnotechnických vlastností konštrukcií (U-hodnota) stavebných prvkov, ako sú obvodové steny, strechy a podlahy. Cieľom je zabezpečiť dostatočnú tepelnú ochranu pre vnútorné prostredie a minimalizovať spotrebu energie na vykurovanie. [7]

Tepelnotechnické vlastnosti konštrukcií: Požiadavky na tepelnotechnické vlastnosti konštrukcií sú stanovené v STN 73 0540-2, pričom ide najmä o tepelnoizolačné vlastnosti stavebných prvkov. [7] Pre vernakulárnu architektúru je výzvou dodržať tieto normové hodnoty bez narušenia pôvodnej materiálovej a tektonickej skladby stavby.

Kritériá výmeny vzduchu a vlhkosti: Tento aspekt zahŕňa požiadavky na hygienické parametre vnútorného prostredia, ktoré zahŕňajú minimálnu výmenu vzduchu, aby sa predišlo kondenzácii a vzniku plesní. [7] Pri vernakulárnych stavbách s tradičnými materiálmi je zabezpečenie prirodzenej výmeny vzduchu nevyhnutné na zachovanie optimálnych podmienok v interiéri.

Emisie CO₂: Posudzovanie emisií CO₂ je súčasťou energetickej certifikácie a prepočítava sa na základe primárnej energie a typu energetických nosičov. [7] Tento ukazovateľ je dôležitý z hľadiska globálneho cieľa dekarbonizácie stavebného fondu.

Výzvy pri procese obnovy VA v súvislosti s EHB

Súčasnú požiadavku na EHB kladú vysoké nároky na energetickú efektívnosť, čo môže byť pre vernakulárnu architektúru náročné bez výrazného zásahu do pôvodných materiálov a technológií. Zabezpečenie kompatibility medzi tradičnými stavebnými prvkami a modernými energetickými štandardmi vyžaduje vyvinúť metodiku, ktorá prepojí kvantitatívne a kvalitatívne parametre obnovy. Dôležité je, aby štát a samosprávy vytvorili usmernenia, ktoré by umožňovali harmonickú obnovu VA, aby sa zabránilo unifikácii a strate jej kultúrneho významu.

6. Vplyv EHB na charakteristické prvky vernakulárnej architektúry

Tepelnotechnické vlastnosti konštrukcií

Hodnotenie: Tepelnotechnické vlastnosti konštrukcií zahŕňajú:

Tepelný odpor stien (R): Udáva schopnosť steny odolávať tepelným stratám. Vyšší tepelný odpor znamená lepšiu izoláciu.

Tepelný odpor strechy: Kritický pre minimalizáciu tepelných strát cez strešné konštrukcie, najmä v zime.

Súčiniteľ prestupu tepla (U): Platí pre obvodové konštrukcie, najmä okná a dvere. Tento súčiniteľ vyjadruje, koľko tepla prejde konštrukciou pri rozdielnych teplotách medzi interiérom a exteriérom – nižšia hodnota U znamená lepšie tepelnoizolačné vlastnosti.

Väzba na VA prvky:

Tektonika konštrukčná: Pri úprave tepelnotechnických vlastností stien a strechy sa často mení skladba konštrukcií, napríklad pridávaním izolačných vrstiev. Tradičné konštrukcie VA sú často hrubé a zabezpečujú prirodzenú reguláciu teploty a vlhkosti, čo je kľúčové pre zachovanie komfortu. [1] [3] Vhodné materiály, ako drevo a hlina, zachovávajú autenticnosť a podporujú prirodzené klimatické podmienky.

Proporcia: Pridanie izolácie na steny a strechu môže zmeniť hrúbku stien a proporčný výraz stavby. Zachovanie proporcií (napr. hrúbka stien, veľkosť okien a dverí) je dôležité pre udržanie autentického vzhľadu.

Merná potreba tepla na vykurovanie

Hodnotenie: Merná potreba tepla na vykurovanie vyjadruje množstvo tepla potrebného na udržanie stabilnej teploty v interiéri počas vykurovacej sezóny. Zohľadňuje izoláciu stien, podláh a strechy, ako aj priepustnosť okien a dverí.

Väzba na VA prvky:

Tektonika konštrukčná: Merná potreba tepla je ovplyvnená výberom materiálov a izolácií v rámci konštrukčných prvkov. Pri výbere vhodných izolácií by sa mali používať prírodné materiály, ako sú drevovláknité dosky, ktoré sú vhodnejšie pre tradičné stavby a lepšie reagujú na prirodzenú vlhkosť.

Proporcia: Tradične nízky pomer otvorov na ploche fasády znižuje tepelné straty, čo je výhodné z hľadiska energetickej efektivity a zároveň zachováva estetiku. Pri úprave pomeru otvorov je potrebné dbať na zachovanie typického výrazu fasády a jej historického charakteru.

Výmena vzduchu a vlhkosti

Hodnotenie: Výmena vzduchu zabezpečuje hygienu vnútorného prostredia a reguláciu vlhkosti. Zníženie prirodzenej infiltračie, napríklad výmenou okien, môže viesť k zvýšenej vlhkosti a vzniku plesní. [11]

Väzba na VA prvky:

Tektonika konštrukčná: Drevené okná a tradičné materiály podporujú prirodzenú výmenu vzduchu, ktorá reguluje vlhkosť a zlepšuje vnútorné prostredie. Použitie plastových okien s vysokou tesnosťou môže narušiť prirodzený tok vzduchu, čo vedie k problémom s kondenzáciou. Pri obnove je dôležité zachovať prirodzenú ventiláciu, ktorá bola kľúčová v pôvodných stavbách.

Orientácia a tienenie: Tradičné architektonické prvky, ako sú gánky a podstrešia, zabezpečujú tieň a prirodzené chladenie. Sú dôležité pre prirodzenú ventiláciu a redukciu tepelného zaťaženia v letných mesiacoch.

Emisie CO₂

Hodnotenie: Emisie CO₂ sa prepočítavajú na základe energetickej spotreby budovy. Znižovanie spotreby energie priamo ovplyvňuje produkciu emisií.

Väzba na VA prvky:

Tektonika konštrukčná: Použitie prírodných materiálov ako hlina, drevo a kameň je ekologické a pomáha znižovať emisie CO₂ v porovnaní s modernými materiálmi. [1] [8] Zachovanie týchto materiálov je prospešné pre udržateľnosť stavieb.

Farebnosť a tektonika povrchová: Tradičné omietky a povrchové úpravy majú nižšiu ekologickú stopu ako moderné syntetické farby. Zachovanie pôvodných povrchových materiálov podporuje udržateľnosť.

7. Záver

Proces obnovy vernakulárnej architektúry na Slovensku si vyžaduje citlivý prístup, ktorý bude rešpektovať jej kultúrno-historické hodnoty a súčasne splní požiadavky energetickej hospodárnosti budov. Tento príspevok predstavuje prvý krok k formulácii metodiky pre harmonickú adaptáciu vernakulárnej architektúry, pričom analyzuje a vymedzuje problematiku, ktorá sa týka spojenia merateľných kritérií EHB a jedinečných kvalitatívnych aspektov VA. Ukázalo sa, že energetická efektívnosť môže byť dosahovaná spôsobom, ktorý nenarúša autentické charakteristické prvky týchto stavieb, ak sa pri obnove využívajú tradičné materiály a zohľadňujú regionálne stavebné postupy.

Táto rešerš poskytuje rámec pre ďalší výskum a pre vypracovanie metodiky, ktorá umožní udržateľnú obnovu VA v súlade s jej kultúrno-historickými hodnotami. Budúce výskumy by sa mali zamerať na detailnejšie prepojenie kvantitatívnych a kvalitatívnych faktorov, aby sa zabezpečila synergia medzi energetickou efektívnosťou a zachovaním identity vernakulárnej architektúry, ktorá je dôležitým prvkom slovenskej národnej kultúry.

Literatúra

[1] Nguyen, B. K., Reiter, S., Rigo, P., & Attia, S. (2019). Studies on sustainable features of vernacular architecture in different regions across the world: A comprehensive synthesis and evaluation. *Renewable Energy Reviews*, 102, 227–247. ISSN 1364-0321.

[2] Webb, A. L. (2017). Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 748–759. ISSN 1364-0321.

- [3] García-Esparza, J. A. (2012). Epistemological paradigms in the perception and assessment of vernacular architecture. *International Journal of Heritage Studies*. doi:10.1080/13527258.2012.666755. ISSN 1352-7258.
- [4] Ulašínová, A. (2014). Tradičná stavebná kultúra ako súčasť revitalizácie vidieckych sídiel. *Muzeológia a kultúrne dedičstvo*, 2(1), 57–70. ISSN 1339-2204.
- [5] Langer, A. (2002). Lokálne prírodné materiály a tradičné techniky: K základným prvkom udržateľnosti vidieckej architektúry. *Architektúra a urbanizmus*, 36(3-4), 201-218. ISSN 0044-8680.
- [6] Pagáčová, M. (2015). Kultúrna identita a autenticnosť slovenských vidieckych stavieb v procese obnovy. *Národná kultúra*, 7(2), 85–95. ISSN 1336-0731.
- [7] Zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov v znení neskorších predpisov. [online]. Dostupné na internete: <https://www.zakonypreludi.sk/zz/2005-555> [cit. 2024].
- [8] Ministry of Transport and Construction of the Slovak Republic. (2020). Dlhodobá stratégia obnovy fondu budov v Slovenskej republike. [online]. Dostupné na internete: https://energy.ec.europa.eu/document/download/b8e058af-f32e-4ee1-a9b9-63d84871a51c_en?filename=sk_2020_ltrs.pdf [cit. 2024].
- [9] Európska komisia. (2020). Vlna obnovy pre Európu: Ekologizácia našich budov, tvorba pracovných miest, zlepšovanie životných podmienok. [online]. Dostupné na internete: https://energy.ec.europa.eu/document/download/b8e058af-f32e-4ee1-a9b9-63d84871a51c_en [cit. 2024].
- [10] Slovholding. (2023). Energetická certifikácia budov: Výpočet energetickej hospodárnosti budov. [online]. Dostupné na internete: <https://www.slovholding.sk/inziniarska-cinnost/energeticka-certifikacia-budov/vypocet-energetickej-hospodarnosti-budov> [cit. 2024]
- [11] Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, L 1, 4 January 2003, pp. 65–71.
- [12] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, L 153, 18 June 2010, pp. 13–35.
- [13] Directive 2018/844/EU of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*, L 156, 19 June 2018, pp. 75–91.

Anežka Kašiarová¹

Študijný program: D-TKPS4. 2. ročník

VPLYV LITURGICKEJ REFORMY NA AKUSTIKU INTERIÉROV HISTORICKÝCH KOSTOLOV

THE IMPACT OF LITURGICAL REFORM ON THE ACOUSTICS OF HISTORIC CHURCH INTERIORS

Abstract

Sacred objects represent items with immeasurable cultural-historical value. Increasingly, the question of preserving their acoustic properties as intangible cultural heritage is being emphasized. Speech intelligibility was necessary in Catholic Church liturgies even before in certain historical periods. In the 16th century, because of the Council of Trent and the importance attributed to preaching as a tool against the Reformation movement, several changes were made during the celebration of the liturgy. These changes were further strengthened during the Second Vatican Council, when significant changes were made to the manner and places from which speeches were delivered during the liturgy.

Kľúčové slová / Key Words

sakrálna architektúra; liturgická reforma; zrozumiteľnosť slova; ambón; kazateľnica

1. Úvod

Sakrálna architektúra tvorí najpočetnejšiu a pamiatkovo najhodnotnejšiu časť architektonického dedičstva. Drvivá väčšina historických kostolov a chrámov sa zachovala a je udržiavaná aj preto, že slúži neprerušene svojmu pôvodnému účelu do súčasnosti. Zároveň predstavuje liturgicky a ľudsky stvárnený priestor a tak ako každé iné architektonické dielo, by mala byť výsledkom prepojenia umeleckých ako aj technických požiadaviek. Okrem iného predstavuje architektonický a umelecký odkaz doby v ktorej vznikla. [1]

V sakrálnej architektúre dochádza ku spojeniu hudobnej a rečovej zložky. Je však veľmi obtiažné vyriešiť obidva aspekty v rovnakej kvalite naraz. Táto práca sa preto zameriava na rečovú zložku z hľadiska akustiky sakrálnych priestorov.

Akustika je pomerne mladým odborom, pričom ako vedný odbor začala byť vnímaná v sedemnástom storočí no súčasťou stavieb bola už od nepamäti. Aj napriek tomu, že stavitelia častokrát nepoznali jej základné princípy a rôzne možnosti jej výpočtov, stavby vznikali takmer vždy v súlade s akustickými potrebami. Takéto budovy sú pre nás príkladom dobrej akustiky a sú objektom nášho záujmu a obdivu. [1]

Akustické podmienky historických objektov sú v celosvetovom meradle predmetom výskumu už niekoľko desiatok rokov a poskytujú často jedinečné a historicky dôležité zistenia. Meranie a archivácia dát akustického priestoru má veľký význam – jedným z nich je napr. aj fakt, že každý z momentálne existujúcich a akusticky zaujímavých objektov môže byť v budúcnosti zničený alebo poškodený v dôsledku nehody, prírodnej katastrofy alebo vojny.

¹ Anežka, Kašiarová, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Vzťah medzi dobou dozvuku a architektonickým štýlom

Tak ako jednotlivé obdobia v rámci histórie ovplyvňovali architektonický štýl v podobe výrazových prostriedkov, tak ovplyvňovali aj veľkosť jednotlivých kostolov. V priemere najväčšie kostoly sú z obdobia raného kresťanstva, gotiky a renesancie s objemom. Románske obdobie sa vyznačovalo menšími rozmermi kostolov, čo súviselo pravdepodobne s nedostatkom financií počas raného stredoveku. V období moderny viedol trend ku ešte výraznejšej redukcii objemu.

Analýza doby dozvuku v závislosti od štýlu v akom bol objekt postavený ukazuje významné variácie, ktoré sú výsledkom závislosti na objeme a celkovej absorpcii spôsobenej použitými povrchovými úpravami. Pre nemecké a talianske kostoly je príznačná dlhšia doba dozvuku práve v období gotiky a renesancie, v dôsledku používania tvrdého kameňa a omietky. Naopak pre obdobie baroka je typická kratšia doba dozvuku, vďaka bohatým dekoratívnym vzorom. [8]

Pri talianskych kostoloch je možné na základe uskutočnených meraní dedukovať, že prechodom od ranokresťanských k renesančným kostolom sa priemerná doba dozvuku zvyšuje, čo má za následok úbytok množstva dreva v prospech kameňa, ktorý bol okrem iného pokrytý omietkou. V období baroka priemerná doba dozvuku klesá najmä v dôsledku menšieho objemu priestoru ako aj bohatých dekorácií, ktoré spôsobujú zvýšenú absorpciu a zníženú dobu dozvuku. Je ťažko posúdiť či je tento priaznivý jav vzhľadom na zrozumiteľnosť reči výsledkom reakcie na potreby protireformácie, alebo len zhodou okolností v dôsledku aplikácie nových architektonických ideí. Pri moderných kostoloch je zaznamenaný nárast doby dozvuku vzhľadom na rozšírené použitie betónu a tvrdých odrazových povrchov. [8]

3. Architektonické prostriedky pre zabezpečenie akustického komfortu pred liturgickou reformou

Množstvo krajín počas rôznych historických období stavalo kostoly na základe ich vlastných štýlov, zvykov a tradícií. Čím viac takýchto rôznorodých stavieb vzniklo, tým viac druhov akustických podmienok naprieč krajinami a obdobiami existovalo. Na základe toho nie je možné stanoviť jednotný spoľahlivý akustický štandard v rámci sakrálnej architektúry. [2]

Sakrálne objekty neboli navrhované a budované za účelom využitia v podobe auditória. Tvary a materiály použité pri ich výstavbe boli založené na architektonických kritériách, pričom sa brali do úvahy nie len potreby rozloženia priestoru, ale aj historický vývoj architektonických štýlov, liturgických bohoslužieb a iných obradov. [3]

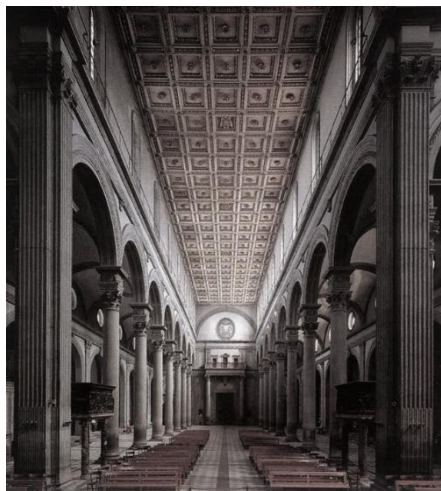
Historické sakrálne stavby sa vyznačujú zložitou priestorovou distribúciou zvuku čo vedie ku veľmi zložitým zvukovým poliam. Zapríčiňuje to najmä typologické a interiérové usporiadanie a rôzne typy konštrukcií v podobe stropov, podláh, stien či výplní otvorov. Okrem statického či funkčného hľadiska slúžia tieto konštrukcie aj ako prostriedky na dosiahnutie požadovaných akustických vlastností daného priestoru.

Posudzovanie prostredí len na základe ich geometrických charakteristík vedie k zložitým vzájomným vzťahom, čo súvisí s preferovanými smermi zvuku spôsobenými viacerými architektonickými prvkami v podobe stĺpov, oblúkov, klenieb či reliéfnych prvkov. [3]

3.1 Stropy

Drevené stropy predstavujú z historického hľadiska dôležitý prvok pre kvalitnú akustiku sakrálnych priestorov. Takéto prostriedky pre dosiahnutie požadovaných akustických parametrov boli často v období skorého baroka významnými architektmi vo veľkom odporúčané avšak v praxi boli aj napriek tomu málo uplatňované.

Architekti uprednostňovali drevené stropy pred kupolami a zaklenutými priestormi, pretože použitie kupol zo skúsenosti zhoršovalo akustiku uzavretých priestorov. V nedávnych štúdiách však bolo dokázané, že zaklenutý priestor znižuje hodnoty (RT) doby dozvuku pri nízkych frekvenciách v porovnaní s plochými stropmi. Túto výhodu je možné pripísať aj väčšej absorpčnej ploche kupoly. [2] Drevené stropy spôsobujú výrazné zníženie doby dozvuku (T_m), najmä pri stredných a nízkych frekvenciách.



Obr. 1 : Bazilika San Lorenzo, Florencia [12]

3.2 Klenby a kupoly

V neskoršej renesancii a baroku bolo čoraz viac kostolov stavaných s kupolami a viacerými bočnými kaplnkami, ktoré boli zdobené vysoko odrazovým mramorom. Kostoly typické pre obdobie renesancie a baroka, ktoré majú pôdorysný tvar gréckeho kríža sú oproti tradičnejším kostolom s pôdorysom latinského kríža menej bežné. V kostoloch z tohto obdobia bol kladený veľký dôraz na zakrivené povrchy, ktoré sa stali charakteristickým znakom významných talianskych architektov ako sú Bernini a Borromini. [4]

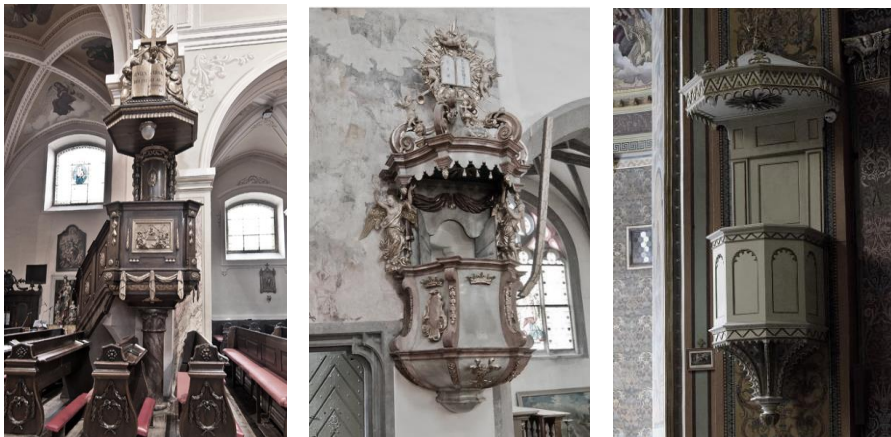


Obr. 2 : Baroková kupola [13]

Pri kostoloch s klenbami a omietanými stenami bol preukázaný nárast doby dozvuku pri nízkych frekvenciách, ktorý je spôsobený nedostatkom ľahkých kmitajúcich štruktúr a strmý pokles pri vysokých frekvenciách v dôsledku absorpcie vzduchu, ktorá nie je dostatočne vyvážená v stredných frekvenciách v dôsledku lešteného povrchu omietky. Naopak kostoly s klenbami a povrchovou úpravou inou ako je omietka, preukazujú menej strmý pokles pri vysokých frekvenciách, zatiaľ čo nárast pri nízkych frekvenciách je takmer rovnaký. [5]

3.3 Kazateľnice

Už od 12. stor. boli v sakrálnych objektoch vo veľkej miere využívané kazateľnice a "kazateľnicové reflektory" resp. baldachýny. Kazateľnicové reflektory zabráňovali oneskoreným ozvenám v priestoroch s veľmi vysokými stropmi a umožňovali tak lepšiu počuteľnosť na strednú vzdialenosť od kazateľnice. Účinnosť takéhoto prvku sa znižuje, prípadne je úplne nevýhodná v priestoroch, kde je výška stropu nižšia ako 10 m a v prípade väčšej vzdialenosti od rečníka. Zmeny v hodnotení zrozumiteľnosti reči sú v takomto prípade zanedbateľné, jej hodnoty sa však môžu zvýšiť v prípade prítomnosti zhromaždenia. Baldachýn je najefektívnejší v kostoloch s vyššími stropmi a na veľké vzdialenosti nemá efekt. Pri kostoloch s nižšími stropmi ako 10 m je efekt baldachýnu na krátke a stredné vzdialenosti nepriaznivý. Prítomnosť baldachýnu odstraňuje skoré odrazy od stropu kostola, ktoré sú pre poslucháča priaznivé. [6]



Obr. 3 : (zľava) Kostol Nanebovzatia Panny Márie, Banská Štiavnica [14];
Kostol sv. Kataríny, Banská Štiavnica [14]; Kostol sv. Ladislava,
Bratislava [15]

4. Akustické materiály využívané v historických sakrálnych priestoroch pred liturgickou reformou

Dlhšie časy dozvuku zodpovedajú kostolom s tvrdými odrazovými povrchmi dokončenými leštenou omietkou. Do tejto skupiny patria niektoré renesančné kostoly.

Druhá skupina zahŕňa kostoly so zvýšenou absorpciou zvuku vďaka tvrdým povrchom a klenbám z tehál alebo kameňa (bez povrchovej úpravy omietkou) alebo s väčším množstvom lavíc. Väčšina románskych a gotických kostolov patrí do tejto skupiny.

Tretia skupina zahŕňa všetky kostoly, ktoré sa vyznačujú značnou absorpciou zvuku vďaka dreveným stropom (či už rovným alebo kazetovým), husto rozmiestnenými lavicami, kobercami a závesmi. Do tejto skupiny patria rano-kresťanské kostoly spolu s románskymi a gotickými kostolmi.[5]

Pri kostoloch, ktoré sú vystavené z tehál bez povrchovej úpravy, môžu tehly do určitej miery kompenzovať efekt, ktorý vytvárajú drevené stropy.

5. Vplyv lavíc na akustiku

Prítomnosť zariadenia kostola v podobe lavíc významne vplýva na akustiku vnútorného priestoru. Lavice zaberajú pomerne veľkú časť priestoru, kde často chýbajú pohlcujúce povrchy. V miestnostiach, kde je väčšina materiálov tvrdá a teda pôsobia ako odražač zvuku, zohrávajú lavice významnú úlohu vo výslednej akustike. Častokrát sa však líšia materiálovým použitím ale aj konštrukciou.

Vplyvu lavíc na akustické vlastnosti sa venovali rôzne vedecké skupiny pochádzajúce najmä z Talianska. Na základe ich výsledkov bolo zistené, že absorpčné koeficienty neobsadených lavíc v kostoloch sú ovplyvnené pomerom obvodu k ploche (P/A) a tiež laterálnymi a difrakčnými efektmi.[7] Laterálny efekt opisuje šírenie zvuku horizontálne od jeho zdroja. V danom prípade to znamená, že časť zvuku, ktorý narazí na lavicu sa môže odraziť do strán namiesto toho, aby bola pohltená alebo odrazená naspäť do priestoru. Pri difrakčnom efekte dochádza ku ohýbaniu zvukových vln okolo prekážok. Keď zvuková vlna narazí na lavicu alebo iný objekt, ktorý nie je príliš veľký v porovnaní s vlnovou dĺžkou zvuku, vlna sa môže „ohnúť“ okolo objektu a pokračovať ďalej za ním. Tento jav sa stáva výraznejším pri nižších frekvenciách (väčších vlnových dĺžkach), kde lavice pôsobia ako prekážky, ale neblokujú zvuk úplne. Difrakcia teda prispieva k tomu, že časť zvuku dosiahne miesta, ktoré by inak boli tieňované prekážkou. Tieto efekty sa menia najmä v závislosti od frekvencie.

Významnú úlohu zohrávajú aj čalúnené kľácaďlá, ktoré sú pri laviciach pomerne časté. Takéto kľácaďlá zvyšujú absorpčné vlastnosti lavíc.

Pri porovnaní rôznej obsadenosti lavíc, vplyvu postoja osoby (sedenie alebo státie), hustoty (počet ľudí/m²) a oblečenia (zima/leto) bolo zistené, že vplyv postoja je v tomto prípade zanedbateľný, na rozdiel od vplyvu obsadenosti. Hustota obsadenosti zdvojnásobuje absorpčný koeficient a má väčší vplyv v zime ako v lete, kedy je absorpcia všeobecne nízka. Najväčšie rozdiely pritom spôsobuje rôzne oblečenie a ovplyvňuje najmä stredné frekvencie, kedy zimné oblečenie výrazne zvyšuje absorpciu.

6. Vplyv obsadenosti kostola na akustiku

Zrozumiteľnosť reči je zväčša hodnotená na základe objektívnych parametrov priestorov, ktoré z praktického hľadiska nie sú obsadené ľuďmi a teda sú prázdne. V normálnych podmienkach však môže prítomnosť veriacich zvyšovať alebo znižovať hodnoty zrozumiteľnosti reči v dôsledku prídavnej absorpcie zvuku prítomnými v miestnosti, prípadne v dôsledku zmeny pomeru signálu a šumu (S/N). Z uskutočnených štúdií a meraní vyplýva, že prítomnosť veriacich spôsobuje priemerné zvýšenie zrozumiteľnosti reči o ΔSTI ($STI_{obsadený} - STI_{neobsadený}$), o 0,05 pri použití verejného ozvučovacieho systému (PA) a o 0,035 bez PA. Toto zvýšenie je spôsobené najmä kvôli skráteniu doby dozvuku v miestnosti, na základe zvýšenej absorpcie zvuku a znížením dodatočného dozvuku, ktorý bol pri meraní spôsobený verejným ozvučovacím systémom (PA) – použitím reproduktorov so silnou smerovosťou orientovaných na oblasť zhromaždenia. Účinky spôsobené zhromaždením, zmeny vlhkosti a teploty majú vo všeobecnosti zanedbateľný vplyv na zrozumiteľnosť reči. [8]

6.1 Rôzne účinky obsadenosti na zrozumiteľnosť reči

Zrozumiteľnosť reči býva vo všeobecnosti ovplyvňovaná viacerými parametrami. Tieto parametre je možné pomerne dobre zohľadniť za pomoci objektívnych ukazovateľov. Najvýznamnejším parametrom je pri tom pomer signálu k šumu (S/N), ktorý predstavuje prevýšenie úrovne reči nad okolité šumy, doba dozvuku (RT) a prítomnosť rušivých neskorých odrazov. [9] Účinky spojené s obsadenosťou miestnosti, ktoré môžu ovplyvniť hodnoty zrozumiteľnosti reči:

1. Skrátenie doby dozvuku v dôsledku dodatočnej absorpcie zvuku prítomnosťou veriacich
2. Skrátenie doby dozvuku spôsobené ozvučovacím systémom. V prípade prispôbeného ozvučovacieho systému (reproduktory s vysokou smerovosťou nasmerované na oblasť zhromaždenia) zhromaždenie veriacich absorbuje veľkú časť energie šírenej reproduktormi, zatiaľ čo táto energia je šírená do celého objemu miestnosti, keď je kostol prázdny;
3. Prítomnosť veriacich môže svojou absorpciou zvuku odstrániť možné trepotavé ozveny (najmä ak je priestor zaklenutý)
4. Vykurovanie kostola počas bohoslužieb v zime (zmena teploty a vlhkosti) spôsobuje zníženie hodnôt doby dozvuku (zvýšením rýchlosti šírenia zvuku a absorpcie vzduchu pri nízkych a stredných frekvenciách), ako aj ohýbanie zvukových lúčov smerom nadol (pozitívna zmena teploty s výškou)

Niektoré účinky však môžu aj znížiť zrozumiteľnosť reči :

1. Zvýšenie úrovne okolitého hluku spojené s prítomnosťou zhromaždenia (zvuky vstávania/sadania, rozprávanie, kašeľ, ..)
2. Slabnutie úrovne zvuku so vzdialenosťou v rámci zhromaždenia v dôsledku absorpcie zvuku a efektu tienenia

Konkrétne výsledky z merania bol realizované na šiestich kostoloch s a bez obsadenosti (priemerný objem bol 4385 m³ a priemerná obsadenosť 117 osôb), tak aby bolo možno otestovať vplyv obsadenosti na hodnoty STI (zrozumiteľnosti reči). Na základe výsledkov je možné vyhodnotiť, že obsadenosť veriacimi spôsobuje zvýšenie zrozumiteľnosti reči. Toto zvýšenie je spôsobené najmä skrátením doby dozvuku v miestnosti v dôsledku dostatočnej absorpcie zvuku vytvorenou prítomnosťou ľudí. Variácie hodnôt zrozumiteľnosti reči pri obsadenosti je možné predpovedať v obsadených a neobsadených kostoloch (priemerná chyba Δ STI < 0,007) pomocou empirických vzorcov založených na dobe dozvuku. [9]

7. Vplyv obrazov a tapisérií na akustiku

Z historického hľadiska bolo bežné v rámci interiérov sakrálnych stavieb používanie a umiestňovanie rôznych druhov obrazov, tapisérií či závesov. Nie je celkom známe, či bolo používanie týchto prvkov aj z akustického hľadiska zámerné, alebo bolo skôr okrasné či funkčné. Z uskutočnených meraní talianskych vedcov však vyplýva, že rôzne úrovne zvukovej absorpcie sa dajú dosiahnuť v závislosti od charakteru plátna a jeho spracovania. V prípade tapisérií sa s narastajúcou vzdialenosťou od pevnej steny presúva absorpčný koeficient smerom k nižším frekvenciám. [7] Vplyv použitých textílií v rôznych polohách sa ukázal ako výraznejší pri stredných frekvenciách pričom doba dozvuku a stredná doba dozvuku boli najviac významnými parametrami.

8. Akustika historických sakrálnych priestorov po liturgickej reforme

Z pohľadu akustiky sakrálnych priestorov došlo pomerne nedávno, po roku 1965, k výrazným zmenám v rámci liturgie katolíckej cirkvi. Najväčšou z prijatých zmien po druhom vatikánskom koncile bolo otočenie kňaza počas slávenia tvárou smerom k ľudu a zavedenie národných jazykov namiesto používania tradičnej latinčiny uplatňovanej pri slávení v rámci tridentskej omše. Práve prijatie národných jazykov znamenalo zvýšenú požiadavku na dobrú zrozumiteľnosť reči počas slávenia. Veriaci už tak neboli len divákmi počas slávenia liturgie, ale mohli sa do nej plnohodnotne zapájať.

Rastúci dopyt po dobrých podmienkach pre počúvanie v kostoloch (predovšetkým v katolíckych, v dôsledku reformy Druhého vatikánskeho koncilu) si vyžaduje preskúmanie toho, ako môžu v takýchto budovách súčasne existovať rôzne zvukové odkazy a ako sa existujúce budovy môžu prispôbovať novým podmienkam. [10]

Zrozumiteľnosť reči sa stala prioritou v kostoloch postavených po vatikánskom koncile. Rímsky misál stanovil, že slovo má byť ohlasované z miesta, ktoré bude dostatočne viditeľné a dôstojné. [4]

Akustické požiadavky súvisiace so zmenami postavenia kňaza sú málo skúmanou situáciou najmä na našom území. Je potrebné poznať akustické charakteristiky, vhodné pre každú fázu liturgie. [11]

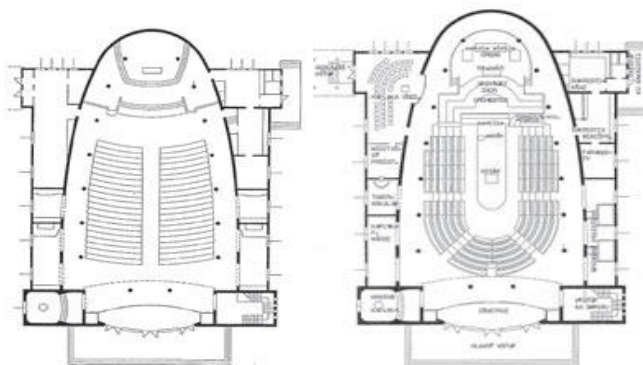
Väčšia vedecká znalosť priestorovej akustiky, ako aj zavedenie elektroakustických inštalácií na riešenie problému projekcie hlasu, prispeli k väčšej akustickej výkonnosti všeobecne v katolíckych kostoloch po Druhom vatikánskom koncile v porovnaní s ich predchodcami. [4]

V súčasnosti sú v mnohých kostoloch inštalované elektro-akustické ozvučovacie systémy (SRS) na zlepšenie zrozumiteľnosti reči, keďže tá je hlavnou akustickou funkciou modernej cirkvi. Porovnanie akustiky s SRS a bez už bolo vykonané vo viacerých výskumoch. [11] Akékoľvek nedostatky v rámci uzavretých priestorov je však veľmi ťažké odstrániť len za pomoci elektroakustických systémov.

9. Historická sakrálna architektúra a súčasné požiadavky na akustický dizajn

Väčšina historických kostolov má pozdĺžnu dispozíciu. V súčasnosti sledujeme rozpor s takýmto typom dispozície a novodobými funkčnými požiadavkami viac účelovosti sakrálneho priestoru. Najmä viac účelovosť sakrálnych priestorov má za následok výstavbu budov s dispozíciou, pri ktorej šírka prevláda nad dĺžkou alebo je s ňou porovnateľná. Výška objektu predstavuje v tomto prípade premennú vlastnosť. Veriaci sedia bližšie k oltáru, lepšie chápu bohoslužbu slova, vidia na seba navzájom a majú tak väčší pocit komunity. Často krát však pri moderných sakrálnych priestoroch chýba práve klasický vyvýšený chór spolu s klenbami alebo kupolami, ktoré výrazne napomáhajú šíreniu zvuku od rôznych nástrojov do vertikálnej roviny.

Moderné kostoly nevykazujú zlé akustické vlastnosti, pravdepodobne vďaka ich všeobecne malým rozmerom, ktoré znižujú vzdialenosť medzi zdrojom a prijímačom zvuku. [5]



Obr. 4 : Kostol sv. Michala v Linci, pôvodné interiérové usporiadanie z roku 1957 (vpravo), nové riešenie z roku 1975 (vpravo) [16]

10. Záver

Sakrálny priestor sa vyznačuje vo všeobecnosti špecifickými akustickými vlastnosťami. Tieto ovplyvňuje na jednej strane vo veľkej miere architektonický dizajn a slohový štýl, v ktorom bol daný objekt vystavaný, na druhej strane je to samotná liturgia, pre ktorú sú tieto objekty určené. Akustické požiadavky sa menili v priebehu histórie a vzájomne sa ovplyvňovali s architektonickým riešením týchto priestorov.

Stropy, klenby a kupoly mali kľúčovú úlohu v akustike, pričom umožňovali šírenie zvuku a vytvárali jedinečný akustický zážitok. Kazateľnice boli najmä z empirického hľadiska navrhované tak, aby zabezpečili optimálne šírenie zvuku. O efektívnosti ich využitia existujú štúdie, ktoré nenaznačujú že by mali kazateľnice z hľadiska zrozumiteľnosti reči výraznejší význam. Rovnako materiály využité pri výstavbe v podobe kameňa, tehál, dreva či rôznych textilných dekorácií mali veľký vplyv na akustiku priestoru, nie vždy však bol tento vplyv priaznivý.

Obsadenosť kostola veriacimi mala tak isto pomerne významný vplyv na akustické vlastnosti priestoru. Plný kostol absorbuje zvuk lepšie, čím prítomnosť ľudí znižuje dobu dozvuku. Naopak pri prázdnom kostole vznikajú dlhé doby dozvuku, ktoré ovplyvňujú zrozumiteľnosť reči či hudby.

Po liturgickej reforme došlo v akustickom dizajne k výrazným zmenám, zohľadňujúc nové liturgické požiadavky, čím sa zlepšila zrozumiteľnosť reči a zvýšila sa participácia veriacich pri slávení bohoslužieb.

Literatúra

- [1] VAVERKA, Jiří. *Akustika sakrálných priestorů* [online]. 2. listopad 2005 [vid. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/news/akustika-sakralnich-prostoru>
- [2] DOMENIGHINI, P., E. BELLONI a C. BURATTI. Experimental subjective and objective analysis of speech intelligibility and acoustic comfort conditions in an unchanged XVII century Italian church. *Applied Acoustics* [online]. 2023, **205**, 109267 [vid. 2024-05-14]. ISSN 0003-682X. Dostupné z: doi:10.1016/J.APACOUST.2023.109267
- [3] MAGRINI, A. a P. RICCIARDI. An Experimental Study of Acoustical Parameters in Churches. *The International Journal of Acoustics and Vibration* [online]. 2002, **7**(3). Dostupné z: doi:10.20855/ijav.2002.7.3116
- [4] NAVARRO, Jaime, Juan J. SENDRA a Salvador MUÑOZ. The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment. *Applied Acoustics* [online]. 2009, **70**(6), 781–789 [vid. 2024-05-14]. ISSN 0003-682X. Dostupné z: doi:10.1016/J.APACOUST.2008.09.014
- [5] ETTORE CIRILLO, Hy a Francesco MARTELLOTTA. *Acoustics and architecture in Italian Catholic churches International Symposium on Room Acoustics ACOUSTICS AND ARCHITECTURE IN ITALIAN CATHOLIC CHURCHES* [online]. 2007. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/256589051>
- [6] CARVALHO, António P, V DESARNAULDS, P CHAUVIN a A P CARVALHO. *Acoustic effectiveness of pulpit reflector in churches* [online]. 2001. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/37649781>
- [7] MARTELLOTTA, F. a E. CIRILLO. Experimental studies of sound absorption by church pews. *Applied Acoustics* [online]. 2009, **70**(3), 441–449 [vid. 2024-10-16]. ISSN 0003-682X. Dostupné z: doi:10.1016/J.APACOUST.2008.05.006
- [8] DESARNAULDS, Victor, António P O CARVALHO a Gilbert MONAY. *Church Acoustics and the Influence of Occupancy*. 2002.
- [9] ALVAREZ-MORALES, Lidia a Francesco MARTELLOTTA. A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches. *Applied Acoustics* [online]. 2015, **91**, 47–58. ISSN 1872910X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2014.12.004

- [10] MARTELOTTA POLITECNICO DI BARI, Francesco, Hy ETTORE CIRILLO a Francesco MARTELOTTA. *Acoustics and architecture in Italian Catholic churches International Symposium on Room Acoustics ACOUSTICS AND ARCHITECTURE IN ITALIAN CATHOLIC CHURCHES* [online]. 2007. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/256589051>
- [11] SOETA, Yoshiharu, Ken ITO, Ryota SHIMOKURA, Shin-ichi SATO, Tomohiro OHSAWA a Yoichi ANDO. Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in Japanese churches. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2012, **131**(2), 1206–1220. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.3676697
- [12] *Coffered-wooden-ceiling-at-San-Lorenzo-in-Florence_W640.jpg (640×701)* [online]. [vid. 2024-06-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Braxton-Boren/publication/230858350/figure/fig2/AS:601624191967277@1520449793806/Coffered-wooden-ceiling-at-San-Lorenzo-in-Florence_W640.jpg
- [13] *Types of Vaults in Architecture: Structure and Architecture Style* [online]. [vid. 2024-06-24]. Dostupné z: <https://thearchitectsdiary.com/types-of-vaults-in-architecture-structure-and-architecture-style/>
- [14] *Banská Štiavnica - Smato.sk* [online]. [vid. 2024-06-24]. Dostupné z: <http://www.smato.sk/banska-stiavnica.html>
- [15] *Kazateľnica – Wikipédia* [online]. [vid. 2024-06-24]. Dostupné z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Kazate%C4%BEnica>
- [16] BOTEK, Andrej. Pokoncilové úpravy v sakrálnych objektoch 50. a 60. rokov 20. storočia. *Monumentorum tutela - Ochrana pamiatok 20*. 2009, 161–178.

Spracované v rámci grantu KEGA č.036STU-4/2022 Pamiatkový výskum a možnosti jeho využitia vo vzdelávaní v podmienkach (Slovenskej) technickej univerzity.

Spracované v rámci grantu VEGA 1/0723/23 Sakrálny priestor na začiatku 21. storočia.

Magdaléna Kaššáková¹
Študijný program: TKPS, 4.

VPLYV RÔZNYCH PÔDORYSOV NA AKUSTICKÝ KOMFORT V MALOM ÁTRIU

INFLUENCE OF DIFFERENT FLOOR PLANS ON ACOUSTIC COMFORT IN SMALL ATRIUM

Abstract

This paper presents a generic study focused on the acoustic properties of atriums with a uniform volume of 1000 m³ and a height of 10 meters, while dealing with the influence of the floor plan shape on the acoustic parameters. Four different floor plans– square, rectangular, circular and triangular – were included in the analysis.

The study also focuses on comparing the acoustic properties of atriums with transparent roofing, namely glass and ETFE foil, which are the two most used materials in modern transparent roof constructions. These materials have a impact on sound transmission, reflections and reverberation in space. ²

Kľúčové slová / Key Words

Átrium; ETFE; pôdorys átria; akustika

1. Úvod

Átria s rozsiahlymi objemami a priehľadnými strechami sú príkladmi nových typov priestorov, ktoré vznikajú v modernej architektúre. Inovácie v dizajne sú často umožnené vďaka novým stavebným materiálom a konštrukčným technikám. Tradičné metódy hodnotenia akustického komfortu, ktoré sú popísané v technických normách, sú prispôbené pre bežné priestory s predvídateľnými funkciami a objemami. Pre veľké dvorany však neexistujú zodpovedajúce akustické normy. Väčší objem priestoru prirodzene predlžuje dobu dozvuku (T_{30}), v kombinácii s malým množstvom zvukových pohltivých materiálov môže viesť k nežiadaným odrazom a zhoršenej zrozumiteľnosti reči čo v konečnom dôsledku ovplyvňuje aj funkčnosť priestoru. Preto používanie len času dozvuku na hodnotenie komfortu je nedostatočné.

Väčšina materiálov vo verejných budovách je hygienická tzn. Zvukovo nepohltivá. Jednou z najväčších plôch v átriu môže byť transparentné zastrešenie. Transparentné konštrukcie ako sklo alebo ETFE fólia, majú odlišné akustické vlastnosti a môžu výrazne ovplyvniť celkovú pohltivosť priestoru. Kým sklenené strechy môžu podporovať dlhé odrazy zvuku, nové typy membrán ako ETFE môžu poskytovať lepšiu kontrolu nad dozvukom, najmä v nižších frekvenciách.

Napriek tomu, že sú takéto priestory stále populárnejšie, ich akustické vlastnosti boli skúmane len v malom množstve štúdií [1], [2], [3], [4]. Z teoretického hľadiska je priestorová akustika ovplyvnená

¹ Ing., SvF, Kaarch, Radlinského 11, Bratislava

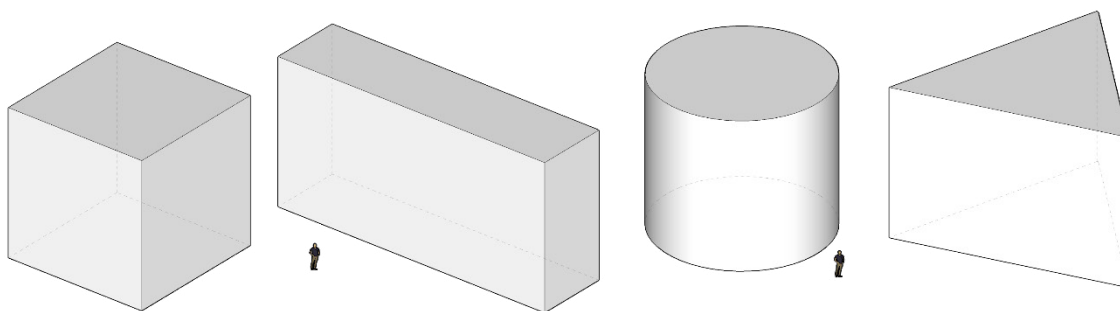
viacerými faktormi, medzi ktoré patrí predovšetkým objem priestoru, geometria, použité materiály a rozloženie zvukovej pohltivosti.

V tejto generickej štúdií sme sa zamerali na porovnanie akustických vlastností átrií s jednotným objemom 10 000 m³ a výškou 10 metrov, pričom sme skúmali vplyv rôznych tvarov pôdorysu – štvorcového, obdĺžnikového, kruhového a trojuholníkového. Každé átrium bolo zastrešené buď sklenenou konštrukciou alebo ETFE fóliou. Analyzované veličiny zahŕňali C₈₀ (jasnosť zvuku), STI (index zrozumiteľnosti reči) a T₃₀ čas dozvuku).

Článok nadväzuje na vydané články a tematiku dizertačnej práce Akustický komfort v átriách zastrešených sklom a ETFE fóliami.

2. Opis prípadovej štúdie

Cieľom tejto prípadovej štúdie je posúdenie charakteristických veličín. Jedinou premennou sa stáva pôdorys átria a s tým súvisiace rozmery plôch, ktoré tvoria výsledný objem.



Obrázok 1.: Objemy átrií posudzované v prípadovej štúdií

Tabuľka 1.: Rozmery átrií

	ŠÍRKA (m)	DĹŽKA (m)	VÝŠKA (m)	OBJEM (m ³)	POVRCH STIEN (m ²)
KOCKA	10	10	10	1000	400
KVADER	5	20	10	1000	500
VALEC	Ø11,28	-	10	1000	354
TROJHRAN	rovnostranný s dĺžkou jednej strany 15,2 m		10	1000	456

Podlaha átrií je zvolená ako mramorová alebo keramická. Povrchy stien sú z maľovaných omietok. Na streche sa alternuje zastrešenie zo skla a ETFE fólie.

Tabuľka 2.: Koeficienty pohltivosti pre materiály

		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
STRECHA	ETFE	0,42	0,35	0,26	0,17	0,8	0,2
	SKLO	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
STENY	Maľovaná omietka	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PODLAHA	Mramorová podlaha	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

3. Simulácie

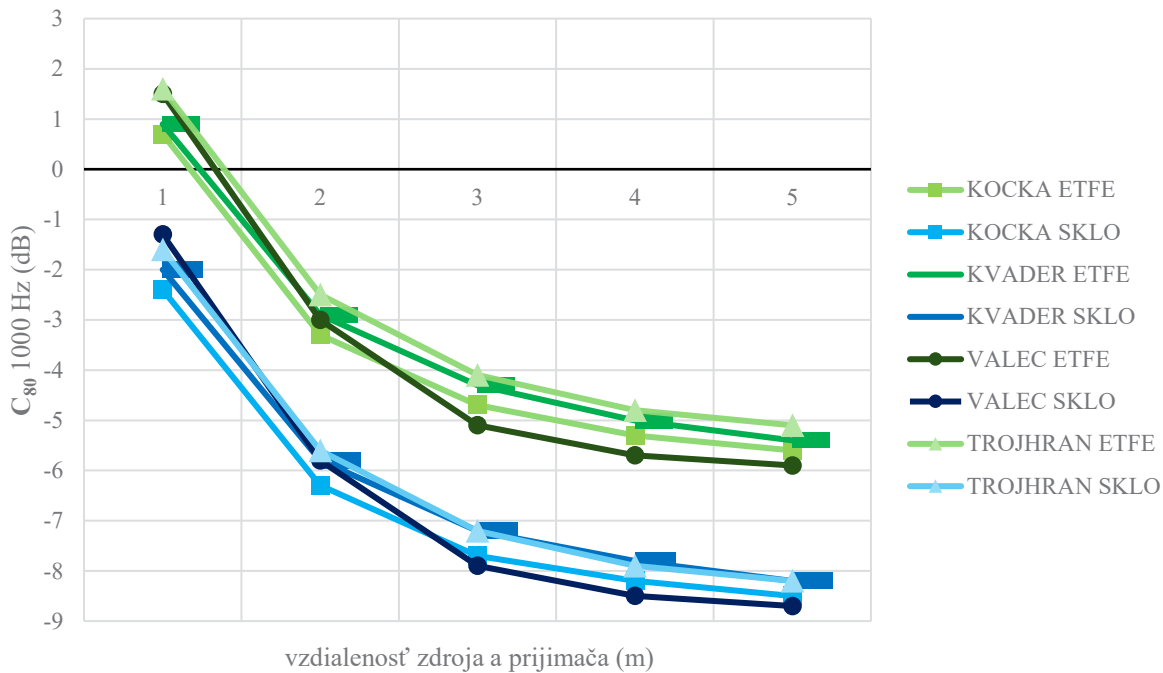
Simulácie átrií boli vykonané v programe Odeon[®]. Všesmerový zdroj zvuku bol umiestnený v strede dispozície, 1,7 metra nad podlahou. V línii s 1 metrovým odstupom bolo umiestnených 5 mikrofónov. Okrem číselných charakteristík spracovaných do grafov boli vyexportované aj mapy pre parameter zrozumiteľnosť reči.

4. Výsledky a analýza

4.1. C_{80} jasnosť reči

C_{80} , známy aj ako jasnosť reči je dôležitý akustický parameter, ktorý vyjadruje pomer medzi hladinou skorých a neskorých odrazov zvuku v priestore. Vyššie hodnoty C_{80} (nad 0 dB) naznačujú lepšiu zrozumiteľnosť a jasnosť zvuku, čo je kľúčové pre priestory, kde je reč alebo hudba dôležitou funkciou. Pri 1000 Hz je C_{80} obzvlášť dôležitý, pretože táto frekvencia spadá do rozsahu, kde je ľudské ucho najcitlivejšie na zrozumiteľnosť reči.

V štúdiu sme analyzovali C_{80} (graf na Obrázku 2.) pre rôzne pôdorysné tvary a materiály, pričom ETFE materiál dosahoval významne lepšie výsledky ako sklo. Napríklad tvar átria – KOCKA so strechou ETFE vykázal pri 1 m pokles len 0,7 dB, zatiaľ čo sklo dosiahlo hodnoty -2,4 dB. Tento rozdiel bol konzistentný aj pri iných tvaroch - KVÁDER, VALEC či TROJUHOLNÍK, kde ETFE neustále vykazovalo nižší pokles hladiny C_{80} , a to až do -5,9 dB pri 5 metroch. Pri presklených strechách nastáva pokles v rozmedzí od -2,4 dB do -8,7 dB. Vplyv tvaru pôdorysu je minimálny a to na úrovni 2dB pri porovnaní všetkých typov pôdorysu/objemu.



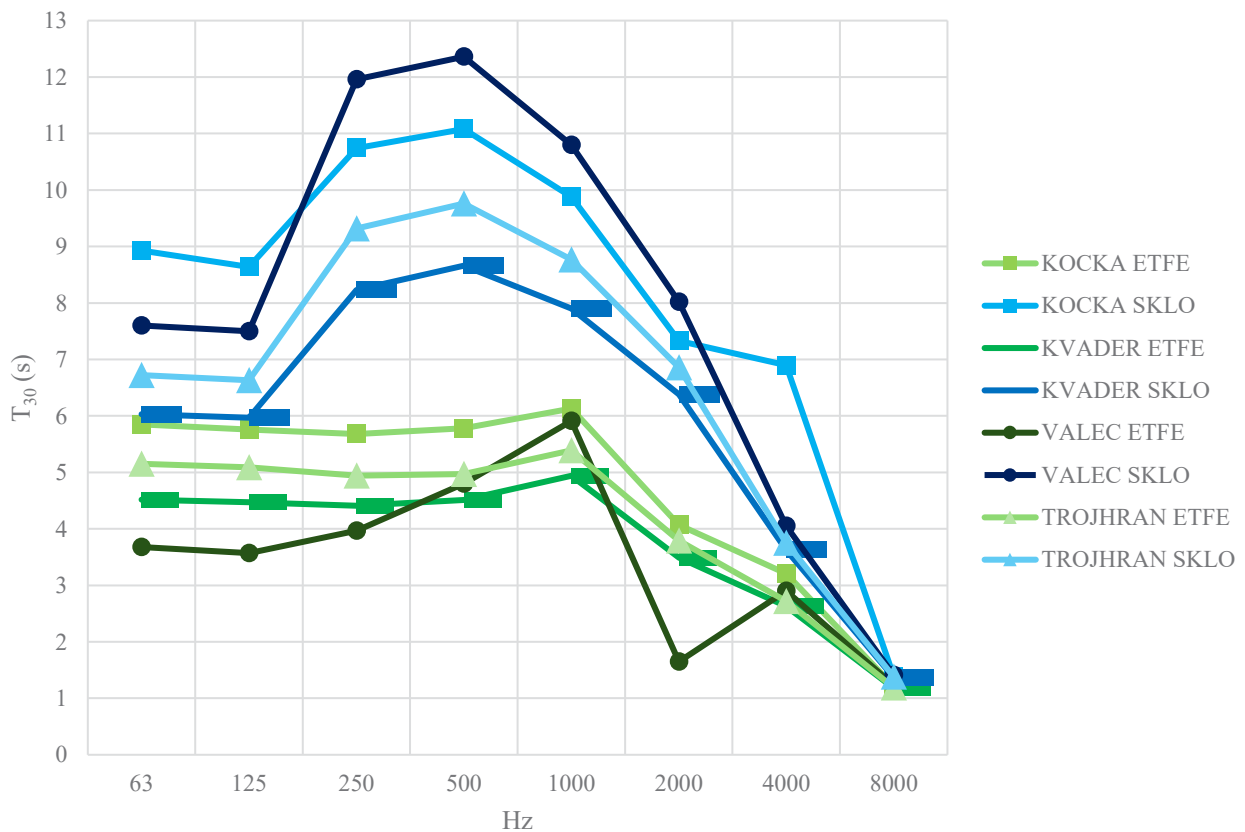
Obrázok 2.: Závislosť hladiny C_{80} (Hz) a vzdialenosti pre jednotlivé tvary átria

4.2. T_{30}

T_{30} (graf na Obrázku 3.) je čas, za ktorý hladina hluku v miestnosti klesne o 30 dB po vypnutí zvukového zdroja. V závislosti od použitia miestnosti sa odporúčajú hodnoty T_{30} líšia. Ale pre väčšie priestory je odporúčaná hodnota okolo 2-4 sekúnd. Sú viditeľné vyššie hodnoty dozvuku pri presklených strechách, čo sa dá vysvetliť horšími vlastnosťami pohltivosti pre sklo ako ETFE. Najvyššie hodnoty času dozvuku dosahuje tvar átria VALEC s presklenou strechou a to najmä v stredných hodnotách frekvenčného pásma, kde je najväčší rozdiel medzi VALCOM a KVADROM na úrovni 3,5 s. Pri ETFE zastrešení nastáva opačný jav a átrium tvaru VALEC dosahujem na väčšine spektra najnižšie hodnoty času dozvuku. Najnižšie hodnoty času dozvuku dosahuje KVÁDER, čo môže byť spôsobené faktom, že daný tvar átria má o 146 m² viac povrchov ako napríklad VALEC s najmenším množstvom povrchov. Hlavným problémom kruhových miestností je fenomén fokálnej ozveny. Zvukové vlny sa môžu sústrediť do jedného bodu (fokusu) a vytvárať veľmi hlasný bod, zatiaľ čo iné časti miestnosti môžu mať menej výrazný zvuk. Hodnoty dozvuku pre zasklené átria zodpovedajú zväčšujúcemu sa povrchu stien a následne sa meniacej celkovej pohltivosti. Hodnoty pre ETFE zastrešenie vykazujú väčší vplyv tvaru priestoru ako priemernej pohltivosti keď najdlhší čas dozvuku dosahuje KOCKA. Dve rovnobežné steny môžu spôsobovať vznik stojatých vln. Na rozdiel od toho TROJHRAN s väčšou pohltivosťou ako KOCKA a s asymetrickými stenami rozptyľuje odrazy a znižuje pravdepodobnosť stojatých vln, preto sú jeho výsledne hodnoty času dozvuku nižšie. Hlavným problémom kruhových miestností je fenomén fokálnej ozveny. Zvukové vlny sa môžu sústrediť do jedného bodu (fokusu) a vytvárať veľmi hlasný bod, zatiaľ čo iné časti miestnosti môžu mať menej výrazný zvuk.

Tabuľka 3.: Porovnanie priemernej pohltivosti, času dozvuku a povrchu stien pre frekvenciu 500 Hz

500 Hz	ETFE		SKLO		povrch (m ²)
	α (-)	T_{30} (s)	α (-)	T_{30} (s)	
KOCKA	0,07	5,78	0,03	11,08	400
KVADER	0,09	4,51	0,04	8,66	500
VALEC	0,07	4,8	0,03	12,36	354
TROJHRAN	0,07	4,97	0,03	9,76	456

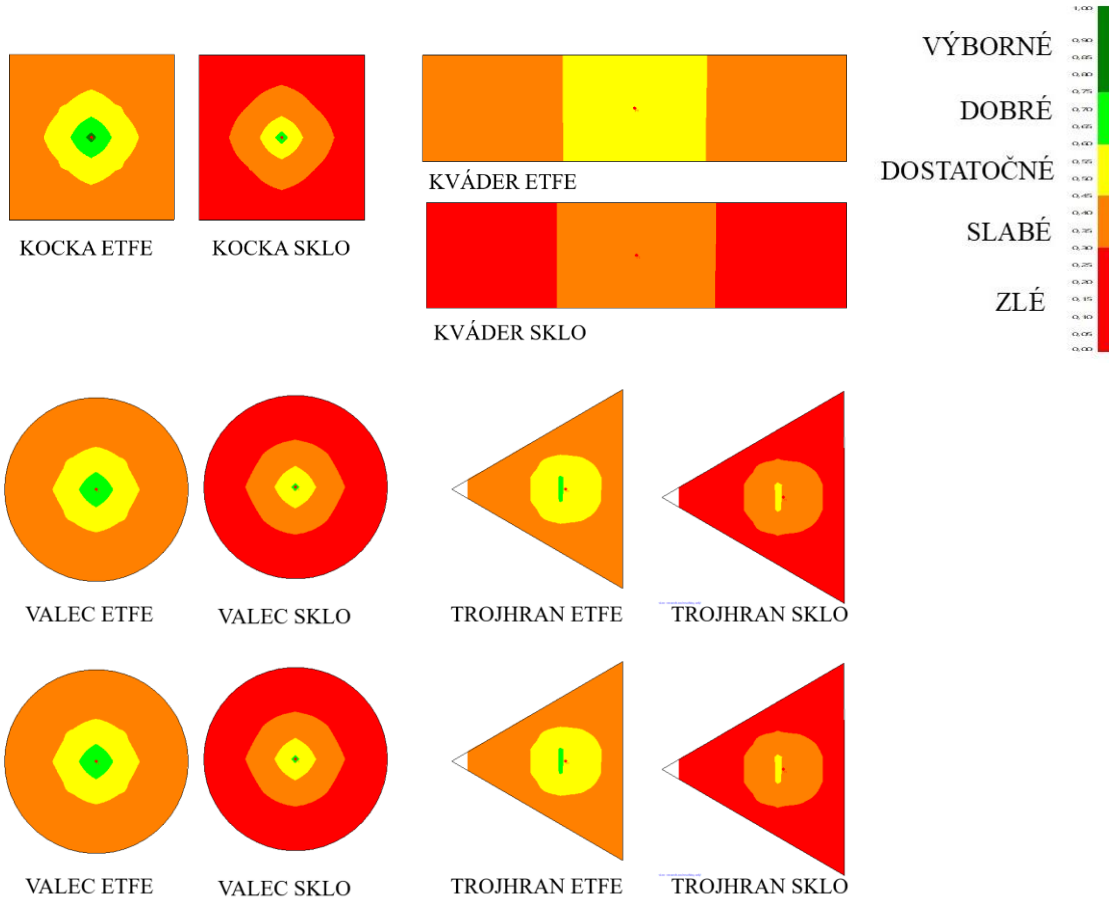


Obrázok 3.: Hodnota času dozvuku T_{30} pre jednotlivé prípady

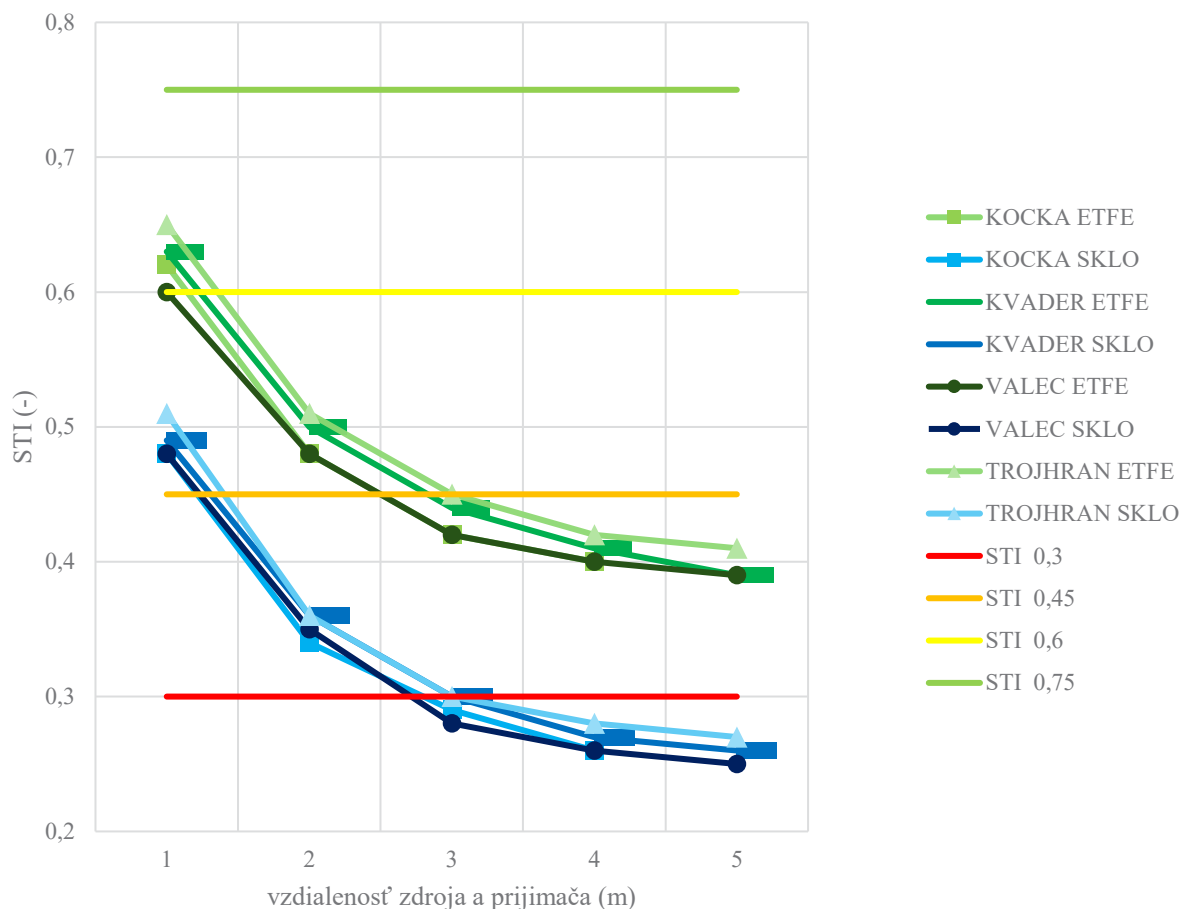
4.3 STI

Výsledky simulácie v ODEON-e priniesli mapy zobrazujúce hodnoty indexu prenosu reči (STI) (graf na Obrázku 5.), ktoré umožňujú vizuálne zhodnotiť akustickú kvalitu priestoru z hľadiska zrozumiteľnosti reči. STI je kľúčovým parametrom pre hodnotenie zrozumiteľnosti hovoreného slova v rôznych typoch priestorov. Hodnoty STI sa pohybujú v rozmedzí od 0 (veľmi zlá zrozumiteľnosť) do 1 (vynikajúca zrozumiteľnosť). Na základe generovaných máp je možné identifikovať oblasti s rôznou kvalitou akustického komfortu, pričom vyššie hodnoty STI (>0,6) indikujú dobré podmienky pre zrozumiteľnosť viet, zatiaľ čo nižšie hodnoty (<0,45) poukazujú na zlú zrozumiteľnosť slov.

Medzi jednotlivými tvarmi átria nastavajú minimálne rozdiely. Väčší vplyv má typ zasklenia. Pri presklenom klesá STI pod počiteľnosť slov na úrovni 1,5 m, pri ETFE na úrovni 3 m.



Obrázok 4.: Mapy STI pre rôzne pôdorysy átrií



Obrázok 5.: Pokles STI k vzdialenosti od zdroja

5. ZÁVER

Je možné konštatovať, že vplyv tvaru pôdorysu na jednotlivé akustické veličiny je pri objeme okolo 1000 m³ zanedbateľný. Väčší vplyv na jasnosť zvuku, zrozumiteľnosť reči a dozvuk má výber transparentného zastrešenia. Prípadovú štúdiu by bolo potrebné overiť s väčšími objemami, napr. 2000 m³, 3000 m³ a sledovať trend vývoja veličín.

6. Literatúra

[1] Urbán D., Zelem L., Maywald C., Glorieux Ch., Rychtáriková M., Influence of transparent roofing systems on room acoustic properties of large atria, Akustika 29, Czech Republic, 93-98, (2017).

[2] Rychtáriková M., Urbán D., Maywald C., Zelem L., Kaššáková M., Glorieux C., Advantages of ETFE in terms of acoustic comfort in atria and large halls, In proceedings of Advance Building Skins 2017, 2-3rd October, Bern, Switzerland, 646-654 (2017).

[3] Urbán, D. (2016) STSM report, COST-STSM-TU1301-33175

[4] Rychtáriková, M., Šimek, R., Húsenicová, J., & Chmelík, V.(2020). Prediction of noise levels in large shoppingstreets covered by glass and ETFE. *ArchitecturalEngineering and Design Management*, 1–8.

[5] Kaššáková M., Urbán D., Zelem L., Chmelík V., Vargová A., Rychtáriková M. Acoustic comfort in restaurant I. Prediction of background noise in a restaurant integrated in a large shopping center, *Euronoise 2018*. Madrid: European Acoustics Association, 2018, p. 1971--1974.

Jozef Olašák¹

Študijný program: Teória konštrukcií pozemných stavieb, 2. ročník

KLIMATICKÝ PRÍNOS VEGETAČNÝCH STRIECH

THE CLIMATIC BENEFIT OF GREEN ROOFS

Abstract

Environmental conditions influence the process of urbanization. In the context of mitigating climate change and creating sustainable urban environments, I consider green roofs to benefit of the construction industry greatly. Green roofs, as an innovative solution, contribute to energy savings and the reduction of greenhouse gas emissions through improved insulation and albedo effects, which lower the surface temperatures of buildings. In addition, vegetated roofs play a key role in capturing and storing carbon, thus contributing to the reduction of CO₂ in the atmosphere. Another important aspect is the ability of green roofs to mitigate the urban heat island effect and regulate the microclimate, which positively impacts the temperature around buildings. Green roofs ensure the internal comfort of buildings by stabilizing the thermal environment. This study only examines the climate benefits of vegetated roofs, and I will address the non-climate co-benefits in the next study.

Kľúčové slová

Strešná konštrukcia; vegetačná strecha; klimatická zmena

1. Úvod

V súčasnosti sme svedkami rýchleho procesu urbanizácie, ktorý má za následok určité zmeny v krajinnom obraze. Aktuálne koncepcie regenerácie sídiel, revitalizácie verejných priestorov, procesy vrátenia života do brownfieldov, ale aj rozvoja novej výstavby sa preto stále viac zameriavajú na adaptáciu riešení a opatrení na zmiernenie zmeny klímy a snahu o vytvorenie udržateľnejšieho, odolnejšieho a zdravšieho urbanizovaného prostredia. V tejto súvislosti k zmierneniu zmeny klímy a znižovaniu emisií skleníkových plynov vie prispieť v urbanizovanom území práve možnosť využitia vegetačných striech. Vegetačné strechy predstavujú prínos pre zmiernenie problémov trvalej udržateľnosti, odolnosti a zdravšieho urbanizovaného územia prostredníctvom rôznych výhod, ktoré môžu poskytnúť. Rôzne vedecké štúdie odkazujú na rôzne prínosy vegetačných striech. Vegetačné strechy však môžu poskytnúť rôzne prínosy prostredníctvom rôznych mechanizmov a skutočný konečný rozsah týchto výhod závisí od množstva zohľadňujúcich faktorov.

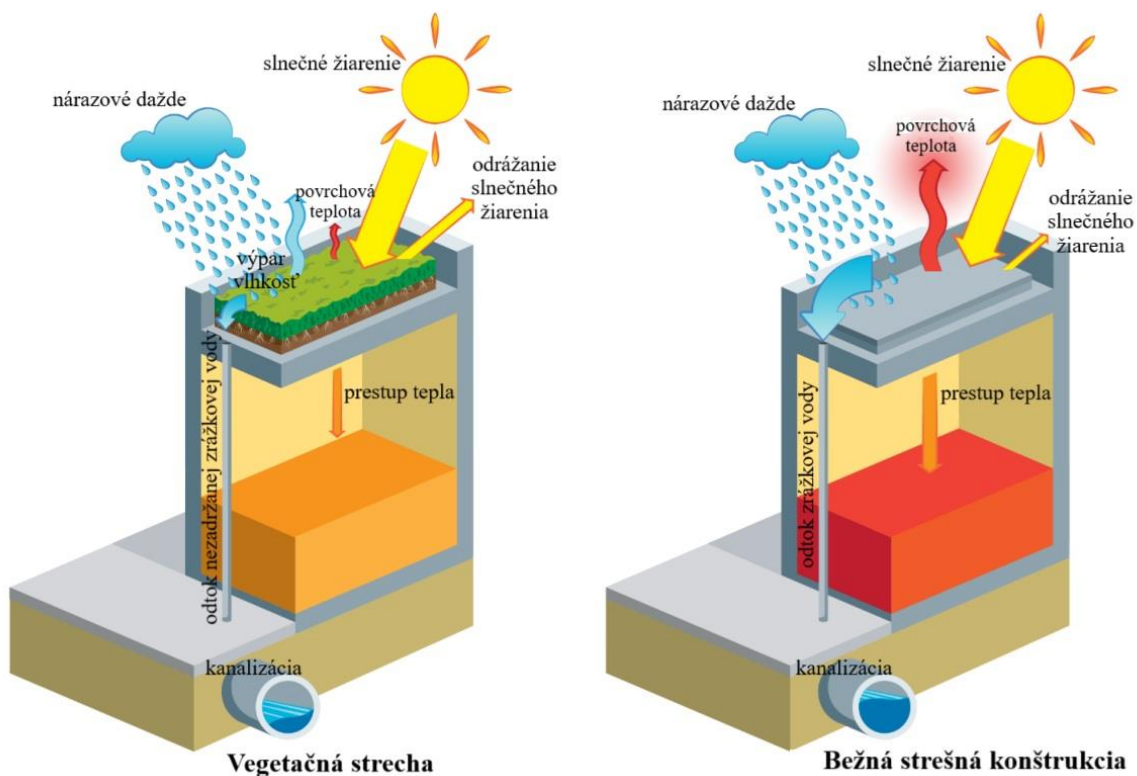
Môj doterajší výskum sa zameriava na zbieranie a vyhodnocovanie rôznych vedeckých štúdií zameraných na vegetačné strechy v kontexte klimatických zmien. Na základe môjho doterajšieho poznania, by som prínosy vegetačných striech pre konštrukcie pozemných stavieb v súlade a s ohľadom na životné prostredie, architektúru, či správnu tvorbu urbanizácie, rozdelil do dvoch skupín a to priame klimatické prínosy vegetačných striech a vedľajšie prínosy vegetačných striech, ktoré vplyvajú na prebiehajúcu klimatickú zmenu nepriamo. V tomto článku sa chcem podrobnejšie venovať klimatickým prínosom vegetačných striech, ktoré ovplyvňujú v značnej miere úsporu energie, znižujú emisie skleníkových plynov, zachytávajú a ukladajú množstvo uhlíka, zmiernujú efekt mestského tepelného ostrova a regulujú vonkajšiu mikroklimu či vnútorný komfort.

¹ Jozef Olašák, Ing.

2. Úspora energie a emisií skleníkových plynov

Prvým nepriamym prínosom, ktorým vegetačné strechy prispievajú k úspore energie, je poskytnutie dodatočnej tepelnoizolačnej vrstvy a tým zníženie tepelného toku cez strešnú konštrukciu budovy. Vrstva substrátu a vegetácie funguje z fyzikálneho hľadiska ako tepelná bariéra, ktorá znižuje prechod tepla medzi vnútorným a vonkajším prostredím, pričom dôležitým faktorom pri tomto procese je rastlinný pokryv.

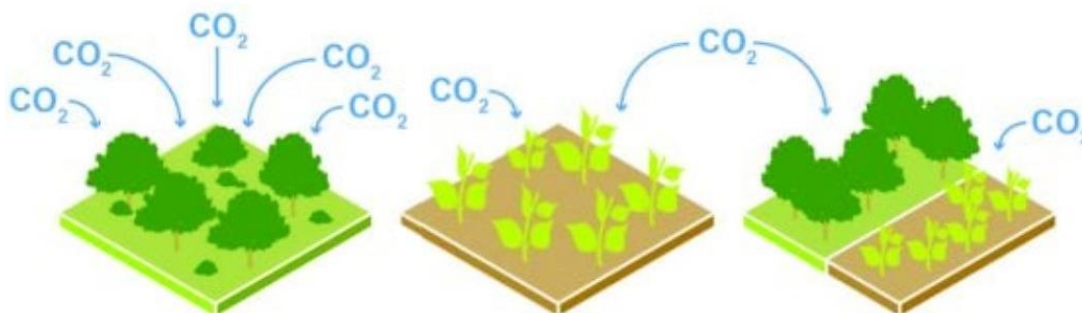
Ďalším prínosom vegetačných striech je znižovanie amplitúd povrchovej teploty strechy prostredníctvom albedo efektov, ktoré sú pri vegetačných strechách zvyčajne vyššie v porovnaní s klasickými strechami. Albedo efekt je schopnosť povrchu odrážať slnečné žiarenie. V kontexte urbanizácie a klimatických zmien má albedo efekt významný dopad na teplotu prostredia. Napríklad, zvýšenie pokrytia plochami s vysokým albedom, ako sú vegetačné strechy, vie prispieť k zníženiu teplôt v mestských oblastiach a zmierneniu efektu mestského tepelného ostrova [1]. Výskum ukazuje, že vegetačné strechy majú albedo v rozmedzí od 0,7 až 0,85 v porovnaní s klasickými strechami s bitúmenovým povrchom či štrkovým násypom, kde majú tieto strechy albedo v rozmedzí od 0,1 až 0,2 [2]. Je teda zrejme že použitie vegetačných striech ukazuje výrazné zníženie povrchových teplôt budov v dôsledku albedo efektov. Výskum priamo ukazuje pri použití vegetačných striech maximálne zníženie povrchovej teploty o 50 °C v porovnaní s bežnou strechou [3]. Treba však uviesť že na úsporu energie v kontexte použitia vegetačných striech vplýva viacero faktorov, ako parametre stavby či klimatické podmienky. Taktiež môžeme konštatovať že pri rôznych vedeckých výskumoch sa mierne líšili výsledky výskumov na základe rôznych výskumných postupov. Experimentálne štúdie odhadujú priemerné zníženie úspory energie pri použití vegetačných striech o 2,25 % pre extenzívne vegetačné strechy a 14 % pre intenzívne vegetačné strechy, zatiaľ čo modelové štúdie odhadujú zníženie úspory energie pri extenzívnych vegetačných strechách o 25,50 % a pri intenzívnych vegetačných strechách o 10 %. Je teda zrejme že experimentálne štúdie sa dost' líšia od štúdií konštruovaných simulačným softvérom.



Obrázok 1: Klimatický prínos vegetačnej strechy v porovnaní s bežnou strešnou konštrukciou [5].

3. Zachytávanie a ukladanie uhlíka

Dôležitým prínosom vegetačných striech je fakt, že vedú významne prispieť k zachytávaniu a ukladaniu uhlíka vo vrstve substrátu a vo vegetácii, čím priamo znižujú emisie CO₂ [6]. Rastliny na vegetačných strechách absorbujú oxid uhličitý počas fotosyntézy, čím prispievajú k znižovaniu skleníkových plynov v atmosfére. Okrem toho, korene rastlín pomáhajú stabilizovať pôdu a zvyšujú jej schopnosť zadržiavať uhlík. Vedecká štúdia zameraná na sekvestráciu a skladovanie uhlíka v extenzívnych vegetačných strechách ukázala premenlivé miery sekvestrácie v závislosti od ročných zrážok pohybujúcich sa v rozmedzí od 95 g C m² /r do 189 g C m² /r [7]. Je teda možné konštatovať že extenzívne vegetačné strechy sekvestrujú uhlík v priemere 1,819 kg CO₂ /m² za rok. Pri polo intenzívnych a intenzívnych vegetačných strechách, rôzne štúdie ukazujú rôzne sekvestrácie uhlíka. Priemerný potenciál sekvestrácie uhlíka sa pri intenzívnych vegetačných strechách hýbe od 11 566 kg do 20 038 kg CO₂ /m² za rok [4]. Je teda možné konštatovať že polo intenzívne a intenzívne vegetačné strechy sekvestrujú oveľa väčšie množstvo uhlíka ako extenzívne vegetačné strechy. Je však isté že vegetačné strechy v konečnom meradle znižujú klimatické zmeny sekvestráciou CO₂.

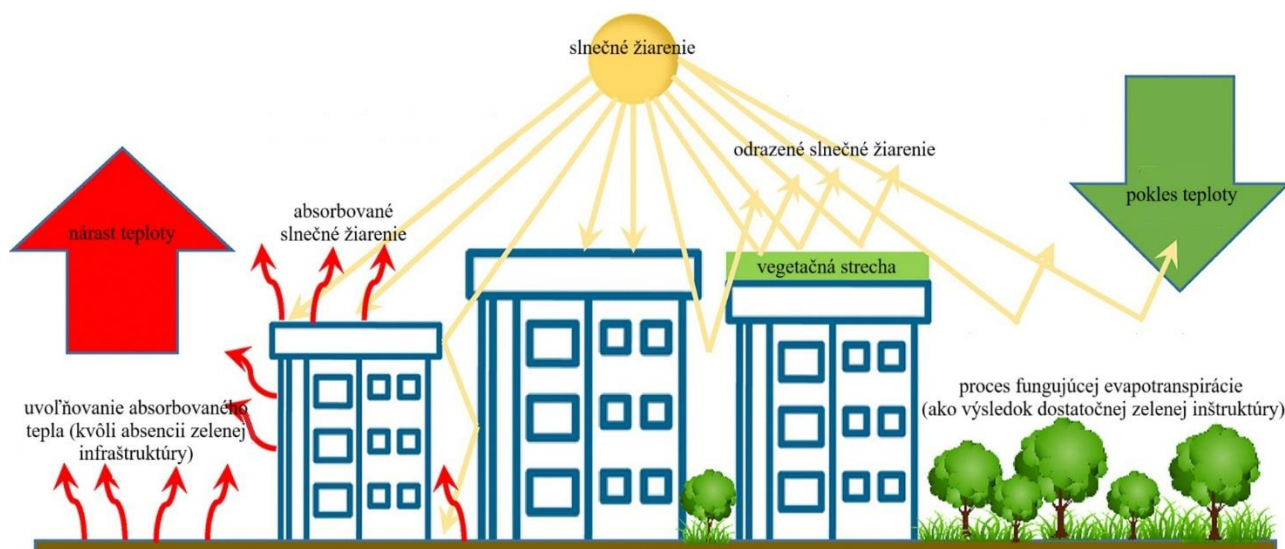


Obrázok 2: Vegetácia počas svojho rastu absorbuje atmosférický CO₂ [8].

4. Zmiernenie efektu mestského tepelného ostrova

Podobne ako pri úspore energie a emisií skleníkových plynov pri vegetačných strechách tak aj pri zmiernení efektu mestského tepelného ostrova v kontexte použitia vegetačných striech sa rôzne vedecké štúdie líšia experimentálnym výskumom a výskumom ktorého vedecké poznatky sa opierajú o simulačné softvéry. Výnimkou sú štúdie konštruované simulačným softvérom, ktoré sú následne overované experimentálnym výskumom. Ďalším prínosom pri použití vegetačných striech je teda nepochybne fakt, že do určitej miery znižujú efekt mestského tepelného ostrova. Je to práve proces evapotranspirácie, pri ktorej rastliny absorbujú značnú energiu, ktorá sa následne uvoľňuje do atmosféry, teda do životného prostredia, ako vodná para [10]. Vegetačné strechy vedú z časti posilniť tepelnú izoláciu strešnej konštrukcie a taktiež poskytnúť akési dodatočné tienenie, čím sa znižuje množstvo absorbovaného slnečného žiarenia cez strešnú konštrukciu do budovy, čo má taktiež opačný efekt, že pomáhajú zabrániť prechodu tepla z budovy cez strešnú konštrukciu [11]. Je možné konštatovať, že vegetačné strechy vedú do určitej miery zvýšiť tepelný odpor strešnej konštrukcie, čím znížia tepelné straty budovy na ktorú vegetačnú strechu umiestňujeme. Celý tento proces znásobuje práve vyššie spomínaný albedo efekt, ktorý je práve pri vegetačných strechách značne vyšší v porovnaní s bežnými strešnými konštrukciami. Vegetačné strechy teda môžu znížiť svojimi špecifickými vlastnosťami povrchovú teplotu strešnej konštrukcie a práve tento efekt presahuje plochu strešnej konštrukcie, čím prispieva k zníženiu teploty okolitého prostredia, čo v širšom meradle pozitívne vplyva zabráneniu tvorby mestských tepelných ostrovov [12]. Maximálne zníženie teploty povrchu strešnej konštrukcie pri použití vegetačnej strechy môže byť až 66 % v porovnaní a bežnou konštrukciou strechy [11]. Zníženie teploty povrchu strešnej konštrukcie sa lineárne zväčšuje v závislosti od percenta pokrytia strešnej konštrukcie funkčnou

vegetáciou, vedecké štúdie však ukazujú že sa požaduje minimálne 40 % pre extenzívnu vegetačnú strechu, 30 % pre polo intenzívnu vegetačnú strechu a 20 % pre intenzívnu vegetačnú strechu aby sa dosiahol efekt zníženia okolitej teploty [12][13]. Treba však spomenúť že vedecké štúdie dokazujú aj opačný efekt počas noci [14][15]. Experimentálnym výskumom bol počas nocí zaznamenaný otepľovací efekt vegetačných striech, čo potencionálne prispieva k zhoršujúcemu účinku povrchovej teploty mestského tepelného ostrova vzhľadom na to, že je výraznejší počas noci. Ďalšie vedecké štúdie zamerané na tento problém však dokazujú, že nočným otepľovacím efektom sa dá vyhnúť pridaným systémom zavlažovania pri vegetačných strechách [16][17][18][19]. Na základe doterajších známych informácií v kontexte zmiernenia efektu mestského tepelného ostrova použitím vegetačných striech, možno konštatovať, že rekonštrukciou strešných konštrukcií s pokrytím 80 % až 100 % je možné dosiahnuť pri extenzívnych vegetačných strechách zníženie povrchovej teploty strešnej konštrukcie o 0,96 % a pri intenzívnych vegetačných strechách zníženie povrchovej teploty o 1,06 %, čo je v konečnej mierke pozitívny vplyv pri zmiernení efektu mestského tepelného ostrova.



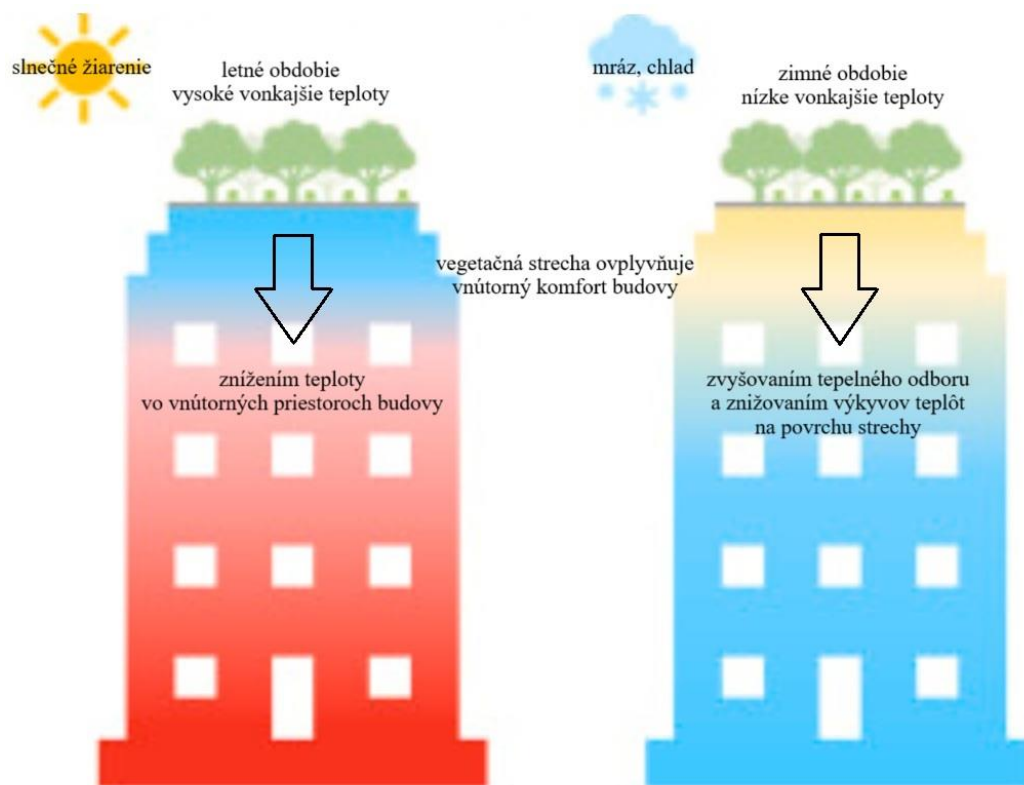
Obrázok 3: Ako vegetačné strechy zmierňujú efekt mestského tepelného ostrova [9].

5. Regulácia mikroklimy

Opäť je možné konštatovať že vedecké štúdie sa v oblasti regulácie mikroklimy v kontexte klimatických zmien sa líšia experimentálnym výskumom a výskumom ktorých výsledky produkujú simulačné softvéry. Prínos vegetačných striech na reguláciu mikroklimy sa dokazuje v schopnosti vegetačných striech znižovať teplotu v okolí budov na ktorých je takýto typ zastrešenia budov použitý [20]. Vedecké štúdie orientované na tento prínos vegetačných striech sa zameriavajú pri výskume na teplotné vplyvy na úrovni chodcov a dokazujú, že vegetačné strechy majú schopnosť ovplyvniť teplotu na úrovni chodcov do značnej miery obmedzenú. Extenzívna vegetačná strecha vo vedeckom výskume dokázala znížiť teplotu na úrovni chodcov o 0,09 až 0,15 °C, intenzívna vegetačná strecha dokázala znížiť teplotu na úrovni chodcov o 0,91 až 1,1 °C a polo intenzívna vegetačná strecha dokázala znížiť teplotu na úrovni chodcov o 0,2 °C [21]. Takýto výskum ovplyvňujú viaceré faktory ako teplota vzduchu, vlhkosť, vietor, slnečné žiarenie, či ďalšie dotknuté faktory. Je teda možné konštatovať, že vegetačné strechy majú potenciál pre malé zlepšenie regulácie mikroklimy, pričom intenzívne vegetačné strechy majú oproti extenzívnym vegetačným strechám väčšiu schopnosť regulovať mikroklimu v kontexte klimatických zmien.

5. Vnútny komfort

Ovplyvnenie vnútorného komfortu pri použití strešnej konštrukcie vegetačnej strechy znamená dosiahnutie zníženia teploty vo vnútorných priestoroch budovy, na ktorej bol takýto typ zastrešenia realizovaný. Efekt ovplyvnenia vnútorného komfortu podľa vedeckej štúdie možno pocítiť až na dvoch poschodiach pod takýmto typom strešnej konštrukcie [23]. Podobne ako pri vyššie spomínaných prínosoch vegetačných striech s orientáciou na zmenu klímy môžeme konštatovať, že mechanizmy, ktorými vegetačné strechy zvyšujú vnútorný komfort, spočívajú v znižovaní výkyvov teploty povrchu strechy a pôsobení ako dodatočná izolačná vrstva, čím efektívne znižujú prenos tepla cez strešnú konštrukciu a tým zlepšujú celkový tepelný komfort vo vnútorných priestoroch. Efekt chladenia v interiéri závisí predovšetkým od tepelnej izolácie použitej v konštrukcii vegetačnej strechy. Vedecké štúdie, ktoré skúmali potenciál zabezpečenia vnútorného komfortu budovy vegetačnou strechou dokazujú že vegetačné strechy dokážu znížiť vnútornú teplotu vzduchu o 1,95 až 3,85 °C [4]. Štúdie v tejto oblasti sú však značne obmedzené na simulačné softvéry, nedostatočnosť experimentálnych štúdií či obmedzenému výskumu na intenzívnych vegetačných strechách. Je však s jasnosťou možné konštatovať že vegetačné strechy majú potenciál ponúknuť výhody vnútorného komfortu počas vysokých vonkajších teplôt, či naopak počas nízkych vonkajších teplôt.



Obrázok 5: Efekt ovplyvnenia vnútorného komfortu možno pocítiť až na dvoch podlažiach pod takýmto typom zastrešenia [24].

6. Prínos vegetačných striech všeobecne

Výskum ukazuje že prínosmi vegetačných striech kategorizovanými v úvode tohto článku, ako prínosy súvisiace so zmiernením zmeny klímy a ktoré tento článok postupnou analýzou vyhodnotil, priamo nadväzujú na prínosy kategorizované v úvode tohto článku ako vedľajšie. Vedľajšie prínosy vegetačných striech prispievajú k ďalším oblastiam trvalej udržateľnosti miest

a ide najmä o zmiernenie znečistenia ovzdušia, zvýšenie biodiverzity, zadržiavanie dažďovej vody, kvalitu odtoku dažďovej vody, zníženiu zaťaženia hlukom či vedľajší prínos vegetačných striech, ako je ľudské blaho či ľudský komfort.

7. Záver

Hoci sú intenzívne vegetačné strechy vo všeobecnosti lepšie takmer vo všetkých kategóriách ich klimatických prínosov, dostupným vedeckým štúdiám v súčasnosti dominujú informácie o extenzívnych vegetačných strechách. Treba tiež zdôrazniť, že pre väčšinu kategórií prínosov vegetačných striech, pochádzajú dôkazy z modelovania a simulácií a nie z experimentálnych štúdií v reálnych podmienkach za dostatočne dlhé časové obdobie. Napriek tomu, že existujú určité obmedzenia v dostupnosti experimentálnych dát, vegetačné strechy predstavujú sľubný prístup k zmierneniu negatívnych dopadov zmeny klímy. Ďalší empirický výskum musí systematicky pristupovať k získavaniu poznatkov o vegetačných strechách prostredníctvom analýzy údajov, experimentovania, či dlhodobého monitorovania účinkov vegetačných striech. Tento systematický prehľad klimatických prínosov vegetačných striech v kontexte klimatických zmien vie poskytnúť odborný podklad tvorcom politik na úrovni miest, krajov či štátu, navrhnúť nové prístupy k použitiu vegetačných striech, či priniesť podporu pre ďalší výskum v tejto oblasti.

Literatúra

[1] ELNABAWI, M. - H. HAMZA. and RAVEENDRAN. R.: Results in Engineering: *'Super cool roofs': Mitigating the UHI effect and enhancing urban thermal comfort with high albedo-coated roofs, Vol. 19* [online]. Al Ain: Architectural Engineering Department, College of Engineering, United Arab Emirates University, Spojené Arabské Emiráty, 2023, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 2590-1230. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101269>

[2] SAADATIAN, O. – SOPIAN, K - SALLEH, E. - LIM, C.H. - RIFFAT, S. - SAADATIAN, E. - TOUDESHEKI, A. and SULAIMAN, M.Y.: Renewable and Sustainable Energy Reviews: *A review of energy aspects of green roofs, Vol. 23* [online]. Selangor: Solar Energy Research Institute (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia, 2013, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 1364-0321. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>

[3] D'ORAZIO, M. - DI PERNA, C. and DI GIUSEPPE, E.: Energy and Buildings: *Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate, Vol. 55* [online]. Ancona: Construction, Civil Engineering and Architecture Department, Faculty of Engineering, Università Politecnica delle Marche, Taliansko, 2012, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0378-7788. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.009>

[4] ALEKSEJEVA, J. - VOULGARIS, G. and GASPARATOS, A.: Urban Climate: *Systematic review of the climatic and non-climatic benefits of green roofs in urban areas, Vol. 58* [online]. Tokyo, Chiba: Graduate Program in Sustainability Science – Global Leadership Initiative (GPSS -GLI), University of Tokyo, Japonsko, 2024, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 2212-0955. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102133>

[5] *Estimating the Environmental effects of green roofs*, [online]. Kansas City, Missouri: Environmental protection agency, Spojené štáty Americké, 2018, [cit. 07. 10. 2024]. EPA 430-S-18-001. Dostupné na: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-09/documents/greenroofs_casestudy_kan_sascity.pdf

[6] GETTER, K. L. - ROWE, B. - ROBERTSON, G. P. - CREGG, B. M. and ANDRESEN, J. A.: Environmental Science & Technology: *Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs*, Vol.43/19 [online]. East Lansing: Departments of Horticulture and Geography, Michigan State University, Michigan, Spojené Štáty Americké, 2009, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0013-936X. Dostupné na: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es901539x>

[7] KONOPKA, J. - HEUSINGER, J. and WEBER, S.: JGR Biogeosciences: *Extensive Urban Green Roof Shows Consistent Annual Net Uptake of Carbon as Documented by 5 Years of Eddy-Covariance Flux Measurements*, Vol. 126/2 [online]. Braunschweig: Climatology and Environmental Meteorology, Institute of Geoecology, Technische Universität Braunschweig, Nemecko, 2020, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 2169-8953. Dostupné na: <https://doi.org/10.1029/2020JG005879>

[8] *What Transitions could Enable Limiting Global Warming to 1.5°C?*, [online]. The Intergovernmental Panel on Climate Change, [cit. 07. 10. 2024]. Dostupné na: <https://www.ipcc.ch/sr15/faq/faq-chapter-4/>

[9] TIWARI, A. - KUMAR, P. - KALAIARASAN, G. and OTTOSEN, T. B.: Environmental Pollution: *The impacts of existing and hypothetical green infrastructure scenarios on urban heat island formation*, Vol. 274 [online]. Guildford: Global Centre for Clean Air Research (GCARE), Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Spojené Kráľovstvo, 2021, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0269-7491. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115898>

[10] CASCONI, S. - COMA, J. - GAGLIANO, A. and PÉREZ, G.: Building and Environment: *The evapotranspiration process in green roofs: A review*, Vol. 147 [online]. Catania: Department of Civil Engineering and Architecture, University of Catania, Taliansko, 2019, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0360-1323. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>

[11] JAFFAL, I. - OULDBOUKHITINE, S-E. and BELARBI, R.: *Renewable Energy: A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*, Vol. 43 [online]. La Rochelle: LEPTIAB, University of La Rochelle, Francúzsko, 2012, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0960-1481. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>

[12] IMRAN, H.M. - KALA, J. and MUTHUKUMARAN A.W.M. Ng, S.: Journal of Cleaner Production: *Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia*, Vol. 197/1 [online]. Melbourne: College of Engineering and Science, Victoria University, Austrália, 2018, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0959-6526. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>

[13] ŽUVELA-ALOISE, M. - ANDRE, K. - SCHWAIGER, H. - BIRD, D. N. and GALLAUN, H.: Theoretical and Applied Climatology: *Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs*, Vol 131 [online]. Viedeň: ZAMG, Rakúsko, 2018, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 1434-4483. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2024-2>

[14] MORAKINYO, T. E. - KALANI, K.W.D. - DAHANAYAKE, C. - NG, E. and CHOW C. L.: Energy and Buildings: *Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study*, Vol 145 [online]. New Territories: Institute of Future Cities, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, 2017, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0378-7788. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.066>

[15] DJEDJIG, R. - BOZONNET, E. and BELARBI, R.: International Journal of Low-Carbon Technologies: *Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons, Vol. 10* [online]. Nantes: LaSIE, University of La Rochelle, Francúzsko, 2015, [cit. 07.10.2024]. ISSN 1748-1317. Dostupné na: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt019>

[16] WANG, X. - LI, H. and SODOUDI, S.: Building and Environment: *The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort, Vol. 217* [online]. Berlin: Institute of Meteorology, Freie Universität Berlin, Nemecko, 2022, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0360-1323. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>

[17] LINWEN, W. - HUI, W. - YUNCAI, W. - YUE, CH. - ZHIWEI, G. and LINGFENG, M.: Biodiversity and Conservation: *The relationship between green roofs and urban biodiversity: a systematic review, Vol. 31* [online]. Nanjing: College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Čína, 2022, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 1572-9710. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02436-3>

[18] JIACHUAN, Y. and BOU-ZEID, E.: Landscape and Urban Planning: *Scale dependence of the benefits and efficiency of green and cool roofs, Vol. 185* [online]. Princeton: Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University, Spojené Štáty Americké, 2019, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0169-2046. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.02.004>

[19] HUTTNER, S. – BRUSE, M. – DOSTAL, P.: *Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities* [online]. 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatolog: Geographisches Institut (Environmental Modelling Group), Johannes-Gutenberg-University of Mainz, Nemecko, 2008, [cit. 07. 10. 2024]. Dostupné na: https://envi-met.net/documents/papers/Huttner_etal_2008.pdf

[20] PENG, L. L.H. and JIM, C. Y.: Energies: *Green-Roof Effects on Neighborhood Microclimate and Human Thermal Sensation, Vol. 6/2* [online]. Hong Kong: Department of Geography, The University of Hong Kong, Čína, 2013, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 1996-1073. Dostupné na: <https://doi.org/10.3390/en6020598>

[21] YIN, H. - KONG, F. - DRONOVA, I. - MIDDEL, A. and JAMES, P.: Science of The Total Environment: *Investigation of extensive green roof outdoor spatio-temporal thermal performance during summer in a subtropical monsoon climate, Vol. 696* [online]. Nanjing: School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Čína, 2019, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0048-9697. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133976>

[22] FACHINELLO KREBS, L. and JOHANSSON, E.: Energy and Buildings: *Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil – A study coupling outdoor and indoor thermal simulations, Vol. 241*, [online]. Pelotas: Department of Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Brazília, 2021, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0378-7788. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110963>

[23] BERARDI, U.: Energy and Buildings: *The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits, Vol. 121* [online]. Toronto: Faculty of Engineering and Architectural Science Ryerson University, Kanada, 2016, [cit. 07. 10. 2024]. ISSN 0378-7788. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>

Jana Pijáková¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: II.

VALORIZÁCIA ODPADU Z BAUXITU V STAVEBNÍCTVE

BAUXITE RESIDUE VALORISATION IN BUILDING INDUSTRY

Abstract

Bauxite residue (BR) is generated during the processing of bauxite into alumina using the Bayer process. Aluminium consumption in building industry in 2023 was approximately 26 million tons. Roughly 1 – 1,5 tons of BR is left per ton of alumina production which results into 32,5 million tons of waste. Due to constant demand in construction field, this area has the highest potential for upcycling of red mud back into circular economy. Red mud can be used as a supplementary cementitious material (SCM) which partially replaces ordinary Portland cement (OPC) in a mortar. It's properties can be enhanced by endothermic reactions, either using low heat during co-calcination or quenching under high temperatures. These three blended cement mortars containing BR based supplementary cementitious materials were compared with standardized OPC mortar, made in accordance with EN 196-1.

Kľúčové slová / Key Words

Bauxite residue, valorisation, cement, mortar, aluminium, building industry

¹ Jana, Pijáková, Ing., Stavebná fakulta STU, KKPS, Radlinského 2766/11, 810 05 Staré Mesto, Slovensko

1. Úvod

Príspevok predstavuje enviromentálnu problematiku spojenú s produkciou červeného kalu), ku ktorej vo významnej miere prispieva aj spotreba hliníka v stavebníctve. Či už hovoríme o hliníkových fasádnych obkladoch, podkonštrukcii pre kotvenie fasádnych panelov, klampiarskych výrobkoch, okenných rámoch, valcovaných profiloch pre zábradlia, prechodových a dilatačných lištách alebo iba poštových schránkach. Toto môžeme ako stavební inžinieri a architekti ovplyvniť priamo – vedomím prístupom k návrhu budov, tzn. hliník budeme alternovať inými ekologickými materiálmi alebo nepriamo vedeckou činnosťou, napríklad výskumom zameraným na vývoj nových materiálov a technických riešení.

Predmetom článku je spôsob produkcie a skladovania zvyškov bauxitu (BR – bauxite residue), súčasne trendy vo výskume jeho valorizácie a návrate do cirkulárnej ekonomiky v rámci výstavby vo forme čiastočnej náhrady portlandského cementu v malte. Popis experimentu výroby mált obsahujúcich odpad z bauxitu.

V závere bude identifikovaný priestor na ďalší výskum v oblasti rádioaktivity mált s obsahom cementových doplnkov zo zvyškov bauxitu a exhalácie radónu z týchto materiálov.

2. Červený kal

2.1 Produkcia červeného kalu

Červený kal je metalurgický odpad, ktorý vzniká počas spracovania bauxitu na hliník (oxid hlinitý - Al_2O_3) pomocou Bayerovho procesu. Ide o vylúhovanie bauxitu v horúcom roztoku hydroxidu sodného (NaOH) [1], po ktorom vzniká hydroxid hlinitý $\text{Al}(\text{OH})_3$ a následne samotný hliník ($\text{Al}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Po kalcinácii (tzn. zahrievanie látky na teplotu, pri ktorej dochádza k odparovaniu vody) sa získava tuhý odpad z bauxitu známy pod anglickou skratkou BR (bauxite residue) alebo červené bahno (red mud).

Svetová produkcia hliníka v roku 2023 bola 143 miliónov ton, z toho 6,5 milióna ton sa vyrobilo v Európe.² Podiel stavebníctva na spotrebe sa odhaduje na 25%³, čo je približne 35,75 Mt celosvetovo.

2.2 Skladovanie červeného kalu

Hlavnou záťažou životného prostredia je kal, ktorý sa ukladá na rozsiahle skládky. Udržateľné skladovanie enormného množstva, cca 4 miliardy ton globálne, vzbudzuje pochybnosti, týkajúce sa návrhu, budovania a prevádzky takýchto rezervoárov. Tento problém sa priamo týka aj Slovenska.

Odkalisko na juhozápadnom okraji mesta Žiar nad Hronom, ktoré vzniklo ako dôsledok viac ako 40-ročnej hutníckej výroby bývalých Závodov Slovenského národného povstania, sa rozkladá na ploche cca 40 ha a je tu uložených približne 10 miliónov ton kalov. Rekultivácia skládky známej ako „červený kopec“, trvala od roku 2004 do roku 2012. Kalová jama bola čiastočne vysušená, nepriepustne uzavretá a zatrávnená. Podnetom pre riešenie situácie bola hrozba, že nádrž sa vyleje a zaplaví okolie.

² International Aluminium, štatistika za rok 2023 dostupná na <https://international-aluminium.org/statistics/alumina-production/>

³ International Aluminium, štúdia spracovaná analytikmi CRU International na žiadosť International Aluminium Institute (IAI), dostupná na <https://international-aluminium.org/resource/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/>

Správnosť riešenia bola potvrdená po ekologickej katastrofe V maďarskej Ajke v roku 2010. Odkalisko hlinikárne MAL Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Zrt zaplavilo oblasť o rozlohe 40 km², z odkaliska uniklo cca 700 000 m³ červeného bahna, obsahujúceho vanád (V), arzén (As) a rádioaktívnych prvkov tória (²³²Th), uránu (²³⁸U), a izotopu draslíka (⁴⁰K) [2].

3. Valorizácia odpadu z bauxitu

3.1 Súčasný výskum

Najperspektívnejšie cesty v recyklácii BR môžu byť roztriedené do nasledovných kategórií [1]:

- znovuzískavanie prvkov ako napr.: železo, titán, hliník, sodík a skandium [3, 4];
- použitie ako hlavnej zložky pri výrobe iného výrobku, napr. cementu [5];
- prímies pri výrobe stavebných materiálov ako betón, tehly alebo obklady [6];
- použitie pre špecifické účely, napr. melioráciu pôdy alebo zakrytie skládok [6];
- konverzia červeného kalu na užitočný materiál modifikáciou prítomných zlúčenín, napr. proces Virotec [7].

3.2 Čiastočná náhrada portlandského cementu v malte

Výroba cementu je vybraná Medzinárodným inštitútom pre hliník⁴ ako najslubnejší cieľový trh pre veľkoobjemovú aplikáciu BR. Produkcia cementu v roku 2020 bola celosvetovo 4 100 miliónov ton⁵, z čoho 4,3 % bolo v EÚ odhadom 176 miliónov ton⁶. Vzhľadom na to, že reálna úroveň náhrady cementu odpadom z bauxitu ako SCM by mohla byť 20 – 30 % hmotnosti, celú ročnú produkciu BR by mohol absorbovať cementársky priemysel na európskej a globálnej úrovni [8].

4. Výroba mált s čiastočnou náhradou portlandského cementu odpadom z bauxitu

4.1 Kľúčové indikátory výkonnosti

V tomto experimente boli navrhnuté zmesi, ktoré čiastočne nahrádzajú portlandský cement. Kľúčovými indikátormi výkonnosti je pevnosť v tlaku podľa EN 197-1: je zvolená pevnostná trieda 42,5N, ktorá vyžaduje dosiahnutie pevnosti 42,5 MPa po dvadsiatich ôsmich dňoch a konzistencia čerstvo namiešanej malty podľa EN 1015-3. Uvedené parametre reprezentujú základné požiadavky na preverenie použiteľnosti navrhnutých zmesí v stavebníctve.

4.2 Vyhotovené malty s čiastočnou náhradou OPC s cementom na báze odpadu z bauxitu

V experimente boli navrhnuté zmesi, ktoré čiastočne nahrádzajú portlandský cement. Všetky malty obsahujú rovnaký percentuálny podiel odpadu z bauxitu z nemenovaného zdroja. Výkonnostné parametre sú porovnávané so štandardizovanou maltou z portlandského cementu

⁴ International Aluminium, Technology Roadmap – Maximizing the use of Bauxite Residue in Cement, dostupné na: <https://international-aluminium.org/resource/technology-roadmap-maximizing-the-use-of-bauxite-residue-in-cement/>

⁵ Cement Production Worldwide from 1995 to 2020., dostupné na: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>.

⁶ Key Facts & Figures., dostupné na: <https://cembureau.eu/about-our-industry/key-facts-figures/>.

pevnostnej triedy 52,5N, štandardizovaného piesku a destilovanej vody, vyrobenej podľa EN 196-1.

Malta s cementom čiastočne nahradeným nespracovaným BR:

Odpad z bauxitu bol pomletý v Eirichovom mixéry a primiešaný k portlandskému cementu, do suchej zmesi bola primiešaná voda, následne piesok a plastifikátor, kým nie je dosiahnutá požadovaná konzistencia [9]. Boli namiešané dve zmesi: BR15+OPC, s obsahom surového odpadu bauxitu 15% z celkovej hmotnosti cementu a BR30+OPC, s obsahom surového odpadu z bauxitu 30% z celkovej hmotnosti cementu.

Malta s cementom čiastočne nahradeným ko-kalcinovaným BR:

V tomto prípade je materiál čiastočne substituujúci cement namiešaný ako zmes kaolínu a surového bauxitu, kt. bol pomletý v Eirichovom mixéry a termochemický upravený na nízku teplotu, tj. Do 750°C [10, 11]. Takto upravená zmes bola zmiešaná s cementom, do suchej zmesi bola primiešaná voda, následne piesok a plastifikátor, kým nie je dosiahnutá požadovaná konzistencia. Boli namiešané dve maltové zmesi: BR70K_15+OPC, s obsahom surového odpadu z bauxitu 15% z celkovej hmotnosti cementu a BR70K_30+OPC, s obsahom surového odpadu z bauxitu 30% z celkovej hmotnosti cementu.



Obr. 1 :Materiály nahradzujúce cement (SCMs) z ľava do prava: neupravený odpad z bauxitu, ko-kalcinovaný odpad z bauxitu, pelety z odpadu bauxitu pred a po vitrifikácii.

Malta s cementom čiastočne nahradeným vytrifikovaným BR:

Výroba vytrifikovaného bauxitu je nasledovná: pripraví sa mix zo surového bauxitu, vápenca, piesku, uhlia, kremičitanu sodného, vody a hydroxidu sodného, ktorá sa mieša v Eirichovom mixéry až kým vzniknú malé guľôčky, tzv. pelety. Pelety sa vykalia vo vysokej peci pri teplote 1250°C [12], kde dochádza k zmene kryštalickej fázy na amorfnú, čo zvyšuje reaktivitu substitúcie cementu. Amorfná fáza, tj. forma skla, je pomletá v atritore na požadovanú jemnosť až potom môže byť použitá na výrobu malty. Zmesi boli navrhnuté nasledovne: 67LVBRC, s obsahom surového odpadu z bauxitu 15% z celkovej hmotnosti cementu a 53LVBRC3G,

s obsahom surového odpadu z bauxitu 30% z celkovej hmotnosti cementu a keďže to reaktivita materiálu umožňuje bola pripravená malta 35LVBRC4G s obsahom surového odpadu z bauxitu 40%.

Malty sú následne naliate do foriem s rozmermi 40 mm x 40 mm x 160 mm, zhutnené na vibračnom stole a umiestnené do vyzrievacej komory po dobu 2, 7 a 28 dní, to je po dobu kým nie je vykonaná skúška pevnosti v tlaku.



Obr. 2 : Maltové kvádre, z ľava do prava: obsahujúce ko-kalcinovaný odpad z bauxitu, neupravený odpad z bauxitu, štandardizovaná malta z portlandského cementu.

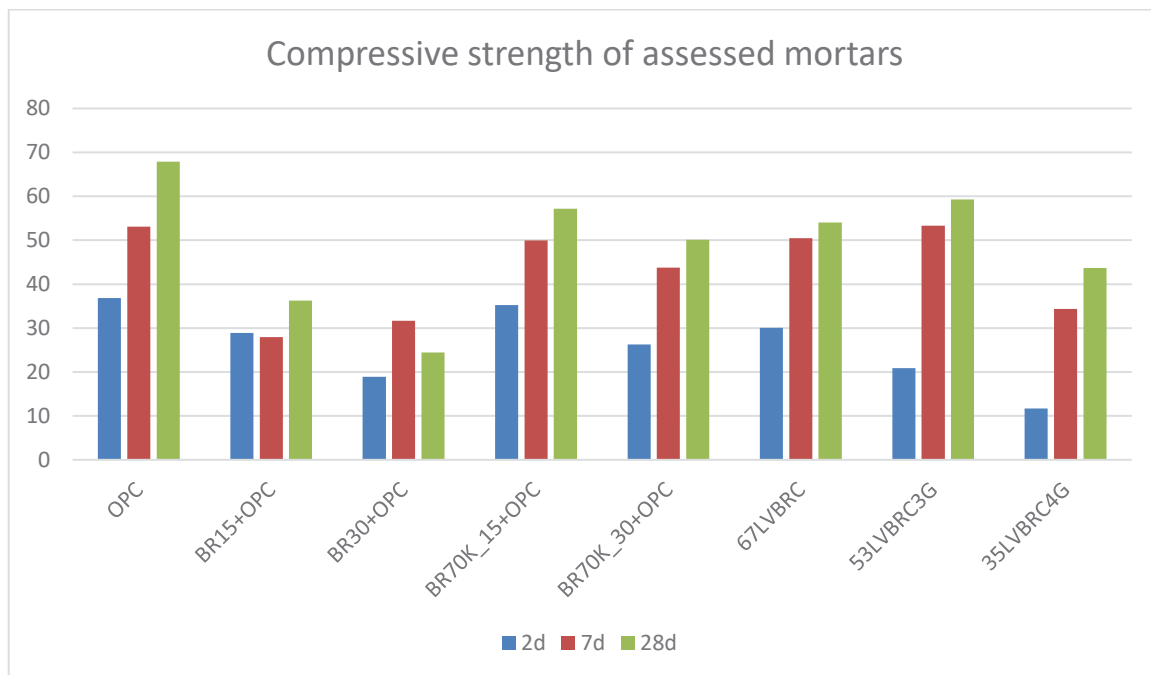


Obr. 3 : Maltové kvádre obsahujúce vitrifikovaný odpad z bauxitu.

4.3 Výsledky

Pevnosť bola testovaná po 2, 7 a 28 dňoch s nasledovnými výsledkami:

Graf 1: Výsledky skúšky pevnosti v tlaku [MPa].



Výsledky ukazujú, že malty kde bol cement čiastočne nahradený surovým odpadom z bauxitu nedosiahli požadovanú pevnosť, nakoľko neupravený bauxit, nie je dostatočne reaktívny.

Malty s cementom na báze ko-kalcinovaného BR a vitrifikovaného BR môžu čiastočne nahradiť portlandský cement.

Konzistencia všetkých mált bola vyhovujúca, avšak pri vitrifikovanom bauxite je výhodou, že nie je potrebný plastifikátor, čo predurčuje materiál aj na jednoduché spracovanie in-situ.

5. Záver

Červený kal je materiál vhodný na substitúciu portlandského cementu v maltách. Vzhľadom na potenciálne zdroje radioaktívnych prvkov (ekologická katastrofa v Ajke, Maďarsku), si vyžaduje ďalší výskum zameraný na rádioaktivitu materiálu a exhaláciu radónu z uránovej rozpadovej rady a jeho dcérskych produktov. Čo je predmetom môjho ďalšieho výskumu.

Literatúra

- [1] Evans, K.: The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. *J. Sustain. Metall.*, 2016, č. 2, s. 316–331.
doi:10.1007/s40831-016-0060-x
- [2] Burke, I. T. et al. Speciation of arsenic, chromium, and vanadium in red mud samples from the Ajka spill site, Hungary. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, č. 46, s. 3085–3092.
- [3] Erca E., Apak R.: Furnace smelting and extractive metallurgy of red mud: recovery of TiO₂, Al₂O₃ and pig iron. *J Chem Technol Biotechnol.*, 1999, č. 70(3), s. 241–246.
- [4] Ganesh, P., Hertel T, Douvalis P.A., Kapelari S., Blanpain B., Pontikes Y.: Towards sustainable valorization of bauxite residue: Thermodynamic analysis, comprehensive characterization, and response surface methodology of H₂ reduced products for simultaneous metal recovery. *Journal of Cleaner Production*, 2024, č.440,
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140931>
- [5] Pontikes Y., Angelopoulos G.: Bauxite residue in cement and cementitious applications: current status and a possible way forward. *Resour Conserv Recycl.*, 2013, č. 73, str. 53–63.
- [6] Klauber C., Gräfe M., Power G.: Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization. *Hydrometallurgy*, 2011, č: 108(1), str. 11–32.
- [7] McConchie D., Clark M., Hanahan C., Davies-McConchie F.: The use of seawater-neutralised bauxite refinery residues in the management of acid sulphate soils, sulphidic mine tailings and acid mine drainage. In: Gaul K (ed) *Proceedings of the 3rd Queensland Environment Conference*, Environmental Engineering Society, 2000, str. 201–208.
- [8] Peys A., Hertel T., Snellings R.: Co-Calcination of Bauxite Residue With Kaolinite in Pursuit of a Robust and High-Quality Supplementary Cementitious Material, *Frontiers in Materials* 2022, č. 9,
DOI: 10.3389/fmats.2022.913151
- [9] Ribeiro D. V., Labrincha J. A., Morelli M. R., Potential Use of Natural Red Mud as Pozzolan for Portland Cement, *Materials Research*, 2011, č.14, str. 60–66,
<https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000001>.
- [10] VITO NV, PEYS A., QUAGHEBEUR M., SNELLINGS R.: PROCESS FOR THE PRODUCTION OF A CEMENT SUBSTITUTE, EP4436935A1, 2024
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/078770375/publication/EP4436935A1?q=arne%20peys>
- [11] Peys A., Hertel T., Snellings R.: Co-Calcination of Bauxite Residue With Kaolinite in Pursuit of a Robust and High-Quality Supplementary Cementitious Material, *Frontiers in Materials*, 2022, č. 9
<https://doi.org/10.3389/fmats.2022.913151>.

[12]Giels M., Hertel T.,Gijbels K., Schroeyers W., Pontikes Y.: High performance mortars from vitrified bauxite residue; the quest for the optimal chemistry and processing conditions. Cement And Concrete Research; 2022, č. 155.

DOI: [10.1016/j.cemconres.2022.106739](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106739) launch

Nancy Sedláčková¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 3. ročník

BIO-KOMPOZITNÁ TEPELNÁ IZOLÁCIA NA BÁZE SLNEČNICOVEJ DRENE: Meranie Tepelnoizolačných Vlastností

BIO-COMPOSITE THERMAL INSULATION BASED ON SUNFLOWER PITH: Measurement of Thermal Insulation Properties

Abstract

The study explores the thermal insulation properties of a bio-composite material derived from sunflower pith. With the construction industry contributing significantly to global CO₂ emissions and waste, the research aims to identify sustainable alternatives to conventional building materials. Sunflower stalks, particularly the pith, exhibit favorable thermal insulation properties due to their high porosity. The material was tested using various methods, confirming its potential to compete with synthetic insulations like polystyrene. The study highlights the need for further research on improving the properties of bio-composites, focusing on sustainability and environmental impact.

Kľúčové slová

udržateľnosť; tepelná vodivosť; tepelná izolácia; bio-kompozit

1. Úvod

V oblasti stavebného inžinierstva sme svedkami významného vzostupu vývoja bio-kompozitov, ktorý spôsobuje zvýšené environmentálne povedomie a rastúce výrobné náklady stavebných materiálov. Stavebný priemysel je zodpovedný za veľkú časť celosvetových emisií oxidu uhličitého a za výrobu značného množstva stavebného odpadu, a preto rastie potreba udržateľných alternatív stavebných produktov.

Bio-kompozity vyrobené z rastlinných vlákien sa ukazujú ako alternatívne riešenie, ktoré ponúka dlhodobé výhody a znížený environmentálny vplyv v porovnaní s tradičnými stavebnými materiálmi. Jednou z hlavných výhod rastlinných stavebných materiálov je ich dostupnosť a nižšia cena. Tieto materiály, získané hlavne z poľnohospodárskych odpadov, predstavujú obnoviteľný zdroj, ktorý je nezávislý od fosílnych palív. Navyše, ich obnoviteľnosť prispieva k zníženému environmentálnemu vplyvu na životné prostredie. Prírodné materiály majú prirodzené tepelnoizolačné vlastnosti, čo umožňuje ich konkurencieschopnosť v porovnaní s tradičnými stavebnými materiálmi.

Široká škála prírodných materiálov ponúka veľa možností pre získavanie tepelnoizolačných produktov. V rámci nášho výskumu sme sa rozhodli zamerať sa na tepelnú izoláciu vyrobenú zo slnečnice. Ako výskumný materiál pre zhotovenie tepelnej izolácie sme si vybrali stonky a dreň slnečnice, kvôli ich priaznivým tepelnoizolačným vlastnostiam a lokálnej dostupnosti. Po zbere slnečnicových semien sa zostávajúci rastlinný materiál zvyčajne považuje za odpad a ponecháva sa na poliach ako prirodzené hnojivo pre pôdu. Náš koncept sa sústreďuje na využitie stonky rastliny, ktorá sa skladá z dvoch rozdielnych komponentov: drene a kôry slnečnice. Obidva tieto komponenty majú potenciál na vytvorenie tepelnoizolačného bio-kompozitného materiálu. Dreň, ako mäkká časť,

¹ Nancy, Sedláčková, Ing.

preukazuje vynikajúce tepelnoizolačné vlastnosti, ktoré sú spôsobené jej vyššou pórovitosťou. Naopak, stonka slnečnice ponúka väčšiu pevnosť a môže byť využitá napríklad pri výrobe tvrdých dosiek.

Tepelnoizolačné materiály môžu znížiť energetické straty a minimalizovať emisie skleníkových plynov z budov. Preto je dôležitý správny výber materiálu, s prihliadnutím na jeho dopad na životné prostredie. Vývoj bio-kompozitov je ešte len v začiatkoch, stále zostáva veľa otvorených tém týkajúcich sa najmä fyzikálnych vlastností, ktoré sú požadované pre správnu funkčnosť, stabilitu, odolnosť a trvácnosť v podmienkach zabudovania v stavebnej konštrukcii.

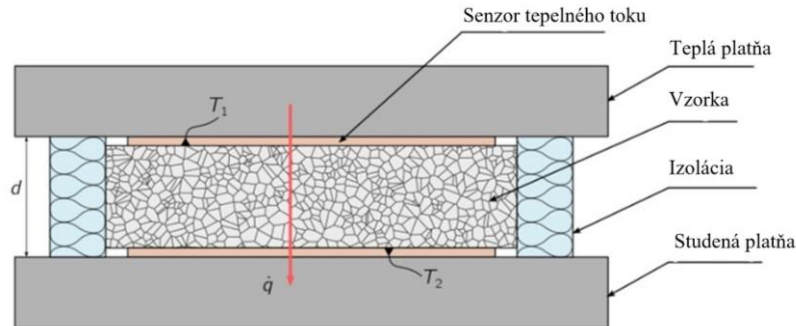
2. Tepelná vodivosť stavebných materiálov

Tepelná vodivosť sa pohybuje pri rôznych stavebných látkach v širokom intervale. Charakterizovaná je súčiniteľom tepelnej vodivosti λ vo $W/(m \cdot K)$. Slúži pre porovnanie jednotlivých produktov, výpočet tepelného odporu a návrh fragmentu konštrukcie. V tabuľke č.1 je prehľad rôznych druhov tepelných izolácií: syntetické, prírodné, inovatívne materiály. Medzi jednotlivými materiálmi sú výrazné rozdiely v hustote aj v tepelnej vodivosti. Syntetické materiály majú oveľa nižšie hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti ako prírodné materiály. Pre porovnanie: najčastejšie navrhovaný materiál – expandovaný polystyrén s hodnotou λ v oblasti 0,032-0,037 $W/(m \cdot K)$ s inovatívnym aerogélom ktorého λ sa pohybuje v rozmedzí 0,013-0,021 $W/(m \cdot K)$.

Tabuľka 1: Prehľad tepelnoizolačných materiálov a ich vlastností [1]

Materiál	Hustota ρ (kg/m ³)	Tepelná vodivosť λ (W/(m·K))	Faktor difúzneho odporu (-)
Sklená vlna	10-100	0,03-0,05	1-1,3
Kamenná vlna	40-200	0,033-0,04	1-1,3
Expandovaný polystyrén	18-50	0,029-0,041	20-100
Extrudovaný polystyrén	32-40	0,032-0,037	80-170
Polyuretán	30-160	0,022-0,035	50-100
Perlit	32-176	0,04-0,06	3,5
Celulóza	30-80	0,037-0,042	1,7-3
Korok	100-120	0,037-0,043	5-30
Aerogél	70-150	0,013-0,021	2-5,5
Vákuový izolačný panel	160-230	0,0035-0,008	340 000
Bambusové vlákna	431-538	0,077-0,088	8,7-15,4
Kukurica	148-257	0,101-0,139	5,2
Kokosové vlákna	174-664	0,042-0,086	1-10
Ľan	20-100	0,033-0,09	1-5,28
Konope	25-100	0,039-0,123	1-10
Slnečnica	36-152	0,038-0,05	-
Slama	80	0,052	-

Existuje viacero prístrojov a metód na meranie tepelnej vodivosti. Jednou z nich je „Hot and cold plate“, teda metóda teplej a studenej platne. Jedna z platní je chladená a druhá je vykurovaná. Po ploche jednotlivých platní sú umiestnené teplotné snímače, ktoré zaznamenávajú zmeny teplôt prechodom tepla. Meranie začína po ustálení teplotného stavu. Namerané údaje na oboch povrchoch sa priemerujú, čím je dosiahnutá výsledná teplota. Túto teplotu vieme použiť pri výpočte súčiniteľa prechodu tepla podľa Fourierovej rovnice.



Obrázok 1: Schéma merania pomocou metódy teplej a studenej platne [2]

Prenosný merač prechodu tepla využíva dynamickú metódu merania, ktorá umožňuje skrátiť čas merania v porovnaní s metódami merania v ustálenom stave. Využíva sa na meranie tepelnej vodivosti, tepelnej difuzivity, objemovej tepelnej kapacity a teploty. ISOMET 2114 je prenosný ručný merací prístroj na priame meranie tepelných vlastností širokej škály materiálov vrátane izolačných materiálov, plastov, skiel a minerálov. Je vybavený dvoma typmi meracích sond: ihlové sondy pre mäkké materiály alebo povrchové sondy pre tvrdé materiály [3]

3. Materiály a metódy

3.1 Materiály

Dreň, ako mäkká časť stonky, preukazuje vynikajúce tepelnoizolačné vlastnosti, ktoré sú spôsobené jej vyššou pórovitosťou. Naopak, stonka slnečnice ponúka väčšiu pevnosť a môže byť využitá napríklad pri výrobe tvrdých dosiek.

Kompozit je zhotovený z drene slnečnicovej stonky a spojiva. Ako spojivo boli použité rozmixované časti papierových novín s vodou, ako súčasť recyklačného procesu.



Obrázok 2: Časti slnečnicovej stonky, vľavo penová a vpravo tvrdá časť stonky

3.2 Príprava vzorky bio-kompozitu

Slnčnicová dreň bola namletá na častice maximálneho rozmeru 1,2 cm a menšie. Následne bolo namiešané spojivo rozmixovaním novinového papiera vo vode, čím vznikne hustá kašovitá zmes. Po zmiešaní oboch súčastí a dostatočnej súdržnosti látok bola zmes presunutá do formy rozmeru 500x500 mm navrstvená do výšky 2 cm. Nasledovalo vysušenie v CTS komore pri 30°C, 40% vlhkosti po dobu 3 dní. Vysušená vzorka bola pripravená na meranie tepelnej vodivosti.



Obrázok 3: Vzorka vo forme pred sušením



Obrázok 4: Vzorka po vysušení v komore CTS

3.3 Meranie tepelnej vodivosti

Metóda teplej a studenej platne prístrojom PMV 01

Rozsah merania prístroja pre súčiniteľ tepelnej vodivosti je v rozmedzí $\lambda = 0,025$ až $2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pri rozsahu teplôt 0-50 °C. Prístroj je stacionárny, doskový, jedno-vzorkový a umožňuje meranie vzoriek rozmeru 500x500 mm maximálnej hrúbky 100 mm. Meranie môže byť vykonané kontaktným alebo komorovým systémom.

Meranie kontaktným systémom bolo použité pre zistenie súčiniteľa tepelnej vodivosti materiálu zo slnečnicovej drene. Toto meranie kontaktným spôsobom je vhodné pre tepelnoizolačné materiály mäkkej alebo polotuhej povahy, kde zaručuje presné a jednoznačné vymedzenie hrúbky vzorky a reprodukovateľné meranie povrchových teplôt termočlánkami zabudovanými do meracích dosiek. O priebehu teplôt počas merania informuje 16 snímačov povrchovej teploty.

Pripravená vzorka sa pri kontaktnej metóde ukladá na dosku ohrevného dielu. Potom sa nad meranú vzorku presunie chladiaci diel, otočné rameno sa zaistí a spustí sa chladiaci diel, ktorý sa zaistí skrutkami (Obr.5). Hmotnosť chladiaceho dielu je 50 kg, takže vzorka je stlačená silou 2kPa. Následne sa uzavrie tepelno-kompenzačný prstenec a zaistí sa skrutkami.

Ďalší priebeh skúšky je riadený riadiacim počítačom s kompatibilným softvérom. Pred začiatkom skúšky je potrebné zadať okrajové podmienky. Vybrané priebehy dát sa priebežne zobrazujú na obrazovke. Po ustálení hodnôt je meranie ukončené a softvér vyhodnotí priebeh súčiniteľa tepelnej vodivosti s vývojom v čase. Meranie bolo uskutočnené 28.3.2024 v priestoroch laboratória SAV v Bratislave.



Obrázok 5: Meranie prístrojom PMV01



Obrázok 6: Meranie prístrojom Isomet 2114

Meranie prenosným meračom Isomet 2114

Princíp merania prístroja je vo vysielaní impulzov tepelného toku do izolačného materiálu. Táto dynamická metóda umožňuje rapídne skrátiť čas merania v porovnaní s inými metódami merania. Teplotný rozsah prístroja s povrchovou sondou je od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozmedzí $0,04$ až $6,0\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Presnosť merania (pri $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) je 5% z nameranej hodnoty, keď je $\lambda = 0,015$ až $0,70\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Keď je $\lambda = 0,70$ až $6,0\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, vtedy je presnosť merania 10% z nameraných dát. Na merané materiály boli vybrané z možností prístroja rozptyly hodnôt λ od $0,04\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ do $0,3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pre meranie plošnou metódou priložením sondy na povrch vzorky.

Pred začiatkom merania prebieha kalibrácia prístroja. Následne je potrebné nastaviť meranie na samotnom prístroji. Zvolený rozsah merania bol $0,04 - 0,3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, čo však neznemožňuje nameranie nižších hodnôt aj mimo rozsahu. Meranie bolo nastavené na 5 cyklov opakovania. Zvolený spôsob merania bol povrchovou sondou, možno vidieť na Obr. 6. Po uplynutí času merania boli zobrazené a zaznamenané výsledky (Obr.6.). Meranie prebehlo 17.4.2024 v priestoroch laboratórií Stavebnej fakulty v Bratislave.

4. Výsledky

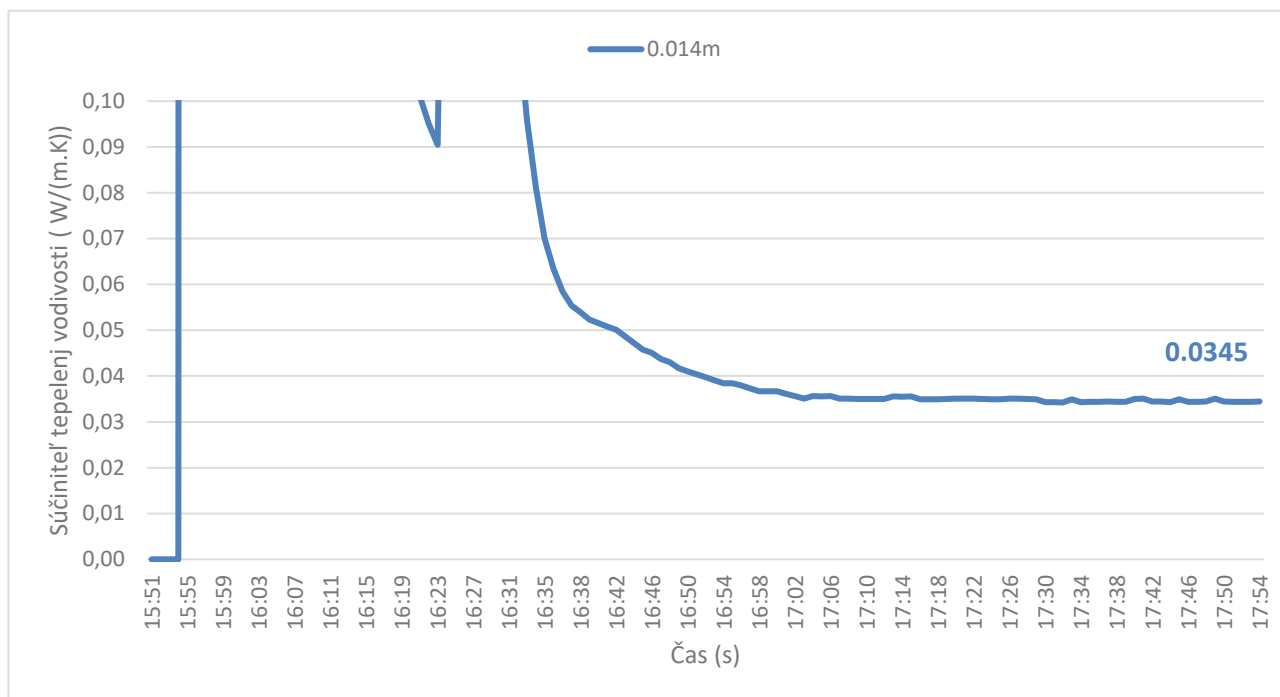
4.1 Meranie tepelnej vodivosti prístrojom PMV01

Meranie pomocou prístroja PMV trvalo 2 hodiny a 3 minúty. Hrúbka vzorky bola stanovená na $0,014\text{ m}$. Z hľadiska nerovnomerného povrchu vzorky môžu byť výsledky skreslené. Nameraná hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti bola po ustálení stavu $\lambda = 0,0345\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Na obrázku č.8 možno pozorovať postupné ustálenie meranej hodnoty a jej vývoj v čase.

Metóda teplej a studenej platne vyžaduje hladkú vzorku ktorá má takmer ideálny kontakt s doskou prístroja. Ak sú medzi doskami prístroja a vzorkou vzduchové dutiny, prístroj zmeria nižší súčiniteľ tepelnej vodivosti. Na základe týchto výsledkov vieme vyvodit' odporúčania pre vylepšenie ďalších meraní. Dôležitým poznatkom je potreba vytvoriť rovinnú vzorku s rozmerom $500\times 500\text{ mm}$, ktorá má rovnomernú hrúbku a hustotu materiálu. Ideálna hrúbka testovanej vzorky by bola minimálne 20 mm .

4.2. Meranie tepelnej vodivosti prístrojom Isomet 2114

Pre porovnanie výsledkov z prístroja PMV01 bolo vyhotovené aj kontrolné meranie prístrojom Isomet 2114. Pred samotným meraním vzorky bio-kompozitu bolo vykonané porovnávacie meranie polystyrénu Isover Greywall, ktorého deklarovaná hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti je $\lambda_D = 0,031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Hodnota nameraná prístrojom Isomet na vzorke tohto polystyrénu bola $0,0313 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Ďalej nasledovalo meranie tepelnej izolácie zo slnečnice, ktorého výsledkom bol súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda = 0,0348 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.



Obrázok 7: Priebeh merania tepelnej vodivosti vzorky bio-kompozitu

5. Diskusia

Namerané výsledky a priebeh výskumu poukázali na mnoho nedostatkov bio-kompozitu a zvoleného spojiva. Celkový proces výroby je potrebné zoptimalizovať vzhľadom na potrebu sušenia materiálu. Predpoklad pri sušení bol, že vzorka sa bude zmrzaťovať. Došlo však k oveľa väčšiemu zmrzaťovaniu ako bolo predpokladané. Je preto potrebné upraviť aj pomer vodnej zložky pri príprave spojiva. Toto zmrzaťovanie spôsobilo nepresnosť rozmeru, zakrivenie vzorky a v konečnom dôsledku aj nedostatočnú výšku pre meranú vzorku – 0,014 m, čo mohlo spôsobiť nepresnosť pri meraní súčiniteľa tepelnej vodivosti. Ďalším dôležitým faktorom pre správne meranie tepelnej vodivosti je zabezpečenie rovnomerného povrchu materiálu –vhodným spojivom, ktoré vyplní medzery medzi časticami slnečnicovej drene. Takisto je dôležitá aj nasiakavosť materiálu. Novinové spojivo je veľmi náchylné na vlhkosť a následný rozpad materiálu.

Merania a výsledky opísané v tomto článku slúžia ako podklad pre ďalší výskum v oblasti tepelnej izolácie zo slnečnicovej drene. Získali sme základný predpoklad o tepelnoizolačných vlastnostiach tohto materiálu, čo potvrdzuje jeho potenciál konkurencie schopnosti syntetickým tepelným izoláciám. Hlavnou témou, ktorej sa treba do budúcnosti venovať je výber alternatívneho spojiva, ktoré by bolo prírodné a zabezpečovalo by potrebné vlastnosti tepelnej izolácie.

6. Záver

Prírodné materiály vykazujú významný potenciál konkurovať syntetickým tepelným izoláciám, ako sú polystyrén a minerálna vlna, čo potvrdzujú viaceré štúdie zamerané na výskum bio-kompozitov a prírodných tepelných izolácií. Štruktúra dreňových stoniek niektorých rastlín, ktorá sa podobá komerčným izoláciám, vykazuje výborné tepelnoizolačné vlastnosti. Prírodné materiály rastlinného pôvodu sa v stavebníctve používajú už od dávnych čias. Súčasné požiadavky na energetickú efektívnosť a vlastnosti stavebných materiálov vyžadujú inovácie a zlepšenia týchto prírodných materiálov.

Nevýhody prírodných materiálov zahŕňajú vyššiu nasiakavosť, nízku požiarnu odolnosť, slabšiu súdržnosť a potrebu ochrany proti škodcom. Z tohto dôvodu je výber vhodného spojiva, ktoré zlepší ich vlastnosti, kľúčový.

V prvej fáze nášho výskumu sme sa zamerali na výrobu a testovanie vzorky z jadra slnečnicovej stonky v kombinácii s novinovým spojivom. Merali sme tepelnú vodivosť materiálu, ktorá potvrdila, že dreň slnečnicovej stonky má vynikajúce tepelnoizolačné vlastnosti. Tieto výsledky slúžia ako základ pre ďalšie merania a výskum alternatívnych spojív, ktoré by boli prírodné alebo udržateľné.

Prírodné tepelné izolácie a bio-kompozity predstavujú oblasť s veľkým potenciálom, avšak zatiaľ sú nedostatočne preskúmané a zahŕňajú množstvo nezodpovedaných otázok. Táto štúdia má ambíciu prispieť k lepšiemu pochopeniu využiteľnosti poľnohospodárskeho odpadu, konkrétne slnečnicovej stonky, a jeho potenciálu v sektore tepelných izolácií budov. Naše zistenia môžu byť impulzom pre ďalší výskum a inovácie, ktoré by mohli prispieť k udržateľnejšiemu stavebníctvu.

PodĎakovanie

Tento článok bol podporený v rámci projektu: Program na motiváciu a podporu zvyšovania kvality a efektívnosti vedecko-výskumnej činnosti mladých vedecko-výskumných pracovníkov 2023, s číslom 1621.

Literatúra

- [1] D. Kumar, M. Alam, P. X. W. Zou, J. G. Sanjayan, and R. A. Memon, “Comparative analysis of building insulation material properties and performance,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, p. 110038, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110038.
- [2] “Wärmeleitfähigkeitsmessung — Chair of Thermodynamics — TU Dresden.” Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/thermo/die-professur/technische-ausstattung/versuchsanlagen/waermeleitfaehigkeitsmessung>
- [3] “Isomet 2114 - APPLIED PRECISION s.r.o.” Accessed: Jul. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.appliedp.com/product/isomet/>

Zuzana Šišková¹

Študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 4.

ARCHITEKTONICKÉ VZORCE LE CORBUSIERA

ARCHITECTURAL FORMULAS OF LE CORBUSIER

Abstract

The Swiss architect Le Corbusier significantly influenced the development of modern architecture, especially with his deep interest in mathematics, geometry and the creation of a universal system of proportions, known as Modulor. This system, based on the golden ratio and human proportions, greatly influenced his lifelong architectural work. In 1926, he summarized his architectural principles into 5 points of modern architecture, with the Modulor providing the mathematical and aesthetic basis for their realization. This post brings us closer to how Le Corbusier applied these principles in practice, focusing on his 5 points of modern architecture and their connection to Modulor. Through the analysis of selected buildings, he reveals how the golden ratio and other mathematical principles became an integral part of his architectural language.

Abstrakt

Švajčiarsky architekt Le Corbusier výrazne ovplyvnil vývoj modernej architektúry a to najmä jeho hlbokým záujmom o matematiku, geometriu a vytvorenie univerzálneho systému proporcií, známeho ako Modulor. Tento systém, založený na zlatom reze a ľudských rozmeroch, výrazne ovplyvnil jeho celoživotné architektonické dielo. V roku 1926 zhrnul svoje architektonické princípy do 5 bodov modernej architektúry, pričom Modulor poskytoval matematickú a estetickú základňu pre ich realizáciu. Tento príspevok nám približuje, ako Le Corbusier aplikoval tieto princípy v praxi, pričom sa zameriava na jeho 5 bodov modernej architektúry a ich prepojenie s Modulorom. Prostredníctvom analýzy vybraných stavieb odhaľuje, ako sa zlatý rez a ďalšie matematické princípy stali neoddeliteľnou súčasťou jeho architektonického jazyka.

Kľúčové slová

Le Corbusier, 5 bodov modernej architektúry, Modulor, architektonické vzorce, matematika v architektúre, proporcia, geometrická analýza, zlatý rez

1. Úvod

Od začiatku 20. storočia smeruje moderná architektúra k abstraktnej forme, ktorá predovšetkým odkazuje sama na seba. Rozvoj abstraktnej formy vyšiel z niekoľkých radikálnych sociálnych a kultúrnych zmien, ktoré sa odohrali na začiatku storočia. Toto dianie nakoniec viedlo k intenzívnym opätovným úvahám o disciplíne, návratu k základným princípom a odklonu od prebytočných princípov. Tento návrat k základom mal za cieľ vývoj univerzálneho jazyka. Dôsledky spôsobené hľadaním univerzálneho jazyka sa stali ďalekosiahlymi a ovplyvnili architektúru natoľko, že ich analýza je stále veľmi aktuálna.

¹ Ing. arch. Ing. Zuzana Šišková, Katedra architektúry, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Jedným z najvýznamnejších predstaviteľov modernej architektúry 20. storočia je bezpochyby švajčiarsky architekt *Le Corbusier*, vlastným menom *Charles-Édouard Jeanneret-Gris*. Po štúdiu architektúry, ku ktorému ho priviedol záujem o umenia a remeslá sa presťahoval do Paríža. Práca *Le Corbusiera* bola posadnutá hľadáním dokonalých proporcií a harmónie, preto sa jeho celoživotné dielo zameriava na vytvorenie univerzálneho systému merania a proporcií. Tento systém, ktorý nazval *Modulor* mal zaručiť estetickú a funkčnú dokonalosť architektúry. Je založený na rozmeroch ľudského tela a matematickom pomere *Zlatého rezu*, ktorý sa považuje za ideálny. Práve *Zlatý rez* sa stal kľúčovým prvkom jeho tvorby, prejavujúci sa v mnohých jeho projektoch od víl až po urbanistické plány.

Medzi najvýznamnejšie diela jeho tvorby patria *Villa Savoye* v Poissy, *Kaplnka Notre Dame du Haut* v Ronchamp a *Unité d'Habitation* v Marseille. Všetky tieto stavby sa vyznačujú charakteristickými znakmi jeho tvorby, čistými líniami, otvorenými priestormi s dôrazom na funkčnosť.

Le Corbusier veril, že architektúra má byť založená na presných matematických princípoch a geometrických tvaroch. Odvážne a inovatívne návrhy, vychádzajúce z jeho ideí zmenili spôsob navrhovania a vnímania architektúry a dodnes sú inšpiráciou pre architektov po celom svete [1] [2] [5].

2. 5 bodov modernej architektúry

Po prvej svetovej vojne vznikla potreba obnovy a vytvorenia novej identity a tak sa moderná architektúra stala symbolom pokroku a budúcnosti stavajúc na ideových základoch. *Le Corbusier* veril, že architektúra má schopnosť zlepšiť život ľudí a vytvoriť lepšie životné podmienky. Okrem iného sa architekti snažili o racionálne a logické riešenia, ktoré boli založené na presných výpočtoch a štúdiách či dôraze, že forma budovy má vyplývať z jej funkcie.

V roku 1926 *Le Corbusier* zhrnul svoje architektonické princípy do 5 bodov modernej architektúry. Boli výsledkom historických, technických, spoločenských a ideových faktorov, ktoré charakterizovali začiatok 20. storočia. Najväčší prínos spočíval v zhrnutí týchto zmien do jasného a stručného manifestu, ktorý sa stal základom pre ďalší vývoj modernej architektúry. Vo svojej najznámejšej podobe sa týchto 5 bodov objavilo v knihe vydanéj pri príležitosti otvorenia sídliska *Weissenhof v Štutgarde* v roku 1927². Pôvodne sa tieto body zaoberali funkčnosťou a estetikou budov avšak ich základ vychádzal z presných matematických výpočtov a v hľadaní harmonických proporcií.

Z historického kontextu vznik podnietilo množstvo faktorov, najmä priemyselná revolúcia a s ňou spojený rozvoj priemyslu, nových technológií a materiálov. Rýchla urbanizácia a rast miest a s tým súvisiaci dopyt efektívne a esteticky uspokojíť podmienky rastúcej populácie. Odklon architektov od historizujúcich štýlov a hľadanie nových originálnych výrazových prostriedkov[1] [2].

2.1 Stĺpy (*les pilotis*)

Použitie stĺpov v modernej architektúre predstavuje inovatívny prístup k navrhovaniu budov, ktorý prináša množstvo výhod. Umiestnenie objektu na stĺpy uvoľňuje prízemie objektu a vytvára tak flexibilný priestor s možnosťou rôzneho využitia, napríklad na záhrady. Takáto konštrukcia zároveň účinne oddeľuje budovu od zeme, čím sa minimalizuje riziko vzniku vlhkosti a zabezpečuje dlhodobú životnosť stavby (obr.1). Pri návrhoch sa často využívajú matematické výpočty a modulárne systémy, ktoré okrem optimálnej nosnosti zabezpečujú aj estetický vzhľad. *Modulor* umožnil *Le Corbusierovi*

² KIRSCH K., Werkbund-Ausstellung „Die Wohnung“. Stuttgart 1927. Die Weissenhofsiedlung

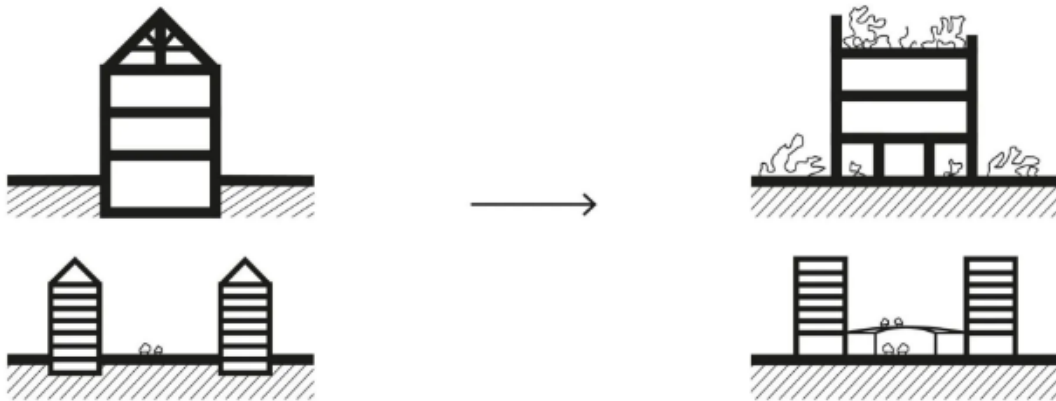
presne definovať optimálnu výšku a vzdialenosť medzi stĺpmi, čím sa zabezpečila harmonická proporcia medzi jednotlivými prvkami stavby a človekom.



Obr.1: Stĺpy (*les pilotis*) - tradičný verzus moderný prístup [10]

2.2 Strešné záhrady (*les tors-jardins*)

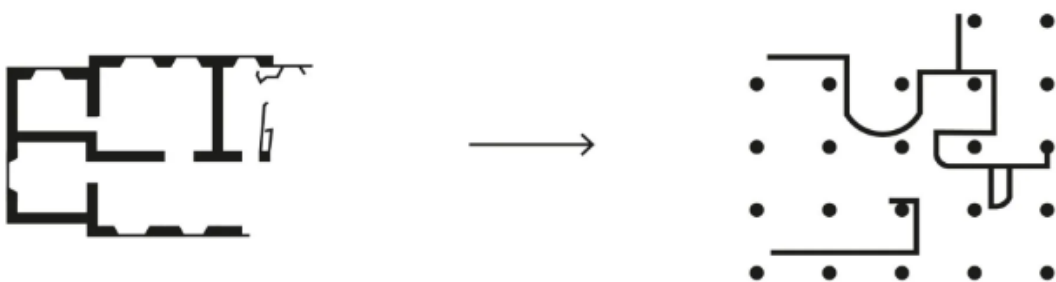
Využitie piatej fasády na strešné záhrady predstavuje multifunkčný architektonický prvok, ktorý v sebe spája estetické, ekologické a funkčné aspekty. Strechy pokryté zeleňou zväčšujú obytnú plochu a zároveň zlepšujú tepelno-izolačné vlastnosti, prispievajú k zlepšeniu kvality ovzdušia a celkovému estetickému dojmu (obr.2). *Modulor* pomohol pri určovaní optimálnej výšky a šírky strešných záhrad, ktoré mali podľa *Le Corbusiera* zmierniť oddelenie človeka od prírody.



Obr.2: Strešné záhrady (*les tors-jardins*) - tradičný verzus moderný prístup [10]

2.3 Vol'ný pôdorys (*le plan libre*)

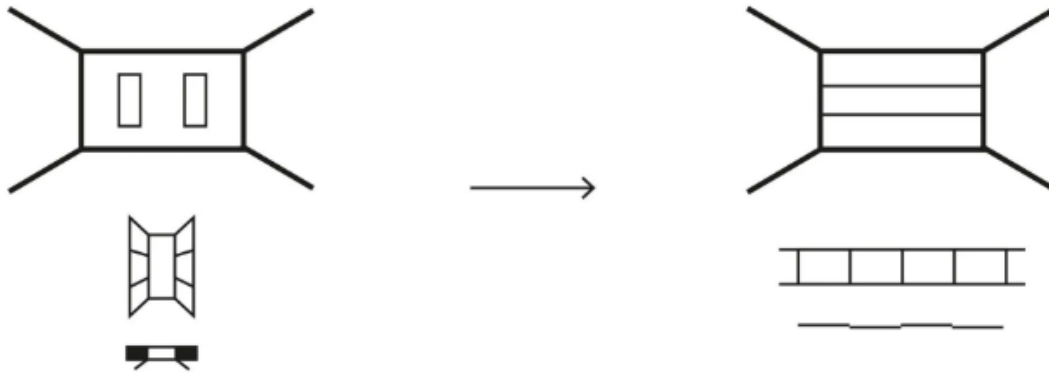
Tento bod je obvykle považovaný za ústredný, pretože je predstaviteľom úplne novej architektúry, ktorá sa rozvíja zvnútra von. Východiskovými konštrukčnými prvkami tohto voľného pôdorysu je stĺp a súvislá stropná doska. Zvislé nosné konštrukcie sú umiestnené tak, aby umožňovali voľné členenie vnútorného priestoru, vďaka čomu je možné prispôbiť dispozíciu domu individuálnym potrebám obyvateľov a meniacemu sa životnému štýlu. *Le Corbusierove* ranné práce predstavujú skúmanie vzťahu medzi rozvinutím voľného plánu na strane jednej a na strane druhej požiadavky na vonkajšiu formu (obr.3). *Modulor* poskytol nástroj na flexibilné členenie vnútorného priestoru či určovanie proporcií jednotlivých miestností a ich vzájomné usporiadanie.



Obr.3: Vol'ný pôdorys (*le plan libre*) - tradičný verzus moderný prístup [10]

2.4 Pásové okno (*la fenetre en longueue*)

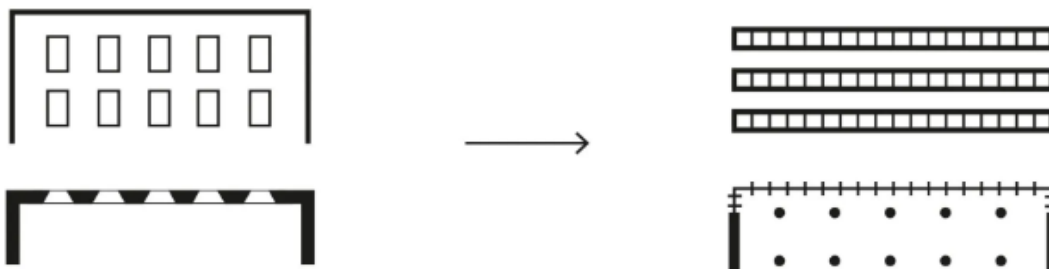
Dlhé, horizontálne okná majú vnútornému priestoru zabezpečiť dostatok denného svetla a vizuálny kontakt s okolím. Podľa *Le Corbusiera* je rozdiel v definícii krásy najzreteľnejší práve pri pôsobení prirodzeného svetla vo vnútorných priestoroch. Okná sú nielen prirodzené „prázdne miesta“ na fasáde, ale tvoria aj konkrétne vízie celého vonkajšieho a vnútorného sveta, prechádzajú z interiéru do exteriéru. Ich strategická poloha je preto v *Le Corbusierových* dielach starostlivo zvážená. Tento typ okna sa stal charakteristickým znakom modernej architektúry. Možnosť aplikácie pásových okien zabezpečuje voľný pôdorys a voľné (predsadené) priečelie objektu (obr.4). *Modulor* umožnil presné určenie výšky a šírky pásových okien.



Obr.4: Pásové okno (*la fenetre en longueue*) - tradičný verus moderný prístup [10]

2.5 Voľné priečelie (*la facade libre*)

Fasády by nemali byť zaťažované nosnými prvkami, čím sa umožňuje väčšia sloboda pri navrhovaní otvorov. Voľné priečelie umožňuje vytvorenie veľkých, presklených plôch, ktoré do interiéru prinášajú dostatok denného svetla a vizuálny kontakt s okolím (obr.5). *Modulor* ovplyvnil proporcie a členenie fasád, ktoré sa stali akýmsi grafickým vyjadrením vnútorného usporiadania a štruktúry budovy [1].



Obr.4: Voľné priečelie (*la facade libre*)- tradičný verus moderný prístup [10]

3. Matematika a geometria v architektúre Le Corbusiera

Le Corbusier bol presvedčený, že architektúra má byť založená na univerzálnych vedeckých princípoch, najmä na matematike a geometrii. Veril, že je tak možné dosiahnuť objektivitu a presnosť v navrhovaní budov a tak sa odlišiť od subjektívnych a náhodných rozhodnutí, ktoré podľa neho charakterizovali mnohé historické štýly. Matematika a geometria pre neho predstavovali nielen nástroj na presné výpočty, ale aj symbol harmónie a rovnováhy. Proporcie ako zlatý rez sa stali preňho ideálom krásy a dokonalosti. Veril, že budovy postavené podľa týchto matematických princípov budú pôsobiť esteticky príjemne a evokovať v ľuďoch pozitívne emócie.

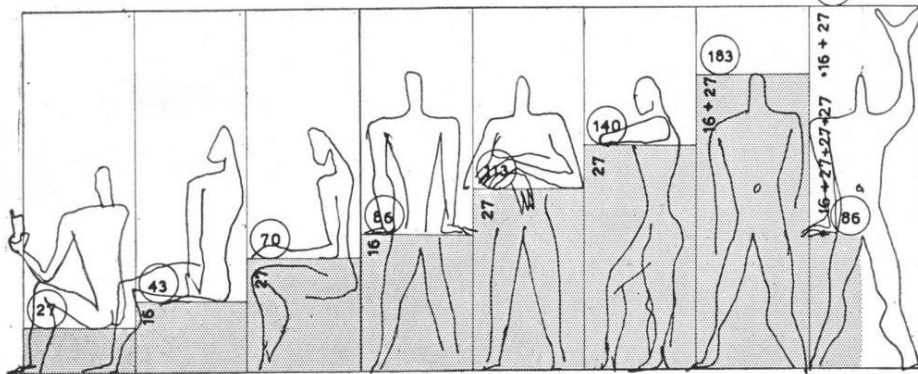
Okrem estetického aspektu mal pre neho veľký význam aj aspekt funkčný. Matematika mu umožnila presne vypočítať rozmery a proporcie jednotlivých prvkov budovy tak, aby čo najoptimálnejšie plnili svoju funkciu. Práve prepojenie architektúry s matematikou a prírodnými vedami dodáva jeho stavbám vedecký charakter a zdôrazňuje ich racionalitu. Tento jedinečný prístup ho odlišil od mnohých jeho súčasníkov a výrazne ovplyvnil ďalší vývoj modernej architektúry [1] [2].

3.1 Modulor a zlatý rez

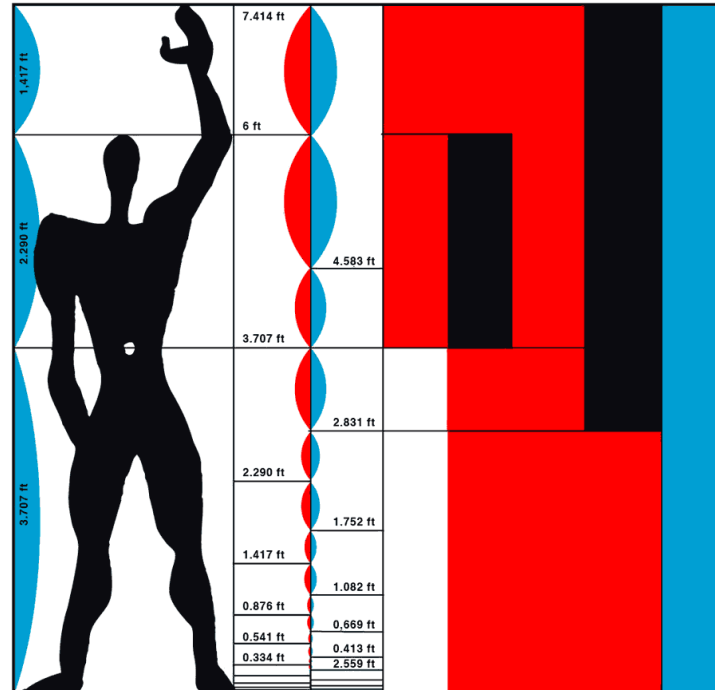
Modulor je systém harmonických proporcií, ktorý predstavuje fascinujúci pokus o spojenie umenia, vedy a architektúry. Tento matematický systém navrhol *Le Corbusier* a stal sa základným pilierom jeho celoživotného architektonického diela. Pri jeho návrhu využil poznatky od *Vitruvia*, *Leonarda Da Vinciho* či *Leona Battistu Alberti* a interpretoval ich svojím vlastným spôsobom. Rozvíjal a zdokonaľoval ho po celý svoj život pričom ho aplikoval v mnohých svojich stavbách čím ovplyvnil generácie architektov po celom svete.

Prvé zmienky sa objavujú v jeho poznámkach a náčrtkoch už v 20. rokoch 20. storočia. V tomto období začal experimentovať s rôznymi matematickými modelmi a antropometrickými údajmi. Za oficiálne predstavenie systému sa považuje rok 1948, kedy vydal knihu *Le Modulor*, v ktorej podrobne popísal svoj nový systém proporcií a jeho aplikáciu v architektúre. Všeobecne platí, že *Modulor* poskytol *Le Corbusierovi* matematický a estetický rámec, v ktorom mohol realizovať svojich päť bodov modernej architektúry. Pomohol mu dosiahnuť jednotu formy a funkcie, a to nielen v jednotlivých budovách, ale aj v širšom kontexte urbanizmu.

Kľúčovými vplyvmi pre vznik *Moduloru* boli najmä pomer zlatého rezu, antropometria a modernistické hnutie. Iracionálny pomer zlatého rezu (približne 1:1,618...) sa vyskytuje v prírode a je považovaný za esteticky príťažlivý. *Le Corbusier* ho považoval za univerzálny proporčný systém, ktorý je aplikovateľný na všetky oblasti života vrátane architektúry. Aplikoval ho najmä pri určovaní proporcií miestností a fasádach budov. Celkové rozmery fasád, ako aj rozmiestenie otvorov či ich veľkosť vyvodzoval práve z tohto pomeru. *Corbusier* veril, že ľudské telo je dokonalým príkladom harmonických proporcií a preto použil rozmery ľudského tela vychádzajúce z antropometrie ako základ pre svoj systém. Konkrétne sa zameriaval na výšku človeka so zdvihnutou rukou, ktorú považoval za ideálny modul. Modernistické hnutie, v ktorom bol jedným z hlavných predstaviteľov sa vyznačovalo snahou o racionalitu, funkčnosť a jednoduchosť. *Modulor* je výsledným pokusom v ktorom pretavil všetky svoje ideály do konkrétnej architektonickej praxe [4].



Obr.5: Antropometria v podaní *Le Corbusiera* [4]



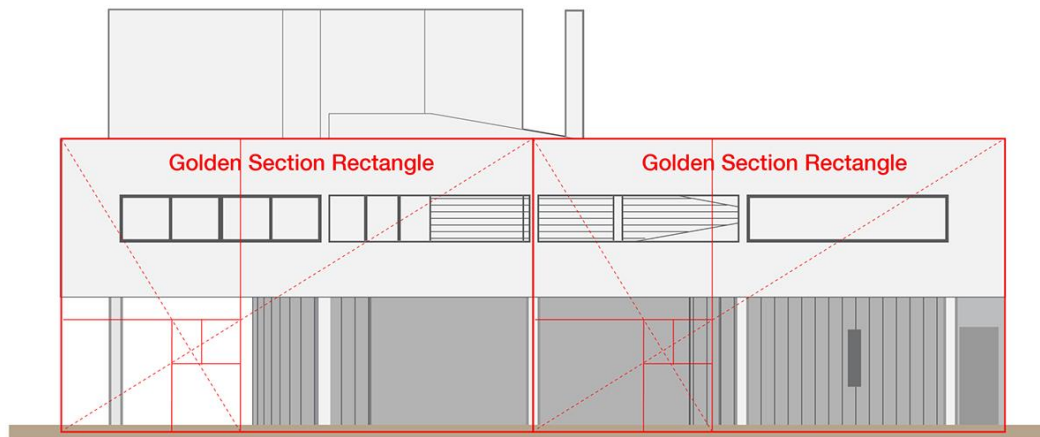
Obr.6: Modulor od Le Corbusiera [4]

3.2 Vybrané diela Le Corbusiera a aplikácia architektonických vzorcov

Na potvrdenie prítomnosti systému *Modulor* a *zlatého rezu* v *Le Corbusierových* stavbách možno využiť množstvo vedeckých metód, ktoré nám umožnia presne identifikovať miesta, kde sú uplatnené. Matematické a geometrické analýzy umožňujú kvantifikovať odchýlky medzi skutočnými a teoretickými proporciami. Pomocou nich môžeme presne určiť, do akej miery sa *Le Corbusier* pridrižoval princípov *zlatého rezu* a *Moduloru*. Tieto analýzy poskytujú objektívne údaje o tom, ako dôsledne boli tieto princípy aplikované v tých ktorých projektoch.

Villa Savoye

Jedno z najznámejších diel *Le Corbusiera*, *Villa Savoye v Poissy*, postavená v rokoch 1928-1931 predstavuje dokonalú syntézu jeho architektonických princípov a fascinácie matematickými proporciami. *5 bodov modernej architektúry* a *Modulor* sa stali východiskom návrhu a prejavili sa na viacerých úrovniach. Tieto princípy sú vnímateľné od rozmerov jednotlivých miestností, cez usporiadanie fasády až po detaily kľučiek či vypínačov. Návrhom miestností v súlade s týmito zásadami sa dosiahla jednotnosť a súlad medzi jednotlivými priestormi. Hmota domu korešponduje so zásadami *Moduloru* a dokonale reflektuje *5 bodov modernej architektúry*. Táto ikonická vila sa stala symbolom modernej architektúry a dodnes inšpiruje architektov po celom svete.



Obr.7: Villa Savoye - geometrická analýza [11]

Unité d'Habitation

Ikonický projekt *Unité d'Habitation* v *Marseille*, z roku 1958 predstavuje jedno z najvýznamnejších diel, v ktorom sa pretavili *Le Corbusierove* teórie o harmonických proporciách vychádzajúcich z *Moduloru* a pomeru *zlatého rezu* ako jeho neoddeliteľnej súčasti. Tento systém sa na objekte prejavil na viacerých úrovniach, od rozmerov jednotlivých bytov, cez usporiadanie fasády až po širšie urbanistické kontexty. Byty boli navrhnuté tak, aby ich rozmery, od výšky stropov až po šírku okien, zodpovedali harmonickým proporciám. Tým sa dosiahla nielen jednotnosť, ale aj pocit rovnováhy a proporcionálnej správnosti. Jasným dôkazom uplatnenia princípu je fasáda objektu. Je rozdelená na pravidelné moduly, ktoré dodávajú budove charakteristický rytmus a zároveň umožňujú flexibilné usporiadanie vnútorných priestorov. Vertikálne komunikácie sú navrhnuté tak aby zapadali do celkového modulárneho systému a zabezpečovali harmonické prepojenie jednotlivých podlaží.

Kaplnka Notre Dame du

Kaplnka *Notre Dame du Haut* v *Ronchamp* z roku 1954 predstavuje jeden z najzaujímavejších prípadov využitia *Moduloru* a *Zlatého rezu* v *Corbusierovej* tvorbe. Na prvý pohľad sa zdá, že táto organicky tvarovaná, takmer sochárska stavba nemá nič spoločné s matematickými princípmi, avšak pri bližšej analýze sa objavujú harmonické vzťahy a proporcie. Hoci sa kaplnka vyznačuje voľnými, organickými tvarmi, jej základná štruktúra je stále modulárna. *Le Corbusier* použil *Modulor* na vytvorenie základnej mriežky, ktorá určovala proporcie jednotlivých častí stavby. Proporcie okien, dverí a iných prvkov sú často založené na princípe *Zlatého rezu*. Proporcie jednotlivých častí stavby sú navzájom prepojené a vytvárajú pocit jednoty a súladu.

Chandigarh

Le Corbusierovo dielo v indickom *Chandigarhu* predstavuje fascinujúci experiment s urbanizmom a architektúrou. Celé mesto je koncipované ako organický celok, ktorý je podriadený presným matematickým princípom. Základom tohto systému je modulárna mriežka. Táto mriežka určuje rozmery jednotlivých blokov, ulíc, ale aj proporcie budov. Proporcie jednotlivých stavieb, od monumentálnych vládnych budov až po obytné domy, sú založené na princípe *Zlatého rezu*. Fasády budov sú členené horizontálnymi a vertikálnymi prvkami, ktoré sú navzájom prepojené pomocou modulárnej mriežky. Táto rytmická členitosť vytvára pocit dynamiky a zároveň dodáva budovám charakteristický vzhľad. *Chandigarh* je príkladom mesta, kde sa modernistické princípy a presné matematické výpočty spojili s praktickými potrebami človeka.

4. Záver

Práca *Le Corbusiera* mala vplyv na množstvo architektov a hnutí, vrátane medzinárodného štýlu, ktorý kládol dôraz na čisté línie a funkčný dizajn až po brutalistov, ktorý prijali jeho dôraz na geometriu. Hoci päť bodov architektúry výrazne ovplyvnilo moderný dizajn, čelili výraznej kritike týkajúcej sa ich praktickosti a relevantnosti. Jednou z hlavných obáv bolo uprednostnenie estetiky pred užívateľským zážitkom. Kritici poukazujú na to, že *Le Corbusierova* vízia často prehliadala sociálny kontext. Kritika identifikuje potrebu rovnováhy medzi týmito inovatívnymi princípmi a zohľadnením ľudskej skúsenosti [10].

Je dôležité poznamenať, že aplikácia týchto princípov nebola vždy striktná a matematicky presná. *Le Corbusier* často uplatňoval určitú mieru voľnosti a intuície, čím dodal svojim projektom osobitý charakter. Jeho prístup možno chápať ako hľadanie rovnováhy medzi prísnu matematikou a estetickým cítením. Môžeme však konštatovať, že rokmi overené princípy vychádzajúce zo Zlatej geometrie, ktoré aplikoval v *Module*, tvoria charakteristickú črtu jeho tvorby a výrazne podporujú jej kvalitu. Odprosenie od ornamentu a zjednodušovanie hmoty na základe geometrie, tak vyvažujú iracionálne pomery a princípy, ktoré svojou kvalitou preberajú rolu hlavného nositeľa krásy v architektúre.

5. Literatúra

- [1] RISSELADA, M.: Rauplan versus plan libre, Adolf Loos, Le Corbusier. Zlín, 2012, ISBN 978-80-87545-04-1
- [2] LE CORBUSIER.: Za novou architekturu. 2015, ISBN 80-86027-23-6
- [3] BEISETZER, L.: Architektúra ako umenie a veda, lexikón architektonickej kompozície väzby architektúry v systéme hodnôt. Bratislava, 1980.
- [4] GANGWAR, G.: Principles and Applications of Geometric Proportions in Architectural Design. Journal of Civil Engineering and Environmental Technology, 2017, p-ISSN: 2349-8404; e-ISSN: 2349-879X
- [5] Archiweb, október 2024. In [online]. Dostupné na internete: <https://www.archiweb.cz/le-corbusier>
- [6] KIRSCH K., Werkbund-Ausstellung „Die Wohnung“. Stuttgart 1927. Die Weissenhofsiedlung
- [7] BANGS, H.: *Návrat posvátné architektury*. Český Tešín, 2008, ISBN 978-80-7309-571-0.
- [8] LUNDAYOVÁ, M.: *Posvátná geometrie*. Praha, 2013, ISBN 978-80-7363-565-7.
- [9] SUTTON, A.: *Pravítka a kružítko, praktické geometrické konstrukce*. Praha, 2017, ISBN 978-80-7363-724-8.
- [10] DRAPÁL, J., DRÁPALOVÁ, O.: *Architektonická kompozice II., Výtvarná geometrie*, Brno, 1992.
- [10] Firstinarchitecture, október 2024. In [online]. Dostupné na internete: <https://www.firstinarchitecture.co.uk/le-corbusiers-five-points-of-architecture/>
- [11] Behance, október 2024, In [online]. Dostupné na internete: <https://www.behance.net/gallery/10026583/Corbusiers-Villa-Savoye-Geometric-Analysis>

Ing. Michal Šveda¹

Študijný program: Teória konštrukcií pozemných stavieb, III. ročník

OPTIMALIZÁCIA PREVÁDZKY TEPELNÉHO ČERPADLA V SYSTÉME S DVOJITOU TRANSPARENTNOU FASÁDOU

OPTIMIZATION OF A HEAT PUMP OPERATION IN A SYSTEM WITH A DOUBLE TRANSPARENT FACADE

Abstrakt

Táto práca sa zameriava na analýzu a optimalizáciu prevádzky tepelného čerpadla v systéme s dvojitou transparentnou fasádou. Experimentálne merania ukázali, že existuje disproporcija medzi vysokým výkonom tepelného čerpadla a nedostatočnou kapacitou vykurovacieho systému, čo vedie k prerušovanej prevádzke čerpadla. V práci je detailne popísaný existujúci systém, prezentované sú výsledky meraní a identifikovaný hlavný problém. Na základe analýzy je navrhnuté riešenie, ktoré spočíva v rozšírení vykurovacieho systému o ďalšie dva fancoily a zvýšení teploty v zásobníku teplej vody. Predpokladá sa, že tieto opatrenia znížia tepelnú zotrvačnosť systému a umožnia kontinuálnu prevádzku tepelného čerpadla.

Abstract

This paper focuses on the analysis and optimization of a heat pump operation in a system with a double transparent façade. Experimental measurements have shown a disproportion between the high performance of the heat pump and the insufficient capacity of the heating system, leading to intermittent operation of the pump. The existing system is described in detail, and the measurement results are presented and analysed to identify the main problem. Based on the analysis, a solution is proposed, which consists of expanding the heating system with two additional fan coils and increasing the temperature in the hot water storage tank. It is expected that these measures will reduce the thermal inertia of the system and enable continuous operation of the heat pump.

Kľúčové slová

tepelné čerpadlo, dvojitá fasáda, optimalizácia, prevádzka

1 ÚVOD

Dvojité transparentné fasády (DTF) sa v súčasnosti považujú za perspektívnu technológiu pre dosiahnutie energeticky efektívnych budov. Ich schopnosť akumulovať a uvoľňovať solárne žiarenie v kombinácii s využitím tepelných čerpadiel ponúka potenciál pre výrazné zníženie spotreby energie. Podľa Kourtzanidisa [1] je efektívne využitie energie získanej z obnoviteľných zdrojov kľúčové pre udržateľnosť moderných budov.

Avšak, napriek ich potenciálu, existujú stále výzvy spojené s optimalizáciou prevádzky DTF. Jednou z nich je optimalizácia geometrie medzipriestoru DTF, ktorá má významný vplyv na energetické zisky celého systému. Predchádzajúce štúdie [2] sa zameriavali na rôzne aspekty DTF, avšak problematika optimalizácie geometrie pre konkrétne fungovanie s tepelnými čerpadlami zostáva stále otvorená.

Cieľom tohto článku je prezentovať výsledky meraní, analyzovať zistené problémy a navrhnúť možné riešenia, ktoré by zlepšili prevádzku tepelného čerpadla a zvýšili energetickú účinnosť celého systému.

Počas prípravnej fázy na experimentálne meranie sa identifikovali významné výkyvy od predpokladaných výsledkov čo bolo spôsobené v nesprávnom nadimenzovaní vykurovacieho systému tepelného čerpadla. Táto skutočnosť podčiarkuje dôležitosť detailnej analýzy prevádzkových parametrov a optimalizácie celého systému.

V nasledujúcich častiach článku sa podrobnejšie zameriava na:

- Popis experimentálneho zariadenia a metód merania
- Analýzu nameraných dát a identifikáciu problému
- Návrh technického riešenia, ktoré zabezpečí nepretržitú prevádzku tepelného čerpadla.

2 EXPERIMENTÁLNE MERANIE

V nasledujúcej kapitole bude podrobne opísaný experimentálny systém pozostávajúci z dvojitej transparentnej fasády (DTF) a tepelného čerpadla vzduch-voda.

Cieľom experimentu je kvantifikovať fyzikálne procesy prebiehajúce vo fasáde, analyzovať ich vplyv na tepelné čerpadlo a získať potrebné údaje na kalibráciu simulačného modelu fasády pre ďalšiu fázu výskumu.

Experiment prebieha na budove univerzitného vedeckého parku Technicom, kde je osadená špeciálne navrhnutá DTF (Obrázok 1).

2.1 Dvojitá transparentná fasáda

Dvojité transparentné fasády (DTF) predstavujú inovatívne riešenie v oblasti stavebníctva, ktoré využíva princíp pasívneho solárneho zisku. Medzi zaskleniami sa vytvára medzipriestor, ktorý umožňuje prirodzené prúdenie vzduchu aj v kritických klimatických podmienkach a zároveň umožňuje naakumulované teplo odvetrať do voľného prostredia. Tento medzipriestor taktiež využíva ohriaty vzduchu na vykurovanie budovy alebo ako zdroj tepla pre iné systémy [3]. Týmto spôsobom sa zvyšuje energetická účinnosť budovy a znižuje závislosť na konvenčných zdrojoch energie [4]. Výkon dvojitej transparentnej fasády (DTF) ovplyvňuje viacero faktorov, vrátane orientácie fasády na svetové strany, geometrie medzipriestoru, typu zasklenia a spôsobu regulácie prietoku vzduchu. [5].

Parametre riešenej DTF:

Dvojitá transparentná fasáda je navrhnutá ako šachtová s priechodným medzipriestorom šírky 580 mm, priebežným po celej výške budovy – 4 podlažia.

Vonkajší plášť tvorí jednoduché bezpečnostné zasklenie. Vnútorňý plášť tvorí v parapetnej časti výplňové murivo z keramických tehál hr. 300 mm s tepelnou izoláciou z minerálnej vlny hr. 120 mm



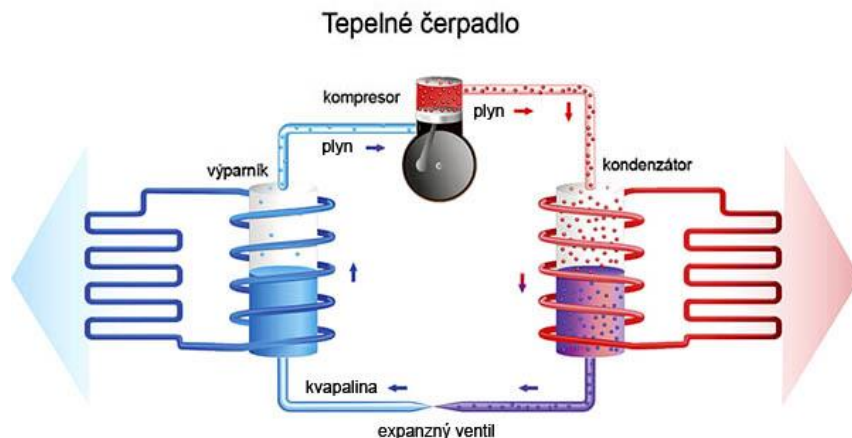
Obrázok 1 DTF Technicom Košice [Autor]

a okennými konštrukciami z hliníkového rámu ($U_w = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), osadený izolačným trojsklom s parametrami $U_g = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $LT = 0,74$ a hodnota $g = 0,54$.

Základný modul fasády tvorí modul $1310 \times 2800 \text{ mm} + 450 \text{ mm}$ prírodná/odvodná žalúzia. 1NP má vyššiu svetlou výšku rozmer modulu $1310 \times 3230 \text{ mm} + 450 \text{ mm}$. Celkový rozmer adaptívnej fasády $5270 \times 15510 \text{ mm} = 81,74 \text{ m}^2$. Fasáda je navrhnutá s variabilnou účinnou výškou medzipriestoru od 3680 mm (1NP) až po maximálnu aktívnu výšku fasády 15060 mm (vývod výdychu cez atiku na strechu) [6].

2.2 Tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlá vzduch-voda predstavujú sľubné riešenie pre vykurovanie budov vďaka ich schopnosti využívať obnoviteľný zdroj energie – teplo z okolitého vzduchu [7]. Tepelné čerpadlo pracuje v cykle kde premiestňuje teplo z oblasti s nižšou teplotou do oblasti s vyššou teplotou (Obrázok 2). Ich účinnosť je však ovplyvnená vonkajšími teplotami a tvorbou námrazy na výparníku, čo môže obmedziť ich prevádzku v kritických klimatických podmienkach [8]. S cieľom minimalizovať tieto obmedzenia a zvýšiť celkovú účinnosť systému sme sa rozhodli pre kombináciu tepelného čerpadla s dvojitou transparentnou fasádou [9].



Obrázok 2 Princíp fungovania TČ [www.tepelnecerpadloshop.sk]

Pre tento experiment bolo zvolené tepelné čerpadlo Hitachi YUTAKI S 2.0 s nominálnym výkonom 11 kW (Obrázok 3). Jeho technické parametre, ako je široký rozsah prevádzkových teplôt a vysoká účinnosť, ho predurčujú pre použitie v kombinácii s dvojitou transparentnou fasádou. Výber tohto konkrétneho modelu bol podmienený jeho schopnosťou efektívne pracovať aj pri nízkych teplotách, čo je kľúčové pre využitie predohriateho vzduchu z medzipriestoru fasády.

Experimentálny systém bude fungovať nasledovne: Tepelné čerpadlo bude odoberať vzduch z medzipriestoru dvojitej transparentnej fasády. Tento vzduch bude predohriaty slnečným žiarením, čím sa zvýši jeho teplota a zlepší účinnosť tepelného čerpadla. Týmto spôsobom sa minimalizuje vplyv nízkych vonkajších teplôt na výkon systému.



Obrázok 3 Tepelné čerpadlo vzduch-voda [Hitachi]

2.3 Popis zapojenia systému

Pre nasmerovanie ohriateho vzduchu z medzipriestoru priamo k nasávacej strane tepelného čerpadla sa navrhol a zhotovil špeciálny zberač. Tento zberač vytvára spojenie medzi medzipriestorom fasády a tepelným čerpadlom, čím umožňuje priame nasávanie ohriateho vzduchu a eliminuje riziko nasávania neohriateho vonkajšieho vzduchu.

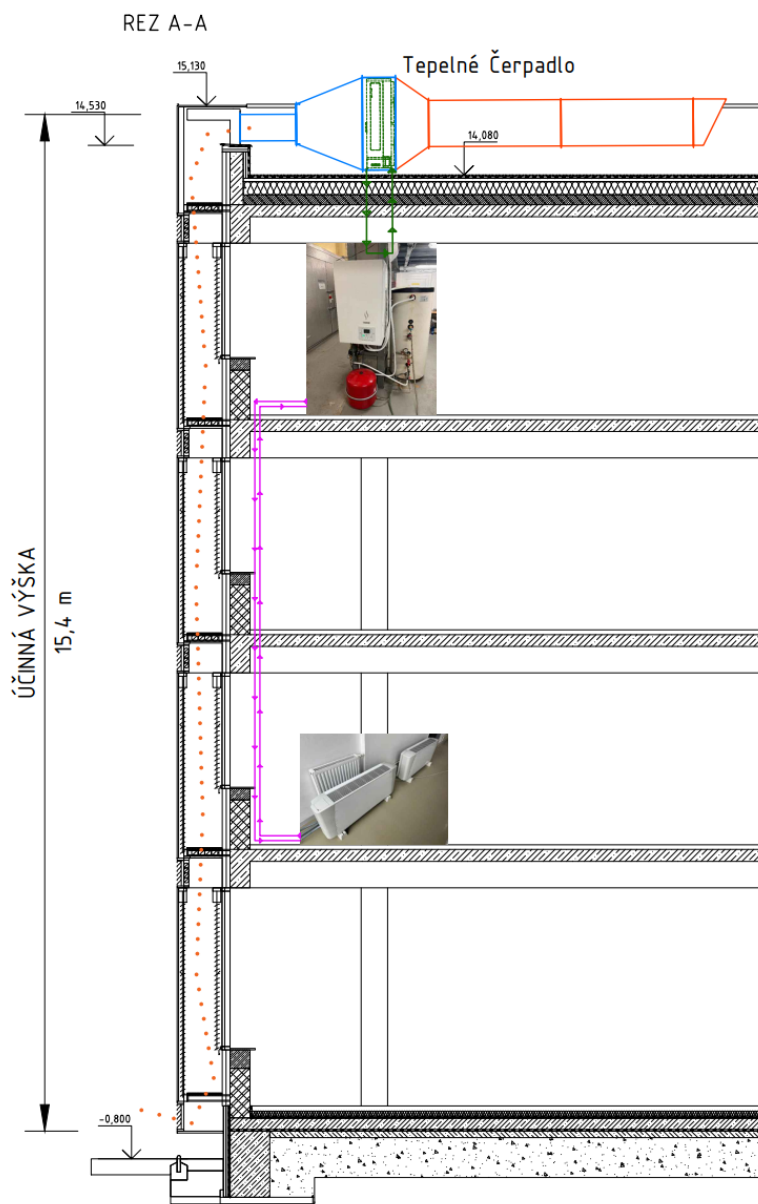
Pripojenie na fasádu bolo realizované cez vopred pripravené otvory v atikovej časti dvojitej fasády (DTF). Tieto otvory sa zlúčili do jedného „lievika“, ktorý je napojený na utesnený box s umiestnenou vonkajšou jednotkou tepelného čerpadla.

Na monitorovanie rýchlosti a objemu vzduchu bol nainštalovaný snímač rýchlosti vzduchu vo fasáde. Kontrolný snímač prúdenia vzduchu je umiestnený v vzduchotechnickom potrubí v ustáľujúcej vzdialenosti za tepelným čerpadlom. Na tento účel slúži redukovaný prierez vzduchotechnického potrubia, s dĺžkou 4,00 m.

Vonkajšia jednotka tepelného čerpadla je prepojená na vnútornú jednotku umiestnenou v kancelárskom priestore pod strechou. Vnútorná jednotka transformuje teplo z chladiaceho okruhu do teplovodného systému, ktorého súčasťou je expanzná nádrž, regulačná zostava, zásobník teplej vody s kapacitou 200 litrov a dve vykurovacie telesá – teplovzdušné fancoily. Zásobník TV sa zahrieva na teplotu + 45 °C.

Fancoily plnia funkciu tepelných odberných jednotiek, čím zabezpečujú kontinuálny odber tepla z tepelného čerpadla a prispievajú k stabilizácii jeho prevádzky. O reguláciu výkonu tepelného čerpadla sa stará interný regulačný systém čerpadla, ktorý nevyžaduje manuálny zásah do jeho prevádzky. Fancoily sú nastavené na maximálny výkon bez možnosti regulácie ich výkonu s cieľom zabezpečiť čo najväčší odber tepla. Vyrobené teplo je odovzdávané do spoločného priestoru vnútorného átria.

Monitoring prevádzky tepelného čerpadla zahŕňa meranie spotrebovanej a vyrobenej energie, pričom tieto údaje sú zaznamenávané prostredníctvom meracej ústredne pripojenej k počítačovému systému pomocou komunikačného protokolu M-Bus.



Obrázok 4 Schéma zapojenia systému [Autor]

3 ANALÝZA MERANIA

Cieľom merania je získať komplexné dátové podklady pre následné vytvorenie simulačného modelu, ktorý by presne reflektoval reálne prevádzkové podmienky systému tepelného čerpadla s dvojitou transparentnou fasádou. Doteraz získané dáta sa využijú na odladenie merania, optimalizáciu prevádzky systému a na zistenie prípadných nedostatkov, ktoré sa pri experimentálnom meraní in-situ môžu vyskytnúť.

Meranie prebiehalo v prípravnom resp. testovacím režime po namontovaní kompletnej technológie tepelného čerpadla a po osadení všetkých snímačov, konkrétne od januára 2024 do mája 2024. Pre účely tejto analýzy sú prezentované dáta zo dňa 1. apríla 2024.

S cieľom zachytiť dynamické zmeny v systéme a zároveň obmedziť objem spracovávaných dát bola zvolená frekvencia merania jedna minúta. Tento časový interval poskytne dostatočnú presnosť pre simulačný model a je taktiež optimálny pre dlhodobé merania z pohľadu objemu a následne spracovanie dát.

Merania boli realizované na experimentálnej dvojitej fasáde budovy Univerzitného vedeckého parku Technicom v Košiciach, orientovanej na juhozápad. Táto orientácia fasády zabezpečila získanie reprezentatívnych dát pre podmienky strednej Európy.

3.1 Merané veličiny

Vonkajšie prostredie:

- Teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]: Meraná pomocou vonkajších teplomerov na streche budovy.
- Rýchlosť a smer vetra [m/s]: Meraná pomocou anemometra umiestneného na streche budovy.
- Slné žiarenie [W/m^2]: Merané pomocou pyranometra umiestneného v rovine meranej fasády.

Dvojitá transparentná fasáda a VZT zberač:

- Teplota vzduchu v medzipriestore [$^{\circ}\text{C}$]: Meraná pomocou termočlánkov umiestnených v rôznych výškach medzipriestoru.
- Rýchlosť prúdenia vzduchu v medzipriestore [m/s]: Meraná pomocou anemetrov umiestnených v rôznych bodoch.

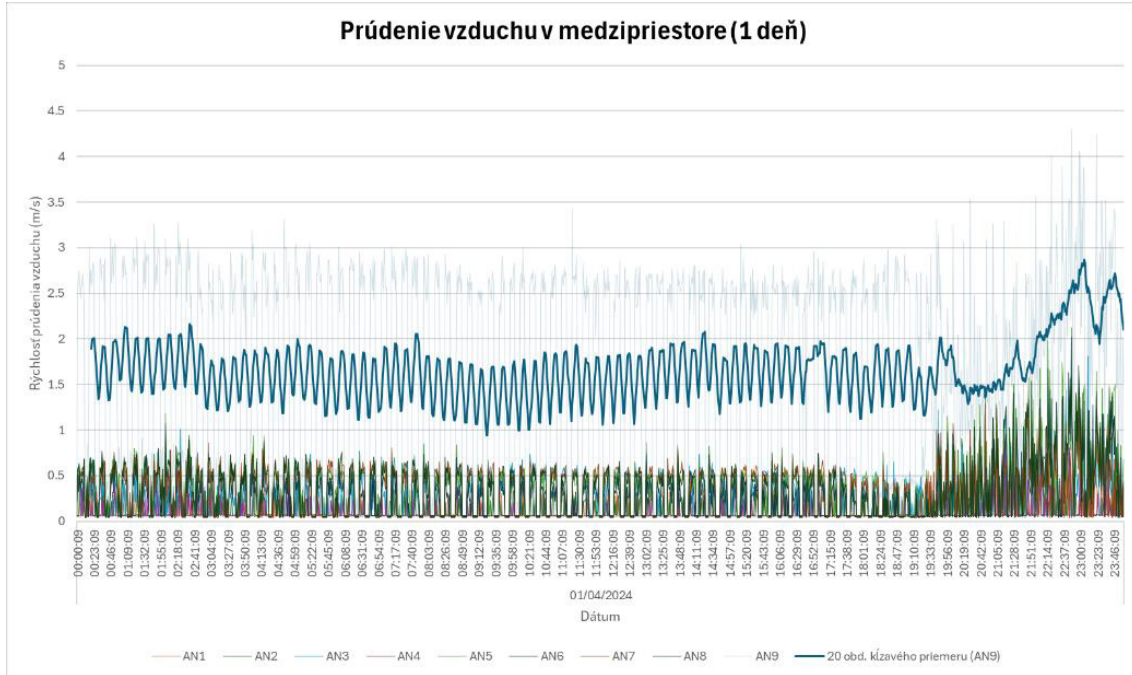
Tepelné čerpadlo:

- Spotrebovaná elektrická energia [kWh]: Meraná pomocou elektromeru.
- Vyrobené teplo [Joul]: Vypočítané na základe známej účinnosti tepelného čerpadla a spotrebovanej elektrickej energie.

3.2 Vyhodnotenie výsledkov

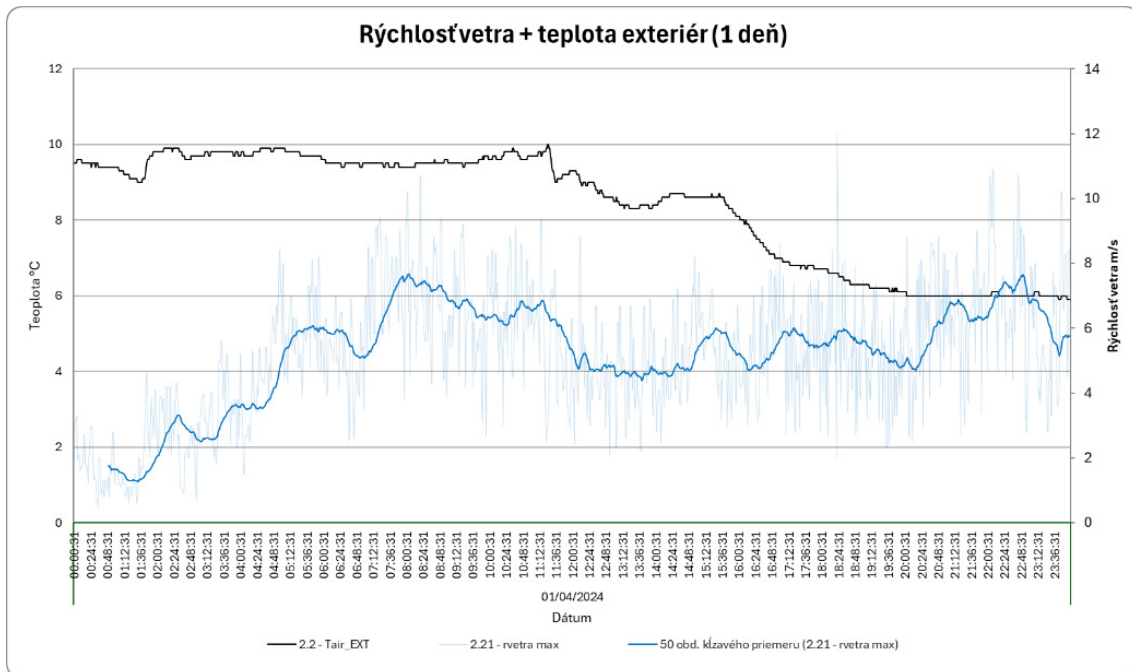
Pri analýze grafov sa podrobne skúmali vzájomné vzťahy medzi teplotami a prúdením vzduchu v riešenej časti fasády a vonkajšími klimatickými vplyvmi. Touto analýzou sa získali hlbšie pochopenie k fyzikálnym procesom prebiehajúcich v medzipriestore DTF. Cieľom je identifikovať dominantné trendy, korelácie medzi jednotlivými parametrami a kvantifikovať vplyv vonkajších faktorov na správanie systému.

Namerané dáta boli spracované v programe Microsoft Excel a vizualizované pomocou čiarových grafov. Na nasledujúcich obrázkoch sú uvedené vybrané výsledky merania z 1. apríla 2024.



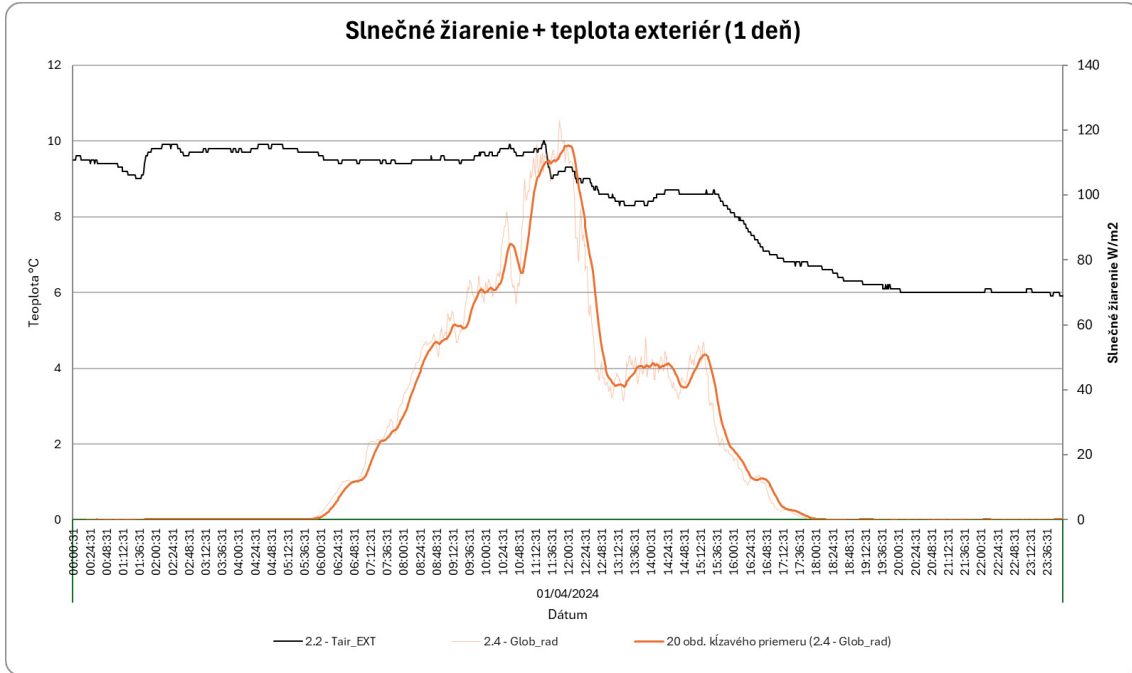
Obrázok 5 Graf prúdenia vzduchu v medzipriestore za 1 deň

Na grafe prúdenia vzduchu (Obrázok 5) pozorujeme výrazné výkyvy a hlavne na snímači AN9, ktorý je umiestnený v ustálenej vzdialenosti v potrubí za tepelným čerpadlom na streche. Po zvýraznení pomocou kľzavého priemeru sa zobrazila pravidelná oscilácia v intervale 20 minút. Takéto výrazné zmeny v nameraných hodnotách sú neštandardné ich zdroj je potrebné preveriť.



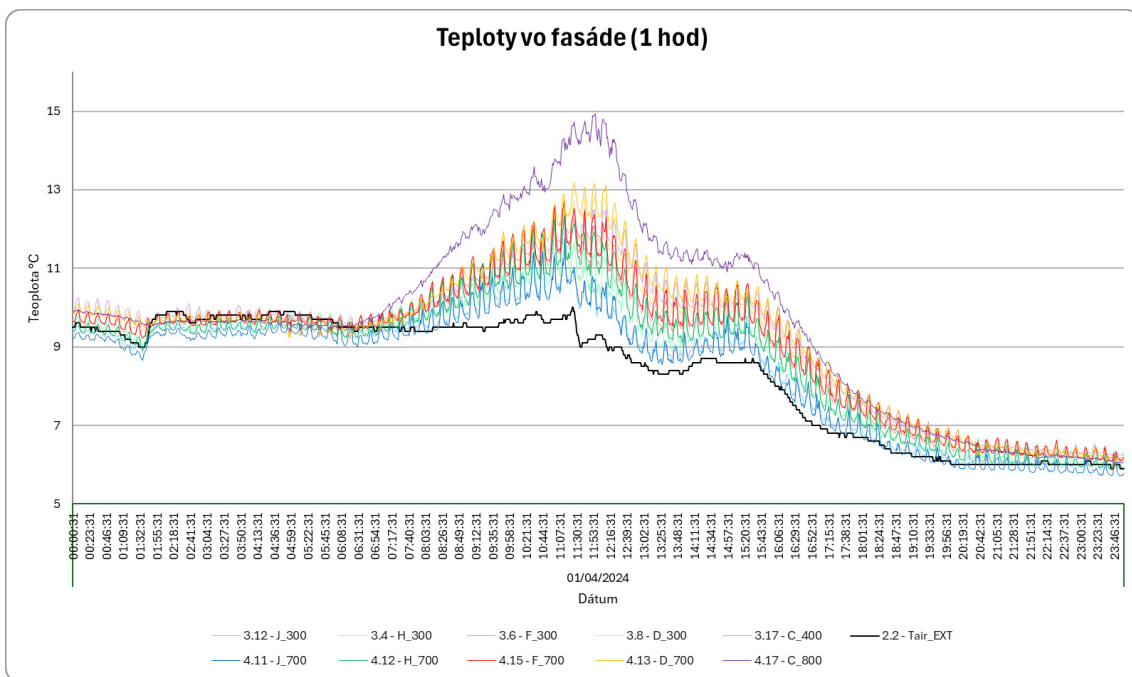
Obrázok 6 Graf rýchlosti vetra za 1 deň

Grafy zobrazujúce rýchlosť vetra (Obrázok 6) a intenzitu slnečného žiarenia (Obrázok 7) nevykazovali podobné pravidelné výkyvy, a ani iné anomálie. Z tohto je zrejmé že vplyv vetra a slnečné žiarenie neboli zdrojom nepravidelného prúdenia vzduchu v medzipriestore meranej dvojitej fasády.

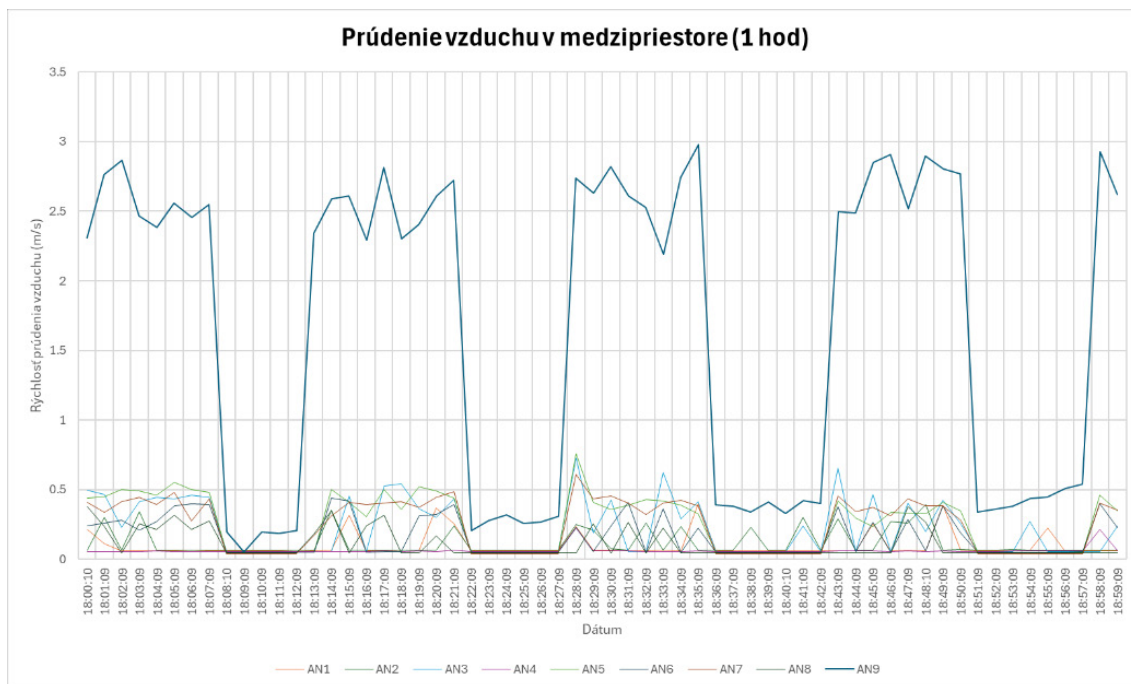


Obrázok 8 Graf priebehu slnečného žiarenia za 1 deň

Na grafe teplôt vo fasáde sú pozorované podobné výkyvy ako na grafe s prúdením vzduchu. Tieto nepravidelné oscilácie v teplotách výrazne sťažujú kvantifikáciu tepelného výkonu fasády a určovanie množstva tepla, ktoré bolo dodané do tepelného čerpadla.



Obrázok 7 Graf teplôt vo fasáde za 1 deň



Obrázok 9 Graf prúdenia vzduchu v medzipriestore za 1 hodinu

Pri detailnejšom priblížení grafu prúdenia vzduchu (s intervalom zobrazenia 1 hodina) sú pozorované výrazné výkyvy prúdenia, ktoré dosahujú hodnoty medzi 2,5 až 3 m/s. Tieto prudké výkyvy sú spôsobené cyklickou prevádzkou tepelného čerpadla, čo naznačuje jeho nekontinuálny chod. Hlavnou príčinou tejto nepravidelnej prevádzky sa javí nedostatočná kapacita na odber tepla, respektíve nepomer medzi množstvom vyprodukovaného a spotrebovaného tepla. Tento jav predstavuje prekážku v analýze vplyvu dvojitej transparentnej fasády na prevádzku tepelného čerpadla, čím nie je možné presne kvantifikovať zlepšenie jeho efektivity pri spolupráci s DTF.

4 NAVRHOVANÉ RIEŠENIE

Na základe analýzy získaných dát a identifikácie hlavného problému – **nedostatočnej kapacity vykurovacieho systému** vzhľadom na výkon tepelného čerpadla – je navrhnuté nasledujúce riešenie:

4.1 Doplnenie vykurovacích telies

Prvým krokom k optimalizácii systému je rozšírenie vykurovacieho okruhu o ďalšie dva fancoily. Týmto opatrením sa zvýši celková vykurovacia plocha a následne aj schopnosť systému odvádzať tepelnú energiu z tepelného čerpadla. Toto riešenie je v súlade s výskumom [10], ktorý potvrdzuje, že zvýšenie počtu vykurovacích telies priamo súvisí so zvýšením potrebného tepelného výkonu.

4.2 Zvýšenie teploty v zásobníku teplej vody

Druhým navrhovaným opatrením je zvýšenie nastavenej teploty v zásobníku teplej vody. Vyššia teplota vody v systéme spôsobí, že vykurovacie telesá budú schopné dodávať vyšší tepelný výkon. Teplotu v zásobníku zvýšime o 10 K, na maximálnu teplotu 55 °C. Maximálna teplota 55 °C bola zvolená s ohľadom na kompresor tepelného čerpadla. Tento krok je podporený zisteniami [11], [12], ktoré ukazujú, že zvýšenie teploty vykurovacej vody má priamy vplyv na výkon vykurovacích telies.

4.3 Očakávané výsledky

Predpokladá sa, že kombinácia týchto dvoch opatrení povedie k nasledujúcim výsledkom:

- **Zvýšenie kapacity vykurovacieho systému:** Doplnenie dvoch fancoilov a zvýšenie teploty v zásobníku výrazne zvýši schopnosť systému odvádzať tepelnú energiu.
- **Zníženie frekvencie zapínania a vypínania tepelného čerpadla:** Vďaka vyššej kapacite vykurovacieho systému bude tepelné čerpadlo môcť pracovať v stabilnejšom režime, čo zníži opotrebovanie jeho komponentov a zvýši jeho životnosť.
- **Zvýšenie energetickej účinnosti systému:** Optimalizáciou prevádzky tepelného čerpadla a zvýšením účinnosti vykurovacieho systému sa dosiahne úspora energie.

4.4 Potenciálne riziká a obmedzenia

V prípade experimentálneho merania nie sú očakávané žiadne obmedzenia ani s tým spojené riziká navrhovaného riešenia.

5 ZÁVER

Na základe uskutočnených experimentálnych meraní sme získali dôležité údaje o správaní dvojitej transparentnej fasády (DTF) v kombinácii s tepelným čerpadlom vzduch-voda. Hlavným problémom, ktorý bol identifikovaný, je cyklická prevádzka tepelného čerpadla spôsobená nepomerom medzi vyrobeným a spotrebovaným teplom, čo viedlo k výrazným výkyvom v teplotách a nepravidelnému fungovaniu systému.

Navrhované riešenie, spočívajúce v doplnení vykurovacích telies a zvýšení teploty v zásobníku teplej vody, predstavuje sľubný prístup k odstráneniu týchto problémov. Predpokladá sa, že implementácia týchto opatrení zabezpečí stabilnejšiu a kontinuálnu prevádzku tepelného čerpadla, čím dôjde k optimalizácii celého systému. Zároveň je očakávané dosiahnutie presnejších údajov o fyzikálnych procesoch vo fasáde, výkone a efektívite tepelného čerpadla pre ďalšiu fázu výskumu.

Na záver je potrebné uviesť, že ďalšie merania a analýzy budú zamerané na detailné overenie efektivity navrhovaných zmien a ich vplyvu na dlhodobú prevádzku systému.

6 POĎAKOVANIE

Tento výskum bol podporený Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVŠ SR a SAV v projekte VEGA 1/0322/23 a Agentúrou na podporu výskumu a vývoja v projekte APVV-21-0144.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] K. Kourtzanidis, K. Angelakoglou, V. Apostolopoulos, P. Giourka, a N. Nikolopoulos, “Assessing Impact, Performance and Sustainability Potential of Smart City Projects: Towards a Case Agnostic Evaluation Framework”, *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 7395*, roč. 13, č. 13, s. 7395, júl. 2021, doi: 10.3390/SU13137395.
- [2] S. Freitas a M. C. Brito, “Solar façades for future cities”, *Renewable Energy Focus*, roč. 31, s. 73–79, dec. 2019, doi: 10.1016/J.REF.2019.09.002.
- [3] W. J. Stec a A. H. C. V. Paassen, “Symbiosis of the double skin façade with the HVAC system”, *Energy Build*, roč. 37, č. 5, s. 461–469, máj. 2005, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2004.08.007.
- [4] M. A. Shameri, M. A. Alghoul, K. Sopian, M. F. M. Zain, a O. Elayeb, “Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving”, 2011, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2010.10.016.
- [5] D. Saelens, J. Carmeliet, a H. Hens, “Energy performance assessment of multiple-skin facades”, *HVAC and R Research*, roč. 9, č. 2, s. 167–185, 2003, doi: 10.1080/10789669.2003.10391063.
- [6] D. Katunský, M. Lopušniak, E. Dolníková, a M. Zozulák, “Adaptívne prvky transparentnej fasády a ich vplyv na kvalitu vnútorného prostredia”, 2018. [Online]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/325811993>
- [7] J. Kazjonovs, A. Sipkevics, A. Jakovics, A. Dancigs, D. Bajare, a L. Dancigs, “Performance analysis of air-to-water heat pump in Latvian climate conditions”, *Environmental and Climate Technologies*, roč. 14, č. 1, s. 18–22, 2014, doi: 10.1515/RTUECT-2014-0009.
- [8] Z. Wang, M. B. Luther, M. Amirkhani, C. Liu, a P. Horan, “State of the Art on Heat Pumps for Residential Buildings”, *Buildings 2021, Vol. 11, Page 350*, roč. 11, č. 8, s. 350, aug. 2021, doi: 10.3390/BUILDINGS11080350.
- [9] G. Kim, L. Schaefer, a J. Kim, “Development of a Double-Skin Façade for Sustainable Renovation of Old Residential Buildings”, *Indoor and Built Environment*, roč. 22, s. 180–190, okt. 2013, doi: 10.1177/1420326X12469533.
- [10] M. OZDEMIR a A. ONAT, “OPTIMIZATION OF THE FAN COIL COOLING SYSTEM AND THE AIR SOURCE HEAT PUMP USING A MODERATED MEDIATION MODEL”, *Thermal Science*, roč. 28, č. 2, s. 1561–1576, 2024, doi: 10.2298/TSCI230810241O.
- [11] D. Kaya, F. Çanka Kılıç, a H. H. Öztürk, “Energy Efficiency in Water Heating-Distribution-Pressurizing Systems”, s. 479–487, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-25995-2_18.
- [12] “Heat Pump Water Heater Installation Best Practices | ENERGY STAR”. Cit: 07. október 2024. [Online]. Available at: https://www.energystar.gov/partner-resources/residential_new/educational_resources/sup_program_guidance/heat_pump_water_heater_guide/installation_best_practices

**THEORY AND STRUCTURES
OF CIVIL ENGINEERING WORKS**

Daniel Beutelhauser¹

Študijný program: D-TKeIS4, ročník: 3.

MERANIE DYNAMICKÉHO SPRÁVANIA VYĽAHČENEJ STROPNEJ DOSKY

Measurement of Dynamic Behaviour of a Voided Floor Slab

Abstract

With the increasing demand for sustainable structural designs, voided reinforced concrete slabs may represent a promising solution due to their reduced material consumption and enhanced structural performance, when compared to full cross-section slabs. However, they also pose some challenges in terms of design, one of which is their dynamic behavior, which is being investigated in this case study.

To better understand the behavior of the voided reinforced concrete slab, a dynamic measurement has been performed. Results of this measurement were compared to results of a finite element analysis and then the model has been verified and validated, based on obtained results.

Kľúčové slová / Key Words

Vyľahčená stropná doska, dynamické správanie, ľudmi vyvolané budenie / voided slab, dynamic behavior, human induced excitation.

1. Úvod

Zmena klímy je v súčasnosti jedným z najzávažnejších problémov našej spoločnosti. Na riešenie tohto čoraz nebezpečnejšieho javu sa vynakladá veľa úsilia, či už na politickej alebo individuálnej úrovni. Európska únia si napríklad stanovila cieľ znížiť emisie skleníkových plynov o 55 % do roku 2030 a dosiahnuť klimatickú neutralitu do roku 2050. Celé toto úsilie je podmienené zásadnými a nezvratnými dopadmi globálneho otepľovania na prírodné procesy na Zemi, ako je stúpanie hladiny oceánov alebo zastavenie Golského prúdu, ako aj ekonomickými dopadmi znečistenia, ako sú zvýšené výdavky na liečbu chorôb spôsobených znečistením vo všeobecnosti [1].

Stavebný priemysel významne prispieva k znečisteniu ovzdušia, pričom štúdie uvádzajú, že výstavba a údržba budov môže predstavovať až 30 % celosvetovej produkcie skleníkových plynov [2]. V štúdiách, ktoré sa týkajú konkrétne Európskej únie, sa uvádza, že toto číslo je ešte vyššie, a to 36 % produkcie skleníkových plynov a 40 % spotreby energie [1]. Medzi ďalšie nepriaznivé vplyvy stavebníctva patria emisie prachu, hluk, produkcia odpadu a spotreba vody [3]. Preto je veľmi žiaduce, aby stavebníctvo hľadalo udržateľnejšie riešenia z hľadiska spotreby materiálov a energie. Jednou z oblastí, kde možno dosiahnuť úspory, je konštrukcia stropných dosiek. Tie sú neoddeliteľnou súčasťou nosných konštrukcií a tvoria podstatnú časť z ich celkovej hmotnosti, pričom sa môže jednať o podiel až 90 % [4]. Použitie dutých plastových tvaroviek, alebo blokov z materiálu s nízkou objemovou tiažou (napr. polystyrénu) v oblasti okolo stredu prierezu dosky, kde by bolo napätie v betóne minimálne, prináša úsporu materiálu, pričom potenciálne zníženie hmotnosti samotnej dosky dosahuje až 30 - 35 % [5], [6]. Okrem toho k úsporám dochádza aj pri konštrukcii

¹ Daniel Beutelhauser, Ing., daniel.beutelhauser@stuba.sk

nadväzujúcich nosných prvkov, ako sú steny, stĺpy a základy, kde vďaka zníženému zaťaženiu od dosiek môže dochádzať ku úspore hmotnosti materiálu až na úrovni 40 % [6].

Medzi iné kľúčové výhody tohto typu dosiek patrí tiež ich nižšia seizmická hmotnosť a schopnosť preklenúť dlhšie rozpätia [6], [7].

Pokiaľ ide o medzný stav použiteľnosti dosiek, ich dynamické správanie je pomerne problematické, pretože rozpätia sú čím ďalej, tým väčšie a konštrukcie sú subtilnejšie, čo sa uplatňuje ešte viac v prípade vyľahčených dosiek [7]. Tento článok preto prezentuje in-situ meranie dynamických vlastností vyľahčenej stropnej dosky, pričom dosiahnuté výsledky sú porovnané s výsledkami dosiahnutými analýzou metódou konečných prvkov (MKP).

2. Meraná konštrukcia a ciele merania

Prvé meranie sa realizovalo na vyľahčenej železobetónovej doske nachádzajúcej sa v objekte predajne SEGUM v Bratislave (Pharos park).

Doska je v tomto prípade obojsmerne vystužená s konštantnou hrúbkou 400mm. Vyľahčenie tvoria vyľahčovacie prvky Cobiax Slim Line 220-240c. Pri okrajoch a v oblastiach stĺpov má doska plný prierez (tj. v tejto oblasti sa nenachádzajú vyľahčovacie prvky). V doske sa nachádza centrálny obdĺžnikový otvor, v ktorom je umiestnené schodisko.

Cieľom realizovaného merania bolo určiť dynamické vlastnosti (vlastné tvary a frekvencie kmitania) vybraného segmentu danej dosky.

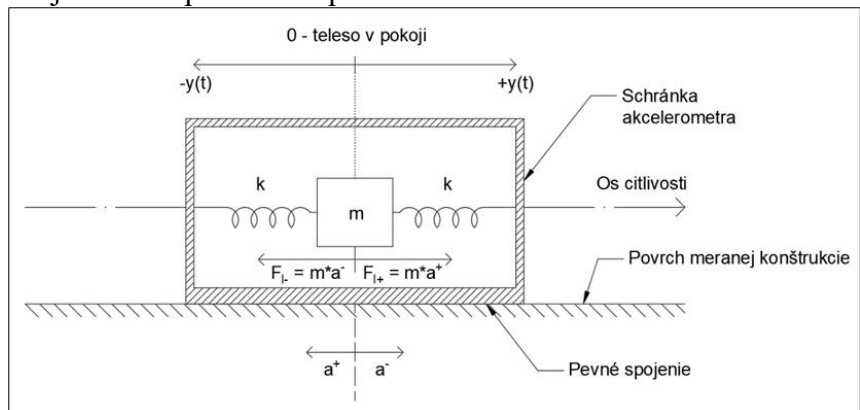
3. Meracie vybavenie

Na účely merania sa použilo 8 piezoelektrických akcelerometrov PCB 393 B31, 2 prevodníky NI-9234 a počítač so softvérom pre záznam údajov. Jednotlivé prvky meracej sústavy sú popísané v nasledujúcich podkapitolách.

3.1. Akcelerometre

Na realizáciu merania sa použili jednoosové piezoelektrické akcelerometre typu IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric).

Piezoelektrický akcelerometer pracuje vďaka priamemu piezoelektrickému efektu. Ten vzniká v určitých materiáloch, tzv. polárnych kryštáloch. Ak na takýto materiál pôsobí mechanické napätie, v materiáli vznikne deformácia sprevádzaná jeho polarizáciou, tj. vznikom elektrického náboja, ktorého veľkosť je priamo úmerná veľkosti tenzoru napätí [8]. Schéma popisujúca princíp vnútorného fungovania takéhoto akcelerometra je na Obr.1.



Obr. 1 - Schéma fungovania jednoosového piezoelektrického akcelerometra

Ak sa teda uvažuje schéma fungovania akcelerometra podľa Obr.1, z piezoelektrického materiálu je pružina, ktorá prepája hmotu so schránkou. Pri zmene mechanického napätia v pružine oproti pokojovému stavu dôjde v materiáli pružiny ku polarizácii a vzniku elektrického náboja q , ktorého veľkosť je priamo úmerná pôsobiacemu zrýchleniu. Tento náboj spôsobí rozdiel elektrických potenciálov na elektródach zariadenia, čím sa vygeneruje elektrické napätie U . Schematické znázornenie fungovania piezoelektrického akcelerometra je na Obr. 2. Vygenerované napätie sa následne zosilní pomocou zosilňovača.

Na základe princípu zosilňovania vygenerovaného náboja sa piezoelektrické akcelerometre delia na 2 konštrukčné typy.

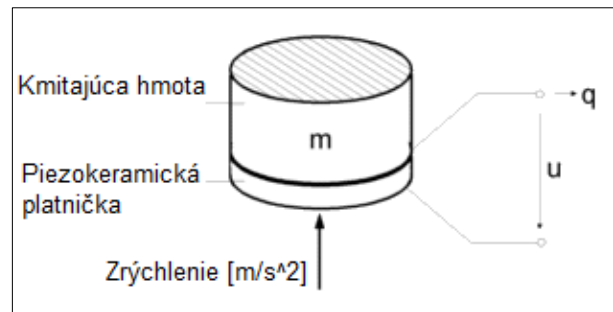
Akcelerometre typu „charge-mode“ generujú elektrický náboj, ktorý sa následne prenáša káblom s vysokou úrovňou tienenia do externého zosilňovača a následne do prevodníka a záznamového zariadenia.

Akcelerometre s vnútorným zosilnením (IEPE) zosilňujú elektrický náboj integrovaným zosilňovačom a ten je následne prenášaný normálnymi káblami k prevodníku a záznamovému zariadeniu. Rozdiely v zapojení medzi týmito podskupinami piezoelektrických akcelerometrov sú znázornené na Obr.3.

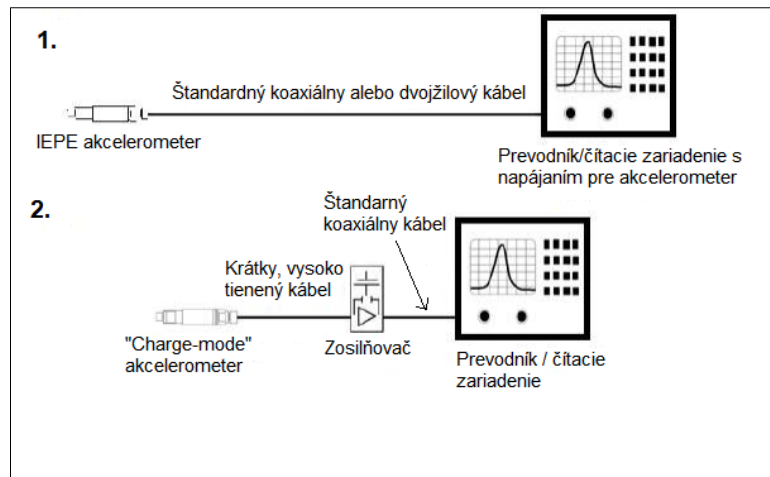
Analógový signál vygenerovaný akcelerometrami sa následne prevedie na digitálny v prevodníkoch, ktorým sa venuje ďalšia podkapitola.

3.2. Prevodníky

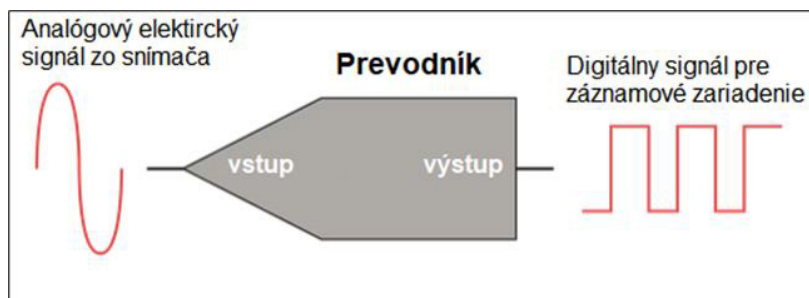
Prevodníky, označované tiež ako ADC (z anglického označenia „Analog-Digital Converter“), sú zariadenia, ktoré prevádzajú analógový elektrický signál zo snímačov na súbor digitálnych dát, ktoré je možné ďalej ukladať a pracovať s nimi. Funkcia prevodníka v procese získavania záznamu je zobrazená na Obr. 4 [9].



Obr. 2 - Schematické znázornenie piezoelektrického akcelerometra



Obr. 3 - 1. zapojenie IEPE akcelerometra, 2. zapojenie "charge-mode" akcelerometra



Obr. 4 - Fungovanie prevodníka v procese získavania záznamu

Z pohľadu princípu vnútorného fungovania sa prevodníky delia na 5 typov, SAR (Successive-Approximation), Delta-Sigma, Dual Slope, Pipelined a Flash. Každý z týchto typov má svoje výhody a nevýhody a je vhodný na iné použitie.

Prevodníky použité pri meraní sú typu Delta-Sigma. Tento typ prevodníkov sa vyznačuje vysokým dynamickým výkonom a inherentnou ochranou proti aliasingu. Maximálne rozlíšenie použitých prevodníkov je 24-bit, najmenšia merateľná frekvencia pri odchýlke -0,1dB je 4,6Hz, resp. 0,5Hz pri odchýlke -3dB.

4. Meranie

Príprava na meranie zahŕňala in-situ meranie pevnosti betónu Schmidovým kladivkom a vytvorenie výpočtového MKP modelu. Princíp merania spočíva v tom, že kladivko pomocou vnútorného pružinového mechanizmu udrie na povrch betónu s pevne určenou energiou. Následne sa odrazí závažie v kladivku a na základe dráhy, ktorú po odraze prejde, sa určia elastické vlastnosti (pevnosť) betónu. Merania sa uskutočnili v šiestich bodoch konštrukcie, pričom v každom bode bolo zaznamenaných päť hodnôt pevnosti. Z týchto výsledkov bol vypočítaný modul pružnosti betónu podľa vzťahov z normy a odborných článkov [10], [11], pričom vypočítaná hodnota bola následne použitá pri tvorbe výpočtového modelu. Geometria konštrukcie bola modelovaná na základe projektovej dokumentácie od prof. Jendželovského. Priemerná hodnota modulu pružnosti pre oblasť dosky s plným prierezom (t.j. bez odľahčenia) bola $E = 34656$ MPa. V odľahčenej oblasti sa na základe odporúčaní výrobcu uvažovalo s modulom pružnosti $E = 0,89 \cdot 34656$ MPa = 30844 MPa. Meranie dynamických vlastností bolo vykonané 7.2.2024. Kmitanie dosky bolo zaznamenané v ôsmich bodoch, ktoré boli určené na základe výsledkov MKP modelu. Meracie zariadenie pozostávalo z ôsmich akcelerometrov PCB 393 B31, dvoch prevodníkov NI-9234 a počítača so softvérom na záznam údajov. Budenie konštrukcie bolo realizované chôdzou po stanovenej dráhe, tzv. heel-dropom (dupnutím zo špičiek na päty) a ambientnými vplyvmi (napr. vietor, doprava v okolí). Celkovo bolo získaných a spracovaných 18 záznamov zrýchlení kmitania konštrukcie.

4.1. Spracovanie záznamov

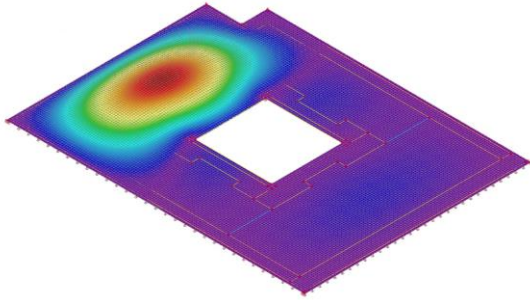
Získané záznamy sa spracúvali v softvéri NI DIAdem. Získané záznamy sa časovo zosynchronizovali, znížila sa ich vzorkovacia frekvencia a prešli filtermi s horným a dolným priepustom (highpass a lowpass). Následne sa vykonala Rýchla Fourierova transformácia (FFT – Fast Fourier Transform) za účelom prevedenia záznamov z časovej do frekvenčnej oblasti. Parametre jednotlivých krokov spracovania sú zhrnuté v Tab. 1.

Tab. 1 - Kroky spracovania záznamov

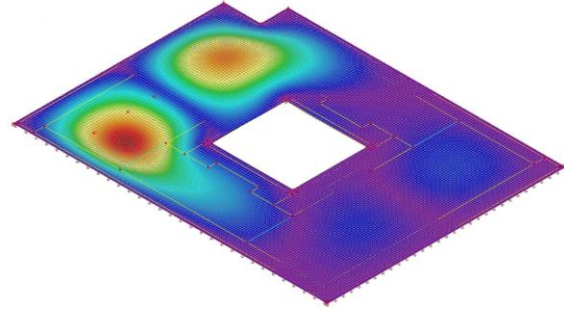
Úkon	Parametre
Filter s dolným priepustom	Typ: Chebyshev Limitná frekvencia: 409,6Hz
Zmena vzorkovacej frekvencie	Požadovaná frekvencia: 1024Hz
Filter s horným priepustom	Typ: Butterworth Limitná frekvencia: 1Hz
Rýchla Fourierova Transformácia	Oknová funkcia: Hanning Dĺžka okna: 30163 vzoriek

4.2. Výsledky meraní – porovnanie modelu a merania

Pre porovnanie výsledkov dosiahnutých analýzou MKP s výsledkami meraní sa uvažovali 2. a 4. vlastný tvar kmitania dosky (Obr. 5 a Obr. 6).



Obr. 5 - 2. vypočítaný vlastný tvar kmitania (9,69Hz)



Obr. 6 - 4. vypočítaný vlastný tvar kmitania (13,81Hz)

Ako z vyššie priložených obrázkov vyplýva, tieto dva vlastné tvary kmitania sa prejavujú na ľavej strane skúmanej dosky, pričom meranie bolo prakticky možné vykonávať len tu.

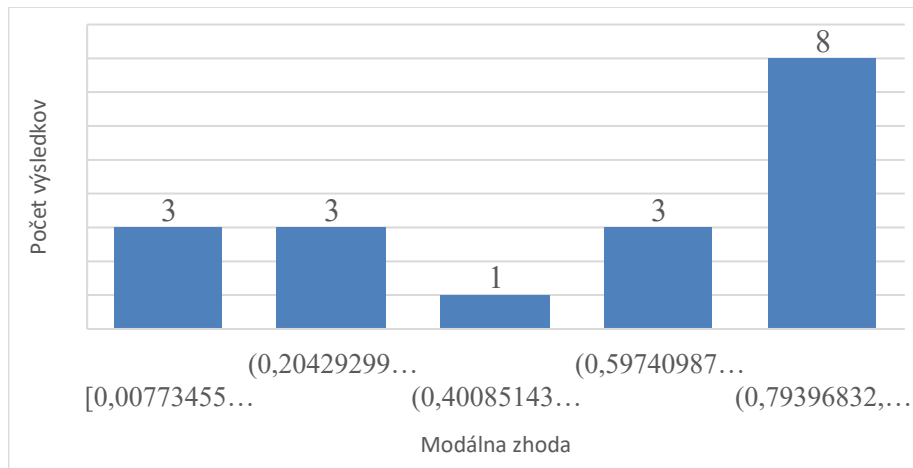
Dôvodom sú rozoberateľné podhľady tvorené sadrokartónovými kazetami, ktoré bolo možné odklopiť a tým sa dostať ku skúmanej nosnej konštrukcii a inštalovať na ňu akcelerometre.

Výsledky merania sa zo záznamov odčítavali pomocou tzv. Peak Picking Method (metóda výberu vrcholov), pri ktorej sa opticky zo záznamov zrýchlení vo frekvenčnej oblasti (po aplikácii Rýchlej Fourierovej transformácie) vyberú lokálne maximá zrýchlení.

Výsledky meraní sa porovnali s výsledkami MKP analýzy a to dvoma spôsobmi. Základné porovnanie spočívalo v porovnaní vlastných frekvencií kmitania reálnej dosky a výpočtového modelu. Komplexnejšie porovnanie spočívalo v aplikácii tzv. Modal Assurance Criterium (Kritérium modálnej zhody).

Histogram znázorňujúci úroveň modálnej zhody dosiahnutej pri 2. vlastnom tvare kmitania pri jednotlivých záznamoch sa nachádza na Obr. 7. Druhý vlastný tvar sa podarilo identifikovať vo všetkých 18 skúmaných záznamoch.

Pre 4. vlastný tvar kmitania sa podobné grafické vyhodnotenie nerobilo, keďže celkovo sa dal 4. vlastný tvar spoľahlivo odčítať len zo 4 záznamov.



Obr. 7 - Histogram rozloženia modálnej zhody medzi výpočtom pri 2. vlastnom tvare kmitania

Pre potreby ďalšej analýzy údajov sa uvažovalo iba so záznamami, pri ktorých bola úroveň modálnej zhody vyššia, ako 90% v prípade 2. vlastného tvaru kmitania (5 záznamov) a vyššia ako 80% v prípade 4. vlastného tvaru kmitania (1 záznam).

Porovnanie výsledkov pre vlastné frekvencie je v Tab. 2. Pre merané frekvencie sa uvažuje priemerná hodnota zo záznamov vybratých na základe vyššie popísaného kritéria.

Tab. 2 - Porovnanie nameraných a vypočítaných vlastných frekvencií kmitania

Č. vl. tvaru	Vlastná frekvencia (meraná) [Hz]	Vlastná frekvencia (vypočítaná) [Hz]	Zhoda [%]
2.	9,32	9,69	95,76
4.	13,94	13,81	99,04

5. Záver

Cieľom tohto príspevku bolo predstaviť štúdiu experimentálneho stanovenia dynamických parametrov vyľahčenej stropnej dosky a porovnať výsledky získané meraním s výsledkami výpočtov. V rámci meraní sa podarilo na skúmanej časti dosky podarilo určiť druhý a štvrtý vlastný tvar merania, pričom ich zhoda s výpočtovým modelom bola všeobecne na pomerne vysokej úrovni. Prezentované meranie je súčasťou výskumnej činnosti realizovanej v rámci písania dizertačnej práce a v budúcnosti naňho bude nadväzovať ďalší výskum.

6. Použitá literatúra

- [1] European Commission, “Stepping up Europe’s 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people,” Brussels, Sep. 2020. Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0562>
- [2] H. Kröhnert, R. Itten, and M. Stucki, “Comparing flexible and conventional monolithic building design: Life cycle environmental impact and potential for material circulation,” *Build Environ*, vol. 222, p. 109409, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109409.
- [3] X. Chuai, Q. Lu, X. Huang, R. Gao, and R. Zhao, “China’s construction industry-linked economy-resources-environment flow in international trade,” *J Clean Prod*, vol. 278, p. 123990, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.123990.
- [4] L. F. Hussein, A. A. S. Al-Taai, and I. D. Khudhur, “Sustainability achieved by using voided slab system,” 2020, p. 020071. doi: 10.1063/5.0000216.
- [5] M. Schnellenbach-Held and K. Pfeffer, “Punching behavior of biaxial hollow slabs,” *Cem Concr Compos*, vol. 24, no. 6, pp. 551–556, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0958-9465(01)00071-3.
- [6] A. J. Pawar, N. S. Mathew, P. D. Dhake, and Y. D. Patil, “Flexural behavior of Two-Way voided slab,” *Mater Today Proc*, vol. 65, pp. 1534–1545, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.04.500.
- [7] N. Jendželovský and K. Vráblová, “Analysis of natural frequencies of voided biaxial concrete slabs,” in *Key Engineering Materials*, vol. 738, Trans Tech Publications Ltd, 2017, pp. 15–24. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.738.15.
- [8] R. Lupták, “Piezoelektrické materiály.”
- [9] G. Smith Maloy, “What Is ADC Converter (Analog-to-Digital Converter)?,” Data Acquisition Knowledge Base.

- [10] B. Graybeal and M. Davis, “Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete,” *ACI Mater J*, vol. 105, pp. 603–609, Apr. 2008.
- [11] Spoločné výskumné centrum *et al.*, *Eurocode 2 : background and applications : design of concrete buildings. Worked examples*. Publications Office, 2014. doi: doi/10.2788/35386.

Roman Červenka¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 3. ročník

ANALÝZA A EKONOMICKÉ POROVNANIE NÁVRHOV OCEĽOVÝCH STĽPOV V POŽIARNEJ SITUÁCIÍ

ANALYSIS AND ECONOMIC COMPARISON OF DESIGNS OF STEEL COLUMNS IN A FIRE SITUATION

Abstract

Load-bearing structures are designed not only for safety, but also for economic efficiency. Currently, designers are increasingly focusing on optimizing the design of load-bearing structures due to the availability of more design options as well as the rising price of materials. In order to design steel columns for fire resistance, the standard STN EN 1993-1-1 can be used or an appropriate buckling length reduction may be applied according to the standard STN EN 1993-1-2. Protection against fire can be achieved with sprays, coatings, and linings, whose thickness is determined by the element's critical temperature. Occasionally, steel columns can be designed without fire protection. As a result of this article, different approaches to the design of steel columns in a fire situation are analyzed and compared according to their economic efficiency.

Kľúčové slová / Key Words

Oceľové stĺpy, vzperné dĺžky, neposuvné uzly, požiar, protipožiarna ochrana

1. Úvod

Ochranu oceľovej nosnej konštrukcie je potrebné zvoliť tak aby bol jej návrh bezpečný a aj ekonomický. V prípade požiaru je potrebné, aby konštrukcia odolala účinkom požiaru na dostatočne dlhý čas, ktorý je potrebný na zabezpečenie ochrany ľudských životov. Nechránená oceľová nosná konštrukcia nedokáže vzhľadom na svoje materiálové vlastnosti dlho odolávať účinkom požiaru, preto je potrebné chrániť oceľovú nosnú konštrukciu napr. nástrekmi, nátermi alebo obkladmi. Oceľové konštrukcie navrhované podľa STN EN 1993-1-2 [1] musia spĺňať kritérium únosnosti, čo znamená, že si musia udržať nosnú funkciu počas požadovaného času vystavenia požiaru. Výpočtový model musí zároveň odrážať očakávané správanie konštrukcie počas požiaru. Jednoduché výpočtové modely a osvedčené riešenia poskytujú konzervatívne výsledky. Ak nie sú použiteľné, je potrebné využiť návrhové metódy založené na spresnených výpočtových modeloch alebo na požiarnej skúškach [2]. Príspevok sa venuje ekonomickému porovnaniu návrhov oceľového stĺpa na základe spresneného výpočtového modelu z programu OZone [3].

2. Zaťaženia

Zaťaženie v požiarnej situácii sa delí na mechanické, ktoré je potrebné pre statický výpočet a tepelné, ktoré je potrebné pre tepelný výpočet. Hlavným pôsobením požiaru je tepelné zaťaženie,

¹ Roman, Červenka, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 512 43 Bratislava

ktoré spôsobuje ohriatie jednotlivých konštrukčných prvkov na vysoké teploty a následne zmenu ich fyzikálnych a mechanických vlastností. Tepelné zaťaženie je vyjadrené teplotnými krivkami alebo požiarными modelmi [4].

Normová krivka ISO834 sa používa pri skúškach požiarnej odolnosti konštrukčných prvkov v skúšobných peciach. Aj keď teplotu za požiaru vyjadruje iba nepriamo, jej zavedenie umožnilo zvýšenie požiarnej spoľahlivosti konštrukcií výpočtami. Zdokonalené modely požiaru zohľadňujú vlastnosti plynu a výmenu hmoty a energie. Jednou z možností je využitie jednozónového modelu, kde sa predpokladá rovnomerné a časovo závislé rozloženie tepla v požiarom úseku. Dvojzónové modely predpokladajú variabilnú hrúbku hornej vrstvy v čase a rovnomernú teplotu, a dolnú vrstvu s teplotou závislou na čase. Vytvoriť jednozónový a dvojzónový model je možné napr. vo výpočtovom programe OZone [3].

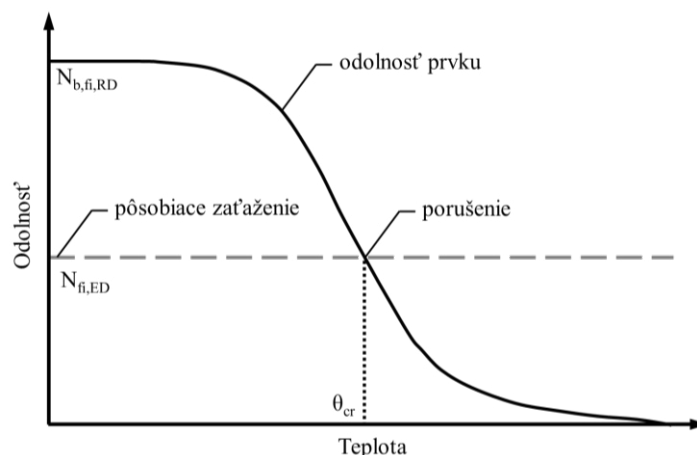
Hlavným rizikom pre konštrukciu počas požiaru je zmena mechanických vlastností konštrukčných materiálov. S rastúcou teplotou sa tieto mechanické vlastnosti znižujú. Redukované hodnoty medze klzu, pevnosti v tlaku, medze úmernosti a modulu pružnosti pre rôzne teploty sa získavajú vynásobením hodnôt za normálnej teploty príslušným súčiniteľom uvedeným v norme STN EN 1993-1-2 [1]. Mechanické zaťaženie pri požiaru E_d sa určí podľa pravidiel pre mimoriadne návrhové situácie, ktoré je v čl. 6.4.3.3 (1) normy STN EN 1990 [5] určené vzťahom.

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; A_d; (\Psi_{1,1} \text{ alebo } \Psi_{2,1})Q_{k,1}; \Psi_{2,i}Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (1)$$

kde symbol $G_{k,j}$ označuje stále zaťaženia, P predpätie, A_d mimoriadne zaťaženia, $Q_{k,1}$ hlavné premenné zaťaženie a $Q_{k,i}$ označuje vedľajšie premenné zaťaženia. Súčinitele $\Psi_{1,i}$ a $\Psi_{2,i}$ pre časť a kvázistálu hodnotu premenných zaťažení sú uvedené v tab. 3.2.1, ktorá je prevzatá z STN EN 1990.

Podľa normy STN EN 1990 [5] sa vo výpočtoch kombinácií zohľadňujú iba zaťaženia, ktoré sa môžu počas požiaru reálne vyskytnúť. Hodnoty premenných zaťažení sa stanovujú podľa pravidiel uvedených v STN EN 1990 [5]. Prípady, kde vzhľadom na roztopenie nie je nutné uvažovať so zaťažením od snehu sa posudzujú individuálne.

Dôležitým parametrom závislým od zaťaženia je kritická teplota prúta. Je to teplota, pri ktorej sa pre danú úroveň zaťaženia očakáva, že nastane porušenie ocelového prvku pri rovnomernom rozložení teploty (obrázok 1).



Obr. 1: Kritická teplota prúta [6]

3. Analýza

Pre porovnanie návrhov ocelového stĺpa bola vytvorená rámová konštrukcia s neposuvnými uzlami s dvoma poľami a štyrmi podlažiami predstavujúca kancelársku budovu. Rozpätia poľí majú dĺžky 7 m, výšky podlaží sú 3 m. Vzdialenosť medzi priečnymi väzbami je 9 m. Na posúdenie bol vybraný stĺp č. 4 nachádzajúci sa v najvyššom podlaží pod plochou strechou. Stále zaťaženie na stĺp je tvorené vlastnou tiažou strešných panelov Kingspan KS1000 RW120 a nosnou strešnou konštrukciou, ktorá je tvorená z väzníc prierezu HEA140 a väzníka prierezu IPE220. Premenné zaťaženie je tvorené snehom, pričom fiktívna budova sa nachádza 2. snehovej oblasti v nadmorskej výške 226,4 m n.m.

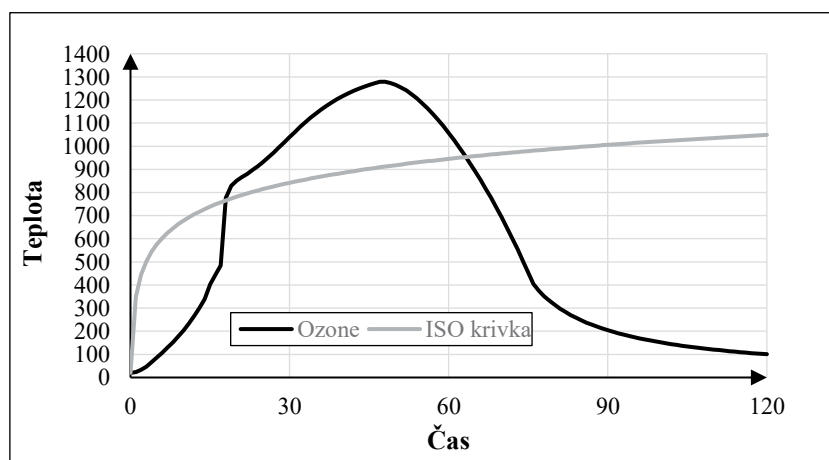
Pre určenie priebehu teplôt v čase a určenie kritickej teploty, pri ktorej prvok zlyhá, prebehla analýza prostredníctvom spresneného požiarneho modelu v programe OZone [3]. Zadefinovaná bola miestnosť o rozmeroch 18 x 7 x 3 m. Na dlhšej strane tvorí väčšiu časť steny (17 m) pridané okná s výškou 1,2 m. Parapet okien sa nachádza vo výške 0,9 m. Plocha miestnosti vystavenej požiaru bola 126 m². Požiarne zaťaženie pre takúto kancelársku miestnosť bolo programom OZone [3] stanovené na úrovni 568,2 MJ/m². Návrhová odolnosť pre pozorovaný stĺp bola určená na R30.

Stĺp bol vo výpočte posudzovaný na vzpernú odolnosť. Pre bežnú teplotu bol posudzovaný podľa postupu určeného v norme STN EN 1993-1-1 [7]. V prípadoch požiarnej situácie boli na základe dosiahnutej teploty stĺpa vypočítanej v programe OZone určené redukčné súčinitele modulu pružnosti a medze klzu ocele podľa normy STN EN 1993-1-2 [1].

3.1 Prierez bez protipožiarnej ochrany optimálne navrhnutý na bežnú teplotu

Stĺp, ktorý je navrhnutý na bežnú teplotu je zaťažený návrhovou silou 216,2 kN, ktorá vznikla z kombinácie uvedených zaťažení. V prípade rámu s neposuvnými uzlami boli vzperné dĺžky rovné systémovej výške stĺpa, t.j. 3 m. Navrhnutý bol prierez HEB 100, ktorý má vzpernú odolnosť pri daných okrajových podmienkach na úrovni 276,1 kN, čo predstavuje využitie prierezu na 78,3 %.

V požiarnej situácii bolo zaťaženie vypočítané z mimoriadnej kombinácie zaťažení s výslednou hodnotou 120,1 kN. Vzperné dĺžky stĺpa neboli redukované. Vzhľadom na to, že bola návrhová odolnosť stĺpa určená na hodnotu R30, tak pozorované teploty stĺpa boli v 30. minúte požiaru. Programom OZone bola vytvorená teplotná krivka pre reálny požiar podľa zadaných vstupov a teplotná krivka na základe normovej krivky ISO 834. Teplotné krivky teplôt v simulovanej miestnosti sú na obrázku 2.



Obr. 2: Teplotné krivky pre reálny požiar a ISO 834

Na základe teplotných kriviek teploty miestnosti, boli programom OZone určené teplotné krivky stĺpa. Kritická teplota stĺpa, pri ktorej by stĺp zlyhal, je 559,01 °C. Kritickú teplotu stĺp dosiahol

približne po 11 minútach požiaru. Teplota stĺpa s prierezom HEB 100 bez protipožiarnej ochrany je v 30. minúte podľa teplotnej krivky pri reálnom požiari 993,72 °C. Pri takejto teplote sú už výrazne redukované mechanické vlastnosti ocele, vo výpočte preto boli redukované hodnoty medze klzu a modulu pružnosti podľa normy STN EN 1993-1-2 [1]. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je len 11,7 kN. Využitie prierezu je 1026 %.

Teplota stĺpa s prierezom HEB 100 bez protipožiarnej ochrany bola v 30. minúte podľa teplotnej krivky ISO 834 na úrovni 814,2 °C. Pre vysokú teplotu boli vo výpočte redukované hodnoty medze klzu a modulu pružnosti podľa normy. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je len 23,5 kN. Využitie prierezu je 511 %.

3.2 Prierez chránený nástrekmi

- *OZone:*

Vo výpočtovom programe OZone bola vybraná protipožiarne ochrana nástrekom, konkrétne nástrekom „Spray Mineral Fiber“ s preddefinovanými vlastnosťami. Teplota stĺpa s prierezom HEB 100 chráneného 6 mm nástreku „Spray Mineral Fiber“ bola v 30. minúte podľa teplotnej krivky reálneho požiaru na úrovni 540 °C. Vo výpočte boli redukované hodnoty medze klzu a modulu pružnosti podľa normy. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je 135,1 kN. Využitie prierezu je 89 %.

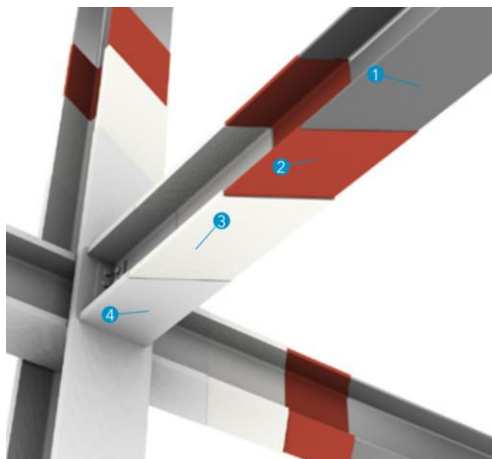
V prípade teplotnej krivky ISO 834 bola dosiahnutá teplota stĺpa 559,4 °C pri hrúbke nástreku 7 mm. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je 120,1 kN. Využitie prierezu je 99,99 %.

- *Promapaint-SC3:*

Promapaint-SC3 je vodou riediteľný intumescentný náter [8]. Hrúbka nástreku je určená podľa katalógu výrobcu. Prierez sa navrhuje na návrhovú teplotu, ktorá by mala byť nižšia ako kritická teplota prvku. V prípade prierezu HEB 100 bola určená návrhová teplota 550 °C, čo predstavuje v prípade kritickej teploty 559,01 °C využitie 97 %. Hrúbka vrstvy je určená na základe súčiniteľa prierezu A_p/V , kde „ A_p “ je plocha povrchu prvku na jednotku dĺžky a „ V “ je objem prvku na jednotku dĺžky. Súčiniteľ je meraný v jednotkách m^{-1} . V prípade návrhovej odolnosti R30 je vybraná hrúbka nástreku 1,951 mm.

- *Promapaint-SC4:*

Promapaint-SC4 je taktiež vodou riediteľný intumescentný náter [8]. Hrúbka nástreku Promapaint-SC4 je určená podobným spôsobom ako Promapaint-SC3. Využitie je taktiež 97 %. Jediná zmena je v hrúbke nástreku, ktorý je v tomto prípade len 0,229 mm. Poradie vrstiev pre aplikáciu protipožiarneho nástreku pre Promapaint-SC3/4 je na obrázku 3.

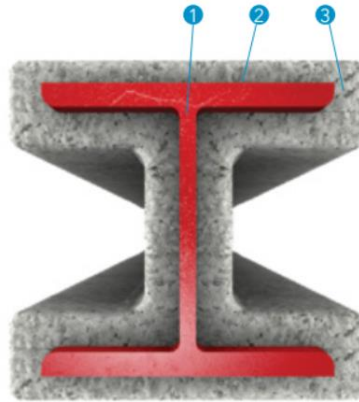


Obr. 3: Promapaint-SC3/SC4:

1 – očistená oceľ, 2 – základová vrstva, 3 – promapaint-SC3/4, 4 – konečný nástrek

- **Promaspray-P300:**

Materiálové zloženie tohto nástreku je na báze vermikulitu a sadry zmiešaných s vodou [8]. Hrúbka nástreku sa tak isto ako u predchádzajúcich nástrekov vyberá podľa katalógu výrobcu. Využitie je taktiež 97 %. Zmena je opäť v hrúbke nástreku, ktorý je v tomto prípade 10 mm. Poradie vrstiev pre aplikáciu protipožiarného nástreku pre Promaspray-P300 je na obrázku 4.



Obr. 4: Promaspray-P300:

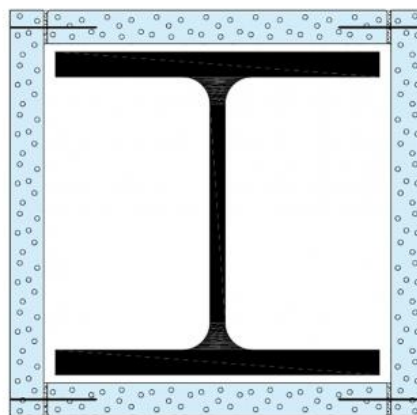
1 – očistená oceľ, 2 – základová vrstva, 3 – promaspray-P300

3.3 Prierez chránený protipožiarnymi obkladmi

- **Knauf Fireboard:**

Knauf FIREBOARD je sadrovláknitá doska, kde je jadro upravenej sadry vystužené sklenenými vláknami a obalené do špeciálnej flísovej tkaniny [9]. Minimálna hrúbka obkladu je 12,5 mm. Možnosť použitia sádrovláknitej dosky sa nachádza aj v programe OZone. Teplota stĺpa s prierezom HEB 100 chráneného 12,5 mm obkladu Knauf Fireboard bola v 30. minúte podľa teplotnej krivky reálneho požiaru na úrovni 316 °C. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je 216,3 kN. Využitie prierezu je len 56 %.

V prípade teplotnej krivky ISO 834 bola teplota stĺpa v 30. minúte 404 °C pri tej istej hrúbke ochranného materiálu. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je 196,3 kN. Využitie prierezu je len 61 %. Obloženie prierezu proti požiarom obkladom Knauf Fireboard je na obrázku 5.

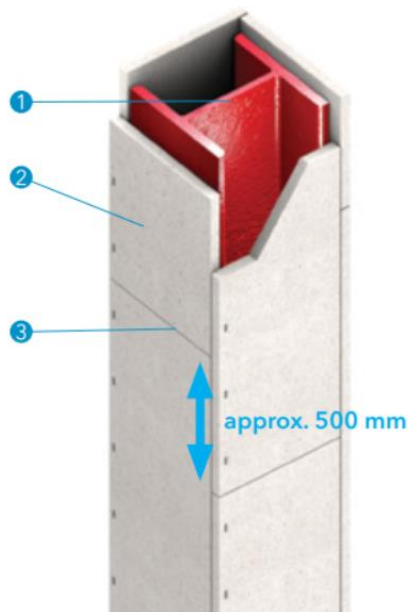


Obr. 5: Ocelový prierez obložený vrstvou protipožiarného obkladu Knauf Fireboard

- **Promatect-H:**

Promatect-H je samonosná protipožiarna doska odolávajúca vlhkosti na cementovej báze [8]. V ponuke materiálov v programe OZone sa nachádza materiál s podobnými vlastnosťami ako je Promatect-H. Teplota stĺpa s prierezom HEB 100 chráneného 8 mm obkladu Promatect-H bola v 30. minúte podľa teplotnej krivky reálneho požiaru na úrovni 468,4 °C. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je 176 kN. Využitie prierezu je len 68 %.

V prípade teplotnej krivky ISO 834 bola dosiahnutá teplota stĺpa 542,8 °C pri hrúbke obkladu 8 mm. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je 133 kN. Využitie prierezu je 90 %. Obloženie prierezu proti požiarnym obkladom Promatect-H je na obrázku 6.



Obr. 6: Promatect-H:

1 – očistená oceľ, 2 – protipožiarny obklad, 3 – spoje dosiek,

3.4 Prierez bez protipožiarnej ochrany navrhnutý na požiaru odolnosť R30

V určitých špecifických prípadoch s kratšími požiadavkami na odolnosť (napr. R30) je možné prvok navrhnuť na odolnosť voči požiaru zväčšením prierezu a bez protipožiarnej ochrany. Prípád analyzovaného stĺpa, ktorý je v najvyššom podlaží a jeho najväčšie zaťaženie je zaťaženie snehom, sa dá považovať za prípad, kde môže byť vhodným riešením práve zväčšenie prierezu. Ako alternatíva k protipožiarnym ochranám je navrhnutý stĺp s prierezom HEB 220, ktorý je navrhnutý primárne na požiaru odolnosť R30.

Kritická teplota stĺpa, pri ktorej by stĺp zlyhal, je 922,02 °C. Kritickú teplotu stĺp dosiahol približne po 31 minútach požiaru. Teplota stĺpa s prierezom HEB 220 bez protipožiarnej ochrany je v 30. minúte podľa teplotnej krivky pri reálnom požiaru 878,9 °C. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je 148,4 kN. Využitie prierezu je 82%.

Teplota stĺpa s prierezom HEB 220 bez protipožiarnej ochrany bola v 30. minúte podľa teplotnej krivky ISO 834 na úrovni 758,5 °C. Odolnosť prierezu pri tejto teplote je len 289,9 kN. Využitie prierezu je 42 %.

Vzhľadom na to že bol prierez stĺpa primárne navrhovaný na požiaru odolnosť R30, tak jeho využitie na bežnú teplotu pri zaťažení návrhovou silou 216 kN je len 9,3 %. Návrhová vzperná odolnosť je až 2335 kN.

4. Výsledky

V nasledujúcich tabuľkách 1 a 2 sú uvedené zhrnuté výsledky z analýzy návrhov, pričom porovnané boli materiálové vlastnosti použitých protipožiarneho materiálov a následne aj ich ceny.

Tab. 1: Porovnanie návrhov ocelového stĺpa v požiarnej situácii

Prierez	Typ ochr. mat.	Produkt	Teplotné zaťaženie	Dosiahnutá teplota pri R30	Hrúbka ochr. mat.	Využitie
			[-]	[°C]	[mm]	[%]
HEB100	Nechránený	-	Bežná teplota	20	-	78
			Hot Zone	994		1026
			ISO 834	815		510
	Chránený nástrekom	Ozone nástrek	Hot Zone	540	6,000	89
			ISO 834	559	7,000	99
		Promapaint-SC3	-	550	1,951	97
		Promapaint-SC4		550	0,229	97
		Promaspray-P300		550	10,000	97
	Chránený obkladom	Knauf Fireboard	Hot Zone	316	12,500	56
			ISO 834	404		61
		Promatect-H	Hot Zone	468	8,000	68
			ISO 834	543		90
HEB220	Nechránený	-	Bežná teplota	20	-	10
			Hot Zone	879		82
			ISO 834	759		42

Tabuľka 1 porovnáva využitie prierezu pri danej hrúbke použitej protipožiarnej ochrany. Na základe použitej teplotnej krivky pri požiari bola navrhnutá hrúbka protipožiarnej ochrany ocelového prierezu stĺpa tak, aby teplota stĺpa v pozorovanom čase (30. minúte) bola nižšia ako kritická teplota, pri ktorej by stĺp zlyhal. Využitie prierezu predstavuje využitie vzpernej odolnosti prierezu pri danej teplote. V prípade nástrekov Promapaint a Promaspray bola vybraná návrhová teplota 550 °C v čase R30 prostredníctvom katalógu výrobcu [8]. Využitie prierezu v tomto prípade predstavuje porovnanie návrhovej teploty a kritickej teploty. Rozptyl vo výsledkov využitia prierezu je pomerne veľký, avšak všetky ochrany boli navrhované tak, aby vyhovel požiadavke odolnosti R30. Najmenej využitý prierez je v prípade použitia Knauf Fireboard, čo vyplýva z jeho minimálnej použiteľnej hrúbky 12,5 mm.

Tabuľka 2 porovnáva návrhy z ekonomického hľadiska. V tabuľke sú uvedené aj hmotnosti materiálov pri potrebnej hrúbke materiálov. Hmotnosti aj ceny materiálov boli vypočítané v potrebnom množstve na ochranu jedného stĺpa prierezu HEB 100. Protipožiarne obklady a nástreky je potrebné aj aplikovať, čo predstavuje ďalšie finančné náklady navyše. V prípade protipožiarneho nástreku je odhadovaný čas práce približne 5 hodín pri hodinovej sadzbe 40 €/hod. vrátane spotrebného materiálu. V prípade protipožiarneho obkladu je odhadovaný čas práce približne 4,5 hodiny pri hodinovej sadzbe 30 €/hod. vrátane spotrebného materiálu. Ako najlacnejšia alternatíva vychádza z porovnania ochrana protipožiarneho obkladom Knauf Fireboard s výslednou sumou 234,2 €. Najdrahšia alternatíva protipožiarnej ochrany je pre posudzovaný prípad protipožiarneho nástreku

Promapaint-SC3 s výslednou sumou 416,1 €. Rozdiel medzi najlacnejším a najdrahším riešením protipožiarnej ochrany je až 78 %.

Tab. 2: Ekonomické porovnanie návrhov ocelového stĺpa v požiarnej situácii

Porovnanie návrhov					Cena pri dodržaní odolnosti R30				
Prierez	Typ ochr. mat.	Hrúbka ochr. mat.	Hmotnosť ochr. mat.	Využitie	Oceľ ¹	Prvok ochrany ¹	Aplikačné práce ^{1,2}	Celková cena	Cenová odchýlka
		[mm]	[kg]	[%]	[€]	[€]	[€]	[€]	[%]
HEB100	-	-	-	78	85,2	-	-	-	-
	-	-	-	1026		-	-	-	-
	-	-	-	510		-	-	-	-
	Ozone nástrek	6,000	nie je známa	89		-	nie je známa	-	-
		7,000		99		-		-	
	Promapaint-SC3	1,951	6,50	97		130,9	200	416,1	78
	Promapaint-SC4	0,229	0,78	97		16,4		301,6	29
	Promatspray-P300	10,000	6,09	97		19,3		304,5	30
	Knauf Fireboard	12,500	13,48	56		14,0	135	234,2	0
				61					
Promatect-H	8,000	8,77	68	52,3	135	272,5	16		
			90						
HEB220	-	-	-	10	303,7	-	-	303,7	30
				82					
				42					

Poznámky:
1) Cena za materiál na 1 stĺp o dĺžke 3 m.
2) Odhadovaný čas práce je 4-5 hod. pri hodinovej sadzbe 30-40€/hod. (vrátane spotrebného materiálu).

5. Diskusia

Ochrana ocelevej nosnej konštrukcie je potrebné zvoliť tak, aby bol jej návrh bezpečný a aj ekonomický. Navrhovanie protipožiarnej ochrany ocelevej konštrukcie je vždy špecifické pre danú konštrukciu a nedá sa tak vzhľadom na variabilitu materiálov, ich vlastností a cien vo všeobecnosti určiť jednoznačne najlepší a najlacnejší materiál. Každý materiál má svoje špecifické vlastnosti. Niektoré môžu byť použité len v interiéri, niektoré aj v exteriéri. Každý má špecifické požiadavky na vlhkosť a na prostredie. Špecifický prípad ako je navrhnutie stĺpa v hornom podlaží, zaťaženým len strešnou konštrukciou a snehom, v kombinácii s požiadavkou na požiaru odolnosť R30 je prípad, kde sa dá použiť aj prierez bez protipožiarnej ochrany. Z ekonomického hľadiska je síce podľa porovnania drahší o 30 % od najlacnejšieho riešenia s ochranou prierezu, na druhú stranu však nie je potrebné vykonať po osadení stĺpa dodatočné práce spojené s požiarou ochranou. Treba však

podotknúť, že ceny za aplikačné práce boli v tomto článku len odhadované a ich reálne hodnoty sa môžu líšiť. Percentuálna odchýlka, resp. rozdiel v konečných cenách sa taktiež môže výrazne zmeniť v závislosti od ceny práce v meste, kraji alebo krajine. Možnosť ušetriť na ochrannom materiáli ponúka aj použitie redukcie vzpernej dĺžky podľa STN EN 1993-1-2 [1] v požiarnej situácii v prípade rámov s neposuvnými uzlami na polovicu systémovej výšky, vďaka votknutiu horúceho stĺpa do studených stĺpov nad a pod ním. Táto možnosť vo výpočte nebola využitá pre lepšie porovnanie výsledkov, ale aj kvôli tomu, že je otáznou, či je vzperná dĺžka stĺpa v požiarnej situácii skutočne polovičná. Na základe výsledkov z tabuľky pre danú konštrukciu vychádza ako najlacnejšie riešenie použitie protipožiarneho obkladu Knauf Fireboard, ktorý poskytuje aj dostatočnú rezervu v prípade požiaru vzhľadom na to, že je jeho využitie v 30. minúte požiaru len 61 %.

6. Záver

Z výsledkov analýzy a ekonomického porovnania návrhov ocelového stĺpa vyplýva, že sa návrh protipožiarnej ochrany nedá zovšeobecniť. Nato, aby bol zvolený nie len bezpečný, ale aj ekonomicky efektívny návrh konštrukcie na požiar je potrebné aby projektanti brali do úvahy všetky špecifické aspekty danej konštrukcie, ceny materiálov a ceny prác.

Literatúra

- [1] European Committee for Standardization (CEN), EN 1993-1-2 – Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules – Structural Fire, Brussels, Belgium, 2004.
- [2] M. Bellová, J. Olbřímek, A. Osvald, J. Prochádzka, R. Štefan a M. Štujberová, Navrhovanie konštrukcií na požiaru odolnosť podľa eurokódov, Bratislava: MABAG spol. s r.o., 2010, pp. 1-216.
- [3] ArcelorMittal, „OZone 3.0.2,“ University of Liege, Liege, 2017.
- [4] F. Wald, J. Macháček, M. Jandera, J. Dolejš, Z. Sokol a P. Hájek, Structural Steel Design according to Eurocodes, Praha: Czech Technical University Publishing House, 2012, pp. 1-193.
- [5] European Committee for Standardization (CEN), EN 1990 - Basis of structural design, rue de Sassart 36, B-1050 Brusel, 2009.
- [6] M. Štujberová, Vybrané problémy navrhovania konštrukcií na účinky požiaru, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Nakladateľstvo STU, 2009.
- [7] European Committee for Standardization (CEN), EN 1993-1-1 – Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules – General rules for buildings, Brussels, Belgium, 2006.
- [8] d. Promat, „Promat,“ [Online]. Available: <https://etex.azureedge.net/pi704519/original/240910135/structural-steel-protection-handbook-promat-see-en-2024-01>. [Cit. 18 10 2024].
- [9] s. KNAUF, „knauf,“ [Online]. Available: https://www.knauf.sk/doska-knauf-fireboard#showtab-tab_47_3. [Cit. 18 10 2024].

Tadeáš Fecko¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: tretí

VYHODNOTENIE PILOTNÝCH EXPERIMENTOV PRETLAČENIA LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK VYROBENÝCH Z BETÓNU S OBSAHOM HRUBÉHO RECYKLOVANÉHO KAMENIVA

EVALUATION OF PILOT EXPERIMENTS ON PUNCHING OF FLAT SLABS CAST FROM CONCRETE WITH COARSE RECYCLED AGGREGATES

Abstract

Recycled aggregate as a substitute for natural aggregate is obtained by processing construction and demolition waste. Due to its ecological and economic aspects and the limited availability of natural aggregate, the price of this aggregate should decrease in the coming years. In practice, there are doubts among engineers whether recycled aggregate is a reliable substitute for natural aggregate. This article describes the casting, preparation, and testing of three reinforced concrete slabs cast from concrete with recycled aggregate. The results of these experiments are compared with the design approach for calculating the punching shear resistance according to the second generation of Eurocode 2. That allows for the first time to consider the presence of recycled aggregate in concrete. The tests showed a decrease in the strength and modulus of elasticity of concrete made of recycled aggregate but did not prove a decrease in the punching shear resistance of slabs. The results of calculations indicate a conservative value of punching shear resistance compared to experiments at the level of 1.16 and 1.23.

Kľúčové slová

recyklované kamenivo, betón z recyklovaného kameniva, šmyková odolnosť proti pretlačeniu, výpočtový postup, experiment

1. Úvod

Betón ako najpoužívanejší stavebný materiál spotrebuje veľké množstvo kameniva. To začína postupne vytvárať na Slovensku, ale aj susednom Česku či zahraničí nedostatok prírodného kameniva, ktoré v betóne zastupuje funkciu plniva. Kvôli klesajúcemu počtu kameňolomov vzniká potreba prevozu prírodného kameniva na veľké vzdialenosti, čo je neekologické (prach, hluk, spotreba paliva, práca) a kvôli tomu aj neekonomické (vyššia cena) [1]. Najvhodnejšou náhradou prírodného kameniva sa zdá byť recyklované kamenivo (Recycled aggregate – RA), ktoré sa vyrába spracovaním stavebného odpadu. Tento odpad končí vo väčšine prípadov na skládkach bez ďalšieho využitia.

Môj experimentálny program skúma vplyv hrubého betónového recyklovaného kameniva (Coarse recycled concrete aggregate – CRCA) na mechanické vlastnosti betónu a šmykovú odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek. Šmyková odolnosť zistená pri experimente je následne

¹ Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

porovnávaná s výpočtovým postupom podľa druhej generácie Eurokódu 2, ktorý umožňuje zohľadniť prítomnosť recyklovaného kameniva v betóne.

2. Betón s obsahom recyklovaného kameniva

RA má samo o sebe takmer vždy nižšiu pevnosť v tlaku v porovnaní s prírodným kamenivom. Zapríčiňuje to najmä cementový kameň, ktorý ostáva prilepený na prírodnom kamenive. Tento cementový kameň má vysokú pórovitosť a častokrát obsahuje mikrotrhliny, ktoré zhoršujú jeho mechanické vlastnosti. Všeobecne platí, že čím väčšie RA uvažujeme, tým sa menej prejavujú zhoršené vlastnosti tohto kameniva. Z tohto dôvodu uvažujem iba s náhradou hrubého prírodného kameniva (Coarse natural aggregate – CNA).

V betóne z recyklovaného kameniva (Recycled aggregate concrete – RAC) vznikajú dve prechodové zóny rozhrania (Interfacial transition zone – ITZ) – medzi pôvodným prírodným kamenivom a prilepeným cementovým kameňom a medzi týmto cementovým kameňom a novým cementovým tmelom. Oba tieto ITZ sú oslabené spomínanou pórovitosťou a mikrotrhlinami. To zapríčiňuje zhoršené mechanické vlastnosti a vlastnosti spojené s trvanlivosťou takého to betónu.



Obr. 1: Betónové recyklované kamenivo frakcie 4/16

Publikácie [2] a [3] popisujú pokles pevnosti betónu v tlaku, ťahu a pokles modulu pružnosti. RA tiež spôsobuje horšiu spracovateľnosť čerstvého betónu a zvyšuje zmršťovanie pri vysychaní.

3. Experimentálny program

Pre prvotný experimentálny program boli zvolené 3 železobetónové dosky rozmeru 2,50 x 2,50 x 0,25 m, ktorých betón bol uvažovaný s 0, 50 a 100 % náhradou hrubého prírodného kameniva recyklovaným. Experimentálny program nadväzuje na medzinárodný projekt, v ktorom je skúmaný vplyv seizmických a cyklických účinkov na šmykovú odolnosť lokálne podopretých dosiek dvojpodlažnej skeletovej konštrukcie vyrobenej z betónu s obsahom hrubého recyklovaného kameniva. Tvar dosiek, ich vystuženie a receptúra betónu preto odpovedá konštrukcii v spomínanom projekte.

Tento výskum tiež nadväzuje na podobné výskumy po celom svete. V ďalších publikáciách popisujem porovnanie experimentov od roku 2015 po súčasnosť, kde výskumníci overovali šmykovú odolnosť proti pretlačeniu dosiek bez šmykovej výstuže vyrobených z betónov s obsahom CRA. Prítomnosť recyklovaného kameniva v betóne ovplyvňovala mechanické vlastnosti betónu a tiež ovplyvňovala šmykovú odolnosť proti pretlačeniu týchto dosiek. Výsledky týchto experimentov ukázali, že pri 50 % náhrade CRA klesla pevnosť betónu priemerne o 8,7 % a pri 100 % náhrade o 10,9 %. Podobne to bolo aj pri module pružnosti, ten klesol pri 50 % náhrade priemerne

o 8,2 % a pri 100 % náhrade bol priemerný pokles väčší, a to 17,3 %. Šmyková odolnosť klesla pri 50 % náhrade priemerne iba o 5,4 % a pri 100 % náhrade o 7,4 %.

Pri takmer všetkých týchto experimentoch však boli skúšané dosky zmenšených rozmerov, hrúbky 50 až 120 mm. V mojom experimente skúmam dosky hrúbok 250 mm, ktoré odpovedajú hrúbkam reálnych konštrukcií.

4. Receptúra použitých betónov

Pre betóny dosiek bola predpísaná receptúra betónu, ktorá odpovedala medzinárodnému projektu, ktorý spomínam vyššie. Uvažovaná bola náhrada CNA s CRCA. Toto kamenivo bolo poskytnuté od dodávateľa z Bratislavy, ktorý vyrába recyklované kamenivo práve zo stavebného odpadu zo zdemolovaných konštrukcií. Navrhnutý bol tiež ekologickejší cement CEM II/A-LL 42,5 R, ktorý obsahuje 6 – 20 % vápenca, čiže znižuje potrebu slinku.

Tab. 1: Zložky betónov skúšobných vzoriek [kg/m³]

Vzorka	Úroveň náhrady CNA	Voda	Cement	Jemné prírodné kamenivo	Hrubé prírodné kamenivo	Hrubé recyklované kamenivo	Plastifikátor
D1.0	0 %	160	360	770	1040	0	2,8
D1.1	50 %				520	520	0,5
D1.2	100 %				0	1040	

Pri výrobe betónu prvej vzorky bola dosiahnutá riadka konzistencia čerstvého betónu, čo je spätne pripisované menej vhodnému typu použitého plastifikátora. To bolo dôvodom redukcie množstva plastifikátora pre ďalšie 2 vzorky na 0,5 kg/m³.

5. Skúšobné dosky

Betonáž troch dosiek prebiehala v závode STRABAG v Seredi. Rozmer dosiek bol 2,50 x 2,50 x 0,25 m a vystuženie tvorili prúty priemeru 12 mm po 100 mm pri hornom povrchu, ktoré dopĺňala konštrukčná a lemovacia výstuž priemeru 10 mm. Pre manipuláciu s doskou bolo navrhnutých štandardných 6 hákov priemeru 14 mm. Dosky boli navrhnuté bez šmykovej výstuže. Účinná výška dosiek bola uvažovaná 218 mm a stupeň vystuženia ohybovou výstužou 0,52 %.



Obr. 2: Pripravená výstuž dosky D1.0 pred betonážou

6. Mechanické vlastnosti betónu

Na zistenie mechanických vlastností betónu dosiek boli vyrobené skúšobné kocky, valce a hranoly. Keďže skúšanie dosiek prebiehalo približne po 35 dňoch od ich betonáže, teda po relatívne krátkom čase, skúšobné telesá bolo potrebné odskúšať v podobnom čase.

Na kockách a valcoch bola zisťovaná pevnosť betónu a na hranoloch modul pružnosti.



Obr. 3: Skúšanie pevností valcov vzorky D1.2

Tab. 2: Mechanické vlastnosti betónov vzoriek

Vzorka	Úroveň náhrady CNA	Priemerná valcová pevnosť $f_{cm,cyl}$ [MPa]	Štand. odchyl. [MPa]	Priemerná kocková pevnosť $f_{cm,cube}$ [MPa]	Štand. odchyl. [MPa]	Priemerný modul pružnosti E_c [GPa]	Štand. odchyl. [GPa]
D1.0	0 %	39,6	1,0	51,3	1,7	38,8	1,9
D1.1	50 %	33,2	1,3	43,2	1,7	31,6	0,5
D1.2	100 %	33,4	2,6	44,3	1,3	29,1	0,3

Z Tab. 2 vyplýva, že pri 50 % náhrade kameniva bol zaznamenaný pokles kockovej a valcovej pevnosti betónu o 16 % a modulu pružnosti o 18,6 %. 100 % náhrada ukázala veľmi podobné výsledky, kocková pevnosť klesla oproti referenčnej vzorke o 13,6 % a modul pružnosti klesol o 25 %.

7. Skúšky dosiek v laboratóriu STU

Všetky dosky boli skúšané v Centrálnom laboratóriu STU v Bratislave v Trnávke. Skúšanie prebehlo v apríli a septembri 2024. Použitá bola dobre overená skúšobná zostava pozostávajúca z hydraulického lisu pod doskou, ktorý tlačí dosku smerom nahor a posunu bráni 8 kotevných tyčí, ktoré sú prichytené k doske a k hrubej železobetónovej podlahe laboratória. Tie simulujú plošné zaťaženie na lokálne podopretej doske. Stĺpové podopretie je nahradené 6 cm hrubou oceľovou

platňou rozmeru 300 x 300 mm. Pod touto platňou a na koncoch kotevných tyčí sú kaloty, ktoré umožňujú potrebné natočenie dosky počas skúšky.

Počas skúšky je nepretržite meraná sila v lise, natočenie dosky a deformácie dosky pomocou šiestich LVDT snímačov a 12 analógových výchylkomerov. V jednotlivých zaťažovacích krokoch je deformácia overovaná pomocou fotogrametrie, ktorá umožňuje z fotografických snímok papierových terčikov prilepených na doske vyčíslieť vzájomnú zmenu polohy daných bodov. V týchto zaťažovacích krokoch sú tiež zakresľované trhliny na hornej (ťahanej) strane dosky a taktiež je meraná ich šírka.



Kotevná platňa
s kalotou

Libela

Analógový
výchylkomer

Oceľ. platňa
simulujúca stĺp
Silomer

Kalota

Hydraulický lis

Kotevná tyč

Obr. 4: Skúšobná zostava dosiek

8. Výpočet šmykovej odolnosti podľa druhej generácie Eurokódu 2

Návrhový postup k výpočtu šmykovej odolnosti proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek bez šmykovej výstuže uvažujem podľa druhej generácie Eurokódu 2 [4], pretože tá už uvažuje aj s prítomnosťou recyklovaného kameniva v betóne. Druhá generácia Eurokódu 2 prichádza s mierne poupraveným vzťahom pre výpočet šmykovej odolnosti bez šmykovej výstuže oproti prvej generácii. Uvažuje s takzvanou účinnou výškou v šmyku a tiež zohľadňuje maximálnu veľkosť zrna kameniva. Základný vzorec pre výpočet šmykovej odolnosti bez šmykovej výstuže popisuje vzťah (1).

$$\tau_{Rd,c} = \eta_{\tau} \cdot \frac{0,6}{\gamma_V} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v} \right)^{1/3} \cdot b_{0,5} \cdot d_v \leq \frac{0,6}{\gamma_V} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_{0,5} \cdot d_v \quad (1)$$

kde η_{τ} je redukčný súčiniteľ zohľadňujúci prítomnosť recyklovaného kameniva v betóne, k_{pb} je koeficient zvyšujúci šmykovú pevnosť proti pretlačeniu počítaný podľa rovnice (3), d_{dg} je parameter veľkosti kameniva zohľadňujúci drsnosť v zóne porušenia, $d_v = (d_{vx} + d_{vy})/2$ je účinná výška dosky

v šmyku, b_0 je dĺžka obvodu teoretickej podpory (stĺpa), $b_{0,5}$ je dĺžka kontrolného obvodu vo vzdialenosti $0,5d$ od líca podpory.

$$\eta_{\tau} = 1 - 0,2 \cdot \alpha_{RA} \quad (2)$$

$$1 \leq k_{pb} = 3,6 \cdot \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0,5}}} \leq 2,5 \quad (3)$$

vo vzťahu (2) α_{RA} je percento náhrady hrubého prírodného kameniva recyklovaným (podiel množstva recyklovaného kameniva ku celkovému množstvu všetkého kameniva použitého v betóne). a_p vo vzťahu (4) je vzdialenosť medzi ťažiskom podpory a miestom nulových radiálnych momentov. V prípade, že a_p je menej ako $8d$, môžeme d_v v zátvorke v rovnici (1) nahradiť hodnoty a_{pd} z rovnice (4).

$$a_{pd} = \sqrt{\frac{a_p}{8}} \cdot d_v \quad (4)$$

$$d_{dg} = 16 \text{ mm} + D_{\text{lower}} \leq 40 \text{ mm} \quad (5)$$

9. Vyhodnotenie výsledkov

Skúšky dosiek ukázali, že pri všetkých troch doskách bola dosiahnutá veľmi podobná šmyková odolnosť. Najvyššiu šmykovú odolnosť dosiahla doska D1.1, ktorá obsahuje 50 % náhradu CNA. Zaujímavé ale je, že betón tejto dosky spolu s doskou D1.2 dosiahol nižšiu pevnosť v tlaku, z čoho sa očakávalo, že dosiahnu nižšiu šmykovú odolnosť. Pri doskách experimentálneho programu je jedinou premennou typ použitého hrubého kameniva, z čoho by sa dalo usúdiť, že recyklované kamenivo mohlo napomôcť k zvýšeniu šmykovej odolnosti vďaka zaklineniu zŕn kameniva v šmykovej trhline.



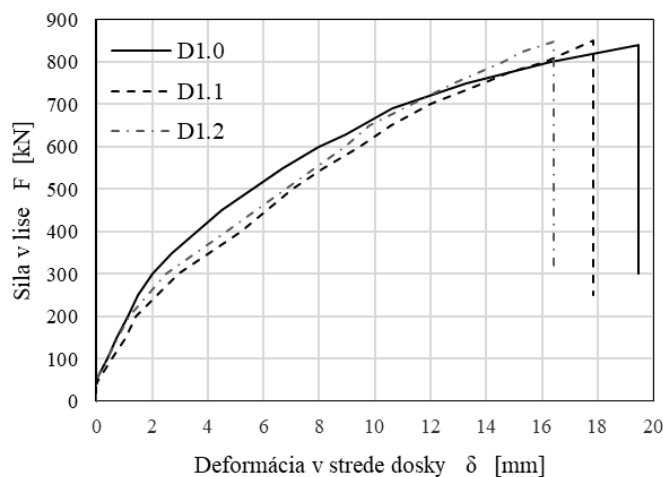
Obr. 5: Porušené a prerezané dosky (hore D1.1, dole D1.2)

Tab. 3: Výsledky experimentov a analytických výpočtov

Vzorka	Priemerná valcová pevnosť $f_{cm,cyl}$ [MPa]	Súčiniteľ $k_{fc} = (f_{cm,cyl,0}/f_{cm,cyl,i})^{1/3}$ [-]	Šmyková odolnosť z experimentu V_{exp} [kN]	Pomer odolnosti i-tej dosky voči ref. $k_{fc} * (V_{exp,i}/V_{exp,0})$ [-]	Súčiniteľ zohľadňuj. prítomnosť RA v bet. η_{τ} [-]	Šmyková odolnosť podľa EC2-23 V_{EC2} [kN]	Pomer V_{exp} / V_{EC2} [-]	Max. deform. dosky pred porušením δ_{max} [mm]
D1.0	39,6	1,000	839	1,000	1,000	824	1,018	19,5
D1.1	33,2	1,061	849	1,074	0,943	732	1,160	17,9
D1.2	33,4	1,058	847	1,068	0,885	689	1,229	16,4

Ak sa sústredíme iba na šmykové odolnosti vzoriek, tak si môžeme všimnúť, že pri doskách z RAC narástla šmyková odolnosť o 1 %. V Tab. 3 je vyčíslený súčiniteľ k_{fc} , ktorý pri pomere šmykovej odolnosti i-tej dosky voči referenčnej napomáha zrovnávať šmykovú odolnosť RAC dosiek v dôsledku vplyvu nižšej pevnosti betónu dosiek z RAC. Inými slovami, pri pôvodne očakávanom poklese šmykovej odolnosti v dôsledku náhrady CNA by zmenšil tento pokles kvôli zistenej nižšej pevnosti betónu vzoriek z RAC. Moje vzorky z RAC však dosiahli oproti referenčnej doske vyššiu šmykovú odolnosť proti pretlačeniu, takže pri uvážení spomínaného súčiniteľa k_{fc} narástla šmyková odolnosť pri experimente o 7,4 %, resp. 6,8 %.

Výpočtové hodnoty šmykovej odolnosti podľa druhej generácie Eurokódu 2 udávajú nižšie šmykové odolnosti než tie dosiahnuté pri experimente. Pri referenčnej vzorke bola výpočtová šmyková odolnosť takmer totožná ako šmyková odolnosť dosiahnutá pri experimente, avšak pri doskách z RAC je vypočítaná odolnosť menšia o 14 a 19 %. Konzervatívne hodnoty šmykových odolností boli dosiahnuté aj vďaka redukčnému súčiniteľu η_{τ} .



Obr. 6: Graf závislosti deformácie dosky od pôsobiacej sily

Z grafu na Obr. 6 vyplýva, že kvôli vyššiemu modulu pružnosti referenčnej dosky táto doska vykazuje menšie deformácie pri prechode do plastickej zóny správania sa betónu. Rozdiel pri deformáciách tesne pred porušením bol zanedbateľný.

10. Záver

Experimenty dosiek ukázali, že pri betónoch z recyklovaného kameniva musíme očakávať pokles pevnosti betónu a tiež pokles modulu pružnosti. Skúšky šmykovej odolnosti však prekvapivo nepriniesli pokles šmykovej odolnosti, tá ostala pri doskách z RAC oproti referenčnej doske takmer nezmenená. Pri porovnaní týchto odolností s prihliadnutím na pokles pevnosti betónu narástla šmyková odolnosť vplyvom náhrady CNA o 7 %. Tento fenomén je určite potrebné bližšie preskúmať. V najbližšom období je plánovaná betonáž a skúšanie rovnakých dosiek s rovnakými úrovňami náhrady CNA, avšak s vyšším stupňom vystuženia ohybovou výstužou.

Výsledky analytických výpočtov šmykovej odolnosti dosahovali konzervatívnu hodnotu. Pri týchto experimentoch sa nám nepodarilo potvrdiť presnosť súčiniteľa η_{τ} , ktorý redukuje šmykovú odolnosť kvôli prítomnosti RA v betóne.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-23-0193 a za podpory Vedeckej Grantovej Agentúry Ministerstva školstva, vedy a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied číslo VEGA č. 1/0310/22.

This work is part of the transnational access project “ERIES – RecycleSlab” (Structural Behaviour of Recycled Aggregate Reinforced Concrete Flat Slabs with Drop Panels under Seismic and Cyclic Actions), supported by the Engineering Research Infrastructures for European Synergies (ERIES) project (www.eries.eu).

Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V05-00005.

Autori tiež ďakujú firme A-Z Stav s r. o. za poskytnuté recyklované kamenivo, firme Danucem Slovensko a.s. za poskytnutý cement a firme Strabag, Pozemné a inžinierske staviteľstvo s.r.o. za výrobu vzoriek.

Literatúra

- [1] GODÁNY, J.: Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a štěrkopísku v ČR. *Beton - technologie, konstrukce, sanace*. pp. 15-21. 2021.
- [2] OZBAKKALOGLU, T. – GHOLAMPOUR, A. – XIE, T.: Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017.
- [3] FECKO, T. – HALVONIK, J.: Analysis of the punching shear resistance of reinforced recycled aggregate concrete slabs according to various standards. *Juniorstav 2024*. 2024.

- [4] EN 1992-1-1: Design of concrete structures - Part 1 - 1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. 2023.

Zuzana Haššová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 2.

VYUŽITIE VYSOKOPEVNOSTNÝCH PREDPÍNACÍCH LÁN V BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÁCH

THE USE OF HIGH-STRENGTH PRESTRESSING STRANDS IN CONCRETE STRUCTURES

Abstract

The article is focused on the application of high-strength prestressing strands. With the arrival of the second generation of Eurocode 2- EC2 (2023) prestressing steels with higher tensile strength than those currently in use are being introduced. Several scientific groups have processed the properties and design models for concrete members with prestressing steel. The application of higher tensile strength steel affects the behavior of bond, transfer lengths and anchorage system. The main goal of this article is to present the influence of higher strength and ductility factor and provide a brief outlook on follow-up research work.

Kľúčové slová / Key Words

Predpätý betón; vysokopevnostná predpínacia oceľ, duktilita / Prestressed Concrete; High Strength Tensile Steel; Ductility.

1. Úvod

V súčasnosti sa čoraz častejšie stretávame s vývojom a napredovaním takmer vo všetkých odvetviach stavebníctva. Vývoj pokročil nie len v oblasti technológií, ale taktiež aj v oblasti materiálov. V súvislosti s vývojom nových materiálov sa v posledných dekádach kladie najväčší dôraz na znižovanie uhlíkovej stopy, ktorú do značnej miery ovplyvňuje stavebníctvo.

S vyššími požiadavkami na efektívnosť a trvanlivosť sa stretávame aj pri návrhu a realizácii jednotlivých konštrukcií, či už je to pri budovách, mostných objektoch, či inžinierskych konštrukciách. Najväčší dôraz sa kladie na zvyšovanie odolnosti a spoľahlivosti. Pomocou ch stavebných materiálov, ktorými sú betón a betonárska výstuž, nebolo ďalej možné vyhovieť rastúcim nárokom na vytváranie ekonomicky efektívnych konštrukcií. Práve vďaka tomuto sa dostal do popredia predpätý betón.

Kľúčovým prvkom sa stáva predpínacia výstuž, vďaka ktorej dokážeme prenášať oveľa väčšie zaťaženia, či navrhovať štíhlejšie konštrukcie alebo konštrukcie väčších rozpätí pomocou vnášania tlakových napätí do betónu nezávisle od vonkajšieho zaťaženia. Významnou vlastnosťou predpínacej ocele okrem samostatnej pevnosti a modulu pružnosti je ťažnosť, ktorá spočíva v schopnosti prijať veľké deformácie bez výrazného poklesu napätia.

Tento článok sa zameriava na možnosti používania vysokopevnostných predpínacích ocelí vyšších pevnostných tried, ktoré prichádzajú s druhou generáciou Eurokódov a návrhu experimentálneho programu zameraného na rozdielne pôsobenie betónových prvkov s bežnými a vysokopevnostnými predpínacími výstužami.

¹ Zuzana, Haššová, Ing., Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Vysokopevnostná predpínacia oceľ

S novou generáciou Eurokódov prichádzajú viaceré zmeny. Aj práve vďaka celej škále meniacich sa požiadaviek bolo potrebné prispôbiť normové predpisy. Obsah Eurokódov sa nerozšíril len o nové materiály, ale taktiež aj o kapitoly venujúce sa zavedeniu pravidiel pre návrh konštrukcií z materiálov vyšších pevnostných tried a vyššej kvality. Zmeny sa netýkajú len betónu, ale taktiež aj betonárskej a predpínacej výstuže. Pri predpäťom betóne bude následne možné aplikovať výstuže s charakteristickou pevnosťou v ťahu Y2060 (Tab. 2). Aj napriek tomu, že sa v súčasnosti v stavebníctve využívajú primárne výstuže s maximálnou pevnosťou v ťahu 1860 MPa, technická komisia v roku 2005 predložila návrh európskej normy (Tab. 1) s maximálnou pevnosťou až 2160 MPa.

Využívanie predpínacej ocele sa považuje za veľmi prínosné, keďže pomocou predpäťia dokážeme zvyšovať odolnosť, nosnosť, či taktiež predĺžiť životnosť konštrukcie z dôvodu obmedzenia korózie ocele. Keďže v súčasnosti sa stretávame bežne pevnosťou predpínacích lán s maximálnou hodnotou 1860 MPa, vývoj vyšších pevnostných tried preto prináša nové možnosti výskumu najmä z pohľadu overenia pôsobenia konštrukcií.

Tab. 1- Pevnostné triedy predpínacej ocele [4]

Steel designation		Nominal ^a				Specified			
Steel name	Steel number	Diameter D mm	Tensile strength R _m MPa	Cross-sectional area ^b S _n mm ²	Mass per metre ^b M g/m	Permitted deviation on mass per metre %	Characteristic value of maximum force F _m kN	Maximum value of maximum force F _{m, max} kN	Characteristic value of 0,1 % proof force ^c F _{p0,1} kN
Y1670S7	1.1364	15,2	1 670	139	1 086	± 2	232	267	200
Y1700S7G	1.1370	18,0	1 700	223	1 742	± 2	379	436	326
Y1770S7	1.1365	6,9	1 770	29,0	226,5	± 2	51,3	59,0	44,1
		9,0		50,0	390,5		88,5	102	76,1
		9,3		52,0	406,1		92,0	106	79,1
		9,6		55,0	429,6		97,4	112	83,8
		11,0		70,0	546,7		124	143	107
		12,5		93,0	726,3		165	190	142
		12,9		100	781,0		177	204	152
		15,2		139	1 086		246	283	212
		15,3		140	1 093		248	285	213
		15,7		150	1 172		266	306	229
18,0	200	1 562	354	407	304				
Y1820S7G	1.1371	15,2	1 820	165	1 289	± 2	300	345	258
Y1860S7	1.1366	6,9	1 860	29,0	226,5	± 2	53,9	62,0	46,4
		7,0		30,0	234,3		55,8	64,2	48,0
		8,0		38,0	296,8		70,7	81,3	60,8
		9,0		50,0	390,5		93,0	107	80,0
		9,3		52,0	406,1		96,7	111	83,2
		9,6		55,0	429,6		102	117	87,7
		11,0		70,0	546,7		130	150	112
		11,3		75,0	585,8		140	161	120
		12,5		93,0	726,3		173	199	149
		12,9		100	781,0		186	214	160
		13,0		102	796,6		190	219	163
		15,2		139	1 086		259	298	223
		15,3		140	1 093		260	299	224
		15,7		150	1 172		279	321	240
Y1860S7G	1.1372	12,7	1 860	112	874,7	± 2	208	239	179
Y1960S7	1.1367	15,2	1 960	165	1 289	± 2	307	353	264
		9,0		50,0	390,5		98,0	113	86,2
Y2060S7	1.1368	9,3	2 060	52,0	406,1	± 2	102	117	89,8
		6,4		25,0	195,3		51,5	59,2	45,3
		6,85		28,2	220,2		58,1	66,8	51,1
		7,0		30,0	234,3		61,8	71,1	54,4
		8,6		45,0	351,5		92,7	107	81,6
Y2160S7	1.1369	11,3	2 160	75,0	585,8	± 2	155	178	136
		6,85		28,2	220,2		60,9	70,0	53,6

^a The modulus of elasticity may be taken to be 195 GPa (kN/mm²).

^b The nominal mass per metre is calculated from the nominal cross-sectional area and a density of 7,81 kg/dm³.

^c The specified characteristic value of the 0,1 % proof force is calculated from the specified characteristic value of the maximum force with a ratio of 0,86. For the grade Y1960S7, Y2060S7 and Y2160S7 the specified characteristic value of the 0,1 % proof force is calculated with a ratio of 0,88.

Tab. 2- Pevnostné triedy predpínacej ocele [3]

Properties in stress-strain-diagram (Fig. 5.3) (characteristic values)	(a) Wires ^a			
	Y1570	Y1670	Y1770	Y1860
proof stress $f_{p0.1k}$ [MPa]	1 380	1 470	1 550	1 650
tensile strength f_{pk} [MPa]	1 570	1 670	1 770	1 860
	(b) Strands ^a			
	Y1770	Y1860	Y1960	Y2060
proof stress $f_{p0.1k}$ [MPa]	1 560	1 640	1 740	1 830
tensile strength f_{pk} [MPa]	1 770	1 860	1 960	2 060
	(c) Bars ^a			
	Y1030	Y1050	Y1100	Y1230
proof stress $f_{p0.1k}$ [MPa]	835	950	900	1 080
tensile strength f_{pk} [MPa]	1 030	1 050	1 100	1 230
NOTE 1 All strength classes apply unless the National Annex excludes specific classes. Intermediate strength classes can be used, if included in the National Annex.				
NOTE 2 For requirements to classify steel products, see C.5.				
^a In all strength classes, stress ratio of $k = (f_p/f_{p0.1})_k \geq 1,1$ and characteristic strain at maximum force $\epsilon_{uk} = 3,5$ % apply.				

3. Úvod do problematiky využitia vysokopevnostných predpínacích lán

Súčasťou tohto príspevku je taktiež aj rešerš výskumných prác venujúcich sa vysokopevnostnej predpínacej oceli (UHS- ultra high steel strength) vo svete. Vysokopevnostnej oceli sa autori jednotlivých publikácií venujú intenzívnejšie posledné roky. S aplikáciou materiálu s novými vlastnosťami prichádzajú mnohé otázky venujúce sa návrhu konštrukcií. Pri návrhu konštrukcií z predpätého betónu s UHS je potrebné zodpovedať otázky venujúce sa nie len bežnému návrhu, ale taktiež je možné preskúmať aj základné parametre ako sú prenosové dĺžky a spôsoby kotvenia.

V jednotlivých publikáciách sa následne autori venujú skúmaniu prierezov s UHS aj s väčšou pevnosťou ako spomína nová generácia Eurokódu 2 - teda pevnosť v ťahu jednotlivých predpínacích lán dosahuje hodnoty 2400 MPa.

Park Ho a kolektív [5],[6] sa vo svojich prácach venuje vplyvu použitia vysokopevnostných predpínacích lán na ohybové správanie dodatočne predpätých nosníkov na základe pevnosti betónu v tlaku a pevnosti lán v ťahu. Výsledkom bolo následne zhodnotenie správania sa v porovnaní s predikciami súčasných noriem bez ohľadu na pevnosť v ťahu lán. Premennou okrem pevnosti v ťahu predpínacích lán bola taktiež aj pevnosť betónu v tlaku [5]. Pri druhom experimente [6] bolo testovaných 11 skúšobných vzoriek, v ktorom boli premennými počet lán, tvar prierezu, pevnosť v ťahu lán a vystuženie podkotevnej oblasti. Na základe toho bola následne preukázaná ohybová odolnosť vzoriek s použitím lán s pevnosťou 2400 MPa o 14,5 vyššia ako u vzoriek s použitím lán s pevnosťou 1860 MPa.

V ďalšej práci sa **Carin Robert-Wollmann spolu s kolektívom [7]** venoval porovnaniu rozdielov v prenosových dĺžkach a odolnosti v ohybe medzi predpínacími lanami pevnostnej triedy 2070 MPa a lanami pevnostnej triedy 1860 MPa. Z každej pevnostnej triedy bolo vyrobených 10 predpätých nosníkov. Na základe experimentov bolo preukázané, že zvýšenie pevnosti lana ovplyvňuje prenosovú dĺžku, kotevnú dĺžku a odolnosť v ohybe.

Väčšina prác sa zaoberala vyhodnotením prenosových dĺžok, čomu sa vo svojej práci venoval aj **Sun-Jin Han s kolektívom [8]**. Keďže väčšina existujúcich modelov predikcie prenosovej dĺžky bola odvodená na základe výsledkov skúšok vzoriek s predpínacími lanami s pevnosťou v ťahu 1860 MPa alebo menej, na zohľadnenie účinku zvýšenej pevnosti v ťahu predpínacích lán sú teraz potrebné modifikácie modelov prenosovej dĺžky. V tejto štúdii bolo vyrobených a testovaných šesť predpätých betónových vzoriek vystužených predpínacími lanami s pevnosťou v ťahu 2400 MPa, aby sa preskúmali ich prenosové dĺžky.

Ďalšiemu skúmaniu prenosových dĺžok sa venoval **Yang Jun-Mo spolu s kolektívom [9]**. V tejto štúdiu bola experimentálne hodnotená prenosová dĺžka sedemdrôtových vysokopevných lán s pevnosťou 2400 MPa s priemerom 15,2 mm v predpätých betónových nosníkoch využívajúcich betón s pevnosťou väčšou ako 58 MPa v čase vnesenia predpätia. Bolo vyrobených 32 vzoriek, ktoré majú premennú pevnosť betónu v tlaku, hrúbku krycej vrstvy a počet lán a boli merané zodpovedajúce prenosové dĺžky. Namerané výsledky prenosovej dĺžky ukázali, že prenosová dĺžka sa znižovala so zvyšovaním pevnosti v tlaku betónu a hrúbky krycej vrstvy.

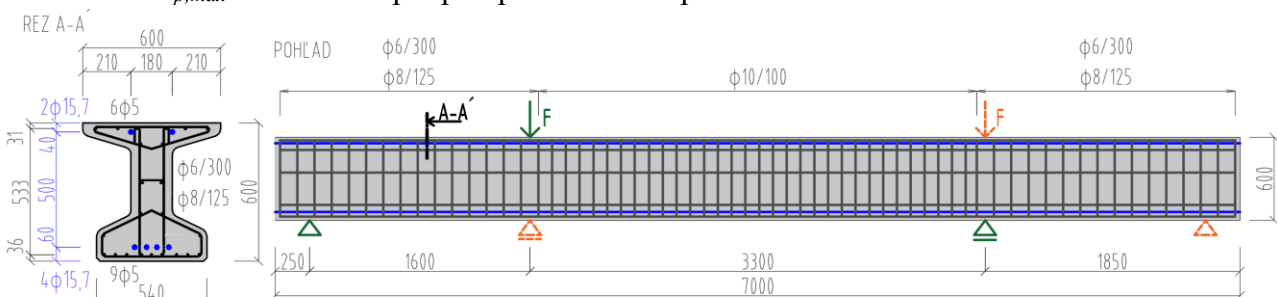
4. Parametrická analýza

Na preukázanie vplyvu vybraných vlastností vysokopevnostných predpínacích lán v pôsobení v betónových prvkoch bola použitá numerická parametrická analýza, pri ktorej premennými vlastnosťami boli pevnosť v ťahu f_{pk} predpínacích lán a pomer pevnosti v ťahu k dohodnutému napätiu $(f_p/f_{p0,1})_k$, charakterizovaný súčiniteľom k reprezentujúcim duktilitu.

Duktilita, alebo taktiež aj ťažnosť, vyjadruje mieru schopnosti materiálu, resp. nosného prvku pretvárať sa bez porušenia pri vysokých namáhaniach. Pri výrobe vysokopevnostnej výstuže sa využívajú za tepla tvárnené prúty kruhového prierezu z ocele, ktorá obsahuje maximálne 0,85 % uhlíka. Vo všeobecnosti platí, že pomocou uhlíka dokážeme zvýšiť pevnosť ocele, ale zároveň znižujeme jej ťažnosť. Pevnostné vlastnosti lán následne dokážeme zvýšiť pomocou mechanického tvárnenia za studena, pri ktorom je však sprievodným javom zníženie ťažnosti ocele ϵ_{pk} a tým zvýšenie jej krehkosti. Ťažnosť predpínacích výstuží je definovaná pomerom pevnosti v ťahu k medzi klzu $(f_p/f_{p0,1})_k$ a charakteristickým pomerným pretvorením predpínacej výstuže pri maximálnom zaťažení ϵ_{pk} . Základnou požiadavkou pre vysokopevnostné predpínacie výstuže je zaručená ťažnosť ϵ_{pk} s hodnotou 3,5%.

V súčasne platných normách, ale taktiež aj v druhej generácii Eurokódov je možné predpokladať primeranú ťažnosť pre predpínaciu výstuž, ak $f_{pk}/f_{p0,1k} \geq k$, pričom pre súčiniteľ k je odporúčané uvážiť hodnotu 1,1. Aj napriek tomu, že súčiniteľ k nevstupuje do návrhu konštrukcií, je potrebný pre špecifikáciu predpínacích výstuží.

Pomocou nelineárnej analýzy v programe Atena bol analyzovaný nosník (Obr. 1), ktorý predstavuje ukazovateľ vplyvu súčiniteľa k na správanie konštrukčného prvku a takisto vplyv veľkosti charakteristickej ťahovej pevnosti na odolnosť prvku. Celková dĺžka vzorky bola 7,0 m s efektívnym rozpätím nosníka 4,9 m. Nosník bol následne vystužený pozdĺžnou betonárskou výstužou s priemerom 5 mm pri hornom a spodnom povrchu, taktiež boli doplnené výstuže na splnenie konštrukčných zásad rovnakého priemeru. Okrem pozdĺžnej betonárskej výstuže sa v priereze nachádza aj priečna šmyková výstuž tvorená dvojstrižnými strmeňmi s priemermi 6 a 8 mm so zahustením v oblasti v strede dĺžky nosníka. Celý nosník bol taktiež vystužený aj 6 vopred predpätými lanami priemeru 15,7 mm. Pri spodnom povrchu boli umiestnené 4 laná a pri hornom povrchu boli umiestnené 2 laná. Predpínacia výstuž bola vopred predopnutá na strednú hodnotu počiatočného napätia v dobe predpínania $\sigma_{p,max} = 1488$ MPa pre predpínacie laná s pevnosťou 1860 MPa a $\sigma_{p,max} = 1968$ MPa pre predpínacie laná s pevnosťou 2460 MPa.

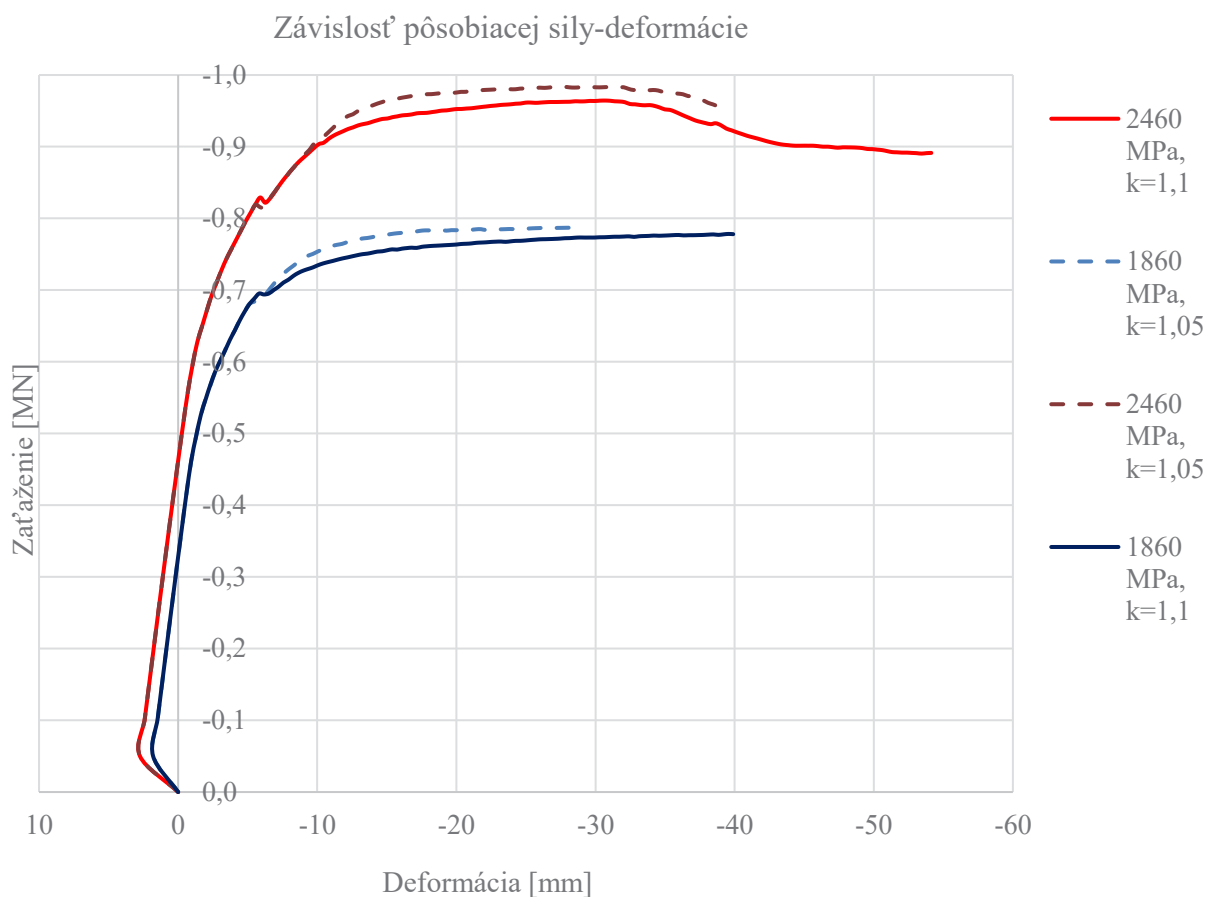


Obr. 1- Analyzovaný nosník

Celkovo boli analyzované 4 skúšobné modely, pri ktorých boli premennými veľkosť pevnosti v ťahu predpínacích lán a taktiež súčiniteľ duktility k (Tab. 3).

Tab. 3- Premenné vlastnosti aplikované v parametrickej analýze

	Charakteristická ťahová pevnosť f_{pk} [MPa]	Súčiniteľ duktility k [-]
1.	1860	1,1
2.	1860	1,05
3.	2460	1,1
4.	2460	1,05



Obr. 2- Vplyv rozdielnych pevnostných charakteristík predpínacích lán a súčiniteľa duktility

Na základe grafu z Obr. 2 je možné zhodnotiť v prvom rade odolnosť prierezu pri použití predpínacích lán vyšších pevnostných tried. Ako bolo predpokladané, pri aplikácii lán s charakteristickou pevnosťou v ťahu 2460 MPa došlo k zlyhaniu vzoriek pri zaťažení vyššom o viac ako 23%, než pri vzorkách vystužených lanami s pevnosťou 1860 MPa. Na veľkosť deformácie má významný vplyv súčiniteľ duktility k . V pružnej oblasti diagramu bolo preukázané rovnaké správanie jednotlivých vzoriek vystužených lanami rovnakej pevnostnej triedy. Výrazný rozdiel nastáva práve v plastickej oblasti, čo je možné pripísať duktilite a zároveň pri vyššej hodnote tohto súčiniteľa dosahujú deformácie väčšie hodnoty bez porušenia. Aj napriek tomu, že pri nižšej hodnote súčiniteľa k dosahujeme menšie deformácie so skorším zlyhaním vzorky, hodnoty maximálneho pôsobiaceho

zaťaženia dosahujú vyššie hodnoty pri nosníkoch vystužených lanami z vysokopevnostnej ocele. Podrobnejšie výsledky sú následne uvedené v Tab. 4.

Tab. 4- Sumarizácia výsledkov

Charakteristická pevnosť v ťahu [MPa]	Súčiniteľ duktility k [-]	Veľkosť maximálnej pôsoiacej sily/ sily pri zlyhaní [MN]	Veľkosť deformácie [mm]
1860	1,1	0,778 / 0,778	39,9
1860	1,05	0,787 / 0,787	28,1
2460	1,1	0,964 / 0,891	54,1
2460	1,05	0,984 / 0,953	39,2

5. Návrh experimentálneho programu

Na základe vykonanej rešerše je možné konštatovať, že výskum v oblasti aplikácie vysokopevnostných ocelí bol zameraný na dva okruhy. Prvým je základné spolupôsobenie predpínacích jednotiek s betónom a druhým je optimalizácia nosných prvkov zameraná na overovanie návrhových modelov pre posúdenie odolnosti a používateľnosti.

Podrobnejšie bolo možné špecifikovať tieto ciele:

- overenie súdržnosti medzi betónom a vysokopevnostnou predpínacou výstužou (vplyv na prenosovú a kotevnú dĺžku),
- overenie efektívnosti prvkov vystužených predpínacou výstužou vyšších pevnostných tried v porovnaní s tradičnými pevnostnými triedami (nárast ohybovej a šmykovej odolnosti, oddialenie vzniku trhlín),
- aplikácia menších a ľahších prvkoch pri zachovaní požadovanej odolnosti, čo môže viesť k navrhovaniu štíhlejších a estetickjších konštrukcií,
- efektívnejšie využívanie materiálov - zvýšenie udržateľnosti súvisiace so znížením uhlíkovej stopy,
- ekonomické porovnanie výhodnosti použitia vysokopevnostnej ocele,
- overenie modelu pre výpočet strát predpätia od relaxácie podľa relevantných noriem - vzájomné porovnanie s experimentálnymi meraniami.

Základný výskum pôsobenia

Hlavnou ideou plánovaného experimentálneho programu je aplikácia vysokopevnostnej ocele v jednoduchých prizmatických prvkoch a s tým súvisiace sledovanie účinky predpätia v čase, teda overenie aj dlhodobých strát od relaxácie. Experimentálne vzorky by pozostávali z rôznych kombinácií pevnosti lán a pevnostných tried betónov so smerovaním k využívaniu vysokopevnostného betónu spolu s vysokopevnostnými predpínacími lanami.

Optimalizácia a overenie návrhu nosného prvku

V súvislosti s efektívnosťou návrhu je potrebné overiť vplyv vyššej pevnosti predpínacej výstuže pri návrhu. Overenie ohybovej a šmykovej odolnosti, spolu s vplyvom na priehyb a vznik a rozvoj trhlín.

Cieľom posúdenia ekonomického vplyvu využívania vysokopevnostnej ocele je možnosť overenia pomocou alternatívnych prvkov s rovnakým vystužením s rôznymi hladinami predpätia alebo aplikácia menšieho množstva vysokopevnostnej ocele v porovnaní s väčšou spotrebou predpínacích lán bežnej pevnostnej triedy.

6. Záver

Na základe vykonanej rešerše je možné skonštatovať, že vysokopevnostné predpínacie ocele môžu predstavovať prínos v oblasti stavebníctva, vďaka ktorým dokážeme zvyšovať efektivitu stavebných konštrukcií. Nepochybne je možné konštatovať, že dokážeme zvýšiť najmä ohybovú odolnosť nosných prvkov pri použití lán vyšších pevnostných tried. V súvislosti s realizáciou sú však potrebné úpravy systémov kotvenia. Aj napriek tomu, že pri ich aplikáciách dokážeme zabezpečiť vyššie odolnosti, je potrebné dbať aj na technologické výzvy a riešenia.

Na základe parametrickej štúdie boli potvrdené predpokladané vlastnosti vysokopevnostných ocelí v súvislosti s odolnosťou prierezu, ale významným ukazovateľom je aj súčiniteľ duktility k s výrazným vplyvom v plastických oblastiach diagramu vyjadrujúceho závislosť medzi veľkosťou pôsobiacej sily a deformáciou. Pri použití súčiniteľa k s odporúčanou hodnotou 1,1 bola dosiahnutá deformácia o viac ako 27 % väčšia ako v porovnaní s hodnotou $k = 1,05$. Výraznejší vplyv rozdielnej hodnoty súčiniteľa duktility bol zaznamenaný pri lanách vyššej pevnostnej triedy. Aj keď boli dosiahnuté mierne väčšie veľkosti zaťaženia pri porušení, malo použitie menšej hodnoty súčiniteľa $k = 1,05$ negatívny vplyv na veľkosť deformácie pri porušení (znížená duktilita).

PodĎakovanie

Táto práca vznikla s podporou výskumného projektu VEGA č. VEGA 1/0358/23 "Navrhovanie a zosilňovanie betónových konštrukcií s ohľadom na životné prostredie" a taktiež bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-23-0193.

Literatúra

- [1] HARVAN, I.: *Predpätý betón. Navrhovanie podľa spoločných európskych noriem*. Bratislava. 2015. 271s. ISBN 978-80-227-4427-0.
- [2] STN EN 1992-1-1+A1: *Eurokód 2. Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy*.
- [3] EN 1992-1-1:2023: *Eurocode 2 – Design of concrete structures- Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*.
- [4] White draft pr EN 10138-3:2005: *Prestressing steels- Part 3: Strand*.
- [5] PARK, H.; JEONG, S.; LEE, S.-CH.; CHO, J.-Y.: *Flexural behavior of Post-Tensioned Prestressed Concrete Girders with High-Strength Strands* [online]. Južná Kórea. 2016. [cit. 2024-10-10].
Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616000067#ab010>>
- [6] PARK, H.; JEONG, S.; LEE, S.-CH.; CHO, J.-Y.: *Flexural behavior of Posttensioned concrete Beams with Unbonded High-Strength strands* [online]. Južná Kórea. 2020. [cit. 2024-10-10].
Dostupné na internete:
<<https://www.hindawi.com/journals/amse/2020/5317456/#conclusions>>
- [7] ROBERT-WOLLMANN, C.; COUSINS, T.; CARROLL, CH.: *GRADE 300 PRESTRESSING STRAND AND THE EFFECT OF CERTICAL CASTING POSITION*. USA. 2009. [cit. 2024-10-10].
Dostupné na internete: <<https://vtrc.virginia.gov/media/vtrc/vtrc-pdf/vtrc-pdf/10-cr2.pdf>>
- [8] HAN, S.-J.; DK LEE, D.; KIM, K., S.; YI, S.-T.: *Transfer lengths of pretensioned concrete members reinforced with 2400 MPa high-strength prestressing tendonds*. Južná Kórea. 2016. [cit. 2024-10-10]. Dostupné na internete:
https://www.researchgate.net/publication/316856321_Transfer_lengths_of_pretensioned_concrete_members_reinforced_with_2400_MPa_high-strength_prestressing_tendons
- [9] YANG, J.-M.; YIM, H.-J.; KIM, J.-K.: *Transfer length of 2400 MPa seven-wire 15,2 mm steel strands in high-strength pretensioned prestressed concrete beam*. Južná Kórea. 2016. [cit. 2024-10-10].
Dostupné na internete: <<https://koreascience.kr/article/JAKO201612461130381.page>>

Matej Jurgoš¹

Študijný program: TKIS, ročník: štvrtý

PROCES VÝVOJA BETÓNOVEJ SAMOZHUTNITELNEJ ZMESI Z RECYKLOVANÉHO KAMENIVA

PROCESS OF DEVELOPMENT OF SELF-COMPACTING CONCRETE MIX FROM RECYCLED AGGREGATE

Abstract

This article discusses the creation of a concrete mix designed to be self-compacting. It replaces natural aggregates with recycled ones, including fine aggregate. The paper outlines the methods used to tackle the increased water absorption and related challenges through a compensation ratio and the inclusion of additional water. The final concrete mix fulfils all the required criteria for a fresh concrete mix, achieving a cylinder strength of 40 megapascals after 28 days. Traditional steel reinforcement is substituted for thermoplastic fiber-reinforced polymer reinforcement.

Kľúčové slová

Samozhnutiteľný betón, Recyklované kamenivo, Nekovová výstuž

1. Úvod

Stavebníctvo a odpadové hospodárstvo závisí od štandardov a zákonov v danej krajine [1]. Momentálna legislatíva je skeptická k používaniu recyklovaného kameniva v nosných konštrukciách vo väčšom objeme z dôvodu heterogenity takéhoto kameniva [2] a všeobecne nižšej kvality oproti prírodnému kamenivu [2]. Pri týchto podmienkach je zabezpečenie požadovanej kvality, unifikácie procesov nesmierne dôležité z hľadiska bezpečnosti. Systémy záväzkov kvality musia stanoviť spoločné pravidlá pre výrobcov a dodávateľov, aby zvýšili dôveru v recyklované kamenivo a podporili jeho použitie v praxi

V poslednej dobe samozhnutiteľný betón je populárny z dôvodu nedostatku pracovnej sily, čo následne znižuje cenu a spotrebu energie [3] a teda výskum v tomto smere je potrebný. Výskum nahrádza tradičnú kovovú výstuž za nekovovú termoplastickú FRP výstuž novej generácia, ktorú je možné tvarovať priamo na stavbe.

2. Materiál

Pri navrhovaní betónovej zmesi od základov je potrebné poznať základne fyzikálne a mechanické vlastnosti kameniva. Najdôležitejšie sú absorpcia, krivka zrnitosti a objemová hmotnosť kameniva nasýteného vodou za vysušeného povrchu (Saturated Surface Dry – SSD). Zároveň sa meral aj tvarový index, podiel prilepenej maltovej zložky ku kamenivu a modul jemnosti jemnozrnej frakcie na podrobnejší popis kameniva. Použité kamenivo je certifikované regionálnou spoločnosťou a testy preukázali veľmi dobrú zhodu s deklarovými vlastnosťami. Tabuľka 1 zobrazuje vybrané

¹ Matej Jurgoš, Ing. Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

vlastnosti pre použité recyklované kamenivo. Tabuľka 2. porovnáva rovnaké vlastnosti pre prírodné kamenivo.

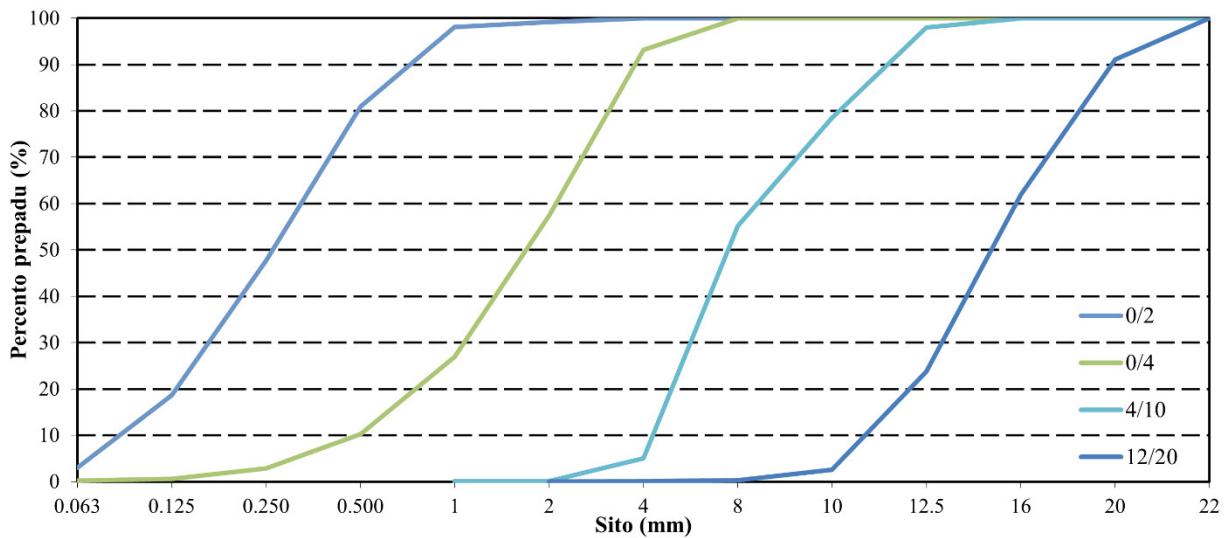
Tabuľka 1. Mechanicko-fyzikálne vlastnosti recyklovaného kameniva

Frakcia	0/2	0/4	4/10	12/20
SSD [-]	2,29	2,47	2,45	2,44
Absorpcia [%]	11,01	6,12	6,13	5,81
Podiel múčky [%]	24,99	7,71	7,55	5,25

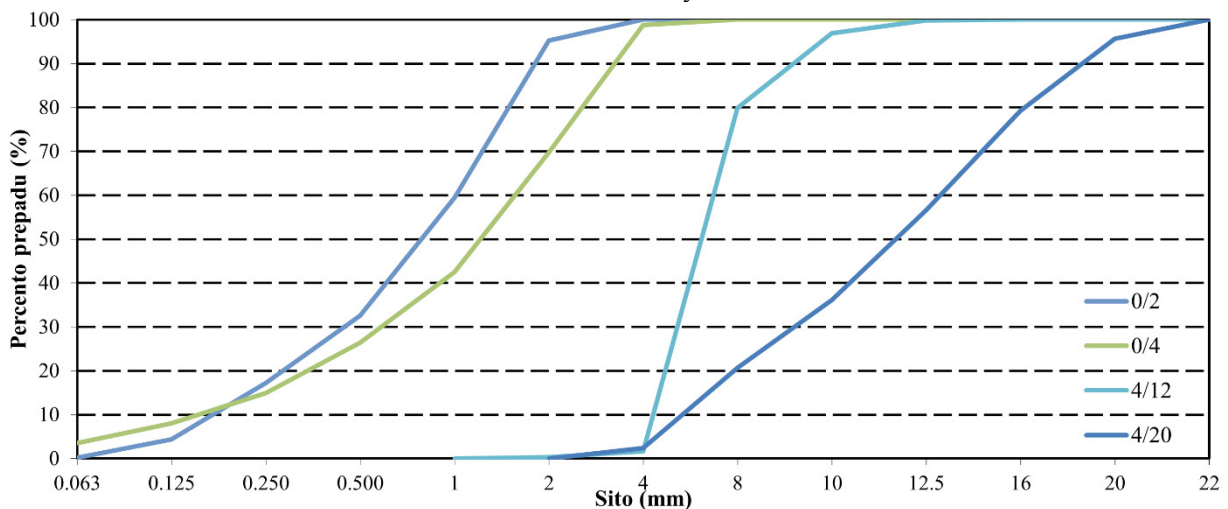
Tabuľka 2. Mechanicko-fyzikálne vlastnosti prírodného kameniva

Frakcia	0/2	0/4	4/12.5	4/20
SSD [-]	2,66	2,65	2,65	2,67
Absorpcia [%]	0,79	0,40	1,45	1,09
Podiel múčky [%]	13,08	17,30	11,16	16,28

Krivka zrnitosti je fundamentálnym parametrom potrebným pri navrhovaní betónovej zmesi. Obrázok 1 zobrazuje krivku zrnitosti jednotlivých frakcií recyklovaného kameniva a Obrázok 2 krivku zrnitosti jednotlivých frakcií pre použité prírodné kamenivo.

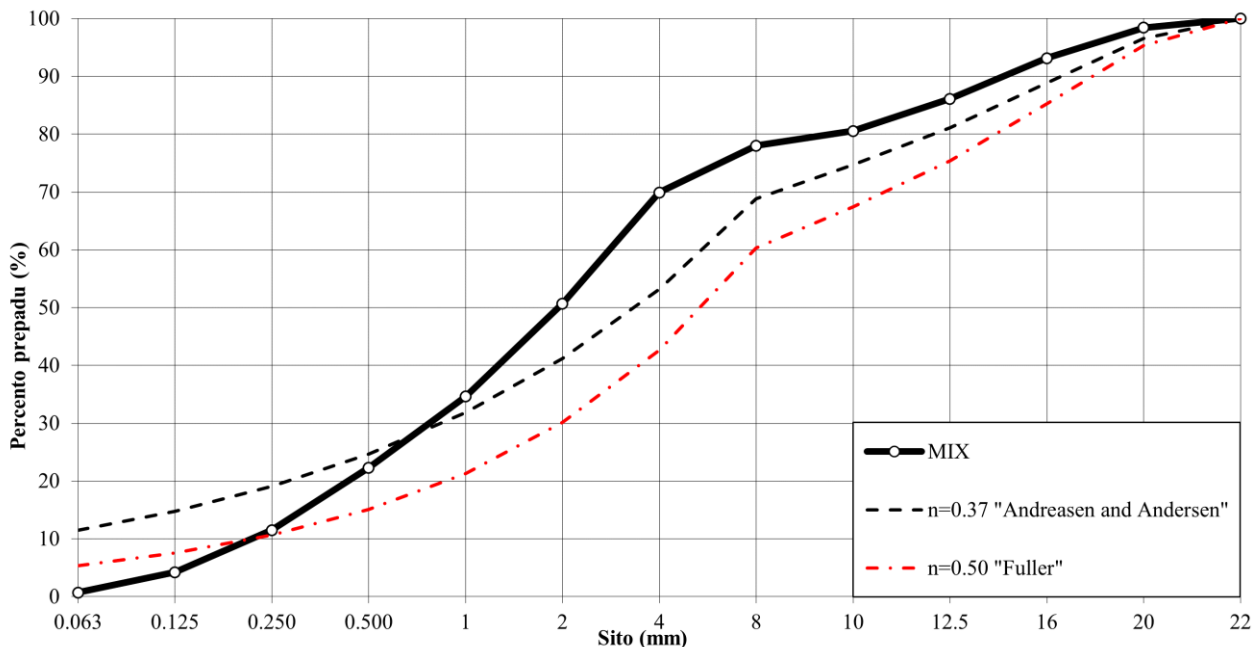


Obrázok 1. Krivka zrnitosti recyklovaného kameniva



Obrázok 2. Krivka zrnitosti prírodného kameniva

Podiel jednotlivých frakcií v zmesi je dôležitý k správne mu zhutneniu, ovplyvňuje parametre čerstvej zmesi a jej celkovú pevnosť v zatvrdnutom stave. Obrázok 3 zobrazuje jednu z posudzovaných kriviek v porovnaní s Fullerovou a Andreasen a Andersen-ovou krivkou. Obidve pracujú s najväčším priemerom zrna v zmesi. Fullerova krivka je odporúčaná pre štandardný betón. Krivka podľa Andreasen a Andersena je odporúčaná pre samozhutniteľný.



Obrázok 3. Vybraná distribučná krivka zrnitosti

3. Čerstvá zmes

Následne sa môže pristúpiť k návrhu podielu cementu, vody a prísad. Kritický je správny návrh podielu vody nakoľko absorpcia recyklovaného kameniva je omnoho vyššia ako absorpcia prírodného. Existujú rôzne metódy výpočtu a prípravy, ja som si vybral metódu najvhodnejšiu pre použitie v praxi, pridával som vodu navyše v určitom intervale, aby došlo k saturácii kameniva vodou. Taktiež je potrebné uvažovať už s vodou, ktorá sa v kamenive nachádza v bežnom stave a o túto vodu znížiť hodnotu pomocou kompenzačného pomeru o hodnotu 0.5. Zároveň je potrebné navýšiť celkový objem kameniva, aby bol dodržaný počiatočný pomer surovín a frakcií. Toto si vyžaduje aktívny monitoring kameniva a jeho aktuálnej saturácie vodou. Pre overenie som v laboratórnych podmienkach kamenivo vysušil, aby bolo úplne zbavené vlhkosti a navrhol zmes, ktorá má rovnaké parametre ako zmes s voľne uloženého kameniva, ktoré bolo vystavené poveternostným podmienkam. Dopracoval som sa ku veľmi vysokej zhode vlastností čerstvej a aj zatvrdnutej zmesi. Proces miešania je čiastočne upravený oproti zmesi z prírodného kameniva. Na začiatok sa do kameniva pridá voda, ktorá má pokryť hydratáciu kameniva. Zmes sa občasne mieša aspoň 10 minút. Obrázok 4 zobrazuje zmes v tomto štádiu. Následne sa pridá 80 percent zvyšnej vody spolu s cementom. Od momentu ako začne hydratácia cementu sa musí zmes miešať minimálne 10 minút. Obrázok 5 je zmes v zmiernenom štádiu. Následne sa do zmesi pridá plastifikátor spolu s 10 percentami vody, Obrázok 6 ilustruje dané štádium. Posledný krok je primiešanie supersplastifikátora s posledným dielom vody. Obrázok 7 znázorňuje finálny stav zmesi.



Obrázok 4. 1. Štádium miešania



Obrázok 5. 2. Štádium miešania



Obrázok 6. 3. Štádium miešania



Obrázok 7. Finálne štádium miešania

Následne sa môže pristúpiť k testovaniu vlastností čerstvej zmesi. Pre správnu klasifikáciu je potrebné uskutočniť aspoň jeden test z každej vlastnosti. Rozlišujeme tri hlavné schopnosti: schopnosť prechodu, naplnenia a segregáciu. Schopnosť prechodu som meral pomocou J-ring testu. Schopnosť naplnenia pomocou V-funnel a jednoduchého testu rozliatia kužeľom. Schopnosť segregácia bola testovaná pomocou 5 minútového V-funnel testu. Obrázok 8 zobrazuje J-ring test.

4. Zatvrdnutý betón

V kalibračnej časti sa z každej skúšanej zmesi odliali 3 kocky, ktoré v dozrievacej komore dosiahli vek 7 dní a následnej sa odskúšali v lise v tlaku. Obrázok 9 zobrazuje vybranú vzorku skúšanú na tlak.



Obrázok 8. J-ring test



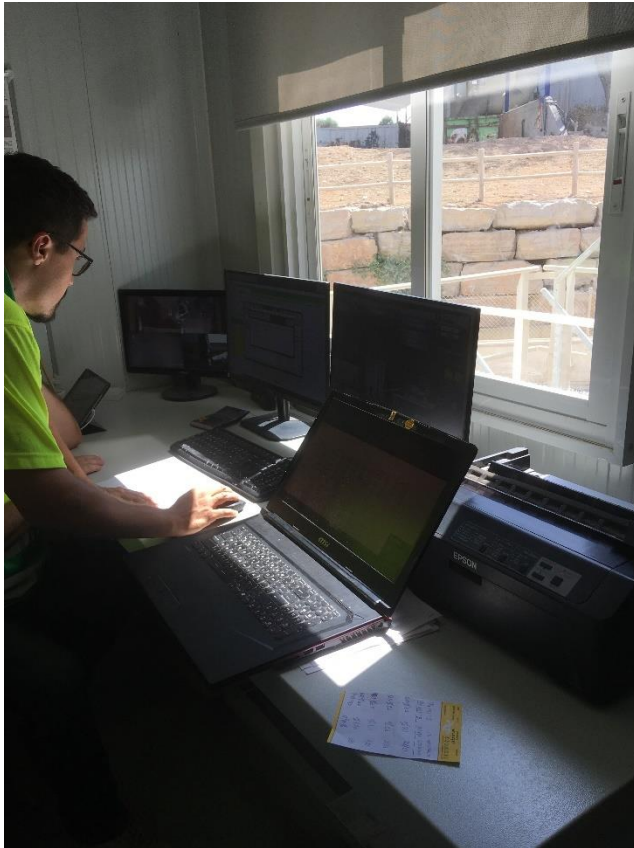
Obrázok 9. Tlakové skúšanie kocky

Výsledky preukázali, že samozhnutiteľný betón je omnoho viacej citlivejší na zmenu pomerov jednotlivých prísad ako tradičný betón. Prvá je problematika dosiahnutia optimálnych vlastností čerstvej zmesi a druhá je dosiahnutie čo najvyššej prípadne želanej pevnosti zatvrdnutej zmesi.

5. Prechod z laboratórnej do praktickej úrovne

Projekt vznikol v spolupráci s búracou spoločnosťou, ktorá zároveň produkuje betón vo veľkej mierke pre bežných zákazníkov. Bolo nám umožnené v predprípravnej fáze si overiť dávkovací vzorec, ktorý zahŕňal aktuálnu vlhkosť kameniva. Ráno v deň testovania sme obdržali aktuálnu saturáciu kameniva vodou a za úlohu bolo pripraviť kvalitatívne rovnakú zmes ako v laboratóriu. Výsledky preukázali veľmi dobrú zhodu s čerstvými parametrami, Pevnosť a jej vývoj v 7 a 28 dňoch bol odlišný z dôvodu iného typu cementu. Väčší objem spracovávanej zmesi má výrazný vplyv na

celkovú spracovateľnosť a teda na vlastnosti čerstvej zmesi. V laboratóriu sa pracovalo s objemom zmesi 15 – 20 litrov, kalibračný test v betonárni obsahoval 30 litrov zmesi. Finálna zmes bola strojovo miešaná v domiešavači a mala objem 2 metre kubické. Zo skúseností je možné dodatočne redukovať vodný súčiniteľ a teda zvýšiť pevnosť betonovej zmesi. Obrázok 10 je vkladanie receptúry do systému, snažili sme sa čo najviac priblížiť štandardnému procesu. Obrázok 11 je príprava pracoviska pred betonážou.



Obrázok 10. Vkladanie receptúry z velína



Obrázok 11. Pripravené pracovisko na betonáž

6. Momentálna situácia

Experiment je stále v procese, testovacia fáza nosníkov je v štádiu plánovania. Čiastočné výsledky potvrdili cieľovú valcovú pevnosť betónu v tlaku o hodnote 40 MPa a vyhovujúce vlastnosti čerstvej betonovej zmesi. 4 zhotovené nosníky obsahujúce výlučne pozdĺžnu nosnú výstuž budú namáhané do šmykového zlyhania. Taktiež sa plánujú testovať trámčeky na zistenie lomovej energie. Okrem nich sa testuje pevnosť v tlaku. Obrázok 12 sú vzorky merajúce zmrašťovanie v klimatickej komore a Obrázok 13 sú vzorky čakajúce na odskúšanie v zrejúcej komore. Nosníky sa vyhodnocujú pomocou metódy DIC (Digital Image Correlation). Obrázok 14. zobrazuje náhľad do programu GOM, zobrazuje sa hlavné pretvorenie, teda pretvorenie v smere väčšej deformácie.

7. Závery

Zvolením správneho prístupu dokážeme navrhnúť dostatočne pevnú zmes, ktorá bude spĺňať všetky stanovené kritéria. Prechod z laboratórnej do veľkoformátovej úrovne dokazuje možnosť

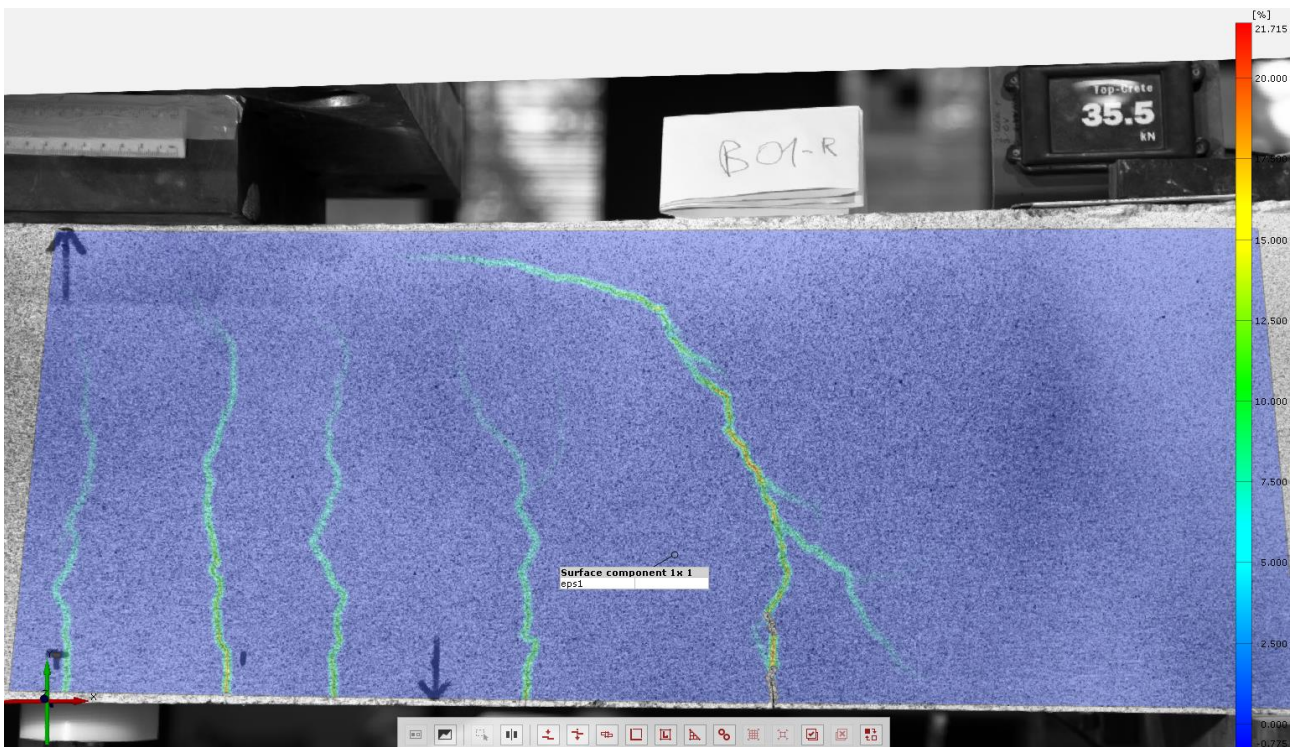
využívať betón so 100 percentnou náhradou recyklovaným kamenivom v budúcnosti pre bežných užívateľov. Dosiahnutie 28 dňovej valcovej pevnosti v tlaku je taktiež významná meta, ktorá otvára ďalšie možnosti využitia betónu z recyklovaného kameniva aj do viacej namáhaných konštrukcií.



Obrázok 12. Meranie zmrašťovania



Obrázok 13. Vzorky v zrejúcej komore



Obrázok 14. Digital Image Correlation

Literatúra

- [1] D. S. H. S. B. Z.-L. José-Luis Gálvez-Martos, “Construction and demolition waste best management practice in Europe,” *Resources, Conservation and Recycling*, no. 136, pp. 166-179, 2018.
- [2] E. Khoury, “Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic,” *Construction and Building Materials*, no. 175, pp. 705-713, 2018.
- [3] Mohseni, E., Saadati, R., Kordbacheh, N., Parpinchi, Z.S., Tang, W., Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate. *J. Clean Prod.* 168, 605-613, 2017

Michal Kázsmér¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 3. ročník

NÁVRH EXPERIMENTU PRE ZOSILNENIE PANELA Z KRÍŽOM LEPENÉHO LAMELOVÉHO DREVA NA ÚČINKY PRETLAČENIA POMOCOU VLEPOVANÝCH OCEĽOVÝCH PLATNÍ

PROPOSAL OF AN EXPERIMENT FOR REINFORCEMENT OF A CROSS- LAMINATED-TIMBER PANEL FOR PUNCHING BY USING GLUED IN STEEL PLATES

Abstract

This paper proposes an innovative solution for reinforcing cross-laminated-timber (CLT) for punching effects using a glued-in steel plate. The steel column head has the shape of a six-pointed star, which is inserted into the grooves in the CLT panels and filled with a two-component epoxy glue. Reinforcement, reduces the shear stress in the critical circumference and moves it away from the support, thus improving the punching resistance. The article presents a method of experimental testing of a steel head. Preliminary analysis indicated a possible increase in the resistance of the CLT panel by 22%. This solution is more effective than traditional methods but requires additional tests and analysis.

Kľúčové slová

Križom lepené lamelové drevo; Bodové podopretie; Koncentrované zaťaženie; Zosilnenie na účinky pretlačenia.

1 Úvod

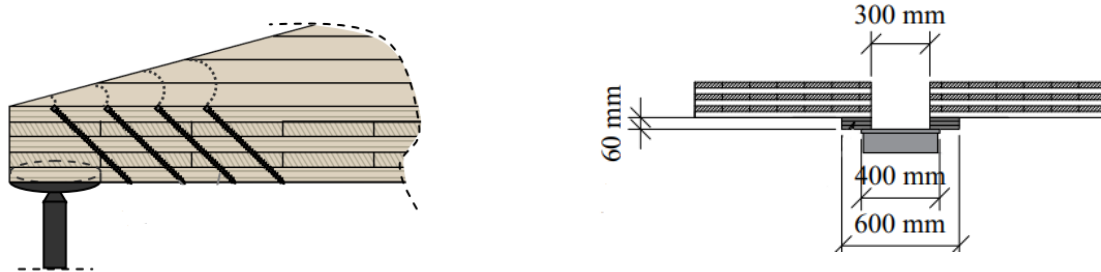
Vedecká a inžinierska komunita sa vo veľkej miere zamerala na dosiahnutie bodovo podoprených dosiek s veľkým rozpätím, počnúc vo Švajčiarsku v roku 2016 Zölligom [1], sľubovalo rozpätie dosiek 8 m x 8 m s premenným zaťažením do 5 kN/m². Pre dosiahnutie tohto cieľa je nutné vyriešenie dvoch základných problémov, s ktorými sa tento typ konštrukcie stretáva.

Prvou problematikou je momentovo tuhý alebo polotuhý spoj medzi CLT. Riešením tohto problému môžu byť na tupo lepené spoje pomocou polyuretánového (PU) lepidla [1], majú však niekoľko slabých stránok na ktoré upozorňuje Lei Zhang a kolektív [2]. Ohybová tuhosť a odolnosť spojov v rámci CLT bola skúmaná Sigong Zhang-om [3], kde autori preukázali veľmi nízku ohybovú tuhosť rôznych typov skrutkovaných spojov. Aktuálne vo svete prebieha výskum v oblasti ohybovo tuhých spojov v rámci CLT v Kanade na Univerzite v Britskej Kolumbií, doposiaľ bez publikovaných výsledkov.

Druhou problematikou je odolnosť CLT panelov v pretlačení, jedným z prvých výskumov v tejto oblasti uskutočnil Mestek v roku 2011, kde skúmal odolnosť bodovo podopretých CLT panelov bez zosilnenia a so zosilnením pomocou celozávitových crutov [4] [5] vid' Obrázok 1.

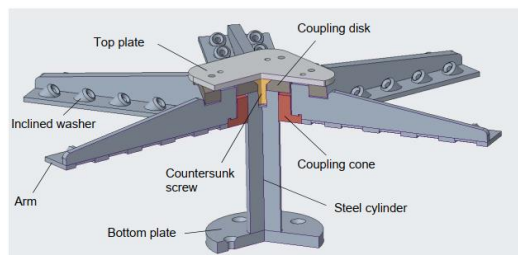
¹ Michal, Kázsmér, Ing. Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

Prvý komerčný výrobok pre zosilnenie nadpodperovej oblasti bol vyvinutý na Univerzite v Innsbrucku [6] [7] vid' Obrázok 2, tento produkt využíva princíp zosilnenia celozávitovými vrutmi. Muster skúmal vplyv otvoru (pre prestup stĺpa) na ohybovú odolnosť bodovo podopretého CLT panela a zosilnenie pomocou zhrubnutia panela nad podperou [8] vid' Obrázok 1.



Obrázok 1 Zosilnenie bodovo podopretej dosky pomocou vrutou (vľavo) [4] zosilnenie pomocou vlozenej hlavice na báze dreva (vpravo) [8]

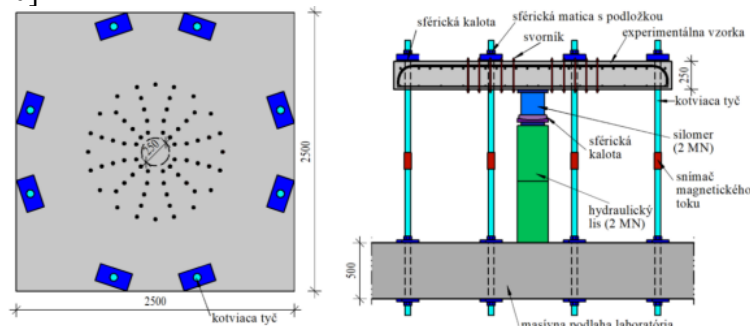
V súčasnosti jediné komerčné riešenie pre zosilnenie nadpodperovej oblasti predstavuje veľmi pracnú montáž, ktorá si vyžaduje aplikáciu minimálne 48 celozávitových vrutov na stavbe. Tento článok predstavuje nové riešenie pre zvýšenie odolnosti CLT panela v pretlačení pomocou vlepovanej ocelevej platne. Lepené platne by sa dali realizovať v dielni, čím sa výrazne skrátil čas montáže na mieste a bodovo podopreté dosky z CLT sa stali pre inžinierov atraktívnejšími.



Obrázok 2 Spider od Rothoblaas [7]

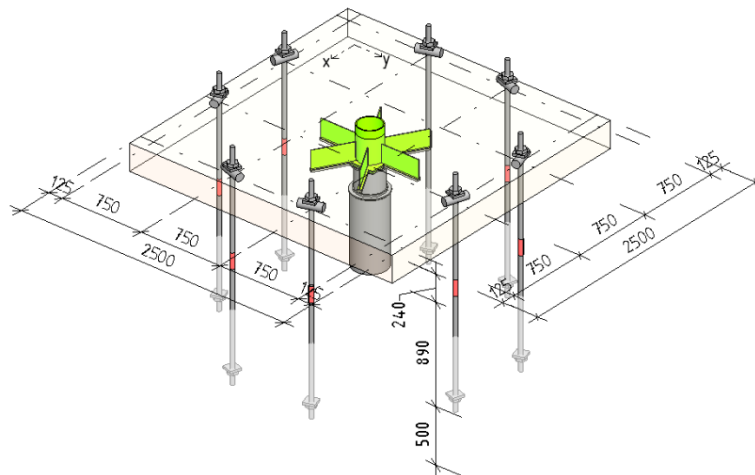
2 Materiály a metódy (Návrh experimentu)

Pre experimentálne overenie je navrhnutá experimentálna zostava založená na pretlačacích skúškach vykonávaných katedrou betónových konštrukcií a mostov, v Centrálnych laboratóriách Stavebnej Fakulty STU v Bratislave. Experimenty takéhoto charakteru vykonala napríklad M. Bolešová v roku 2022 [9]. Podobné experimenty boli vykonané na CLT paneloch aj autormi Mestekom [4], avšak s líniovým podopretím, Musterom [8] na zostave obrátenej vertikálne a Bogenspergerom [10].



Obrázok 3 Zostava experimentu podľa M. Bolešovej [9].

Experimentálna vzorka upevnená a podopretá v skúšobnej zostave simuluje lokálne podopretú stropnú dosku nad vnútorným stĺpom s rozpätím poľa približne 5 až 6 metrov. Vzorka je po obvode podopretá na ôsmich miestach pomocou kotevných tyčí M32 upevnených do podlahy. Kotevné body v podlahe sú usporiadané v pravidelnom rastru zhruba 750 mm. Ukotvenie tyčí nad hornou hranou vzorky je zabezpečené maticami a podložkami, pod ktorými sú umiestnené sférické kaloty. Vzorka je zaťažovaná oceľovou platňou s priemerom 280 mm a hrúbkou 25 mm z ocele triedy S355. Pod platňou, ukotvenou na dolnom povrchu vzorky, sa nachádza silomer s rozsahom 2 MN, uložený na sférickej mostovej kalote. Zaťažovanie dosky je realizované pomocou hydraulického lisu umiestneného pod kalotou na podstavci, aby bola zabezpečená dostatočná výška pod stropnou doskou.



Obrázok 4 Schéma zostavy experimentu

Budú vyhotovené 3 typy vzoriek, každý typ bude mať 4 identické vzorky (celkom 12 vzoriek). 1. typ je bez zosilnenia na účinky pretlačenia, s otvorom na prestup stĺpa priemeru 220 mm. 2. typ vzorky je zosilnený vlepovanou oceľovou hlavicou opísanou v nasledujúcich kapitolách bez perforácie a 3. typ je s perforáciou platne.

Počas zaťažovania všetkých vzoriek bude sledovaná sila vyvinutá hydraulickým lisom pomocou silomeru. Na všetkých kotviacich tyčiach bude umiestnené zariadenie sledujúce magnetický tok, ktoré určí prerozdelenie toku síl v doske medzi jednotlivé tyče. Pri hornom povrchu v okolí stĺpa bude umiestnených osem tenzometrov (štyri v jednom a štyri v druhom smere) na meranie pomerného pretvorenia krajnej lamely CLT v ťahu. Na štyroch stranách dosky, na jej okrajoch, budú umiestnené libely merajúce pootočenie vzorky. Okrem toho bude merané aj vertikálne premiestnenie panela pomocou snímačov dráhy LVDT. Ich rozmiestnenie v pôdoryse bude do kríža, od líca stĺpa po okraj vzorky. V každom smere budú umiestnené štyri snímače LVDT, čo predstavuje celkovo osem snímačov.

2.1 CLT panel

Zvolený bol 7-vrstvový panel celkových rozmerov 2,5 x 2,5 m, hrúbka 240 mm. Konfigurácia jednotlivých vrstiev 30-40-30-40-30-40-30. Rezivo použité v paneli minimálnej pevnostnej triedy C 24. Prierezové charakteristiky sú zhrnuté v Tabuľka 1

Tabuľka 1 Momenty zotrvačnosti CLT L7 30-40-30-40-30-40-30

Moment zotrvačnosti	$I_{x,net}$	$74,4 \times 10^7$	mm ⁴
Moment zotrvačnosti	$I_{y,net}$	$40,8 \times 10^7$	mm ⁴

2.2 Lepidlá

Vzhľadom na pokročilé štádium výskumu a štandardizáciu spojov z vlepovaných tyčí v drevených konštrukciách, napríklad autormi Tannert [11] Duchoň [13], použitie lepidiel bude predpísané v novej generácii Eurokódu 5. Požiadavky na mechanické vlastnosti dvojzložkových epoxidových a polyuretánových lepidiel definuje norma EN 17334:2021.

Nemecký technologický predpis "Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung Nr. Z-9.1-770", vydaný DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) [13]. Načrtáva technické požiadavky, výrobné procesy, a zhotovovacie ustanovenia potrebné na zaistenie bezpečného a efektívneho používania vlepovaných perforovaných platní v stavebníctve. predpisuje použitie dvojzložkového epoxidového lepidla WEVO-Spezialharz EP 32 S s urýchľovačom tvrdnutia WEVO B 22 TS. Použitie lepidiel definujú aj ich výrobcovia vo svojich technologických predpisoch ako napríklad pri výrobku XPEPOX od Rothoblaas [14].

Pre experiment bude zvolené práve lepidlo dvojzložkové epoxidové lepidlo XEPOX od Rothoblaas pevnostné charakteristiky tohto lepidla sú zobrazené v tabuľke 2. Použitie bude v prevedení L (liquid), ktoré sa odporúča na vyplnenie vysokých zvislých škár do hrúbky 2 mm. [14].

Tabuľka 2 Materiálové charakteristiky epoxidového lepidla XEPOX od Rothoblaas [14].

Osová pevnosť v ťahu (Adhézna)		27	MPa
Šmyková pevnosť (Adhézna)		27	MPa
Pevnosť v tlaku		88	MPa
Pevnosť v ťahu		36	MPa
Pevnosť v šmyku		28	MPa
Modul pružnosti v ťahu		4600	MPa
Modul pružnosti v tlaku		3098	MPa

2.3 Oceľová hlavica

Tento prvok sa skladá oceľového valca, vonkajšieho priemeru 216 mm a hrúbky steny 8 mm, presahujúceho nad úroveň CLT panela o 50 mm. Presah má zabezpečiť prípadné spojenie päty stĺpa z podlažia nad panelom Obrázok 5.

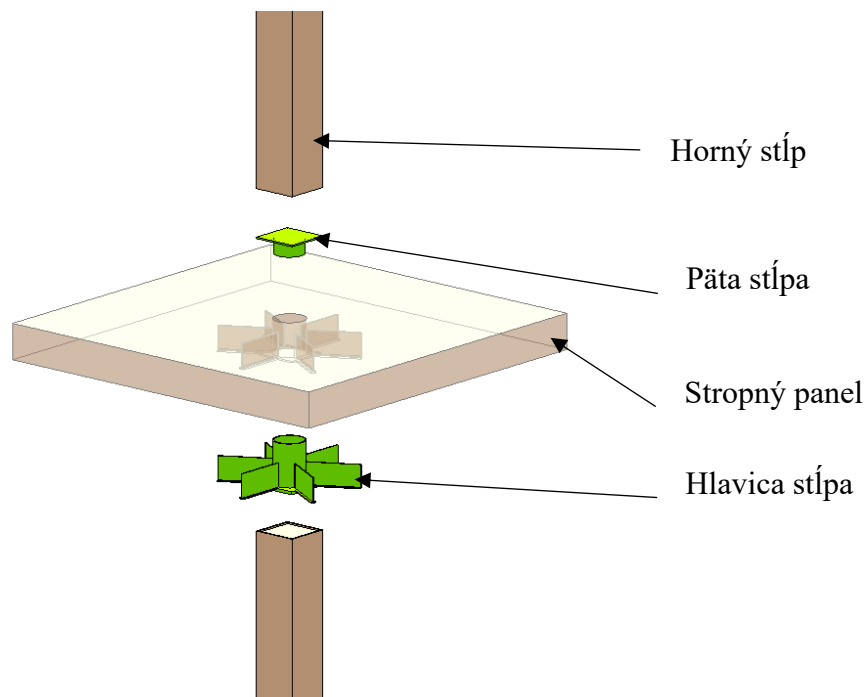
Hlavica je ukončená čelnou platňou na kontakte so stĺpom (v tomto prípade s hydraulickým lisom) o rozmeroch 280 x 280 mm hrúbky 20 mm. Pre zabezpečenie rovnomernej distribúcie kontaktného napätia v hornej hrane stĺpa. Pôdorys platne je zmenšený o 20 mm v zhl'adom k prierezu stĺpa, aby za zabezpečilo krytie oceľovej hlavice za povrchom drevených konštrukcií, pre zvýšenú odolnosť pri požiarnej situácii.

Ramená sú výšky 160 mm dĺžky 357 mm a hrúbky plechu 10 mm. Ramená neprebiehajú po celej výške CLT panela. Horné dve vrstvy panela ostávajú neporušené aby bol zabezpečený dvojosový prenos horných ťahových napätí od nadpodperového momentu cez prierez CLT. Tým sa predíde možným krehkým spôsobom porušenia na kontakte drevo-lepidlo-ocel'. Celkovo je v hlavici 6 ramien umiestnených radiálne s rozstupom 60°. Hlavica je vždy orientovaná tak aby štvorica ramien bola umiestnená v smere očakávaného vyššieho zaťaženia. V prípade symetrického pôdorysu zostavy, bude štvorica orientovaná v smere rovnobežnom s povrchovými lamelami.

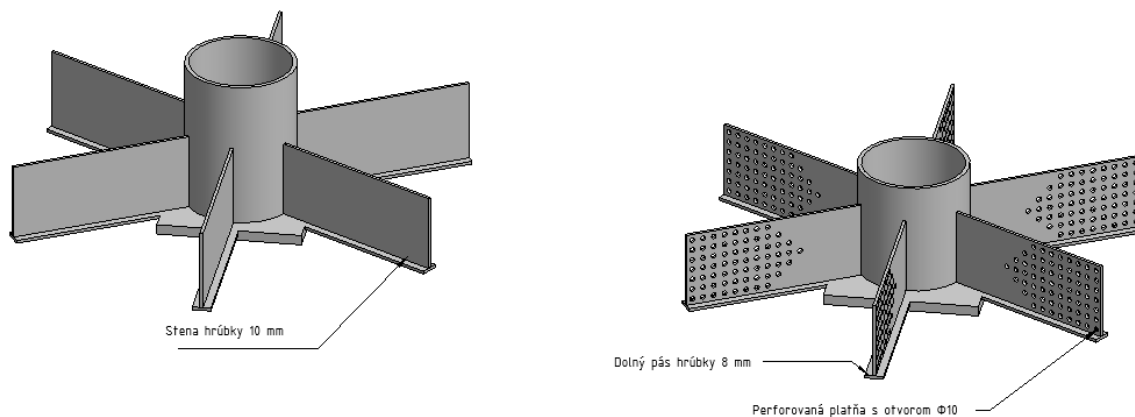
Dolný pásu ramien hlavice je o hrúbke 8 mm a šírky 50 mm. Všetky oceľové prvky budú z ocele S 355.

Ramená budú v dvoch možných vyhotoveniach, s perforáciou a bez. Výhodou ramien bez perforácie je, že ich prierez ostane neoslabený. Toto riešenie je však pracnejšie, pretože si vyžaduje opieskovanie na triedu SA2.5 /SA3. Následný náter adhéznym mostíkom podľa predpisu výrobcu.

V prípade riešenia s perforáciou bude na jednom ramene celkovo 65 dier priemeru 10 mm s osovým rozstupom 16 mm. Hlavica je v takomto prípade jednoduchšia na zhotovenia avšak klesá odolnosť celého spoja.



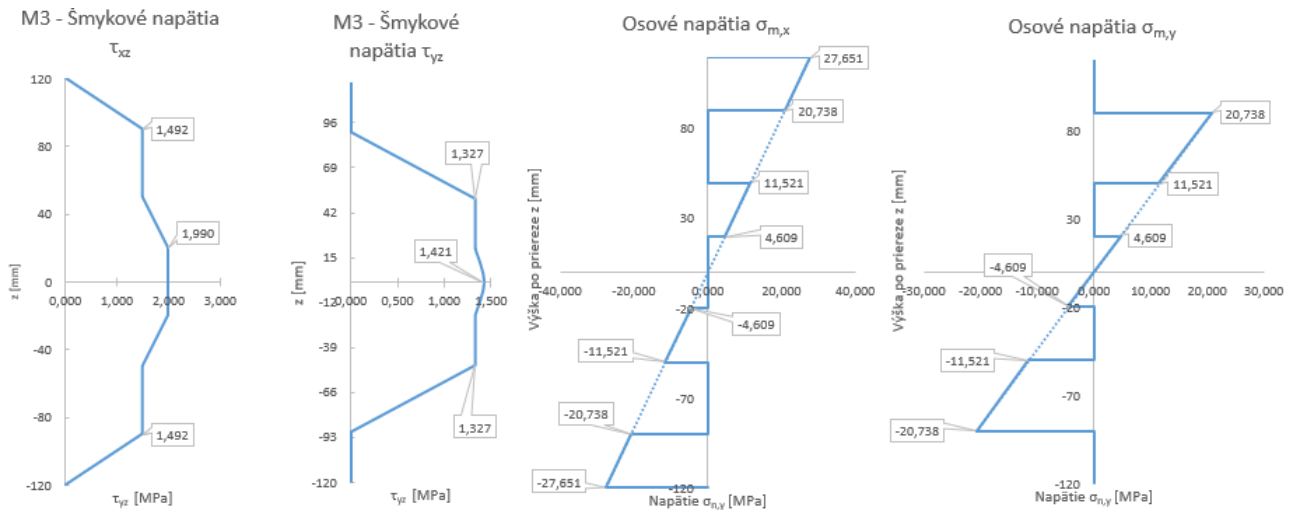
Obrázok 5 Schématické zobrazenie použitia ocelevej hlavice



Obrázok 6 Variantné riešenia hlavice

3 Odolnosť nezosilnenej dosky

Odolnosť nezosilnenej dosky bola stanovená na základe publikácie porovnávajúcej rôzne výpočtové prístupy bodového podopretia [15]. Stredná hodnota na základe výpočtov bola stanovená na $F = 471,91$ kN. Pričom táto sila zodpovedá sile v hydraulickom lise, pri ktorej nastane porušenie vzorky. Porušenie sa predpokladá vo valivom šmyku v hlavnom nosnom smere panela. Stav napätosti pri sile F_{mean} je opísaný v obrázku.

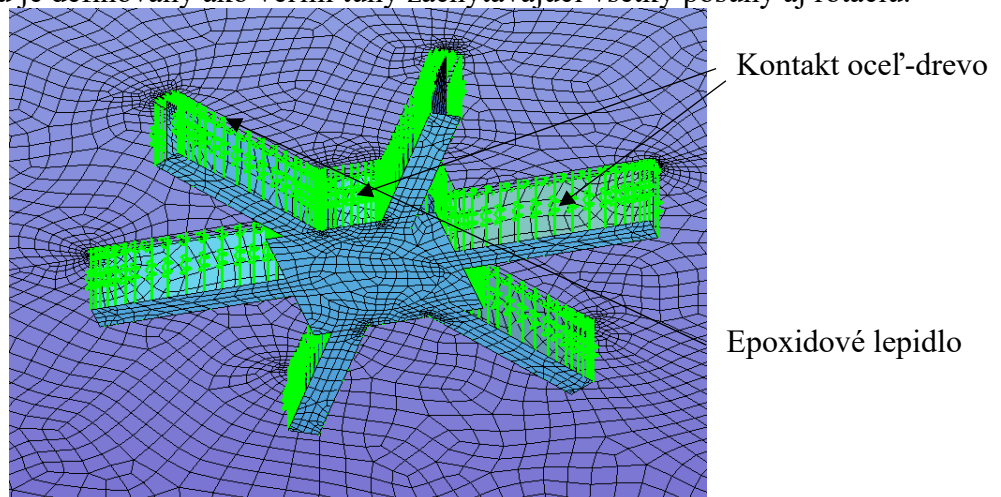


Obrázok 7 Priebeh napätí v priereze pri sile $F=471,91$ kN

Uvažovaná pevnosť panela vo valivom šmyku je $f_{\text{mean}} = 1,6$ MPa zvýšená o súčiniteľ $k_{r,pu} = 1,2$ podľa Mustera [8]

4 Odolnosť zosilnenej dosky

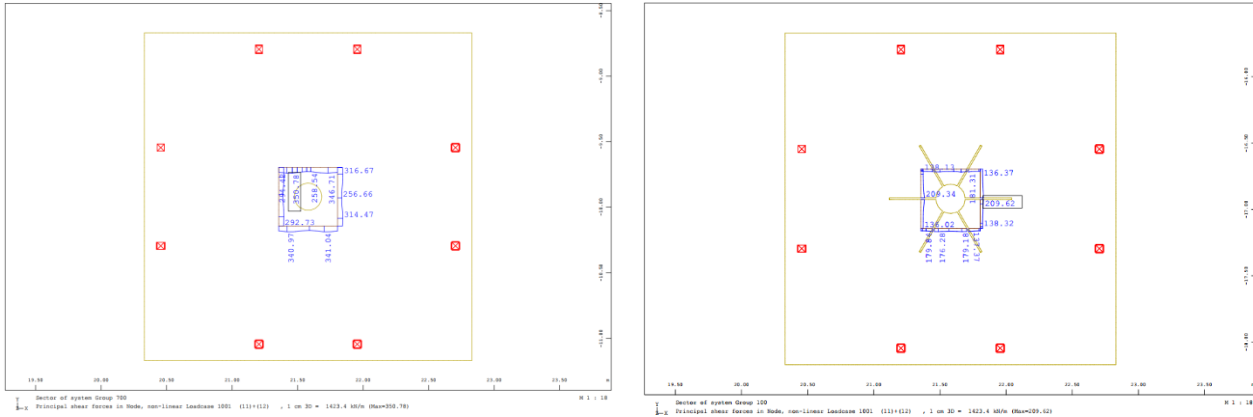
Doska so zosilnením bola uvažovaná v nasledujúcej konfigurácii: Hlavica s opieskovaním, a dolným pásom hrúbky 8 mm a šírky 50 mm, podľa Obrázok 6. Výpočtový model bol zhotovený podľa geometrie zostavy a použitých prvkov. Na zohľadnenie charakteristík CLT panela bol použitý vrstvený materiál, ktorý zodpovedal vlastnostiam CLT panela. Hlavica bola modelovaná z doskových prvkov, ktorá zodpovedajú skutočným rozmerom a materiálovým vlastnostiam prvku. Spoj medzi CLT panelom a hlavicom je definovaný ako veľmi tuhý zachytávajúci všetky posuny aj rotáciu.



Obrázok 8 Doskostenový MKP model

Ramena vlepenej hlavice prenesú časť priečných síl z dosky priamo do podpory, to možno pozorovať na znížení priečných síl v pôvodnom šmykovom obvode o zhruba polovicu, vid' Obrázok 9. Možno predpokladať aj posun skutočného kontrolného obvodu až za hranicu vlepenej hlavice. V tomto mieste by kontrolný obvod dosahoval celkovú dĺžku 2,766 m namiesto pôvodných 1,792 m. A tak sa odolnosť v pretlačení významne zvýši. Pri takomto náraste odolnosti dosky v pretlačení, možno predpokladať, že rozhodujúcim spôsobom porušenia nebude zlyhanie CLT panela v šmyku

ale zlyhanie horných ťahaných vrstiev CLT panela v dôsledku ohybového momentu. V prípade, že sa uvažuje stredná hodnota pevnosti reziva $f_{m,mean} = 34,0$ MPa tak sa predpokladá zlyhanie vzorky pri sile v lise $F_{reinforced} = 580,27$ kN.



Obrázok 9 Šmykové sily v doske na kontrolnom obvode pri sile F (vľavo) a pri sile $F_{reinforced}$ (vpravo)

5 Záver

Predbežná analýza ukázala, že vlepované platne môžu predstavovať relevantný spôsob zosilnenia nadpodperovej oblasti bodovo podopretého CLT na účinky pretlačenia. Zo zjednodušenej analýzy vyplýva, že by bolo možné dosiahnuť až 1,22 násobné zosilnenie panela s tým, že sa zmení dominantný spôsob porušenia na zlyhanie ťahaných vrstiev CLT panela v dôsledku ohybu, za predpokladu, že porušenie nenastane v lepidle. Konštrukčné riešenia, akými sú dolný pás ramien alebo zníženie výšky ramien o kritické ťahané lamely, sú zhotovené za cieľom čo najväčšieho zníženia namáhania lepidla a tak predídenie jeho krehkým zlyhaniam, ktoré boli pozorované a skúmané v [2].

Táto štúdia je však limitovaná zjednodušeným výpočtovým modelom. Daná problematika je veľmi komplexná a na správne zohľadnenie distribúcie síl do ramien hlavice a napätosti na kontakte drevo-lepidlo-ocel', je potrebné zhotovenie MKP modelu z objemových prvkov.

Obmedzenia tohto modelu sú menovite:

- Nutnosť analytického rozdelenia CLT panela v mieste vloženia hlavice, čo reprezentuje prerezanie panela po celej výške.
- Distribúcia síl do ramien hlavice iba v úrovni priesečníka strednice CLT panela a strednice ramena.

6 Diskusia

Na základe obmedzení možno zhodnotiť, že analýza je na strane bezpečnej z hľadiska návrhu ocelej hlavice, lebo v takomto modeli si ramená hlavice naviažu väčšiu silu ako v skutočnosti. A naopak na strane nebezpečnej z pohľadu šmykovej odolnosti CLT panela. Preto je nevyhnutné pre presnú analýzu a na potvrdenie týchto záverov problematiku skúmať aj na MKP modeloch z objemových prvkov.

Literatúra

- [1] Zöllig, S. et al.: Timber Structures 3.0 – New Technology For Multiaxial, Slim, High Performance Timber Structures. *WCTE 2016 :World Conference on Timber Engineering – proceedings*. Vienna, Austria, TU Wien, 2016, ISBN 978-3-903039-00-1
- [2] Lei Zhang, et al.: Robustness Of Adhesively Bonded Panel-To-Panel. *WCTE 2023 :World Conference on Timber Engineering – proceedings*. Oslo, Norway, 2023, ISBN 978-1-713873-29-7 <https://doi.org/10.52202/069179-0159>
- [3] Sigong Zhang, Ying Hei Chui.: Characterizing flexural behaviour of panel-to-panel connections in cross-laminated timber floor systems. *Structures*. 2020,Volume 28, s. 2047-2055. ISSN 2352-0124 <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.040>
- [4] Mestek, P., Winter, S.: Cross Laminated Timber (CLT)-Reinforcements with Self-Tapping Screws. *Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber*. Graz, Austria, 2013, ISBN 978-1-85790-181-8
- [5] Mestek, P.: (2011) *Punktgestützte Flächentragwerke aus Brettsper Holz (BSP) – Schubmessung unter Berücksichtigung von Schubverstärkungen*. [dizertačná práca]. München, Germany, Technischen Universität München.
- [6] Maurer, B., Maderebner, R.: Cross Laminated Timber under Concentrated Compression Loads - Methods of Reinforcement. *Engineering Structures*. 2021,Volume 245, s. 0141-0296. ISSN 0141-0296 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112534>
- [7] ETA-19/0700, SPIDER Connector and PILLAR Connector: Rotho Blaas s.r.l, Österreichisches " Institut für Bautechnik, Vienna (AUT), 2020.
- [8] Muster, M.: (2020) *Column-Slab Connection In Timber Flat Slabs* [dizertačná práca]. Zurich, Switzerland, ETH ZURICH.
- [9] Bolešová, M.: (2022) *Vplyv Histórie Zaťažovania Na Účinnosť Zosilnenia Lokálne Podopretej Stropnej Dosky Dodatočne Vloženou Šmykovou Výstužou*. [dizertačná práca]. Bratislava, Slovakia, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave.
- [10] Bogensperger, T. et al.: Timber Structures 3.0 – Concentrated load introduction in CLT elements perpendicular to plane. *WCTE 2016 :World Conference on Timber Engineering – proceedings*. Vienna, Austria, TU Wien, 2016, ISBN 978-3-903039-00-1
- [11] Ayansola, G. S., Tannert, T.: Glued-in multiple steel rod connections in cross-laminated timber. *The Journal of Adhesion*. 2020,Volume 98(6), s. 810-826. <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1962715>
- [12] Duchoň, V.: (2016) *Teoretická a Experimentálna Analýza Spojov s Vlepovanými Tyčami*. [dizertačná práca]. Bratislava, Slovakia, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave.
- [13] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung Nr. Z-9.1-770. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2020.
- [14] Technical data sheet by Rothoblaas XEPOX L – Liquid, two-component epoxy adhesive. 2022
- [15] Kázsmér, M.: Slab-Column Connection of Cross-Laminated Timber for Punching: Comparison of Current Simplified Methods. *Juniorstav 2024: Proceedings 26th International Scientific Conference Of Civil Engineering, s. 1-9*. Brno, Czechia, VUT v Brne, 2024, ISBN 978-80-86433-83-7. <https://doi.org/10.13164/juniorstav.2024.24093>

Anna Kováčová¹

Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 2

PRÍPRAVA EXPERIMENTU ŠTÍHLÝCH BETÓNOVÝCH STĽPOV PRI STRATE STABILITY

PREPARATION OF EXPERIMENT FOCUSED ON SLENDER CONCRETE COLUMNS AND FAILURE DUE TO LOSS OF STABILITY

Abstract

In the European Concrete Design Standard there is the possibility of using the general nonlinear method in practice for compressed members. In the design of slender structures, the influence of second-order theory is a very important part of the design. Loss of stability is another phenomenon this article focuses on. The article presents a preparation of experimental analysis of the slender columns, that fail due to loss of stability inside of their design interaction diagram.

Increase of bending moment due to second order effect can be calculated with three methods. Method of nominal stiffness, method of nominal curvature and general nonlinear method. Approach based on general nonlinear method shows deficit of global reliability for cases, when the concrete columns fail by the stability loss before reaching the design resistance in the critical cross-sections. Whole study is based on nonlinear calculations in various software and points out unpredictability of this calculation method. Numerous nonlinear calculations lead to cross section of column that will be tested in laboratory [1].

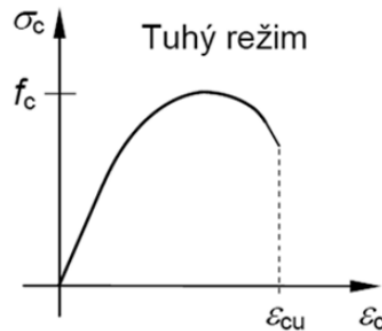
1. Úvod

V tejto práci sa venujem opisu všetkých dôležitých náležitostí potrebných na prípravu experimentu zameraného na stratu stability pri štíhlych stĺpoch. Strata stability je definovaná ako typ krehkého zlyhania, čo v praxi znamená, že zlyhanie nastane náhle bez viditeľných známkov blížiacej sa poruchy. Stabilné zlyhanie je spájané so štíhlymi prvkami. Aj z tohto dôvodu je potrebné zohľadniť teóriu druhého rádu, ktorá zahŕňa dodatočné ohybové momenty vyplývajúce z vybočenia stĺpa pod vplyvom vonkajšieho zaťaženia. V súčasnosti platnej norme sa uvádzajú tri výpočtové metódy zohľadnenia vplyvov druhého rádu [2]. Bežná prax nám poukazuje na primárne využívanie najmä metódy nominálnej krivosti a metódy nominálnej tuhosti. Výpočet, danými metódami, je pomerne jednoduchý a vykazuje dostatočnú spoľahlivosť čo sa týka vysokých štíhlych nosných prvkov. Poslednou nespomenutou metódou na zohľadnenie teórie druhého rádu je všeobecná nelineárna metóda. Daná metóda sa preukázala ako najúčinnějšía, no zároveň nesie v sebe veľké riziko, čo sa týka bezpečnosti výpočtov. Nelineárne výpočty požadujú veľké množstvo skúseností a na základe širokého spektra užívateľov a predošlých prác je očividné, že ani získané skúsenosti nemusia byť zárukou správneho výsledku. Cieľom tejto práce je opis prípravy experimentu, ktorý poukáže na vyššie spomenuté problémy.

¹ Anna, Kováčová, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

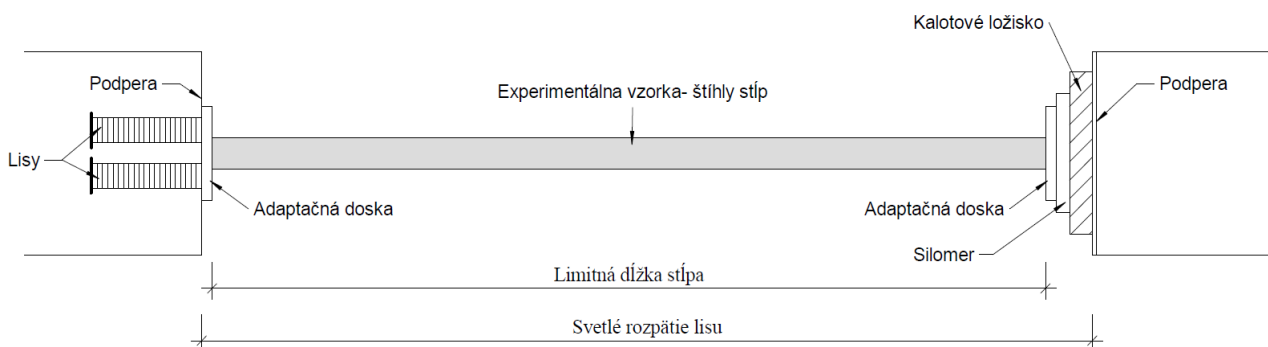
2. Okrajové podmienky experimentu

Na experimentálne overenie zvolenej numerickej nelineárnej analýzy sú kladené určité nároky na použité laboratórium. Požaduje sa tuhý režim zaťažovania. Zaťažovanie v tuhom režime je také, pri ktorom sa mení veľkosť zaťaženia tak, že rýchlosť zmeny pomerného pretvorenia je konštantná. Získame aj klesajúcu vetvu pracovného diagramu betónu.



Obrázok 1: Pracovný diagram betónu - Tuhý režim

Ďalšou dôležitou podmienkou je dĺžka skúmaného stĺpa a zaťaženie stĺpa. V aktuálnom stave riešenia predpokladáme dĺžku stĺpa 12m. V prípade nedostatočnej kapacity, uvažujeme aj s možnosťou vyhotoviť experiment v mierke 1:2. Experimentálne vzorky budú skúšané v polohe ležmo. Je teda nevyhnutné navrhnuť zostavu, ktorá bude spĺňa všetky požiadavky. V laboratóriu sa musí nachádzať lis, ktorý je schopný vyvinúť dostatočnú osovú silu potrebnú na porušenie skúmanej vzorky. Na základe vyššie uvedených podmienok je výber laboratória stále v procese riešenia. Do úvahy pripadá Laboratórium TU vo Viedni, prípadne Technická univerzita v Košiciach. Následne zvolený spôsob skúšania bude zohľadnený v nelineárnych výpočtoch, za pomoci ktorých bude vykonaná analýza.



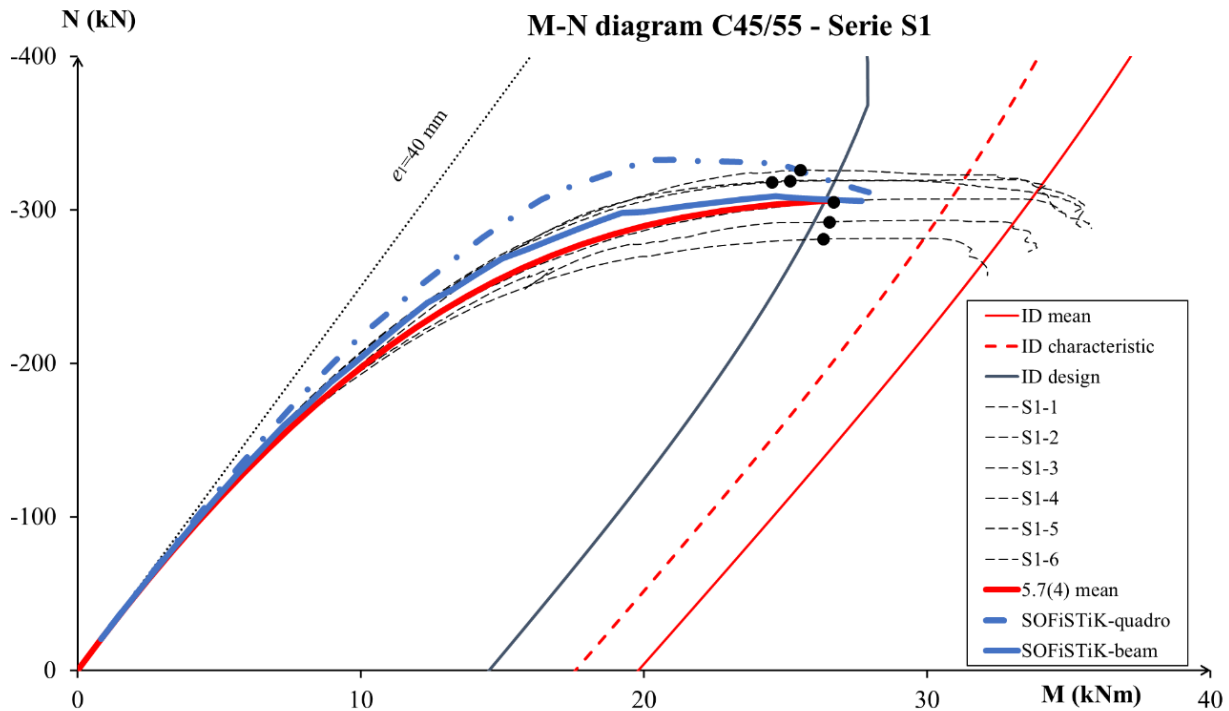
Obrázok 2: Schéma zaťažovacej zostavy

3. Nelineárna analýza – návrh prierezu stĺpa

3.1 Nelineárne modelovanie

Ako je uvádzané vyššie v článku, výpočet pomocou nelineárnej analýzy vyžaduje určitú úroveň skúseností a poznatkov. Je preto nevyhnutné najskôr analyzovať štíhle stĺpy, ktoré už boli experimentálne overované v minulosti, a to konkrétne na Katedre betónových konštrukcií a mostov.

Na základne získaných výsledkov bolo zistených niekoľko aspektov, ktoré ovplyvňujú nelineárne výpočty. Zhodu nelineárnej analýzy s výsledkami staršieho experimentu možno nájsť v Obr. 3. Samotné výsledky úzko ovplyvňuje spôsob modelovania stĺpa. Stĺpy modelované pomocou plošných prvkov nedosahovali podobné výsledky ako stĺpy modelované pomocou prútových prvkov. Stĺpy modelované pomocou plošných prvkov sa ukázali ako tuhšie, a stĺpy modelované z prútových prvkov dosiahli výbornú zhodu s vykonaným experimentom. Neštandardnosť modelovania pomocou plošných prvkov bola zvolená kvôli snahe zistenia post-kritického správania stĺpa vid'. Obr.3. Na nelineárny výpočty sme sa rozhodli použiť výpočtový program SOFiSTiK.



Obrázok 3: Odolnosť viacerých modelov a výsledky experimentu stĺpov S1 z roku 2013.

3.2 Podmienky pre hľadanie prierezu stĺpa

Pri samotnom návrhu stĺpa je dôležitá vedomosť o spôsobe namáhania skúmaného stĺpa t. j. či je kritický prierez namáhaný prevažne ohybom alebo tlakom. V pripravovanom experimente chceme dosiahnuť, aby prišlo k porušeniu až nad hranicou návrhovej hodnoty tlakovej pevnosti betónu (1). Ak skúmaný stĺp budeme vedieť zaťažiť silou väčšou ako je táto sila, dosiahneme prevažne zaťažovanie tlakom.

Pôsobenie vlastnej tiaže sme schopní do určitej miery ovplyvniť vyvážením skúšaného stĺpa telesom rovnakej tiaže. To by malo do značnej miery vplyv na schému zaťažovacej zostavy.

Ak chceme prehlásiť, že stĺp zlyhal na stratu stability, musí zlyhať vo vnútri návrhového diagramu vytvoreného pre kritický prierez. Ďalšou podmienkou je pomerné pretvorenie betónu pri hornom povrchu menšie ako 1,5%. Jedna z posledných podmienok je podmienka vzniku trhliny. Nie je taká podstatná ako predošlé podmienky, ale nechceme aby na prvku vznikli trhliny pred porušením. Materiálové požiadavky na stĺp nie sú konkrétne, ale chceme s pevnosťou betónu zostať v bežne používaných hodnotách v praxi [3].

$$F_{cd, lim} = x_{lim} * b * f_{cd} \quad (1)$$

Kde x_{lim} je limitná poloha neutrálnej osi

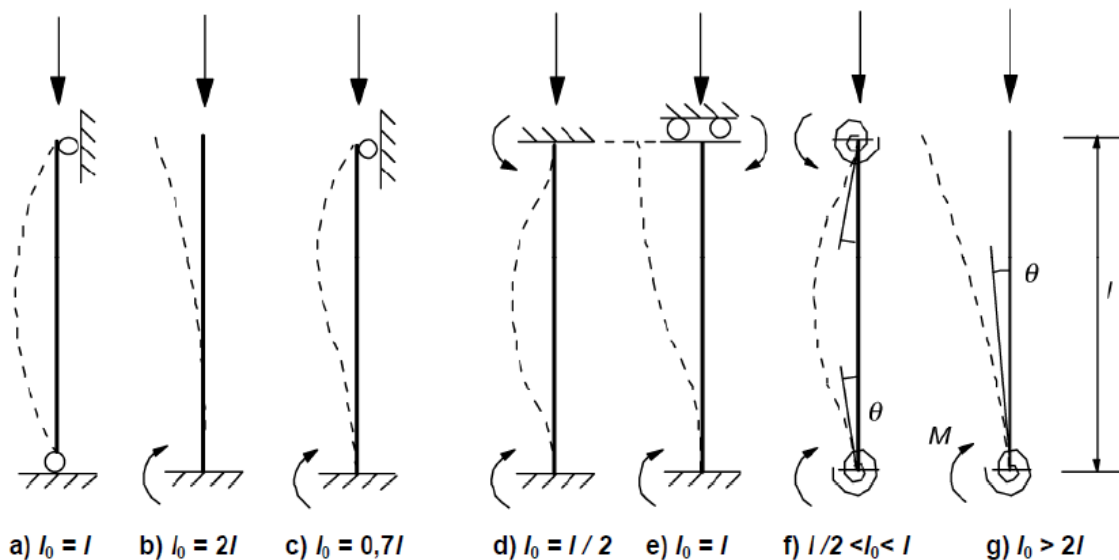
b šírka stĺpa
 F_{cd} návrhová pevnosť betónu

Na základne predchádzajúcich prác na Katedre betónových konštrukcií a mostov vyplýva, že celková bezpečnosť návrhu štíhlych železobetónových prvkov s použitím všeobecnej nelineárnej metódy klesá s narastajúcou štíhlosťou prvku. Pri určovaní štíhlosti stĺpa je kľúčovým faktorom vzperná dĺžka. Vzperná dĺžka je definovaná ako teoretická dĺžka stĺpa medzi bodmi, kde ohybový moment je nulový. Vzorec na výpočet štíhlosti λ (2) stĺpa závisí od účinnej dĺžky a polomeru zotrvačnosti prierezu bez trhlín [4].

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \quad (2)$$

Kde l_0 je účinná dĺžka
 i polomer zotrvačnosti prierezu

Naším cieľom je skúmať prvky s prislúchajúcou štíhlosťou väčšou ako $\lambda=90$.



Obrázok 4: Vplyv okrajových podmienok na účinnú dĺžku

S pevne stanovenými obmedzeniami a po zistení všetkých náležitostí laboratória, ktoré spĺňa naše požiadavky, budeme pokračovať rozsiahlou primárnou štúdiou, ktorá bude mať za cieľ nájsť všetky ďalšie spôsoby smerovania výskumu. Rozhodli sme sa analyzovať 4 stĺpy s použitím 4 rôznych typov betónu v pomere 1:2. Počiatočná excentricita sa bude variovať v rozmedzí 5-40mm.

Tabuľka 1: Rozmery prierezov spolu s triedami betónov použitých pri analýze

Použité betóny	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	
$l_0=6m$					
OZN	b (m)	h (m)	φ (m)	n	ρ %
St1	0.15	0.25	0.016	4	2.144
St2	0.15	0.3	0.016	6	2.679
St3	0.15	0.35	0.016	6	2.297
St4	0.15	0.35	0.016	8	3.062

Po vykonaní veľkého množstva nelineárnych výpočtov sme dostali výsledok a to prierez stĺpa St4, ktorý bude zaťažovaný silou s excentricitou o veľkosti 10 mm. Trieda použitého betónu je C50/60. Stĺp s takýmto prierezom a dĺžkou 6 m spĺňa všetky požiadavky, ktoré sme chceli dosiahnuť.

3.3 Overenie nelineárnych výpočtov

Kvôli dôkladnému overeniu získaných nelineárnych výpočtov sa následne budú dané výpočty overovať za pomoci ďalších troch výpočtových programov. Nelineárnym softwarom vytvoreným na katedre, Stab2NL, použitý na analýzu železobetónových stĺpov v minulosti, a komerčný program Scia Engineer.

4. Experimentálne overenie

Pri experimentálnom overovaní našich získaných predpokladov budeme na skúmaných stĺpoch merať pretvorenia dolného a horného povrchu, deformáciu stĺpa v strede rozpätia, napätia na tlačenej časti a vnášanú osovú silu, ktorou budeme skúmaný stĺp zaťažovať. Zvyšné detaily ohľadom zaťažovacej zostavy ako aj spôsoby a postup jednotlivých meraní skúmaných premenných budú ozrejmene po výbere konkrétneho laboratória a po stretnutí so zástupcami.

5. Záver

Nelineárna metóda sa v súčasnej dobe využíva v čoraz väčšej miere a tento trend sa vzhľadom na rozvoj výpočtovej techniky a dostupnosť nelineárnych softwarov bude len stupňovať.

Pripravovaný experiment nadviaže na predošlý výskum vykonaný na Katedre betónových konštrukcií a mostov. Jeho príprave bola venovaná značná pozornosť a tento princíp bude zachovaný aj pri doladení chýbajúcich neznámych a následnej realizácii experimentu.

Predpokladaný výsledok experimentu by mal poukazovať na riziko spojené so stratou stability štíhleho železobetónového prvku, pri nevyužití kompletných materiálových charakteristík betónu a výstuže.

Použitá literatúra

[1] BENKO, V. a kol.: Failure of slender concrete columns of loss of stability. *Key Engineering Materials : Reliability Aspects in the Design and Execution of Concrete Structures*. Vol. 691, 2016, s. 185-194. ISSN 1013-9826.

[2] BENKO, V. - STRAUSS, A. - TAUBLING, B. - VALAŠÍK A.- ČUHÁK, M.- a kol.: Reliability of slender columns, *Beton - und Stahlbeton*, vol. 112, 2017

[3] STN EN 1992-1-1: 2006 (73 1201) Eurokód 2- Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy, 2006

[4] DOBRÝ, J.: Nonlinear analysis of slender reinforced concrete columns. Bratislava : s.n., 2021.

Silvia Martinkovičová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 4

Statické pôsobenie krovov z hľadiska ich historického vývinu

Static Effect of Roof Trusses from the Perspective of their Historical Development

Abstract

The article focuses on the research of the historical development of the statics of truss structures. The period between the 14th and 19th centuries is characterized by a significant construction boom and advancements in roof structures, particularly in the territories of the Czech and Slovak Republics. This construction progress was reflected not only in the creation of new, more efficient, and modern roof structures, but also in the reconstruction of older roofs of historical buildings. To understand the structural development of roofs across different periods, it is essential to grasp not only the construction solutions but also their static models. Therefore, this static analysis of the historical development of roof structures provides new and valuable insights for modern carpentry.

Kľúčové slová / Key Words

Tesárstvo; Historický krov; Statická analýza

1. Úvod

Cieľom tejto práce bolo vykonať konštrukčnú analýzu viacerých konštrukčných typov krovov naprieč obdobiami. Historické krovky z obdobia 14. až 19. storočia sa vyznačujú zaujímavými priestorovými konštrukčnými riešeniami, ktoré dodávajú týmto stavbám veľkú rozmanitosť. Rôzne priestorové riešenia krovov striech boli odvodené zo základných typov konštrukcii striech. V priebehu tohto obdobia prišlo k stavebnému vývinu systémov krovov od najjednoduchších foriem k zložitejším a sofistikovanejším riešeniam. V historickom vývine je potrebné sa pozastaviť najmä na konštrukčnom riešení krovov najmä z 18. storočia, kde prišlo práve nielen k zníženiu sklonu strechy ale aj vytvoreniu iného modernejšieho priestorového a tuhostného riešenia konštrukcie krovu. Krovky z tohto obdobia sa začali vyznačovať vysokou vyspelosťou a modernými praktickými riešeniami. Avšak aj napriek inovatívnym riešeniam mali svoje nedostatky, ktoré až po čase prejavili najmä v degradácii konštrukcie, kedy sa zaťaženie začalo prenášať na iné prvky a to nebolo v súlade s prvotným návrhom. [1] V tom príspevku je uvedený historický konštrukčný vývin krovov počas piatich storočí a ich statická analýza.

2. Krovové krovky zo 14. storočia

V 14. storočí boli krovky charakteristické svojou konštrukčnou jednoduchosťou. Boli navrhované pre stavby s menším rozpätím strechy, ako napríklad dedinské kostoly. Táto jednoduchá konštrukcia sa stala východiskom pre neskoršie, zložitejšie krovky a jej využívanie pretrvávalo od stredoveku až do 19. storočia.

¹ Silvia Martinkovičová, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 810 05 Bratislava

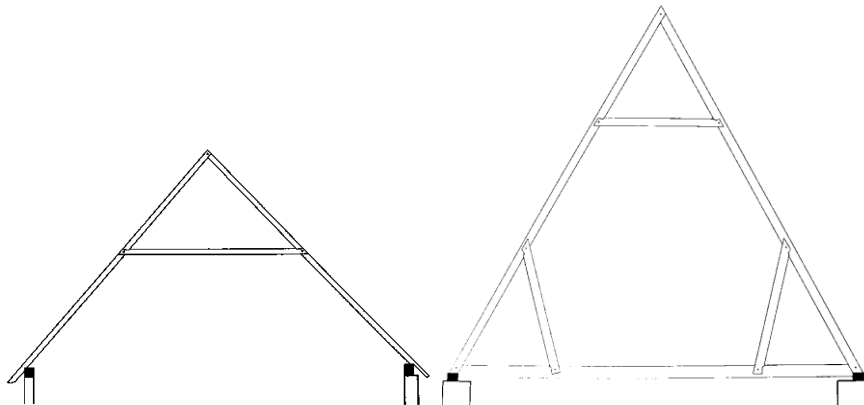
Medzi najčastejšie konštrukčné systémy krovov v 14. storočí patrili: jednoduché hambáľkové krovov, hambáľkové krovov s pätnými vzperami a krovov s ondrejskými krížmi medzi krokvmi [2]. Práve tieto sústavy sa dajú považovať za základný a univerzálny model.

2.1 Jednoduché krovov s hambáľkom

Najjednoduchšia konštrukcia krovu v tvare písmena a. V jednoduchých hambáľkových krovov sa nachádza prvok zvaný hambáľok, ktorý je umiestnený na jednej alebo viacerých úrovniach v priečnom smere konštrukcie a spája krokvy. Hambáľkový systém sa používal predovšetkým pri menších rozpätiach, ako napríklad pri krovov ľudových domov alebo malých kostolných svätýň. V neskoršom období, po pridaní väzného trámu, sa však uplatňoval aj pri väčších rozpätiach, ako pri krovov lodí vidieckych kostolov [3]. Na obrázku č.1 je zobrazená konštrukcia jednoduchého hambáľkového krovu.

2.2 Krokvové krovov s hambáľkom

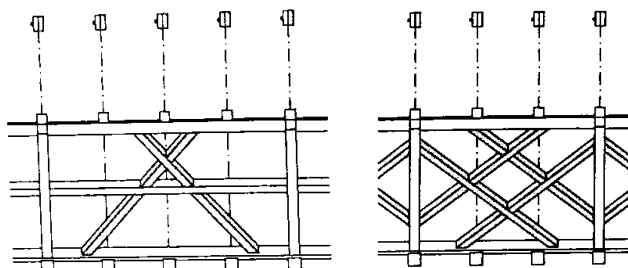
Krokvovo-hambáľkové krovov sú doplnené o konštrukčný prvok s názvom vzpera. Daný prvok sa nachádza v konštrukcii vertikálne tzv. klasické vzpery alebo šikmo tzv. pätné vzpery. Tieto krovov patria medzi najstaršie konštrukčné systémy striech na Slovensku. Boli využívané od stredoveku až po 18. storočie [3]. Na obrázku č. 1 je zobrazená konštrukcia jednoduchého hambáľkového krovu s pridanými pätnými vzperami.



Obrázok č.1: Schéma a rez: krokvovo-hambáľková sústava [2]

2.3 Jednoduché krovov s Ondrejskými krížmi

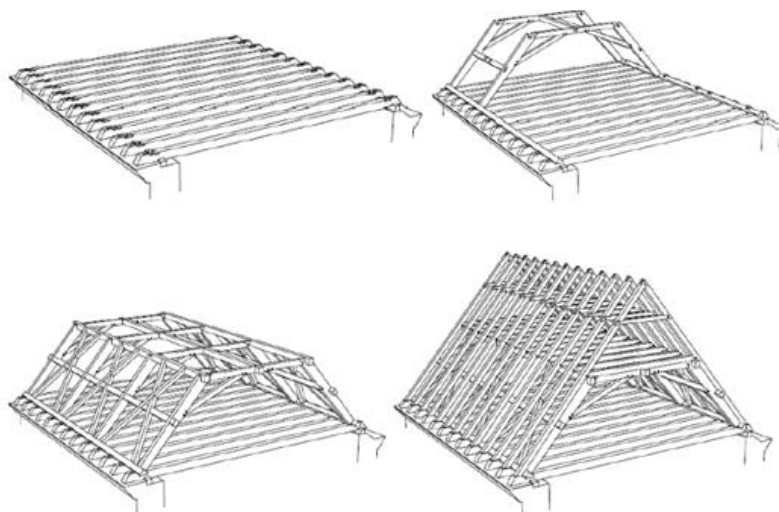
Historické krokvovo-hambáľkové krovov často obsahovali diagonálne prekríženie krokiev v tvare písmena „X“, nazývané Ondrejský kríž (Obr. 2). Tento konštrukčný prvok bol typický hlavne pre územie Českej republiky a Nemecka.



Obrázok č.2: Schéma jednoduchého a dvojitého Ondrejského krížu [2]

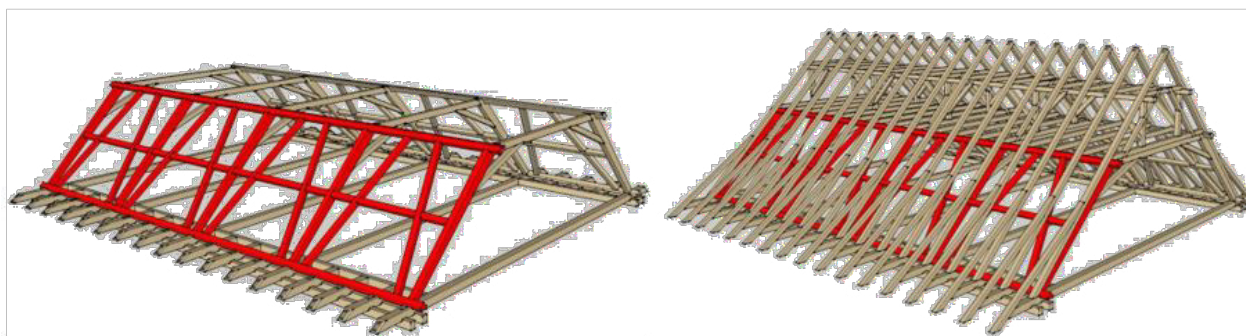
3. Barokové krovy 18. storočia

Vznik ležatých stolíc v období stredoveku sa stal významným a pozoruhodným fenoménom, ktorý sa rýchlo rozšíril po celej Európe. Ležaté stolice našli svoje uplatnenie v rôznych typoch konštrukcií, pričom najväčšie využitie zaznamenali v krovoch väznicového a krokrového typu. Hlavnou výhodou tohto riešenia oproti iným typom krovov bola možnosť kombinovať ich s ďalšími typmi stolíc a rôznymi systémami vešadiel pri väčších rozpätiach. Medzi ďalšie výhody patrí voľný priestor pod rozperami a efektívny prenos zaťaženia. Pri ležatých stoliciach sa zaťaženie prenáša na pomúrnice, ktoré slúžia ako stabilné opory pre kľúčové konštrukčné prvky krovu, ako sú väzné trámy a krátčatá. Tento systém efektívne rozvádza zaťaženie do bočných strán konštrukcie, čo je výsledkom prepracovaného dizajnu ležatej stolice. Okrem pomúrníc, väzných trámov a krátčat obsahuje ležatá stolica aj ďalšie dôležité priečne prvky, ako sú rozpery a pásiky, ktoré spevňujú rohy konštrukcie. Vďaka týmto priečnym prvkom je ležatá stolica samonosná, čo umožňuje jednoduché zdvíhanie ostatných prvkov počas výstavby ako môžeme vidieť na obrázku č.3. [4].

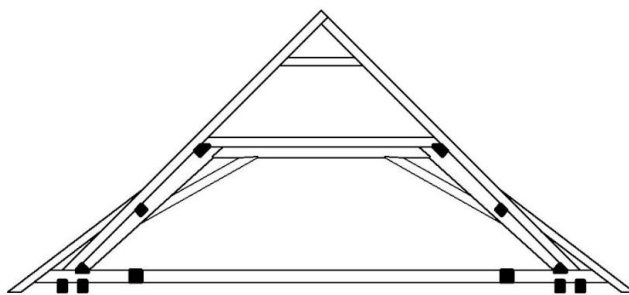


Obrázok č.3: Schéma postupu výstavby, kresba: Lukáš Hejný [4]

Na obrázku č. 4 je viditeľné, že ležaté stolice zohrávali dôležitú úlohu už počas samotnej výstavby. Vďaka svojej priestorovej tuhosti a vnútornej „samonosnej klietke“ (Obr. 4) umožňovali inštaláciu a vztyčovanie ďalších konštrukčných prvkov. Na pripravené rozpery bolo možné položiť dosky, čím sa vytvorila pochôdzna plošina, ktorá uľahčila ďalšiu prácu na stavbe krovu. Toto riešenie zároveň zvyšovalo odolnosť celej konštrukcie, pretože v prípade zlyhania niektorého prvku zostala konštrukcia stabilná. Priečna väzba typickej ležatej stolice je zobrazená na obrázku č. 5.



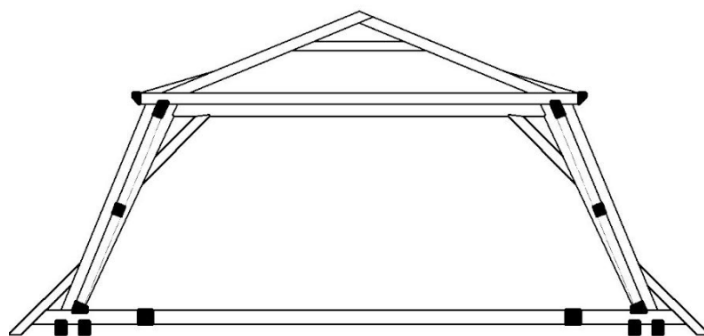
Obrázok č.4: Vnútorňa tuhostná časť konštrukcie ležatej stolice, model: Pavel Vonšovský, Silvia Martinkovičová



Obrázok č.5: Schéma ležatej stolice podľa .J. Schübler, : Pavel Vonšovský. Silvia Martinkovičová.

3.1 Manzardové krov

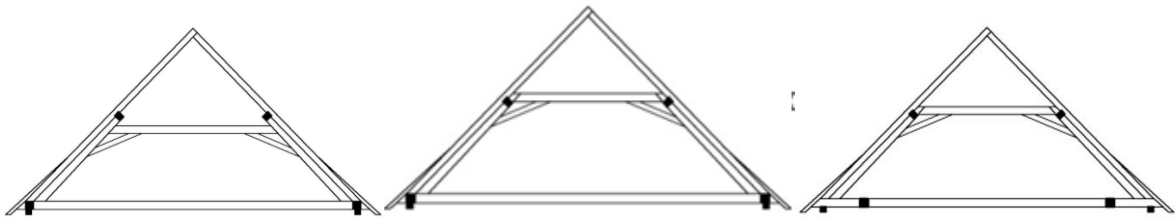
V barokovom období je dôležité spomenúť vznik typickej manzardovej strechy (obr. 6), ktorá umožnila zväčšiť vnútorný priestor a uvoľniť podkrovie. Tento typ strechy navrhol francúzsky architekt François Mansart (* 1598 – † 1666), podľa ktorého je aj pomenovaná. Konštrukcia mansardových krovov sa zásadne nelíši od sedlových alebo valbových striech, avšak ich charakteristickým znakom je zalomenie strešnej roviny v mieste dolného strešného hambálku, ktorý presahuje. Tento hambálok zároveň slúži ako väzný trám hornej časti krovu. Vďaka presahom je možné znížiť sklon strechy, čo vytvára priestor pre dekoratívne prvky, ako sú ozdobné rímasy po celom obvode [4].



Obrázok č.6: Schéma Manzardovej stolice podľa J. Schübler: Pavel Vonšovský. Silvia Martinkovičová.

3.2 Rankové úsporné krov

Vrcholom vývoja ležatých stolíc v barokovom období bol vznik Ránkovho úsporného krovu (obrázok č. 8), ktorý bol patentovaný v roku 1831. Tento typ krovu je pomenovaný podľa pražského tesárskeho majstra a podnikateľa Michela Raneka. Ránkov úsporný krov zjednodušil konštrukciu, ktorá vychádzala z tradičnej barokovej ležatej stolice. Úspora sa dosiahla vypustením hambálka, ktorý sa v klasickej ležatej stolici nachádzal tesne nad rozperou. Ránkov úsporný krov existoval v niekoľkých variantoch konštrukcie, od verzie A a B až po tzv. deriváty. Hlavným rozdielom medzi konštrukčnou variantou A a variantou B je poloha väznice v krove. Zatiaľ čo vo variante A je väznica umiestnená nad úrovňou rozpery a vložená medzi plné väzby krovu, vo variante B je väznica priebežná, prechádza cez všetky väzby a je umiestnená pod úrovňou rozpery. Ránkov úsporný krov vo variante nazvanej ako derivát (obrázok č.7) už obsahoval iné konštrukčné riešenie spodných prvkov krovu. Boli pridané konštrukčné prvky vo forme krácat a výmen.

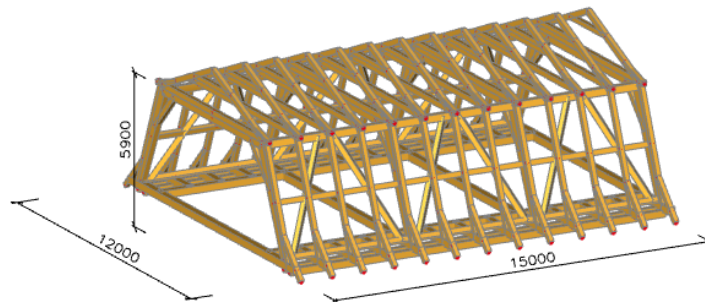


Obrázok č.7: Schéma Rankovho úsporného krovu variant A, B a derivát: Pavel Vonšovský. Silvia Martinkovičová.

4. Statická analýza

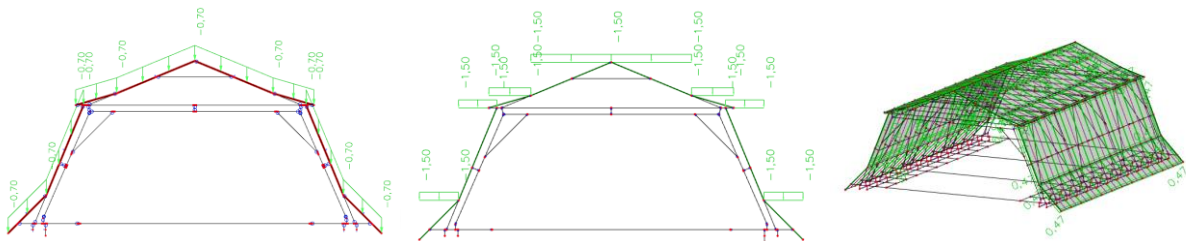
4.1 Základný statický model a zaťaženie

Rozmery statických modelov boli určené na základe presných meraní historických krovov. Namerané hodnoty rozmerov jednotlivých krovov sa medzi konštrukciami líšili maximálne o 2,5 m. Všetky výpočtové modely mali určité základné spoločné typizované parametre (šírka 12 m, dĺžka 15 m a výška krovu 5,9 m.) ako môžeme vidieť na obrázku č.8, aby bolo možné dosiahnuť relevantné výsledky vhodné na porovnanie správania konštrukcií.



Obrázok č.8: Základné spoločné rozmerové parametre

Z obrázku č. 9 vyplýva, že konštrukcia bola zaťažená stálym zaťažením z ťažkej strešnej krytiny (bobrovky) s hmotnosťou 70 kg/m², snehovým zaťažením 150 kg/m² (nie je zohľadnený vplyv sklonu strechy) a vetrom o rýchlosti 26 m/s (II. vetrová zóna, smer 0°).



Obrázok č.9: Zaťaženia: a) stále zaťaženie b) zaťaženie snehom c) zaťaženie vetrom

Na základe analyzovaných zaťažovacích stavov a s cieľom dosiahnuť relevantné výsledky pre porovnanie konštrukcií z hľadiska medzného stavu únosnosti a používateľnosti sa zohľadnili tri základné kombinácie zaťaženia, ktoré ovplyvňovali konštrukciu. Tieto tri hlavné kombinácie sú uvedené v tabuľke č. 1. Na statickú analýzu konštrukcií bola v rámci daného článku vybraná len jedna najhlavnejšia kombinácia a to kombinácia K2. Zaťaženia konštrukcie boli vytvorené podľa príslušných noriem. [6,7,8,9,10,11,12].

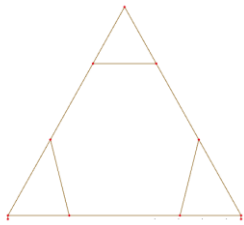
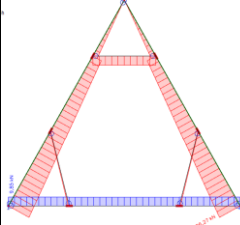
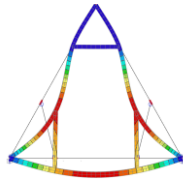
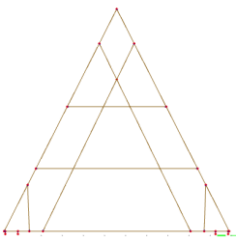
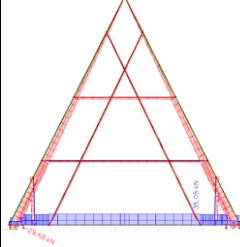
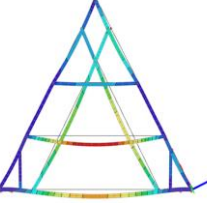
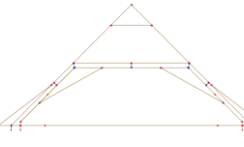
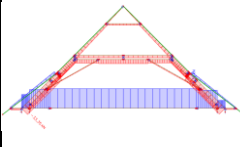
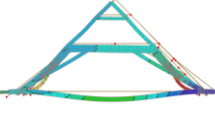
Tabuľka 1: Uvažované kombinácie

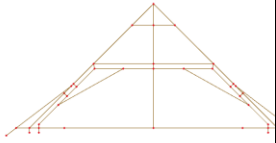
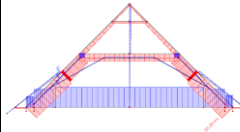
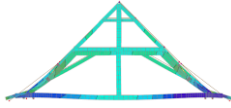
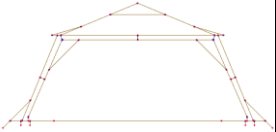
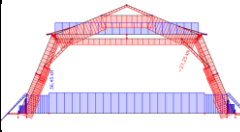

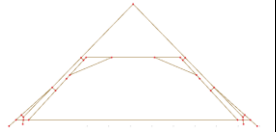
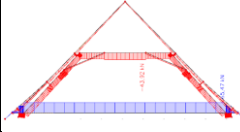
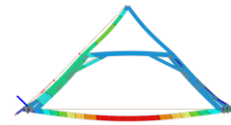
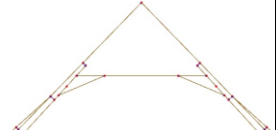
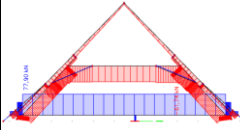
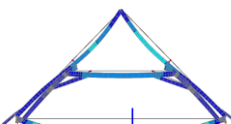
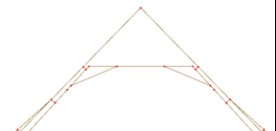
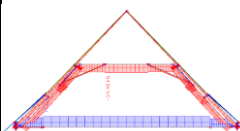
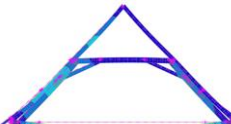
Názov kombinácie	Označenie
Vlastná tiaž + Stále zaťaženie	K1
Stále zaťaženie + Sneh – trvalá situácia * Ψ	K2
Vlastná tiaž + Vietor 0 ° sanie * Ψ	K3

4.2 Dosiahnuté výsledky v statickej analýze

V tabuľke č. 3 a priložených obrázkoch sú zobrazené priebehy a hodnoty maximálnych vnútorných síl pôsobiacich na väzný trám v porovnávaných konštrukciách pri vybranej kombinácii K2. Schémy jasne ukazujú rozloženie síl v analyzovaných konštrukciách, a to spôsobom zrozumiteľným aj pre odborníkov v tesárstve, ktorí nemajú špecializáciu v statike. Pri pohľade na konštrukcie zo 14. storočia (riadky 1 a 3 v tab. 3) sú najväčšie vnútorné sily zaznamenané na krokách a hambáľkoch. Dôvodom je, že tieto dva prvky tvoria základné nosné časti krokvových systémov s hambáľkami, ktoré majú typickú "A" konštrukciu a strmý sklon strechy (asi 65°). V konštrukciách z 18. storočia (riadky 3 až 5 v tab. 3) dosahujú najväčšie vnútorné sily väzný trám, ktorý je kľúčovým prvkom barokových krovov. Zaujímavé je, že konštrukcia č. 3 – ležatá stolica s päťbokým prahom podľa Johanna J. Shüblera – vykazuje podobné výsledky ako konštrukcie č. 6 až 8, ktoré reprezentujú Ránkov úsporný krov. Tento súlad je spôsobený tým, že Ránkov úsporný krov, ako bolo uvedené vyššie, sa vyvinul práve z ležatej stolice tohto typu.

Tabuľka 2: Výsledky statickej analýzy

Názov a číslo konštrukcie	Statická schéma	Vnútorné sily, kombinácia K2 (kN)	Schéma vnútorných síl, kombinácia K2(kN)	Deformácia konštrukcie (mm)	Hmotnosť konštrukcie (t)
č.1 Krovový krov s hambáľkami a šikmými päťnými vzperami (14. storočie)		22.27 kN Maximálna osová sila je v krokve			37,91
č.2 Krovový krov s paralelnými krokvami (14. storočie)		35.50 kN Maximálna osová sila je v krokve			37,58
č.3 Ležatá stolica (18.storočie)		75.38 kN Maximálna osová sila je vo väznom tráme			33,42

<p>č.4 Ležatá stolica s 5- bokým prahom a s vešiakom podľa Johann Jacob Shübler (18. storočie)</p>		<p>74.48 kN Maximálna osová sila je vo väznom tráme</p>			<p>37,71</p>
<p>č.5 Manzardová ležatá stolica s 5- bokým prahom podľa Johann J. Shübler (18. storočie)</p>		<p>36.45 kN Maximálna osová sila je vo väznom tráme</p>			<p>34,22</p>
<p>č.16 Rankov úsporný krov varianta A (19. storočie)</p>		<p>65.74 kN Maximálna osová sila je vo väznom tráme</p>			<p>26,96</p>
<p>č.7 Rankov úsporný krov varianta B (19. storočie)</p>		<p>77.90 kN Maximálna osová sila je vo väznom tráme</p>			<p>26,94</p>
<p>č.8 Rankov úsporný krov – derivát (19. storočie)</p>		<p>71.90 kN Maximálna osová sila je vo väznom tráme</p>			<p>27,78</p>

5. Záver

Tento príspevok sa zameriaval na statické posúdenie historických strešných konštrukcií z rôznych časových období. Cieľom statickej analýzy je overiť, či krovy spĺňajú požiadavky na zaťaženie, a zároveň analyzovať rozdiely medzi jednotlivými typmi konštrukcií. Výsledky ukázali, že v konštrukciách z 13. storočia sú najviac zaťaženými prvkami krokvy a hambálky, zatiaľ čo v strešných systémoch z 18. a 19. storočia je najviac namáhaným prvkom väzný trám. Poznanie funkcie väzného

trámu je kľúčové pre pochopenie historických krovov. V minulosti zohrával významnú úlohu, prenášal horizontálne sily a zabezpečoval stabilitu krovu. Dnes je jeho použitie zriedkavé, keďže nevyhovuje moderným požiadavkám na dispozičné riešenie podkrovia. Jeho funkciu nahradil železobetónový veniec, ktorý sa umiestňuje na okraji strechy.

Z pohľadu spotreby materiálu je konštrukcia č. 5, manzardová ležatá stolica s päťbokým prahom podľa Johanna J. Shüblera, najnáročnejšia na drevo a počet prvkov, čo je dôsledkom rozsiahleho dispozičného riešenia. Naopak, konštrukcie č. 1 a č. 2 z 13. storočia majú optimálnu a nižšiu spotrebu dreva v porovnaní s barokovými konštrukciami. S príchodom barokového Ránkového vyl'ahčeného krovu sa však podarilo znížiť spotrebu dreva a hmotnosť krovu až o 40 % v porovnaní s konštrukciou č. 5 manzardová ležatá stolica.

Literatúra

- [1] VONŠOVSKÝ, P: Diplomová práca: Statická analýza strešných konštrukcií 18. stoloetí, Praha: 2023.
- [2] BLÁHA, J. – BUZEK, J. – KYNCL, T.: Atlas historických krovů České republiky. Telč 2020, ISBN 978-80-86-24-6-86-4.
- [3] SUCHÝ, L., ZACHAROVÁ, D., a kol. Metodika identifikácie a výskumu historických krovov, 1. vyd. Bratislava: 2018. ISBN 978-80-89175-85-7.
- [4] BLÁHA, Jiří: Krovy z pomezí jižních Čech a Moravy inspirované úspornými návrhy Michaela Ranka 2010.

Normy

- [5] STN EN 1990: 2007; Eurokód: Zásady navrhovania konštrukcií. August 2009.
- [6] STN EN 1991-1-1: 2007; Eurokód 1. Zaťaženia konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné zaťaženia. Objemová tiaž, vlastná tiaž a úžitkové zaťaženia budov.
- [7] STN EN 1991-1-3: 2007; Eurokód 1. Zaťaženia konštrukcií. Časť 1-3: Všeobecné zaťaženia. Zaťaženia snehom.
- [8] STN EN 1991-1-3/NA1: 2012; Eurokód 1. Zaťaženia konštrukcií. Časť 1-3: Všeobecné zaťaženia. Zaťaženia snehom. Národná príloha.
- [9] STN EN 1991-1-4: 2007; Eurokód 1. Zaťaženia konštrukcií. Časť 1-4: Všeobecné zaťaženia. Zaťaženia vetrom.
- [10] STN EN 1991-1-4/NA1: 2010; Eurokód 1. Zaťaženia konštrukcií. Časť 1-4: Všeobecné zaťaženia. Zaťaženia vetrom. Národná príloha.
- [11] STN EN 1995-1-1: 2008; Eurokód 5. Navrhovanie drevených konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy.

Muhammad Mohsin¹

Study program: Theory and construction of engineering structures, 2nd year

UDRŽATEĽNÉ RIEŠENIA NA ZLEPŠENIE ZEMÍN

SUSTAINABLE SOLUTIONS FOR SOIL IMPROVEMENT

Abstract

The increasing demand for sustainable practices in engineering has led to significant advancements in geotechnical soil improvement techniques. This paper delineates various eco-friendly materials intended to enhance soil properties while minimizing environmental impact. It emphasizes the integration of innovative technologies, waste utilization, and sustainable design principles to foster resilience in geotechnical engineering. Specifically, the eco-friendly materials discussed include bio-based soil stabilizers, recycled aggregates, and geopolymer binders. These materials aim to improve soil strength, reduce erosion, and limit the need for traditional construction materials, thereby contributing to a more sustainable approach to geotechnical engineering.

Keywords

Sustainable usage, carbon footprints, biopolymer, soil stabilization.

1. Introduction

As global infrastructure development gains momentum, there is an increasing imperative for sustainable geotechnical solutions. Conventional soil stabilization methodologies often entail the use of energy-intensive materials such as cement and synthetic additives, resulting in substantial carbon emissions and environmental degradation. In light of mounting awareness regarding climate change and the criticality of conserving natural ecosystems, the geotechnical community is actively pursuing environmentally friendly alternatives that mitigate environmental impact while upholding or enhancing soil performance.

Soil improvement is one of the oldest introduced and simplest methods for improving the bearing conditions of soils. It can be done by either replacing the poor soil with more competent materials or altering the characteristics of the in-situ soil by using additives, considering obtaining good quality materials taking into consideration local availability, environment friendliness, and low cost [1,2]. This promotes the incorporation of industrial by-products and other waste materials, mainly from agricultural sources as construction material in terms of [3];

- sustainability and exploiting convenient ways to produce new materials from waste.
- eliminating the problem of waste treatment.
- avoiding the use and depletion of new natural resources.
- developing innovative and smart composite materials.

1.1 Conventional soil reinforcement methods

Figure 1 provides an array of conventional soil reinforcement methods that can be categorized into three primary groups: physical, mechanical, and chemical. Within the physical category, the

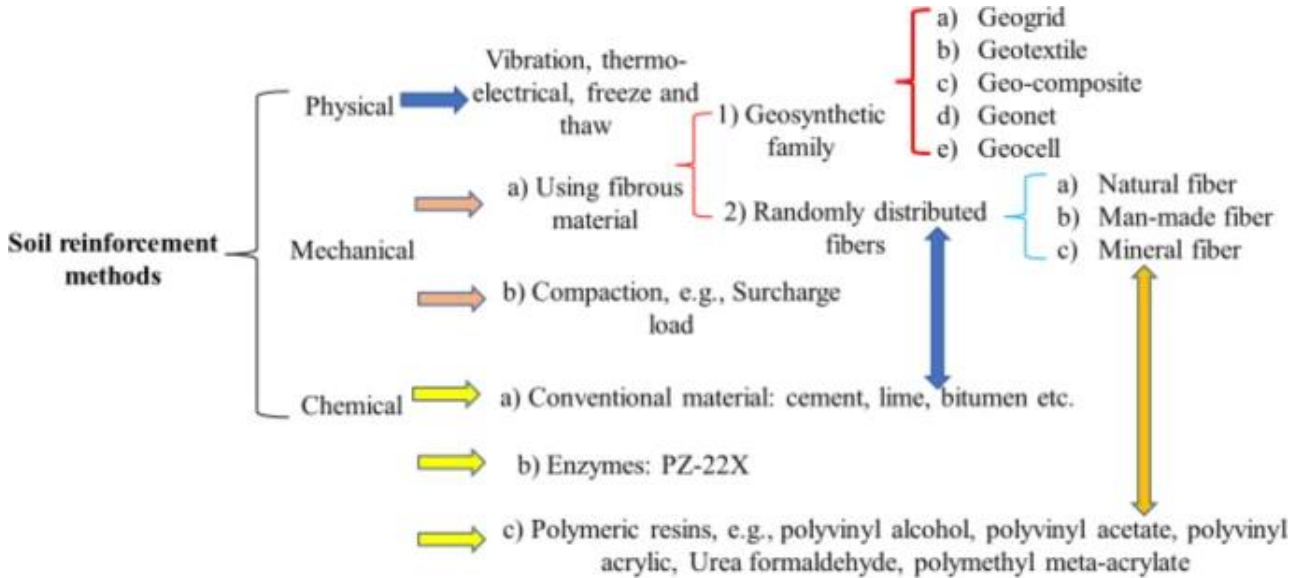


Figure 1: Conventional soil-stabilization techniques and methods [4]

focus is on geosynthetic materials, encompassing geogrids, geotextiles, geocomposites, geonets, and geocells. These materials can be further classified based on their fiber composition, either using fibrous material or randomly distributed fibers. The mechanical methods predominantly entail compaction techniques, notably surcharge loading. Lastly, the chemical category delves into polymeric resins such as polyvinyl alcohol, polyvinyl acetate, polyvinyl acrylic, urea-formaldehyde, and polymethyl methacrylate. This comprehensive depiction offers a valuable visual representation of the diverse approaches utilized in soil reinforcement, facilitating comprehension and the selection of pertinent techniques for specific applications.

1.2 Environmental challenges

Soil improvement is essential for construction projects, especially in areas with soft or unstable soils. Traditional methods, such as deep stabilization using lime-cement piles, contribute significantly to carbon emissions due to the extensive use of binders like cement, which can emit up to 1000 kg CO₂ per kg of binder used [5]. The challenge lies in balancing the need for effective soil stabilization with the imperative to reduce carbon footprints and enhance sustainability.

The production processes for geosynthetics vary widely depending on materials (e.g., polyester, polypropylene). While specific emission factors for geogrids and geofibers are less commonly reported, estimates suggest that producing synthetic materials can emit between 1.5 to 3 tonnes of CO₂ per tonne of product, depending on the type of polymer and manufacturing processes involved [6].

Lime production is a major source of CO₂ emissions, primarily due to the calcination process where limestone (CaCO₃) is heated to produce lime (CaO). The production of lime emits approximately 0.77 to 0.75 tonnes of CO₂ per tonne of lime produced. This includes both process emissions from the decomposition of limestone and emissions from fossil fuel combustion used for heating the kilns. About two-thirds of the CO₂ emissions come from the calcination of limestone

itself. At the same time, the remaining one-third is associated with the combustion of fossil fuels used in the production process [7].

Cement production is one of the largest industrial sources of CO₂ emissions. The cement industry generates approximately 3 billion tonnes of CO₂ annually, accounting for about 8% of total anthropogenic CO₂ emissions [8]. This includes both process emissions (from the calcination of limestone) and energy-related emissions. The average emission factor for cement production is estimated to be around 0.5 to 0.6 tonnes of CO₂ per tonne of cement produced. This figure can vary based on the specific processes and technologies used [9].

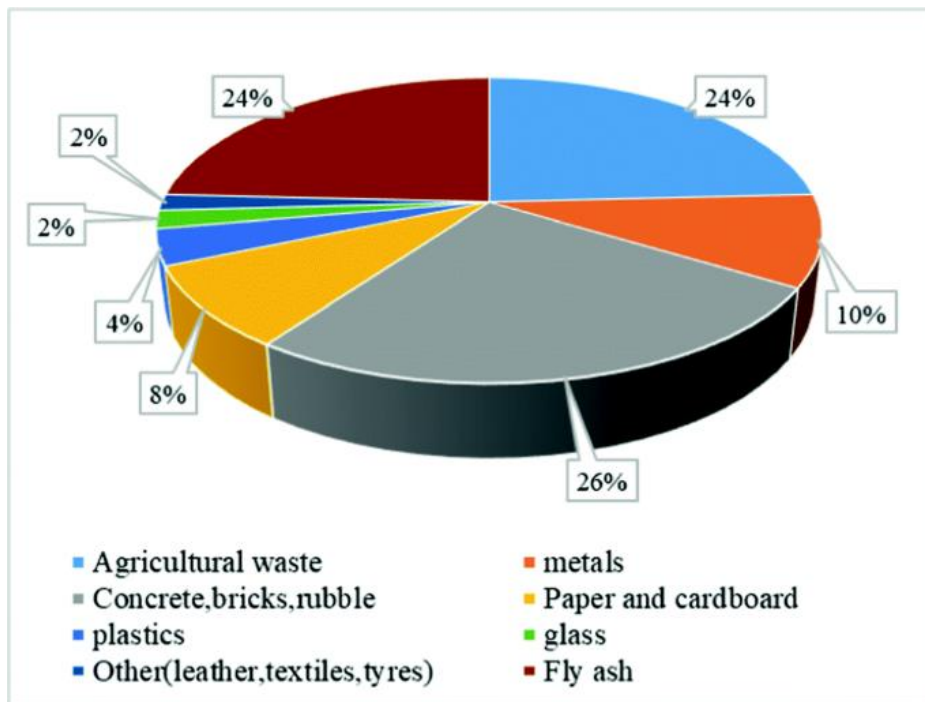


Figure 2: Total waste generation in Australia by material category management (millions of tonnes) in 2010–2011 (REC report 2011)

Figure 2 illustrates the types and amounts of waste materials from different sources, according to a report issued by the Department of Sustainability, Water, Population and Communities in Australia during the year of 2010 and 2011. It is clear that the highest amount of these wastes (15 Mt) comes from Masonry materials, which include wastes as concrete, rubble and bricks. 70% of these wastes were recycled, and the rest were considered to be disposed of. The second highest quantity was associated with agricultural wastes and fly ash (14 Mt), for both of them, with 53% and 44%, respectively, recovery rates. It would be worth mentioning that 83% of the agricultural recovery rate was recycled and 17% was for energy recovery.

The compelling evidence found in the following literature reinforces the effectiveness of utilizing industrial waste and byproducts. Industrial waste, such as paper industry byproducts, can be effectively used to enhance soil properties when combined with lime or cement [10]. However, the implementation of sustainable solutions faces challenges, including resistance to new technologies and lack of consistent emissions data [11]. The field of sustainable geotechnical engineering is evolving, with a focus on green materials and the need for comprehensive assessment tools [12]. While these innovations offer potential cost savings and environmental benefits, there is a notable research gap in multi-aspect technology selection processes and uniform standards for sustainability assessment in ground improvement and piling solutions [11].

1.3 Sustainable alternatives

Exploring the in-depth discussion on various sustainable options:

1.3.1 Use of recycled and waste materials

Recent advancements highlight the potential of utilizing industrial byproducts and waste materials as sustainable alternatives to traditional binders. Materials such as waste utilization in which there is a use of industrial by-products such as fly ash, ground granulated blast-furnace slag, and recycled construction materials have gained traction. These materials not only enhance soil properties but also reduce landfill waste and the demand for virgin resources [13, 14]. Biochar is produced from organic waste, which not only enhances soil stability but also sequesters carbon [13, 2]. Steel slag and recycled paper sludge have shown promise in improving soil properties while reducing reliance on conventional binders [2]. These alternatives not only lower the carbon footprint of soil improvement techniques but also promote waste recycling, aligning with circular economy principles.

1.3.2 Innovative soil modification techniques

Emerging technologies in soil modification include microbial-induced calcite precipitation (MICP), which is the biogeochemical process that uses bacteria to precipitate calcite in soil pores, enhancing strength without traditional binders [15]. Enzyme-based treatments utilizing enzymes extracted from natural sources can improve erosion resistance and overall soil stability [15]. Biobased polymers have also been investigated for their effectiveness in improving various types of soil properties, particularly in fine-grained soils [16]. The application of geosynthetics provides a sustainable approach to soil stabilization and erosion control. These materials can improve drainage, reduce soil erosion, and enhance load-bearing capacity without extensive excavation or material transport [15]. These methods represent a shift towards more sustainable practices by leveraging natural processes.

2. A novel material for the stabilization technique

Biopolymers have emerged as innovative materials for soil stabilization in geotechnical engineering. They provide an environmentally friendly alternative to traditional chemical stabilizers like cement and lime. Their application addresses issues such as soil erosion, strength enhancement, and overall soil improvement.

2.1 Harnessing the potential of biopolymers

Biopolymers can be classified based on different terms, including biodegradability (biodegradable and non-biodegradable) and the source of raw materials. Three groups can be considered when classifying biopolymers based on their source of origin: plant-based biopolymers, animal-based biopolymers, and biopolymers produced by microorganisms [17]. Figure 3 presents a list of biopolymers, which are mostly utilized for soil improvement purposes, based on the source of production.



Figure 3: Common biopolymers used for soil improvement based on their production source. [18]

2.1.1 Plant-based biopolymers

Plant-based biopolymers are produced from plants and agricultural scraps. Biopolymers in geotechnics mainly include plant-based products, which are mostly polysaccharides. Guar, lignin, agar, beta-glucan, alginate, and carrageenan fall into this category. Guar gum (guaran) is a polysaccharide composed of two sugars, galactose and mannose, extracted from the guar plant. Among water-soluble polysaccharides, guar gum is the one with the highest molecular weight [19]. Guar gum is a naturally charged polysaccharide that can be found in both cationic and anionic states. The world production for the guar gum family is more than 1 million tons each year, so it is commercially available at a reasonable cost. The presence of large hydroxyl groups in guar gum produces a network of hydrogels among soil particles and hydrogen ions through hydrogen bonds [20].

2.1.2 Microorganism-based biopolymers

Micro-organism based biopolymers, such as xanthan gum, gellan gum, and dextran, are the products of bacterial fermentation processes, which are considered microorganism-based biopolymers. Xanthan gum is a microorganism-based anionic polysaccharide, produced through glucose/ sucrose fermentation by the *xanthomonas campestris* bacterium. The most well-known characteristics of xanthan gum are pseudo-plasticity [21] and high shear stability [22], even at relatively low concentrations.

2.1.3 Animal-based biopolymers

Animal-derived biopolymers are polymers produced from animal sources. Chitin and chitosan are produced from the waste crustacean shells, such as shells of shrimps, and protein-based biopolymers are produced from milk and dairy products. Chitosan is a water-soluble biopolymer that tends to bind to negatively charged surfaces [23]. Chitosan is a linear polysaccharide of D-glucosamine and N-acetyl-D-glucosamine, which is usually extracted from crustacean shells of the food processing industry [24]. Chitosan is an animal-based biopolymer with a cationic nature, and because of the

positive charges of amino groups, it becomes a cationic polyelectrolyte after being dissolved in acetic acid [25].

3. Applications in soil improvement

Biopolymers are effective in controlling wind and water erosion, making them suitable for use in areas prone to such issues [8]. They can be employed for dust control in construction sites and unpaved roads, enhancing air quality while stabilizing the surface [26]. Biopolymers are useful in landfill management due to their ability to reduce leachate-containing heavy metals. By improving the physical properties of soils used in landfill covers, biopolymers can help mitigate environmental impacts associated with waste disposal. This application is critical for enhancing the stability and safety of landfill sites [18]. Research indicates that biopolymers can enhance California Bearing Ratio (CBR) strength and resilient modulus, which are critical for pavement design [27]. Certain biopolymers facilitate MICP processes, where microbial activity leads to carbonate precipitation within the soil matrix. This method not only enhances soil strength but also reduces permeability, making it effective for stabilizing loose or granular soils [8]. Stabilization of fine-grained soils have shown promising results in treating fine-grained soils, which are often challenging to stabilize with traditional methods. They improve the rheological properties of these soils, making them more workable and stable for construction purposes. Studies indicate that biopolymer treatments can enhance the shear strength and reduce permeability in fine-grained soils [28].

4. Summary

The shift towards sustainable geotechnical practices is imperative for addressing global challenges such as climate change and resource depletion. By embracing innovative materials and techniques, the geotechnical engineering community can significantly reduce its environmental impact while ensuring the integrity and longevity of infrastructure projects. Further research will focus on developing comprehensive frameworks that integrate sustainability principles across all phases of geotechnical design and construction.

Despite their potential, the use of biopolymers in geotechnical applications is still limited due to lack of standardization as there is a need for standardized testing methods to evaluate the performance of biopolymers under various conditions. In terms of economic feasibility, more research is required to establish the cost-effectiveness of biopolymer treatments compared to conventional methods.

In conclusion, biopolymers represent a sustainable solution for soil stabilization in geotechnical engineering, offering significant improvements in soil properties while addressing environmental concerns. Continued research will help refine their application techniques and expand their usage across various engineering practices.

In this context, it is planned to study various geotechnical aspects of medium- to high-plasticity soils through a laboratory experimental program, incorporating plant-based biopolymers and nanosilica. The laboratory testing has already commenced and is in progress.

References

[1] Basu, D. et al.: Sustainability in Geotechnical Engineering. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Canadian Geotechnical Journal*, 2011, pp. 3171–3174.

- [2] Esayas, E. et al.: Development of Wall Construction Material Stabilized with Enset Vegetable Fibers for Rural Housing Units. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2018, Vol. 6(20) pp. :54–62.
- [3] Fondjo, A. A. et al.: Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive Review. *Civil Engineering and Architecture*. 2021, Vol. 9(5), pp. 1295 – 1308.
- [4] Hejazi, S. M. et al.: A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*. 2012, Vol. 30, pp. 100-116.
- [5] Hov, S. et al.: Can soil improvement become sustainable?. *The Norwegian Technical Institute*, 2023.
- [6] IPCC: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 3, chapter 2.
- [7] <https://www.nordkalk.com/lime-and-co2-whats-the-big-deal/>
- [8] Kumar, S. et al.: A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil, *Discover Applied Sciences, Springer Link*. 2024, vol. 6(8), article number 39.
- [9] Andrew, R. M.: Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*. 2018, vol. 10(1), pp. 195-217.
- [10] Nienov, F. A. et al.: Soil geotechnical improvement by using waste from the paper industry. *Proceedings of the indian national science academy*. 2023, vol. 89(1), pp. 228-234.
- [11] Mach, A., Walach, D.: Implementation of Integrated Life Cycle Design Principles in Ground Improvement and Piling Methods—A Review. *Sustainability*. 2024, vol. 16(2), article number 659.
- [12] Wang, S. et al.: Advancing Sustainability in Geotechnical Engineering. *Sustainability*. 2024, vol. 16(11), article number 4757.
- [13] Al Naje, F. Q. et al.: A Review of Sustainable Materials to Improve Geotechnical Properties of Soils. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*. 2020, Vol. 23(3), pp. 289-305.
- [14] Basu, D. et al.: Sustainability in Geotechnical Engineering. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris*. 2013, pp. 3171-3174.
- [15] Sustainability in Geotechnics: The Use of Environmentally Friendly Materials. *Sustainability*. 2023, ISSN 2071-1050.
- [16] Soldo, A. et al.: Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. *Scientific Reports*. 2020, A.N. 267.
- [17] Niaounakis, M.: Biopolymers: Applications and Trends; *William Andrew: Norwich, NY, USA*, 2015.
- [18] Fatehi, H. et al.: Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review. *Geosciences*. 2021, vol. 291(11), <https://doi.org/10.3390/geosciences11070291>
- [19] Gupta, S. C. et al.: Tailoring of guar gum for desert sand stabilization. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2009, vol. 16(6) , pp. 507-512.
- [20] Chen, R. et al.: Biopolymer Stabilization of Mine Tailings. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2013, vol. 139(10), pp. 1802-1807.
- [21] Milas, M., Rinaudo, M.: Properties of xanthan gum in aqueous solutions: Role of the conformational transition. *Carbohydrates Research*. 1986, vol. 158, pp. 191–204.
- [22] Chen, C.S.H., Sheppard, E., Conformation and shear stability of xanthan gum in solution. *Polymers Engineering Science*. 1980, vol. 20, pp. 512–516.
- [23] Lee, D.W. et al.: Strong adhesion and cohesion of chitosan in aqueous solutions. *Langmuir*. 2013, vol. 29, pp. 14222–14229.
- [24] Kumar, M. N. V. R.: A review of chitin and chitosan applications. *Reactive & Functional Polymers*. 2000, vol. 46, pp. 1–27.

- [25] Jayasuriya, A.: Production of micro-and nanoscale chitosan particles for biomedical applications. *Chitosan based biomaterials, vol 1: fundamentals*. 2017, vol. 122, pp. 185-209.
- [26] Fradj, N. et al.: Biopolymers in geotechnical engineering for soil improvement. *AKJournals*. 2024, vol. 19(2), pp. 82-86.
- [27] Sulaiman, H., et al.: Performance of soil stabilized with biopolymer materials – xanthan gum and guar gum. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2022, vol. 128.
- [28] Armistead, S. J. et al.: Sustainable biopolymer soil stabilisation: the effect of microscale chemical characteristics on macroscale mechanical properties. *ACTA Geotechnica*. 2023, vol. 18(6), pp. 3213-3227.

Lucia Ondrašínová¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb,

ALTERNATÍVNE PRÍSTUPY STANOVENIA ÚNAVOVEJ ZOSTATKOVEJ ŽIVOTNOSTI PREVZATÉ Z HISTORICKÝCH PREPRÁV NA MOSTOCH

ALTERNATIVE APPROACHES TO DETERMINING THE FATIGUE RESIDUAL LIFE, TAKEN FROM HISTORICAL TRANSPORTS ON BRIDGES

Abstract

This study focuses on comparing different approaches to determining fatigue parameters in railway bridges. Various methods and standards, such as SBB I-AM 08/02 and DB RL 805, ČSN 73 6203 are analyzed to identify differences in results caused by operational conditions, fatigue curves, and other key factors. A key finding is that the historical load conditions significantly impact the estimated fatigue life of railway bridges. The application of equivalent damage factors, considering both historical and modern traffic loads, provides a more accurate assessment of the remaining service life. This comparison highlights the importance of selecting an appropriate methodology for fatigue evaluation to ensure the safety and reliability of steel railway bridges.

Kľúčové slová / Key Words

Fatigue analysis, stress range, railway bridges

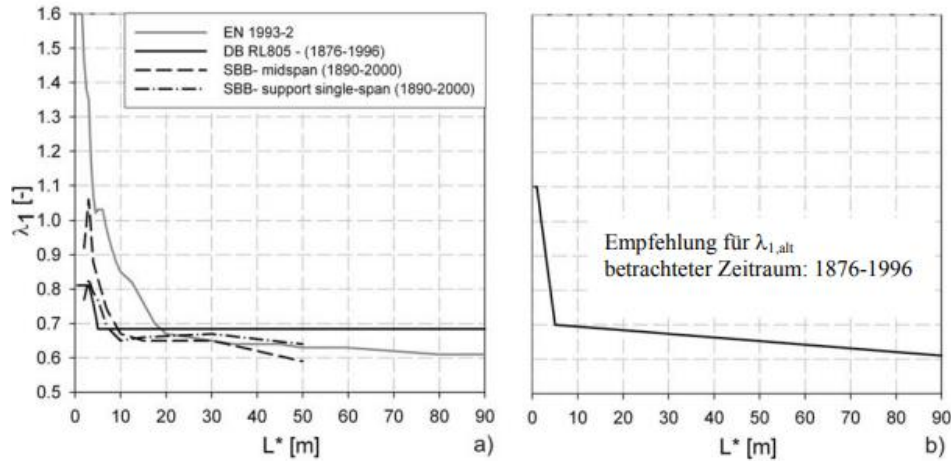
1. Úvod

Hodnotenie únavovej životnosti železničných mostov predstavuje zložitý a multidisciplinárny proces, pri ktorom sa využívajú viaceré metódy a prístupy. Tieto metódy sú založené na rôznych normách a technických predpisoch, pričom ich vzájomné porovnanie odhaľuje rozdiely vo výsledkoch. Tieto rozdiely môžu byť spôsobené viacerými faktormi, ako sú odlišné prevádzkové podmienky, použité únavové krivky či iné relevantné parametre. Správny výber metódy hodnotenia únavovej životnosti je zásadný pre zaistenie bezpečnosti a spoľahlivosti železničných mostov, pretože priamo ovplyvňuje presnosť odhadov zostatkovej životnosti a rozhodnutia týkajúce sa údržby či rekonštrukcie mostných konštrukcií.

2. Alternatívne hodnoty súčiniteľa ekvivalentného poškodenia

¹ Lucia Ondrašínová, Ing. , Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 8102 05 Bratislava

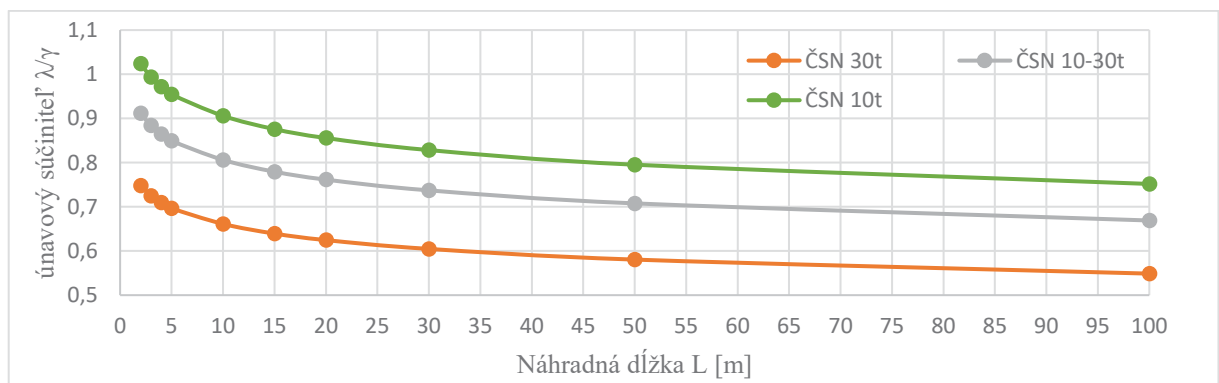
Tento faktor odráža prevádzkové zaťaženie mostov a je závislý na dĺžke rozpätia mosta, čo ovplyvňuje rôzne prevádzkové súbory vznikajúce pri prejazde vlakov. Pre nové mosty je hodnota λ_1 definovaná na základe očakávaných budúcich vlakových mixov na európskych hlavných tratiach. Avšak pre existujúce mosty je situácia komplexnejšia. Pre ne platí nielen súčasné a budúce prevádzkové zaťaženie, ale aj minulé prevádzkové kolektívy. V minulosti boli definované fiktívne vlakové mixy, ktorých zloženie sa menilo v rôznych obdobiach. (podľa SBB [3] a DB RL 805 [4]) Na ich základe sa vypočítali súbory rozkmitov a následné poškodenia, čo umožnilo vypočítať alternatívny faktor $\lambda_{1,alt}$, ktorý zahŕňa prevádzkové obdobie od roku 1876 do roku 1996.



Obr. 1 Porovnanie hodnôt λ_1 v troch rôznych súboroch pravidiel (a), odporúčané hodnoty faktora $\lambda_{1,alt}$ pre premávku z minulosti pre aplikácie v Rakúsku (b)[13]

Pre každý časový úsek boli určené rôzne prevádzkové zmesi vlakov s ohľadom na hlavné a vedľajšie trate, ako aj špecifiká pre nákladnú, osobnú či zmiešanú dopravu. Tieto faktory sú podrobne spracované v predpisoch SBB I-AM 08/02 a DB RL 805 a slúžia ako základ pre presný výpočet zostatkovej životnosti existujúcich mostov.

Ďalšou metódou je použitie staršej československej normy, ktoré zaviedla obdobný postup stanovenia únavových súčiniteľov podľa priemernej dopravy v Československu do roku 1976[8]. Na základe stanovených rozkmitov a ich početnosti z je možné numericky extrahovať alternatívne únavové súčinitele $\lambda_{1,alt.čs}$



Obr. 2 Alternatívne hodnoty únavového súčiniteľa závislého na prevádzkovom namáhaní mostov v Československu do roku 1976

3. Metóda overovania zostatkovej životnosti mostov pomocou historických ekvivalentných súčiniteľov poškodenia

Táto metóda je podrobnejšia ako jednoduchá metóda z EC [5,6] pretože zohľadňuje historické prevádzkové zaťaženia z minulosti.

Postup metódy:

1. **Stanovenie cieľovej spoľahlivosti:** V prvom kroku sa v spolupráci s prevádzkovateľom mosta stanoví cieľová spoľahlivosť pomocou čiastkových súčiniteľov bezpečnosti. Pre zaťaženie sa obvykle uvažuje $\gamma_{Ff} = 1,0$, pričom γ_{Mf} sa volí na základe kontrolovateľnosti mosta, pričom pre nitované mosty sa odporúča γ_{Mf} medzi 1,00 a 1,15.
2. **Výpočet referenčného rozkmitu napätia:** Na základe modelu zaťaženia UIC 71 a pozícií vlakov sa vypočíta referenčný rozkmit napätí $\Delta\sigma_{ref} = \Phi \cdot \Delta\sigma_{UIC}$; v kritickom mieste mosta.
3. **Výpočet historického súčiniteľa ekvivalentného poškodenia λ_{alt} :** Tento krok zohľadňuje historické zaťaženie mosta do roku 1996. Pre λ_{alt} sa použije graf v z obrázka 1, ktorý berie do úvahy rôzne obdobia a vlakové mixy.
4. **Klasifikácia konštrukčného detailu:** Detail sa klasifikuje podľa katalógu detailov a zodpovedajúcej hodnoty únavovej pevnosti $\Delta\sigma_c$.
5. **Výpočet historického poškodenia (D_{1996}):** Historické poškodenie sa vypočíta pomocou vzorca:

$$D_{1996} = (\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{E2.alt}}{\Delta\sigma_c} \right)^m \quad (1)$$

kde $m=5$ je sklon Wöhlerovej krivky. Ak je $D_{1996} > 1$, most nemá ďalšiu zostatkovú životnosť po roku 1996 D_{Zost} .

6. **Výpočet nového ročného poškodenia ($D_{1rok.nové}$):** Poškodenie spôsobené súčasnými a budúcimi zaťažzeniami sa vypočíta na základe moderných hodnôt kolektívnych súčiniteľov:

$$D_{1rok.nové} = \frac{(\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{E2}}{\Delta\sigma_c} \right)^m}{100} \quad (2)$$

7. **Výpočet zostatkovej životnosti ($Z\check{Z}$):** Zostatková životnosť mosta sa vypočíta ako:

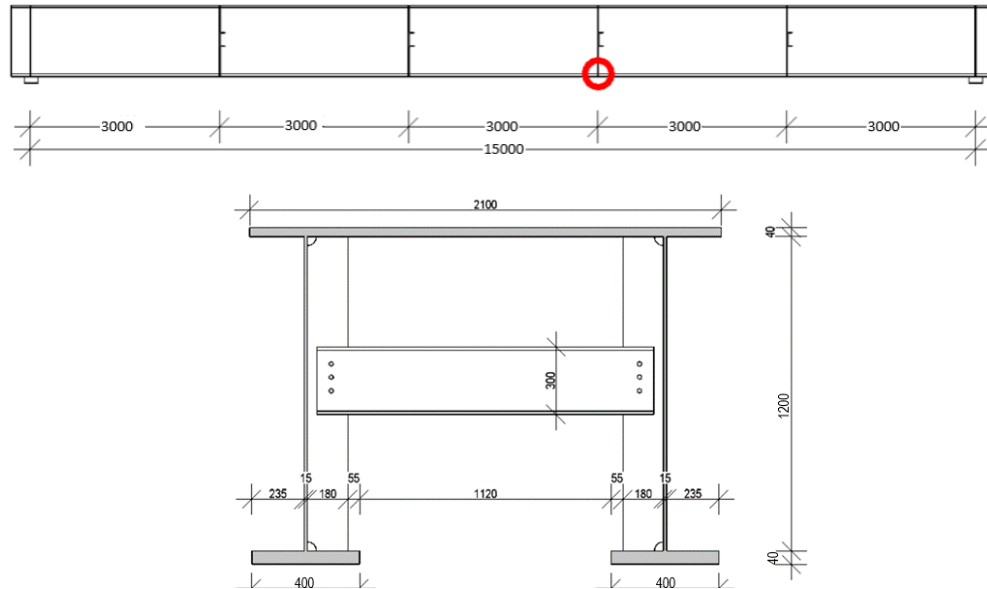
$$Z\check{Z} = \frac{D_{Zost}}{D_{1rok.nové}} - (R_{výp} - 1996) \quad (3)$$

kde $R_{výp}$ je aktuálny rok výpočtu. Ak je hodnota $Z\check{Z} < 0$, životnosť mosta bola už vyčerpaná.

4. Dokazovanie zostatkovej životnosti na praktickom príklade

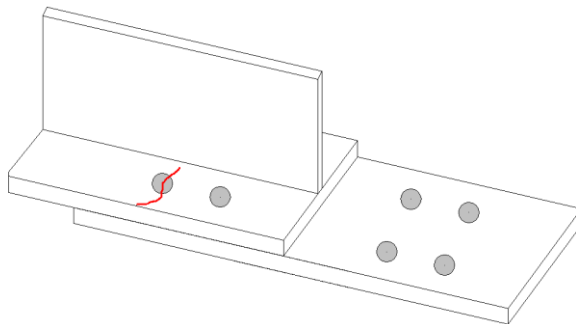
4.1 Základné informácie

- Rok výpočtu : $R_{výp} = 2024$
- Rok výstavby: 1905
- Súčasná životnosť: $Z_{akt} = 2024 - 1905 = 119$ rokov
- Parciálne súčinitele : $\gamma_{FF} = 1,0$; $\gamma_{MF} = 1,15$
- Ročná prepravovaná hmotnosť: 25 mil. ton/rok



Obr. 3 Pohľad na konštrukciu mostu (hore) a zjednodušený priečny rez (dole)

- Relevantný konštrukčný detail:



Určenie kategórie detailu:

Kategória detailov → preplátovanie,
nitovaný spoj

$$\Delta\sigma_C = 80 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_D = 80 \cdot 0,737 = 58,96 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_L = 0,405 \cdot 80 = 32,4 \text{ MP}$$

Obr. 4 Konštrukčný detail posudzovaný na únavu

4.2 Výpočet podľa zjednodušenej metódy [5,6]

- Maximálny rozkmit napätia v mieste výstuhy je $\Delta\sigma_p = 71,75 \text{ MPa}$
- Určenie dynamického súčiniteľa Φ

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi - 0,2}} + 0,82 = \frac{1,44}{\sqrt{15 - 0,2}} + 0,82 = 1,212 \quad (4)$$

- Určenie faktora ekvivalentného poškodenia λ

$$\lambda_1 \text{ pre EC MIX a } L=15 \text{ m} \rightarrow \lambda_1=0,76$$

$$\lambda_2 \text{ pre objem dopravy } 25 \cdot 10^6 \text{ ton/rok} \rightarrow \lambda_2=1,0$$

$$\lambda_3 \text{ pre životnosť } 100 \text{ rokov} \rightarrow \lambda_3=1,0$$

$$\lambda_4 \text{ pre jednokoľajovú dopravu} \rightarrow \lambda_4=1,0$$

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,76 \quad (5)$$

- **Výpočet ekvivalentného rozkmitu** napätí pri počte kmitov $N=2 \cdot 10^6$:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,76 \cdot 1,212 \cdot 71,75 = 66,093 \text{ MPa} \quad (6)$$

- Stanovenie zostávajúcej životnosti **ZŽ**

$$D_{Z100} = (\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{E2}}{\Delta\sigma_C}\right)^m = (1,0 \cdot 1,15)^5 \cdot \left(\frac{66,093}{80}\right)^5 = 0,774 \quad (7)$$

$$Z\check{Z} = \frac{100}{D_{Z100}} - Z_{akt} = \frac{100}{0,774} - 119 = 10,173 \quad (8)$$

4.3 Výpočet podľa presnejších údajov [8,13]

- **Maximálny rozkmit napätia** v mieste výstupy je $\Delta\sigma_p = 71,75 \text{ MPa}$

- **Určenie dynamického súčiniteľa Φ**

$$\Phi_2 = 1,212$$

- **Určenie faktora ekvivalentného poškodenia λ_{alt}**

$$\lambda_1 \text{ pre dopravu pre rokom 1996 a } L=15\text{m} \rightarrow \lambda_{1.alt.čs}=0,779$$

$$\lambda_1 \text{ pre dopravu pre rokom 1996 a } L=15\text{m} \rightarrow \lambda_{1.alt.o}=0,689$$

$$\lambda_2 \text{ pre objem dopravy } 25 \cdot 10^6 \text{ ton/rok} \rightarrow \lambda_2=1,0$$

$$\lambda_3 \text{ pre životnosť 100 rokov} \rightarrow \lambda_3=1,0$$

$$\lambda_4 \text{ pre jednokoľajovú dopravu} \rightarrow \lambda_4=1,0$$

$$\lambda_{alt.čs} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,779 \quad (9.1)$$

$$\lambda_{alt.o} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,689 \quad (9.2)$$

- **Výpočet ekvivalentného rozkmitu** napätí pri počte kmitov $N=2 \cdot 10^6$:

$$\Delta\sigma_{E2.alt.čs} = \lambda_{alt.čs} \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,689 \cdot 1,212 \cdot 71,75 = 67,746 \text{ MPa} \quad (10.1)$$

$$\Delta\sigma_{E2.alt.o} = \lambda_{alt.o} \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,689 \cdot 1,212 \cdot 71,75 = 59,96 \text{ MPa} \quad (10.2)$$

- Stanovenie zostávajúcej životnosti **ZŽ**

$$D_{1996.čs} = (\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{E2.alt.čs}}{\Delta\sigma_C}\right)^m = (1,0 \cdot 1,15)^5 \cdot \left(\frac{67,746}{80}\right)^5 = 0,876 \quad (11.1)$$

$$D_{1996.o} = (\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{E2.alt.o}}{\Delta\sigma_C}\right)^m = (1,0 \cdot 1,15)^5 \cdot \left(\frac{59,96}{80}\right)^5 = 0,476 \quad (11.2)$$

$$D_{Zost.čs} = 1 - D_{1996.čs} = 1 - 0,876 = 0,124 \quad (12.1)$$

$$D_{Zost.o} = 1 - D_{1996.o} = 1 - 0,476 = 0,524 \quad (12.2)$$

$$D_{1rok.nové} = \frac{(\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{E2}}{\Delta\sigma_C}\right)^m}{100} = \frac{(1,0 \cdot 1,15)^5 \cdot \left(\frac{66,093}{80}\right)^5}{100} = 0,008 \quad (13)$$

$$Z\check{Z}_{čs} = \frac{D_{Zost.čs}}{D_{1rok.nové}} - (R_{výp} - 1996) = \frac{0,124}{0,008} - (2024 - 1996) = -11,968 \quad (14.1)$$

$$Z\check{Z}_o = \frac{D_{Zost.o}}{D_{1rok.nové}} - (R_{výp} - 1996) = \frac{0,524}{0,008} - (2024 - 1996) = 39,723 \quad (14.2)$$

5. Záver

Vidíme že rozdiel v celkovom porovnaní medzi metódami z rôznych noriem je spôsobený v značnej miere vplyvom iného uvažovaného „skutočného“ zaťaženia. V rozpätiah do 5 m uvažuje ČSN [8] s malými počtami rozkmitov za rok a v ONR [13] do 20m dlhej vplyvovej čiary posudzovaného prvku, čo spôsobuje, že pri týchto nižších rozpätiah je konzervatívnejšia norma STN, avšak pri väčších rozpätiah už sú počty jednotlivých rozkmitov za rok z ČSN, ONR oveľa vyššie a teda bol návrh pri týchto rozpätiah v minulosti konzervatívnejší. V jednoduchom výpočte mostu z roku 1905 vidíme veľký rozdiel v zostatkovej životnosti pri použití rôznych prístupov k posudzovaniu tohto fenoménu a to hlavne pri rozpätiah od 5 do 20 metrov, kde podľa

čkoslovenskej premávky z roku 1976 most vyčerpá svoju únosnosť už 12 rokov dozadu, podľa rakúskej dopravy z roku 1996 môže most spoľahlivo fungovať ešte 39,7 roku a podľa práve platnej legislatívy v Európe je zostatková životnosť ešte 10 rokov.

Literatúra

- [1] Albuquerque, C. M.C.: Advanced methodologies for the assessment of the fatigue behaviour of railway bridges, Porto: FEUP, 2015.
- [2] Al-Emrani, M.; Aygül, M. : Fatigue design of steel and composite bridges, Goteborg Sweden: Chalmers University of Technology, 2014
- [3] DEUTSCHE BAHN - RICHTLINIE RL 805 – Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken, DB Netz AG, Frankfurt a.M., 2002
- [4] SCHWEIZER BUNDESBAHNEN – SBB, Richtlinie für die Beurteilung von genieteten Eisenbahnbrücken, Schweizer Bundesbahnen, Document I-AM 08/02, SBB CFF FFS, 2002
- [5] Norma STN EN 1993-2: Eurokód 3. Navrhovanie ocelových konštrukcií. Časť 2: Ocelové mosty. Bratislava: SÚTN, 2007
- [6] Norma STN EN 1993-1-9: Eurokód 3. Navrhovanie ocelových konštrukcií. Časť 1-9: Únava. Bratislava: SÚTN, 2007
- [7] Norma ČSN 73 1401: Navrhování ocelových konstrukcí. Schválená : 5.4.1987
- [8] Norma ČSN 73 6203: Zatížení mostů. Schválená : 2.6.1986
- [9] Norma ČSN 73 6205: Navrhování ocelových mostních konstrukcí. Schválená : 17.2.1984
- [10] Norma ČSN 73 6205: Navrhování ocelových mostních konstrukcí. Zmena a), Schválená : 4.12.1985
- [11] Nussbaumer, A., Günther, H.-P.: Grundlagen und Erläuterung der neuen Ermüdungsnachweise nach Eurocode 3, Stahlbau Kalender, Verlag Ernst&Sohn, 2006
- [12] Schmid, Johannes, Lener, Gerhard: Lastkollektive für Eisenbahnbrücken aus Messdaten: Teil 1: Systematische Untersuchungen zum Schadensäquivalenzfaktor λ 1 an Einfeldträgern. Stahlbau. 86. , 2017
- [13] ONR 24008, Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Straßenbrücken, Österreichisches Normungsinstitut (ON), Wien, Dezember 2006

Ján Pecka¹

Študijný program: D-TKeIS4, ročník: štvrtý

EXPERIMENTÁLNE OVERENIE ZOSILNENIA ŠTÍHLÝCH ŽELEZOBETÓNOVÝCH STĽPOV CFRP LAMELAMI

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF STRENGTHENING SLENDER REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH CFRP STRIPS

Abstract

Strengthening of existing structures and their transformation for new uses is one way to reduce the amount of waste produced by the construction industry. Columns, as load-bearing elements, certainly deserve attention within the scope of strengthening efforts. A significant portion of research on column strengthening focuses on short columns. For slender columns, however, the amount of data is still more limited, especially in terms of experimental results on full-scale slender columns. This paper briefly reviews existing experimental research on the strengthening slender columns using CFRP. It primarily focuses on the description of an original experiment aimed at strengthening slender columns through the application of CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) strips as the NSMR (Near-Surface Mounted Reinforcement).

Kľúčové slová / Key Words

Experimentálny výskum; zosilňovanie CFRP lamelami; štíhle železobetónové stĺpy; história zaťaženia

1. Úvod

Problematika ochrany životného prostredia, šetrenia prírodných zdrojov a znižovania produkcie odpadov má v súčasnosti veľký význam s dopadmi na kvalitu a spôsob života nie len nás, ale aj budúcich generácií. V európskej únii bolo podľa údajov z Eurostatu z roku 2022 stavebníctvo najväčším producentom odpadu. Z celkového množstva odpadu v rámci európskej únie vyprodukovalo stavebníctvo až 38,4 % [1]. Možností ako prispieť k zníženiu množstva odpadu je viacero. Odpad z demolovaných konštrukcií možno ďalej využiť, napríklad vo forme recyklovaného kameniva do betónu. Používať progresívne materiály ako UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete), ktoré umožňuje stavať subtílnejšie konštrukcie s väčšou odolnosťou voči vplyvom prostredia. Prípadne je možné zamedziť vzniku odpadu tak, že namiesto demolácie existujúcich konštrukcií sa pristúpi k ich vhodnej transformácii. V súčasnosti v Bratislave možno pozorovať trend transformácie starších administratívnych či polyfunkčných budov na účely bývania. Takáto transformácia sa často neobíde bez potreby zosilnenia nosnej konštrukcie.

Medzi nosné prvky vyžadujúce si pozornosť pri zmenách zaťaženia určite patria aj stĺpy. Jedná sa o subtílne nosné prvky, ktoré nemávajú veľké rezervy v návrhovej odolnosti. Pri štíhlych stĺpoch navyše účinky teórie druhého rádu nezanedbateľne ovplyvňujú odolnosť stĺpa a je potrebné ich vziať do úvahy pri návrhu a posúdení stĺpa. Existuje viacero metód zosilňovania stĺpov. Pre štíhle stĺpy sú efektívne metódy zvyšujúce nie len tlakovú odolnosť, ale najmä ohybovú odolnosť (tuhosť) stĺpa.

¹ Ján Pecka, Ing. Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Príkladom tradičnej metódy je obetónovanie stĺpa s pridaním betonárskej výstuže. Dochádza však k značnému zväčšeniu prierezu a aj k určitému nárastu zaťaženia v dôsledku vlastnej tiaže obetónovania. Medzi metódy, pri ktorých je nárast prierezu minimálny možno zaradiť metódy založené na aplikácii CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Polymer). Možno sem zaradiť ovinutie stĺpa CFRP tkaninou, aplikáciu CFRP lamiel ako EBR (Externally Bonded Reinforcement), aplikáciu CFRP lamiel ako NSMR (Near-Surface Mounted Reinforcement), ich kombinácie a prípadne ďalšie metódy založené na použití CFRP.

Ovinutie využíva priestorový stav napätosti v dôsledku čoho dochádza k nárastu pevnosti ovinutého betónu pôvodného stĺpa. Táto metóda je efektívna pre krátke stĺpy, pri štíhlych stĺpoch s narastajúcou štíhlosťou klesá efektívnosť ovinutia: Tao [3], Fitzwilliam [4], Gajdošová [5]. Pri štíhlych stĺpoch je efektívnejším zvýšenie ohybovej tuhosti stĺpa, čo možno dosiahnuť aplikáciou pozdĺžnych CFRP lamiel, prípadne ich kombinovať s ovinutím. Experimentálnych výskumov venujúcich sa zosilneniu štíhlych stĺpov reálnych rozmerov aplikáciou CFRP lamiel je málo, najzaujímavejšie z nich sú nasledovné:

Gajdošová 2013 [5] experimentálne skúmala zosilnenie obdĺžnikových štíhlych stĺpov (150 x 210 x 4100). Zosilňované boli ovinutím CFRP tkaninou, aplikáciou CFRP lamiel vo forme NSMR po dĺžke stĺpa a kombináciou uvedených metód. Experiment nebral do úvahy históriu zaťaženia. Pre štíhle stĺpy sa ukázali byť efektívnejšie metódy s aplikáciou CFRP lamiel vo forme NSMR, zatiaľ čo samostatné ovinutie sa pre takto štíhle stĺpy neukázalo byť efektívnym.

Khorrarnian 2021 [6] experimentálne skúmal zosilnenie kruhových stĺpov priemeru 260 mm a dĺžky 3048 mm kombináciou CFRP lamiel aplikovaných vo forme EBR a ovinutia CFRP alebo GFRP tkaninou ako aj zosilnenie len samotným ovinutím. Výrazne väčšie zvýšenie odolnosti bolo dosiahnuté pri kombinácii CFRP lamiel s ovinutím. Ovinutie zabraňuje vybočeniu lamiel, umožňuje tak ich pôsobenie v tlaku. Tento výskum rovnako nebral do úvahy históriu zaťaženia. Od rovnakého autora je zaujímavý aj výskum venujúci sa tlakovému pôsobeniu CFRP lamiel aplikovaných vo forme NSMR pri zosilnení krátkych stĺpov. [7] Výsledky preukazujú, že pri aplikácii lamiel vo forme NSMR je ich tlakové pôsobenie nezanedbateľné.

Blikharskyy 2023 [8] experimentálne skúmal zosilnenie stĺpov aplikáciou CFRP lamiel vo forme EBR, avšak so zameraním sa na vplyv histórie zaťaženia. Zosilňovanie bolo realizované pri rôznych úrovniach zaťaženia vzoriek. Výsledky preukázali, že čím je vyššie predchádzajúce zaťaženie a teda aj deformácia zosilňovaného stĺpa, tým je menší prírastok odolnosti v dôsledku zosilnenia. Je to z dôvodu dosiahnutia menšieho pomerného pretvorenia lamiel do momentu porušenia stĺpa.

Na základe vyššie uvedených výskumov bola pre zosilňovanie stĺpov zvolená aplikácia CFRP lamiel vo forme NSMR - do drážok v betónovej krycej vrstve. Aplikácia do drážok bráni vybočeniu tlačných lamiel a zaručuje, že tlačné lamely prispievajú k odolnosti stĺpa. Ďalší z cieľov experimentálneho výskumu je zohľadnenie histórie zaťaženia a teda realizácia zosilnenia na vopred zaťažených vzorkách. CFRP lamely pridané v procese zosilňovania prispievajú k odolnosti v závislosti od ich aktivácie – teda dosiahnutého pomerného pretvorenia. Vychádzajúc z Hookovho zákona boli pre experiment zvolené CFRP lamely s vyšším modulom pružnosti, v ktorých sa pri rovnakom pomernom pretvorení dosiahne väčšie napätie.

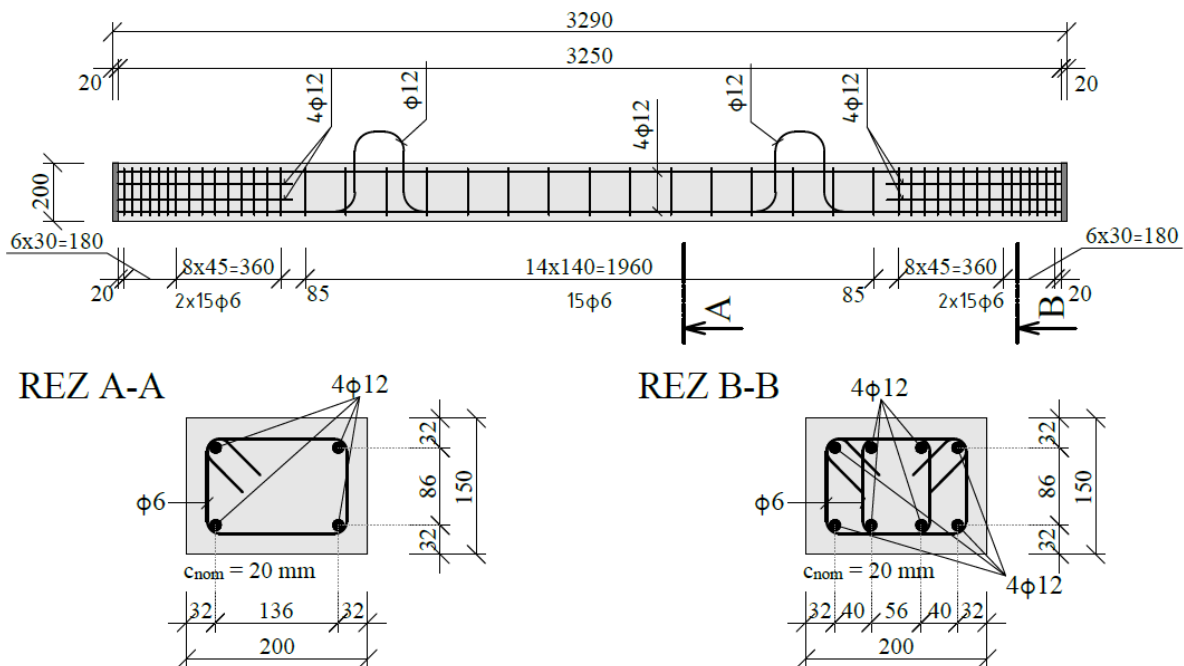
2. Experimentálne zosilnenie štíhlych stĺpov

Parametre experimentu boli zvolené tak, aby sa doplnila svetová databáza výsledkov v oblasti zosilňovania štíhlych stĺpov CFRP lamelami. Rozhodlo sa pre aplikáciu CFRP lamiel vo forme NSMR po dĺžke stĺpa so zohľadnením vplyvu histórie zaťaženia. Celkovo bolo vyrobených sedem zhodných vzoriek štíhlych železobetónových stĺpov s obdĺžnikovým prierezom. Samotný experimentálny program bol následne rozdelený na dve fázy. Prvá fáza prebehla na začiatku roka 2024, druhá fáza je naplánovaná na jeseň roka 2024. V prvej fáze bola v Centrálnych laboratóriách

SvF STU v Bratislave odskúšaná štvorica stĺpov: S1, S2.0, S2.1 a S2.2. Referenčný nezosilnený stĺp s označením S1, zosilnené stĺpy sú označené S2. Pri zosilnených stĺpoch druhé číslo odkazuje na históriu zaťaženia. S2.0 je stĺp zosilnený bez predchádzajúceho zaťaženia. S2.1 je stĺp zaťažený na silu 150 kN, odľahčený, následne zosilnený a odskúšaný do porušenia. S2.2 je stĺp zaťažený na silu 150 kN, zosilnený za kontinuálneho pôsobenia zaťaženia a po vytvrdnutí epoxidového lepidla odskúšaný do porušenia. Aby bolo možné zosilňovanie zaťaženého stĺpa, bolo potrebné navrhnuť a pripraviť vhodnú skúšobnú zostavu.

2.1 Skúšobné vzorky

Vyrobených bolo sedem zhodných štíhlych železobetónových stĺpov. Stĺpy majú po celej dĺžke konštantný obdĺžnikový prierez 150 x 200 mm. Celková dĺžka vzoriek je 3290 mm spolu aj s oceľovými koncovými platničkami hrúbky 20 mm. Ku koncovým platničkám je privarená pozdĺžna výstuž pozostávajúca zo štyroch prútov priemeru $\phi 12$ mm. V koncových oblastiach je doplnená pozdĺžna výstuž o štyri prúty priemeru $\phi 12$ mm dĺžky 600 mm. V strednej časti stĺpa sú dvoj-strižné strmene priemeru $\phi 6$ mm, rozmiestnené osovo po 140 mm, v oblastiach s prídavnou pozdĺžnou výstužou sú štvor-strižné strmene priemeru $\phi 6$ mm, rozmiestnené osovo po 45 mm so zahustením na 30 mm bezprostredne pod koncovými platňami. Zahustenie strmeňov je realizované s ohľadom na koncentrované namáhanie v mieste vnášania zaťaženia. Výroba stĺpov sa uskutočnila v dňoch 12.-13.4.2023 vo výrobní hale STRABAG - Prefa - závod Sereď. Všetky vzorky boli vyrobené z jednej zámesy betónu. V čase realizovania prvej fázy experimentálneho programu bola na materiálových vzorkách určená stredná hodnota valcovej pevnosti 25,61 MPa a modul pružnosti 29,8 GPa. Použitá bola betonárska výstuž triedy B500B. Geometria vzoriek je zobrazená na Obr. 1.



Obr. 1: Geometria a výstuženie vzoriek štíhlych stĺpov

2.2 Postup zosilňovania

Samotné zosilňovanie pozostáva z viacerých technologických krokov. Ďalej uvedený postup bol rovnaký pre všetky zosilňované stĺpy, jednotlivé stĺpy sa líšili len miestom a polohou pri ktorej dochádzalo k zosilneniu. Na zosilnenie boli použité lamely CARBOPLATE E250/50/1,4 [9]

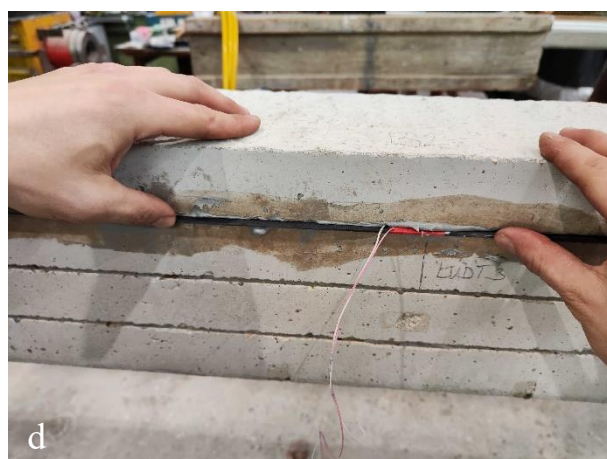
a dvojzložkové epoxidové lepidlo Adesilex PG1 od firmy Mapei [10]. V Tab. 1 sú uvedené vlastnosti CFRP lamiel uvádzané výrobcom.

Tab. 1: Vlastnosti CFRP lamiel uvádzané výrobcom, stredné hodnoty [9].

Označenie	Rozmery	Modul pružnosti [GPa]	Ťah. pevnosť [MPa]	Pretvorenie pri pretrhnutí
Carboplate E 250	50 x 1,4	250	2500	1%

CFRP lamely narezané na prierez 10 x 1,4 mm sa aplikovali do drážok v betónovej krycej vrstve. Po tri lamely na dlhšie strany prierezu. Stupeň vystuženia prierezu CFRP lamelami je 0,28% z plochy prierezu.

Ako prvé bolo potrebné vyrezať drážky do betónovej krycej vrstvy stĺpa. Na ich vyrezanie bol použitý HILTI drážkovací stroj DCH 150-SL. Na protiahlých dlhších stranách stĺpov boli vyrezané trojice drážok vo vzdialenostiach osovo po 50 mm. Drážky sa vyhotovili priebežné po celej dĺžke stĺpa s hĺbkou 15 mm a šírkou približne 3mm (Obr. 2a). V strednej časti stĺpa v mieste, kde je na CFRP lamele osadený tenzometer, boli drážky mierne rozšírené. Pred samotným zosilňovaním sa drážky očistili pomocou stlačeného vzduchu od prachu, nečistôt a uvoľnených častí betónu.



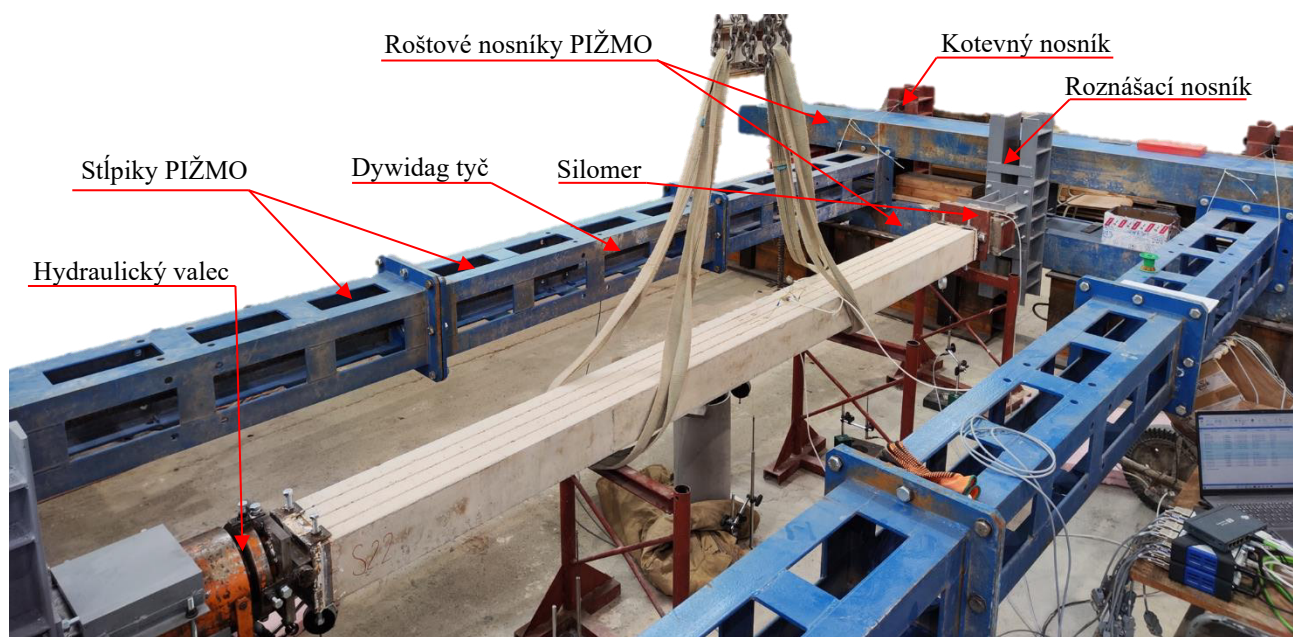
Obr. 2: Fotodokumentácia zo zosilňovania stĺpov, a) drážkovanie, b) lepenie tenzometrov na lamely, c) nanášanie epoxidového lepidla do drážok, d) osádzanie lamiel do drážok

2.3 Skúšobná zostava

Pre experimentálny program bola vytvorená vlastná skúšobná zostava, ktorá umožňuje zosilňovanie vzoriek pod zaťažením. Na vytvorenie základného rámu boli použité PIŽMO prvky – oceľové prvky priehradovej rozoberateľnej konštrukcie mostných pilierov. PIŽMO prvky boli bezplatne zapožičané spoločnosťou Doprastav, a.s.

Z dôvodu, že stĺpiky sú navrhnuté na prenos tlakového a nie ťahového zaťaženia, boli roštové nosníky prepojené dvojicou predpínacích Dywidag tyčí priemeru \varnothing 36mm s odolnosťou približne 1 MN. Dvojice roštových nosníkov sa spojili tak, aby medzi nimi zostala medzera, cez túto medzeru boli prevedené predpínacie tyče a uchytené pomocou kotevných nosníkov z vonkajšej strany zostavy. Počas zostavovania zostavy sa predpínacie tyče mierne predopli.

Z dôvodu, že roštové nosníky boli spojené s medzerou, bolo potrebné vyrobiť dva roznášacie nosníky. Jeden pre osadenie hydraulického lisu, druhý pre osadenie silomeru. Celá zostava je kotvená cez roznášacie nosníky pomocou Dywidag tyčí do ťažkej podlahy laboratória. Podložená je na oceľových nosníkoch výšky 0,5 m z dôvodu, aby bola prístupná aj spodná strana stĺpov. Použitý hydraulický lis umožňuje zaaretovanie výtlačného piestu a tým zaistenie deformácie dosiahnutej v určitom momente skúšky pri konkrétnom vyvinutom zaťažení. Po zaistení aretačnej hlavice je možné znížiť tlak v hydraulickom valci bez toho, že by došlo k vráteniu sa piesta. Vďaka tomu je možné zosilňovať stĺp pri zaťažení, avšak len pri danej deformácii, nie sile. V dôsledku dotvarovania dochádza v čase k miernemu poklesu zaťaženia. Skúšobná zostava je zobrazená na Obr. 3.



Obr. 3: Skúšobná zostava s osadeným stĺpom

2.4 Priebeh skúšky a výsledky

Stĺpy sa do zostavy umiestňovali v horizontálnej polohe, v tejto polohe prebiehala aj samotná skúška. Excentricita vnášania zaťaženia bola 30 mm vertikálne nad osou stĺpa tak, že spôsobovala vybočenie stĺpa smerom nadol. Rovnaké deformačné účinky mala vlastná tiaž stĺpa. Po osadení stĺpa do zostavy nebola nameraná deformácia od vlastnej tiaže. Vypočítaná deformácia v dôsledku vlastnej tiaže je približne 0,6 mm, preto sa deformáciu od vlastnej tiaže nepodarilo namerať.

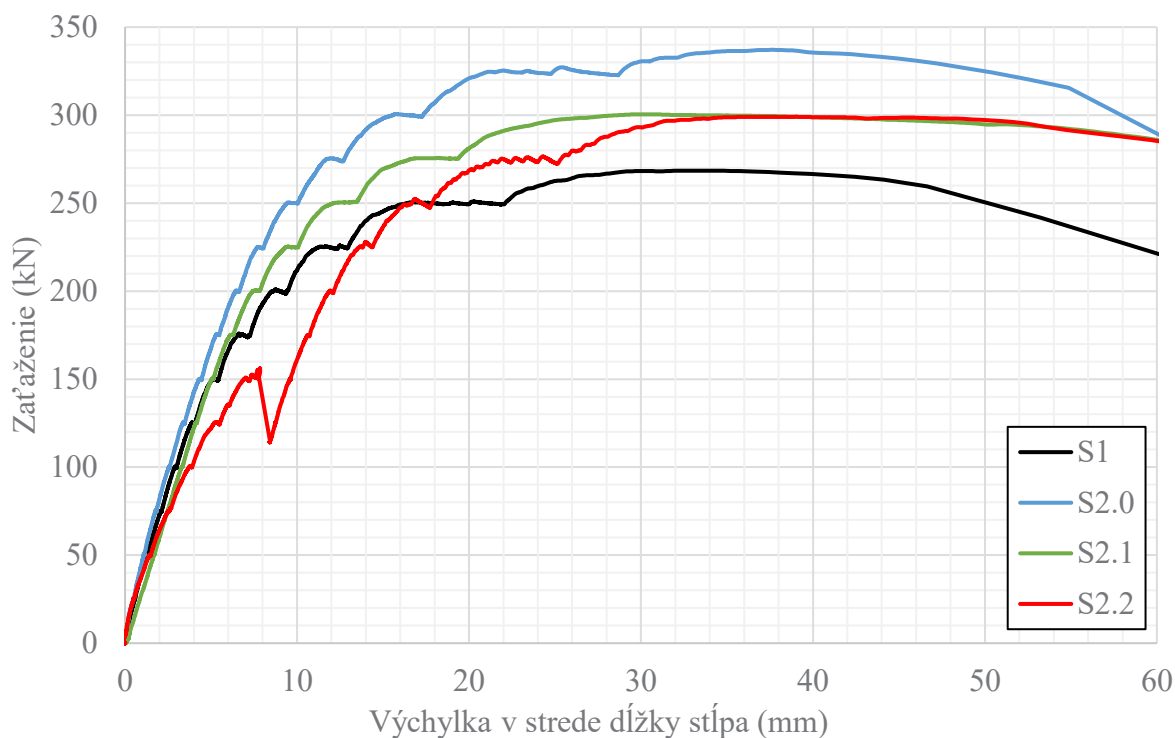
Počas experimentu sa zaťažovalo silou generovanou čerpadlom a hydraulickým valcom. Sila sa zvyšovala v jednotlivých krokoch. Prvou hodnotou bola sila 5 kN, pri tejto hodnote sa začali kontrolné ručné merania. Nasledovala sila 25 kN a ďalej s prírastkom vždy 25 kN buď po dosiahnutí

predzaťaženia (150 kN) alebo po zosilnení až do porušenia vzorky. V každom kroku boli ručne odčítané hodnoty z výchylkomerov a deformetra. Veličiny merané pomocou silomera, LVDT a tenzometrov boli zaznamenávané automaticky s frekvenciou zápisu 4 Hz.

Zosilnené stĺpy rovnako ako aj referenčný stĺp zlyhali v dôsledku straty stability. Nasledovalo materiálové porušenie kritického prierezu v strede dĺžky stĺpa. Došlo k drveniu betónu následne k porušeniu tlačných aj ťahaných CFRP lamiel. V tabuľke je uvedené maximálne zaťaženie dosiahnuté pri jednotlivých stĺpoch. Záznam výchylky v strede dĺžky stĺpa v závislosti od pôsobiaceho zaťaženia je na Obr. 4.

Tab. 2: Maximálne dosiahnuté zaťaženia a porovnanie s referenčným stĺpom

Označenie	Predzaťaženie	N_R [kN]	ΔN_R [%]	Príčina zlyhania
S1	-	268,4	-	Strata stability
S2.0	-	337,0	+25,5	Strata stability
S2.1	150 kN - odľahčenie	300,4	+11,9	Strata stability
S2.2	150 kN	298,9	+11,4	Strata stability



Obr. 4: Záznam výchyliek v strede dĺžky stĺpa v závislosti od zaťaženia

3. Záver

Uvedený experiment bol zameraný na praktické overenie možností zosilnenia štíhleho železobetónového stĺpa CFRP lamelami aplikovanými vo forme NSMR so zohľadnením histórie zaťaženia. Snahou bolo zaplniť voľné miesto vo svetovej databáze výsledkov.

Pri stĺpe zosilnenom bez prechádzajúceho zaťaženia bol dosiahnutý prírastok v odolnosti okolo 25%, čo je s ohľadom na nízky stupeň vystuženia CFRP lamelami 0,28% zaujímavá hodnota. Dosiahnutá bola vďaka použitiu CFRP lamiel s vyšším modulom pružnosti (250GPa). Pri stĺpoch so zohľadnením histórie zaťaženia je prírastok odolnosti ani nie polovičný, niečo málo nad 11% oproti referenčnému

stĺpu. Pri predchádzajúcom zaťažení stĺpov došlo k nevratným pretvoreniam. Po aplikácii lamíel pri nasledovnom zaťažení bolo dosiahnuté menšie pretvorenie týchto lamíel než pri lamelách v stĺpe bez predzaťaženia. V dôsledku toho lamely prispievali k odolnosti stĺpa v menšej miere. To dokazuje dôležitosť zohľadnenia vplyvu histórie zaťaženia na zosilňované konštrukcie. Prípadne na potrebu iným spôsobom aktivovať materiál pridávaný v procese zosilňovania, aby účinnejšie prispieval k odolnosti.

Aby boli dosiahnuté výraznejšie prírastky v odolnosti bolo by potrebné aplikovať väčšie množstvo CFRP lamíel, alebo prípadne iných CFRP profilov. Pri aplikácii vo forme NSMR je množstvo lamíel limitované množstvom drážok, ktoré je možné v priereze vytvoriť. Efektívnejšie by sa tak javilo použitie CFRP profilov väčšej hrúbky v rámci jednej drážky. Výhodou zvolenej metódy aplikácie je prakticky nulové zväčšenie prierezu stĺpa a vďaka aplikácii do drážok dobrá ochrana CFRP lamíel pred mechanickým poškodením v porovnaní s aplikáciou na povrch stĺpa.

PodĎakovanie:

Táto práca vznikla s podporou výskumného projektu VEGA č. VEGA 1/0358/23 "Navrhovanie a zosilňovanie betónových konštrukcií s ohľadom na životné prostredie".

Táto práca vznikla s podporou výskumného projektu Mladý výskumník č. 1613.

Literatúra

- [1] Eurostat Statistics Explained: Waste statistics [online]. Eurostat ©2024 [cit. 1.10.2024]. ISSN 2443-8219, Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation
- [2] TAO, Z. et al.: Experimental behaviour of FRP-confined slender RC columns under eccentric loading. In *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction*. 2004. s 203-212. Dostupné na internete: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781855737365500236>
- [3] FITZWILLIAM, J. - BISBY, L.: Slenderness Effects on Circular CFRP Confined Reinforced Concrete Columns. In *Journal of Composites for Construction*. 2010.Vol. 14, no. 3, s. 280-288
- [4] 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.
- [5] KHORRAMIAN, K. - SADEGHIAN, P.: Slender RC Columns Strengthened with a Novel Hybrid Strengthening System of External Longitudinal and Transverse FRPs. In *Journal of Structural Engineering*. 2021.Vol. 147, no. 10, s. 1–16.
- [6] KHORRAMIAN, K. - SADEGHIAN, P.: Strengthening concrete columns using NSM CFRP laminates. In *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS 2017* . 2017. July.
- [7] BLIKHARSKYY, Y. et al.: Strengthening RC eccentrically loaded columns by CFRP at different levels of initial load. In *Engineering Structures*. 2023.Vol. 280, no. January, s. 115694.
- [8] Mapei. Technický list: CARBOPLATE [online]. Mapei ©2024 [cit. 2.10.2024]. Dostupné z: https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider53/products-documents/1_01001_carboplate_sk-sk_18fa076526604458a25675c8e5f58db0.pdf?sfvrsn=29b3e500_0
- [9] Mapei. Technický list: Adesilex PG1 [online]. Mapei ©2024 [cit. 2.10.2024]. Dostupné z: https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider53/products-documents/1_364-380_adesilex-pg1-pg2_sk_67e6452385d84201ab29fd50271a0879.pdf?sfvrsn=7b02cbd3_0

Dana Tomajková¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

VPLYV POUŽITEJ VÝPOČTOVEJ METÓDY A DEFORMAČNÝCH CHARAKTERISTÍK NA VÝPOČET KONEČNÉHO SADNUTIA PLOŠNEJ ZÁKLADOVEJ KONŠTRUKCIE

THE INFLUENCE OF THE USED CALCULATION METHOD AND DEFORMATION CHARACTERISTICS ON THE CALCULATION OF THE FINAL SETTLEMENT OF A SPREAD FOUNDATION

Abstract

The chosen calculation methods, along with the deformation characteristics, have a significant impact on the final calculated settlements. Through thorough analysis and optimization, it is possible to design foundation structures with considerable efficiency. This approach is particularly economically beneficial for deeply founded high-rise buildings. As a case study, the high-rise building of the Faculty of Civil Engineering at the Slovak University of Technology in Bratislava was selected. The calculated values obtained from various calculation methods were compared with the measured settlement values of the structure during and after construction.

Kľúčové slová / Key Words

Zakladanie výškových budov; plošné základy; medzný stav používateľnosti; sadanie; oedometrický modul deformácie a pružnosti

1. Úvod

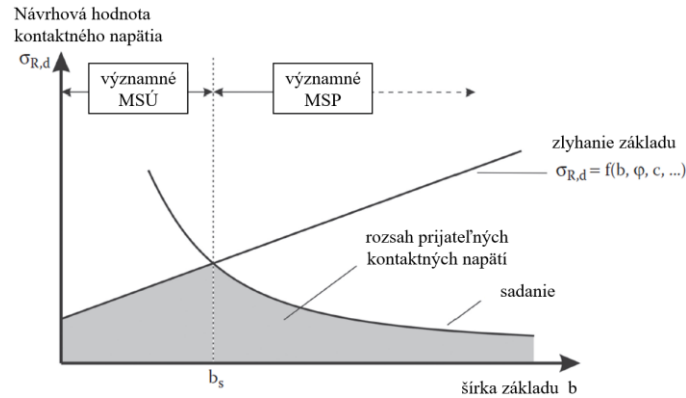
Pri návrhu stavebných konštrukcií je potrebné overiť ich spoľahlivosť, ktorá sa preukazuje výpočtom medzného stavu únosnosti a medzného stavu používateľnosti. Dôležitým aspektom, ktorý je potrebný zohľadniť, je aj hospodárnosť návrhu nosnej konštrukcie.

Pri posudzovaní stavebných konštrukcií hlboko založených na širokých plošných základoch (t. j. základových doskách) spravidla prvý medzný stav vyhovuje, pričom výpočtom je potrebné preukázať vyhovujúci stav. Na veľkosť zvislej únosnosti majú najvýznamnejší vplyv pevnostné charakteristiky zemín v podloží plošnej základovej konštrukcie (uhol vnútorného trenia a súdržnosť) a tiež prítlačenie v úrovni základovej škáry a veľkosť klznej plochy pri hlboko založených a širokých základových doskách.

Medzný stav používateľnosti je spravidla rozhodujúcim medzným stavom pri návrhu širokých a hlboko založených základových konštrukcií (Obrázok 1). Pri medznom stave používateľnosti sa konštrukcia posudzuje na celkové konečné sadnutie a na nerovnomerné sadnutie. Pri výškových objektoch založených na širokých (ohybných) základových doskách sú spravidla vypočítané hodnoty konečného a nerovnomerného sadnutia väčšie ako limitné hodnoty sadnutia stanovené podľa STN 73 1001, čo môže viesť k zmene návrhu z plošných na hĺbkové základy [1, 2].

Rôzne výpočtové metódy a deformačné charakteristiky zemín v podloží majú zásadný vplyv na výpočet (prognózu) sadnutia. Preto je dôležité získať reprezentatívne (t. j. s dostatočnou presnosťou) hodnoty vlastností zemín z laboratórnych alebo terénnych skúšok a zvoliť správnu výpočtovú metódu, čím je možné spresniť vypočítané hodnoty sadnutia a doceliť optimálny (t. j. spoľahlivý a hospodárny) návrh základovej konštrukcie.

¹ Ing. Dana Tomajková, Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

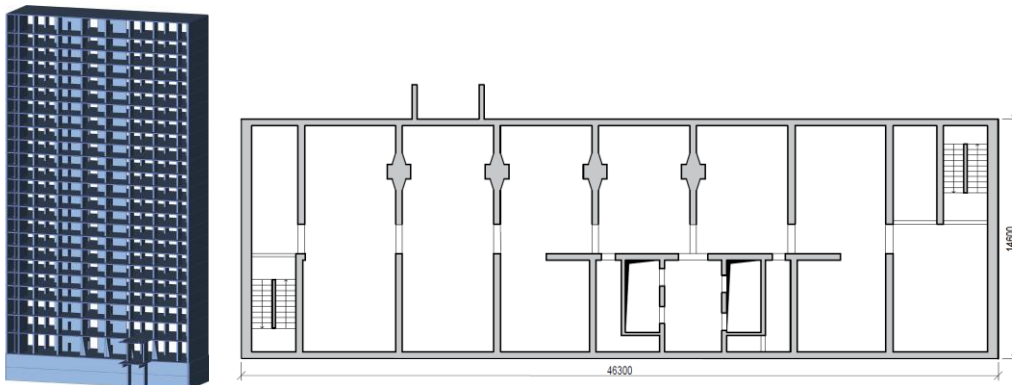


Obrázok 1: Maximálne návrhové kontaktné napätie $\sigma_{R,d}$ pri zohľadnení šírky základu a oblasti významnosti vplyvu medzného stavu únosnosti (MSÚ) a použiteľnosti (MSP) [1].

2. Okrajové podmienky geotechnických výpočtov

2.1 Geometrické okrajové podmienky

Geotechnické výpočty sú aplikované na výškovú budovu Stavebnej fakulty (blok C) Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. Výstavba Stavebnej fakulty prebehla v rokoch 1964 až 1974. Na obrázku 2 je zobrazený 3D model a pôdorys 2. podzemného podlažia objektu SvF STU - blok C. Pôdorys objektu je obdĺžnikového tvaru, nosný systém tvoria železobetónové steny, stĺpy a v strede sa nachádza stužujúce jadro. Objekt tvorí 24 nadzemných podlaží a 2 podzemné podlažia. Budova je založená na základovej doske hrúbky 1,5 m. Pôdorysné rozmery základovej dosky sú 47,7 m x 16,0 m [3].



Obrázok 2: 3D model a pôdorys 2. podzemného podlažia Stavebnej fakulty STU - blok C [3].

2.2 Materiálové okrajové podmienky

Základová doska je vyhotovená z betónu triedy C25/30 – XC2, XF1 (SK) - C1 0,4 - Dmax 22 mm - S3 vystužená oceľou triedy B 420B [3].

Pre účely výstavby objektu SvF (blok C) a v blízkom okolí bolo vykonaných viacero inžinierskogeologických prieskumov, súčasťou ktorých bola realizácia prieskumných sond, ktorých poloha je znázornená na obrázku 3 [4 - 7]. Vo výpočtoch bol zohľadnený predovšetkým geologický profil z vrtu S-4a, ktorý bol realizovaný pre Stavebnú fakultu v roku 1965 [4]. Vhodnosť výberu je odôvodnená hĺbkou 40,3 m, čím zachytával aj neogénne podložie a zároveň sa nachádzal v tesnej blízkosti bloku C Stavebnej fakulty. Maximálna hladina podzemnej vody bola nameraná v 130,50 m n. m., čo je 12,13 m pod úrovňou terénu.



Obrázok 3: Situácia realizovaných prieskumných diel v okolí Stavebnej fakulty STU [4 - 7].

Z prieskumu pre Stavebnú fakultu v roku 1965 [3] je na základe súčiniteľa stlačiteľnosti zrejmé, že neogénne podložie je výrazne nehomogénne (Tabuľka 1). Podrobnejšie stanovované vlastnosti zemín boli v inžinierskogeologickom prieskume pre Národnú banku Slovenska [8], ktorá je v širšom záujmovom území SvF STU s veľmi podobným vrstevnatým podložíom a pre ktorú boli realizované pomerne komplexné laboratórne skúšky deformačných vlastností zemín. Z uvedených dôvodov boli prevzaté výsledky laboratórnych skúšok a vlastnosti zemín, ktoré sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Vlastnosti zemín použité v geotechnických výpočtoch [3 - 9].

Hrúbka vrstvy	Geologické obdobie	Trieda - symbol	Názov zeminy	Konzistencia zeminy	Uľahnutosť zeminy	Objemová tiaž	Poissonovo číslo	Súčiniteľ	Uhol vnútorného trenia	Súdržnosť	Modul deformácie	Oedometrický modul	Oedometrický modul	Súčiniteľ
						v prirodzenom uložení			(efektívne parametre)	(efektívne parametre)	(min. až max.)	deformácie	pružnosti	
						γ	ν	β	ϕ_{ef}	c_{ef}	E_{def}	E_{oed}	$E_{oed,el}$	C
[m]					[kN.m ⁻³]	-	-	[°]	[kPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	-	
1,3	kvartér	Y	navážka	-	-	18	0,3	0,74	30	0	10	13,46	-	-
1,9		S4-SM	piesok siltovitý	-	-	19,3	0,3	0,74	32,5	8	12,5	16,83	-	-
8,93		G3-G-F	štrk s prímiesou jemnozrnnej zeminy	-	stredne uľahnutý	21	0,25	0,83	40	0	65 až 105	78,03 až 126,1	-	300
0,37		G3-G-F	štrk s prímiesou jemnozrnnej zeminy	-	stredne uľahnutý	11,6	0,25	0,83	40	0	65 až 105	78,03 až 126,1	-	300
27,8	neogén	F8-CH	íl s vysokou plasticitou	pevná	-	19,6	0,4	0,42	22	14	6,2 až 9,2	14,76 až 21,90	25,24 až 56,19	37 až 120

Keďže je podložie výrazne nehomogénne, pre získanie čo najpresnejších výsledných hodnôt sadnutia bolo vo výpočtoch uvažované s minimálnym, priemerným a maximálnym oedometrickým

modulom deformácie zisteným podľa vykonaných laboratórnych skúšok. Ďalším vstupným parametrom vo výpočtoch je oedometrický modul pružnosti, ktorý bol použitý pri zohľadnení odpruženia podložia [8, 9].

Pre ďalšie spresnenie bolo uvažovanie s oedometrickým modulom neogénneho podložia, ktorý narastá s hĺbkou a bol určený podľa vzťahu (1). Túto metodiku je možné použiť za predpokladu, že napätie od zaťaženia je väčšie ako pôvodné geostatické napätie [10].

$$E_{oed,i} = 2,4183 \cdot h^{0,7442} \quad (1)$$

kde h je hĺbka vrstvy zeminy od povrchu pôvodného terénu.

2.3 Statické okrajové podmienky

Stále zaťaženia pôsobiace na konštrukciu boli vypočítané v charakteristických hodnotách a zadávané do programu SCIA Engineer, v ktorom bolo vypočítané celkové stále návrhové zaťaženie pôsobiace na základovú konštrukciu [11, 12]. Kontaktné napätie na základovej škáre je 349,021 kPa.

3. Použité výpočtové metódy konečného sadnutia

Geotechnické výpočty boli realizované formou parametrickej štúdie s minimálnymi, priemernými a maximálnymi hodnotami oedometrického modulu deformácie (E_{oed}) a pružnosti ($E_{oed,el}$) a súčiniteľa stlačiteľnosti (C) pre jednotlivé triedy zemín. Použitím rôznych hodnôt oedometrického modulu boli vypočítané rôzne hodnoty konečného sadnutia, ktoré boli porovnávané s nameranými sadnutiami. Sadnutia boli počítané v závislosti od zvolenej metódy v 4 až 10 reprezentatívnych bodoch situovaných v pôdoryse základovej konštrukcie (Obrázok 4).

Limitné konečné celkové priemerné sadnutie $s_{m,lim}$ v zmysle STN 73 1001 pre viacpodlažné budovy so železobetónovým skeletom a výplňovým murivom je 50 mm a limitné nerovnomerné sadnutie $\Delta s/L$ je 0,0015. Hodnotu priemerného konečného sadnutia objektu je možné určiť ako aritmetický priemer hodnôt sadnutia v reprezentatívnych bodoch základu [2].

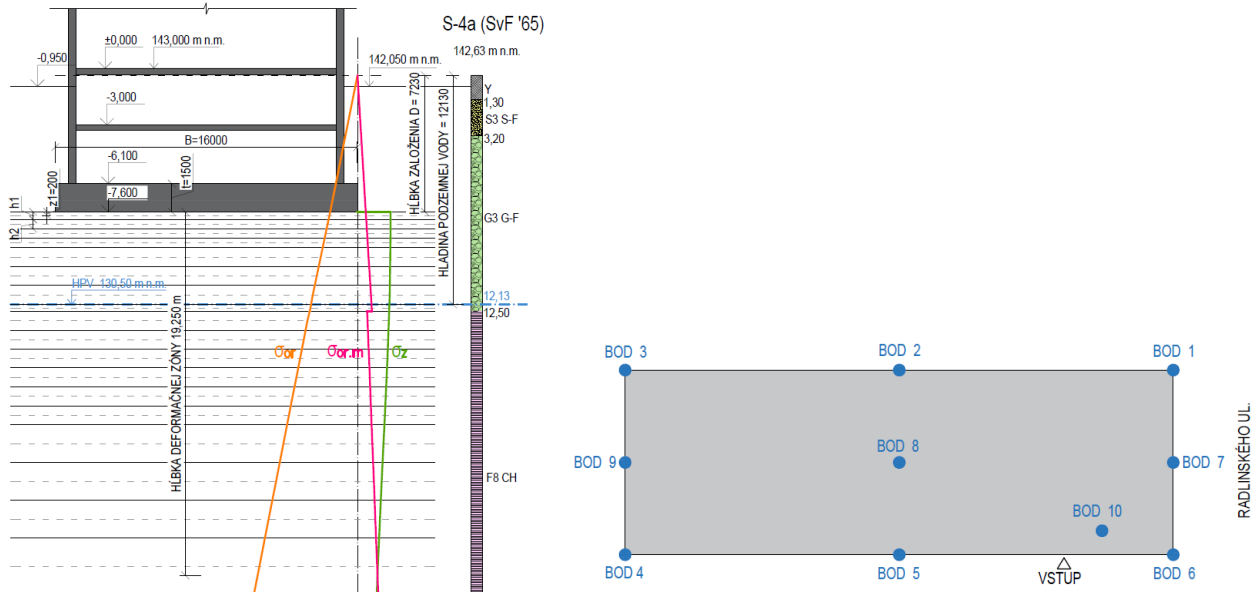
3.1 Výpočet podľa STN 73 1001

Posúdenie medzného stavu používateľnosti bolo realizované podľa normového postupu v zmysle STN 73 1001 [2] s využitím programu EXCEL (MS OFFICE). Výsledky boli porovnávané s výpočtom v programe GEO 5 modul päťka, kde bola základová doska posúdená na medzný stav únosnosti a medzný stav používateľnosti. Použitý výpočtový model je znázornený na obrázku 4 s vykreslenými napätiami pre bod 5 (v strede hrany v smere dĺžky "L" základu). Výpočet podľa STN 73 1001 bol realizovaný s nasledujúcimi deformačnými charakteristikami neogénneho ílovitého podložia (Tabuľka 2):

- Oedometrický modul deformácie – minimálne, priemerné a maximálne hodnoty.
- Oedometrický modul deformácie (pre $\sigma_{z,i} > \sigma_{or,i}$) a pružnosti (pre $\sigma_{z,i} < \sigma_{or,i}$) – minimálne, priemerné a maximálne hodnoty.
- Oedometrický modul deformácie – minimálna, priemerná a maximálna hodnota pre zeminy triedy G3-GF a pre zeminy triedy F8-CH narastajúca hodnota s hĺbkou podľa vzťahu (1).

3.2 Výpočet pomocou dvojparametrického modelu podložia

Výpočet bol vykonaný v programe GEO 5 podľa literatúry [13]. Podopretie po obvode dosky bolo uvažované ako lineárne pružné s pružinovou konštantou k_z , vypočítané podľa koeficientu odporu vo zvislom smere C_1 a koeficientom charakterizujúci šmykový roznos účinkov zaťaženia C_2 .



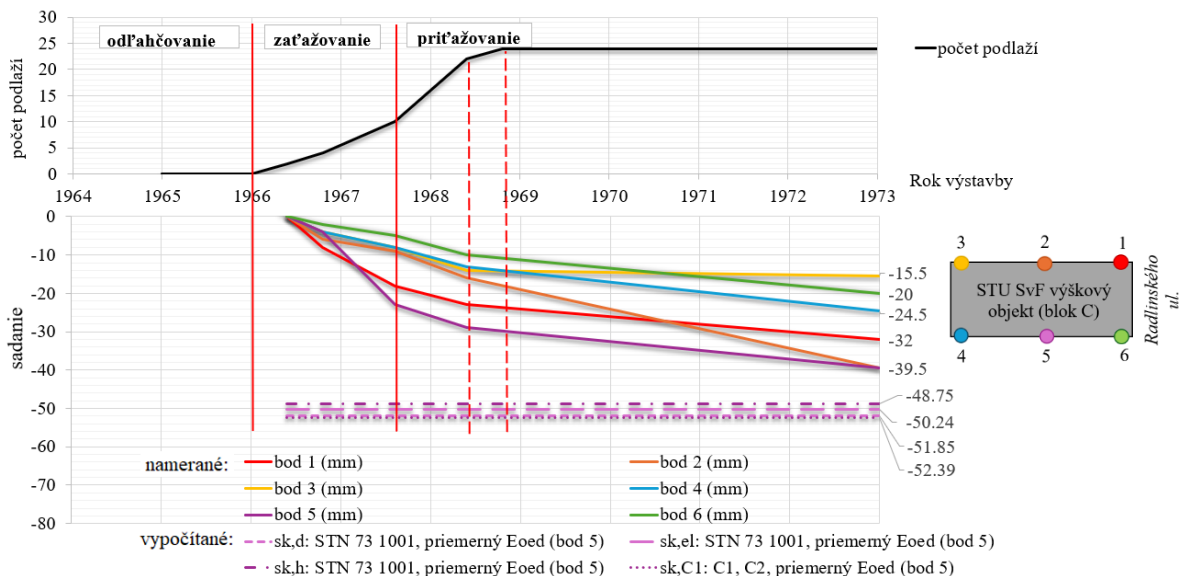
Obrázok 4: Výpočtový model použitý v geotechnických výpočtoch a situácia meraných a reprezentatívnych bodov pre výškovú budovu SvF STU (blok C).

3.3 Výpočet s použitím súčiniteľa stlačiteľnosti C

Výsledky inžinierskogeologického prieskumu pre Stavebnú fakultu z roku 1965 [4] poskytli laboratórne stanovené hodnoty súčiniteľa stlačiteľnosti pre jednotlivé triedy zemín v podlaží. Výpočet sadnutia s využitím súčiniteľa stlačiteľnosti bol realizovaný podľa metodiky podrobne popísanej v literatúre [14].

4. Namerané hodnoty sadnutia objektu SvF STU

Realizované geotechnické výpočty konečného sadnutia boli porovnávané s nameranými hodnotami sadnutia za obdobie rokov 1966 – 1973 [15]. Ako je z obrázku 5 zrejmé, meranie začalo až po vybudovaní základovej dosky a dvoch podzemných podlaží a zároveň bolo meranie ukončené skôr ako prebehlo celé konsolidačné sadnutie.



Obrázok 5: Výsledky geodetických meraní časového vývoja sadania výškového objektu SvF STU (blok C) v reprezentatívnych bodoch 1 až 6 a postupnosti nanášania zaťaženia [15].

Namerané hodnoty sadnutia sa pohybovali v intervale od 15,5 mm (v bode 3 situovanom v rohu základu) do 39,5 mm (v bode 5 situovanom v strede dĺžky základu). Veľkosť konsolidačného sadnutia je možné odhadnúť na základe porovnateľných skúseností s vyhodnotením dlhodobých meraní (cca 17,5 rokov) sadnutia budovy NBS [16], z ktorého vyplýva, že konsolidačné sadnutie tvorí približne 20% z celkového konečného sadnutia.

5. Zhodnotenie výsledkov vypočítaných a nameraných sadnutí

V prehľadnej tabuľke 2 sú uvedené namerané a vypočítané hodnoty sadnutia v reprezentatívnych bodoch pre použité výpočtové metódy a postupy (metodika podľa STN 73 1001 bez odpruženia a s odpružením, metodika s použitím súčiniteľa stlačiteľnosti a dvojparametrický model podložia). V tabuľke 3 sú uvedené vypočítané konečné sadnutia s použitím oedometrického modulu deformácie narastajúceho s hĺbkou podľa vzťahu (1).

Tabuľka 2: Porovnanie nameraných a vypočítaných sadnutí pre vybrané výpočtové postupy.

Bod	Poloha	Merania sadnutia [mm]	STN 731001 - Výpočet v GEO 5 modul päťka bez odpruženia			STN 731001 - Výpočet Excel so zohľadnením odpruženia			Súčiniteľ stlačiteľnosti s C [mm]	Dvojparam. model GEO 5 Sadnutie $S_{k,C1}$ $E_{oed,priem}$ [mm]
			Sadnutie $S_{k,d}$ $E_{oed,min}$ [mm]	Sadnutie $S_{k,d}$ $E_{oed,priem}$ [mm]	Sadnutie $S_{k,d}$ $E_{oed,max}$ [mm]	Sadnutie $S_{k,el}$ $E_{oed,min}$ [mm]	Sadnutie $S_{k,el}$ $E_{oed,priem}$ [mm]	Sadnutie $S_{k,el}$ $E_{oed,max}$ [mm]		
1	roh 1	32	-	-	-	6,04	4,02	3,04	65,07	40,32
2 *	stred strany L	39,5 *	-	-	-	-	-	-	-	54,32
3 *	roh 2	15,5 *	-	-	-	-	-	-	-	31,97
4	roh 3	24,5	-	-	-	-	-	-	-	37,54
5	stred strany L	39,5	64,80	51,85	43,35	63,08	50,24	41,80	114,92	52,39
6	roh 4	20	-	-	-	-	-	-	-	39,12
7	stred strany B	-	35,70	28,40	23,65	35,23	28,02	23,28	91,82	45,70
8	stred základu	-	134,40	107,50	89,60	125,43	98,53	81,43	157,66	60,96
9	stred strany B	-	-	-	-	-	-	-	-	40,50
10	charakt. bod	21,6 **	67,00	53,40	44,40	63,06	49,38	40,72	116,11	46,33

* vylúčené hodnoty na základe výsledkov merania

** interpolovaná hodnota

Zo zhodnotenia vypočítaných konečných sadnutí vyplývajú nasledujúce skutočnosti:

- Z porovnania výpočtu konečného sadnutia SvF STU podľa metodiky STN 73 1001 bez odpruženia (pomocou programu EXCEL a GEO 5-modul päťka) vyplýva, že rozdiel medzi vypočítanými hodnotami je od 0,6 do 1,34 %, t.j. vypočítané konečné hodnoty sadnutia sa takmer zhodujú z dôvodu použitej rovnakej metodiky výpočtu s využitím dvoch rôznych výpočtových programov.
- Z výpočtov konečného sadnutia podľa metodiky STN 73 1001 pri zohľadnení odpruženia v porovnaní s výpočtom bez odpruženia (bod a) vyplýva, že došlo k relatívne malému zníženiu vypočítaného konečného sadnutia (od 1,3 % pod okrajom v smere šírky základu do 9,1 % pod stredom základu). Rozdiely vypočítaných konečných sadnutí závisia od priebehu zvislých napätí v podloží od výkopu (odpruženie v základovej škáre) a priebehu zvislých napätí od prítlačenia objektom a výskytu málo stlačiteľnej vrstvy štrku pod základovou škárou.
- V prípade použitia súčiniteľa stlačiteľnosti sú výsledky v porovnaní s inými metódami výrazne väčšie (od 55,0% pod stredom základu až do 224,6% pod okrajom v smere šírky základu)

z dôvodu, že sa jedná o inú metodiku výpočtu sadnutia s rozdielnou deformačnou charakteristikou a rozdielnym zohľadnením zmeny napätostného stavu v podloží základu.

- d) Výpočet pomocou dvojparametrického modelu podložia bol realizovaný vo výpočtovom programe GEO 5 modul doska. Maximálne sadnutie v strede základovej dosky vychádza až o 43% menšie v porovnaní s výpočtom podľa STN 73 1001 bez odpruženia a naopak, pod stredom v smere šírky B boli vypočítané hodnoty sadnutia väčšie o 61,0%. Vypočítané rozdielne hodnoty konečného sadnutia sú spôsobené najmä rôznymi deformačnými charakteristikami podložia a zohľadnením pôsobiaceho zaťaženia na základovú konštrukciu (centrické zaťaženie podľa STN 73 1001 a zaťaženie v mieste pôsobenia zvislých nosných konštrukcií na základ pri dvojparametrickom modeli podložia).
- e) Vypočítané hodnoty konečného sadnutia (Tabuľka 3) pri zohľadnení nárastu oedometrického modulu deformácie neogénneho ílovitého podložia podľa vzťahu (1) sú porovnateľné s výpočtami podľa STN 73 1001 bez odpruženia. Rozdiely vypočítaných konečných sadnutí pre priemerný oedometrický modul deformácie sú v rozpätí od 0,0% (pre stred v smere šírky základu) do 6,8% (pre stred základu).

Tabuľka 3: Výsledné hodnoty sadnutia s oedometrickým modulom, vypočítané podľa vzťahu (1).

		Merania sadnutia	STN 731001 - Výpočet v GEO 5 modul päťka, $E_{oed,i} = 2,4183 \cdot h^{0,7442}$		
Bod	Poloha	[mm]	Sadnutie $s_{k,h}$ s $E_{oed,min}$ [mm]	Sadnutie $s_{k,h}$ s $E_{oed,priem}$ [mm]	Sadnutie $s_{k,h}$ s $E_{oed,max}$ [mm]
1	roh 1	32	-	-	-
2 *	stred strany L	39,5 *	-	-	-
3 *	roh 2	15,5 *	-	-	-
4	roh 3	24,5	-	-	-
5	stred strany L	39,5	50,50	48,75	47,60
6	roh 4	20	-	-	-
7	stred strany B	-	30,10	28,40	27,35
8	stred základu	-	104,50	100,20	97,50
9	stred strany B	-	-	-	-
10	charakt. bod	21,6 **	55,60	52,10	50,00

Z vyhodnotenia časového vývoja nameraných hodnôt sadnutia (Obrázok 5) objektu SvF (blok C), ktoré bolo realizované na 6 meracích bodoch vyplýva, že v čase posledného realizovaného kontrolného merania (v roku 1973, t.j. 4 roky po ukončení výstavby) nebol ukončený proces konsolidácie neogénneho ílovitého podložia, t.j. nebola dosiahnutá hodnota konečného sadnutia [15]. Z nameraných hodnôt je tiež zrejmé, že v bodoch 2 a 3 boli namerané anomálne hodnoty zvislých posunov (sadnutí) základovej konštrukcie. Z uvedeného dôvodu boli body 2 a 3 vylúčené z porovnávaní s vypočítanými hodnotami konečného sadnutia (Tabuľky 2 a 3). Z porovnania nameraných ($s_n = 39,5$ mm) a vypočítaných hodnôt konečného sadnutia pre reprezentatívny bod 5 (Tabuľky 2 a 3) vyplývajú nasledujúce skutočnosti (Obrázok 5):

- a) Najlepšia zhoda je dosiahnutá pri použití metodiky podľa STN 73 1001 pre priemerný oedometrický modul deformácie bez zohľadnenia odpruženia ($s_{k,d} = 51,85$ mm), resp. so zohľadnením odpruženia ($s_{k,el} = 50,24$ mm). Vypočítané hodnoty konečného sadnutia sú väčšie ako namerané sadnutia o 27,2% (pri zohľadnení odpruženia), resp. 31,3% (bez zohľadnenia odpruženia). Keďže nameraná hodnota nie je konečné sadnutie a pri zohľadnení porovnateľnej skúsenosti z NBS (4. kap.) je možné predpokladať, že konsolidačné sadnutie bude ešte zodpovedať približne 20,0 % z konečného sadnutia, t.j. rozdiel vypočítaných a nameraných

sadnutí je do 11,3%.

- b) Relatívne dobrá zhoda je aj podľa STN 73 1001 s nárastom modulu deformácie s hĺbkou ($s_{k,h} = 48,75$ mm) a výpočtovej metódy s využitím dvojparametrického modelu podložia ($s_{k,C1} = 52,39$ mm), t.j. rozdiel vypočítaných a nameraných sadnutí pri zohľadnení neukončenej konsolidácie je od 3,4 do 12,6%.

6. Záver

Pri návrhu a posúdení plošných základových konštrukcií výškových objektov je spravidla rozhodujúcim kritériom vyhovujúci medzný stav použiteľnosti (2.MS). Uvedený medzný stav je obzvlášť významný pri staticky náročných (neurčitých) nosných konštrukciách založených na ohybných základoch (základových doskách), kde často rozhoduje kritérium nerovnomerného sadnutia. Z realizovanej parametrickej štúdie výpočtu konečného sadnutia výškového objektu SvF STU v Bratislave vyplýva, že na konečné vypočítané sadnutie má významný vplyv použitá výpočtová metóda a hlavne reprezentatívnosť (výstižnosť) stanovenia deformačných charakteristík prírodného horninového prostredia, ktoré je spravidla veľmi nehomogénne a vrstevnaté s výrazne rozdielnymi deformačnými vlastnosťami. Preto je potrebné zohľadniť v geotechnických výpočtoch miestne geotechnické údaje, ktoré musia byť stanovené v rámci realizácie geotechnického prieskumu v zmysle platných STN EN. Požiadavky na ciele, rozsah a obsah geotechnického prieskumu musí definovať statik, resp. statik-geotechnik, ktorý zodpovedá za spoľahlivý návrh základovej konštrukcie.

Literatúra

- [1] KATZENBACH, R. – LEPPLA, S. – CHOUDHURY, D.: *Foundation systems for High-Rise Structures*. CRC Press, 2017. 298 s. ISBN 978-1-4987-4477-5
- [2] STN 73 1001 *Geotechnické konštrukcie. Zakladanie stavieb*. Bratislava: SUTN, 2010. 40 s.
- [3] ČERNÝ, O. - FARKAŠ, L.: *Projektová dokumentácia SvF SVŠT v Bratislave*, 1964.
- [4] ONDREJKOVIČ, J.: *Posudok o základovej pôde. Blok C - Stavebná fakulta SVŠT*. Krajský projektový ústav pre bytovú a občiansku výstavbu Bratislava, 1965, s. 15.
- [5] ONDREJKOVIČ, J.: *Posudok o základovej pôde. Stavebná fakulta SVŠT B1/2, B2/1, B3*. Krajský projektový ústav pre bytovú a občiansku výstavbu Bratislava, 1965, s. 12.
- [6] ONDREJKOVIČ, J.: *Posudok o základovej pôde. Stavebná fakulta SVŠT bl. C*. Krajský projektový ústav pre bytovú a občiansku výstavbu Bratislava, 1964, s. 9.
- [7] ŽITŇAN, M.: *Zabezpečenie zdroja podzemnej vody pre chladenie výškovej budovy Stavebnej fakulty STU v Bratislave*. AQUA-GEO, s.r.o. Bratislava, 2011, s. 21
- [8] ŠVASTA, M.: *Národná banka Slovenska. Záverečná správa podrobného IG prieskumu staveniska*. GEOCON – konzorcium IG a GT. 1996, s. 185.
- [9] STN 72 1001 (2010): *Klasifikácia zemín a skalných hornín*. Bratislava: SUTN, 2010. 20 s.
- [10] GALLIKOVÁ, Z.: *Predikcia deformácií horninového prostredia pri zakladaní výškových budov*. STU- SVF, Bratislava, 2011.
- [11] STN EN 1990 *Zásady navrhovania konštrukcií*. Bratislava: SUTN, 2009. 68 s.
- [12] STN EN 1991 – 1 – 1 *Eurokód 1. Zaťaženia konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné zaťaženia. Objemová tiaž, vlastná tiaž a úžitkové zaťaženia budov*. Bratislava: SUTN, 2007. 40 s.
- [13] JENDŽELOVSKÝ, N.: *Modelovanie základových konštrukcií v MKP*. Bratislava, 2013.
- [14] JESENÁK, J.: *Mechanika zemín*. Bratislava, 1994. 406 s. ISBN 80-227-0642-6.
- [15] *Výsledky geodetických meraní sadania (zvislých posunov) výškového objektu SvF STU (blok C) v Bratislave na Radlinského ul. 11*. 1973, (archív prof. Ing. J. Hullu, DrSc.).
- [16] HULLA, J.: *Poznámky k pedagogickej, vedeckej a odbornej činnosti*. In: *Zborník 12. Slovenskej geotechnickej konferencie*. Bratislava, 2015. s. 133 – 142.

Bahman Zarazvand¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 3. ročník

3D numerické modelovanie kombinovaných základov: Skúmanie distribúcie zaťaženia na základe parametrov základu

3D Numerical Modeling of Piled Raft Foundations: An Exploration of Load Distribution Based on the Piled Raft Parameters

Abstract

Geothermal pile foundations, which integrate structural support with energy extraction, offer potential benefits in mitigating settlement under combined thermal and mechanical loading. This study investigates the settlement behavior of a long, flexible geothermal pile resting on a stiff soil layer using an axisymmetric numerical modeling approach. To simulate an extreme scenario, the thermal response test (TRT) results from Laloui et al. [1] were used, involving significant temperature changes to provide insights into the pile's performance under challenging conditions. The analysis begins with a thermal simulation to establish the model dimensions, followed by mechanical loading to measure the resulting settlement. A subsequent thermomechanical coupling analysis evaluates settlement under simultaneous thermal and mechanical loads. The study aims to assess the effectiveness of geothermal piles in reducing settlement by comparing outcomes under purely mechanical loading and coupled thermomechanical conditions. Settlement patterns are illustrated using 2D contour plots, highlighting the effects of thermomechanical interaction on foundation performance.

Kľúčové slová / Key Words

Geothermal pile foundation, Thermomechanical coupling, Numerical Modeling.

1. Introduction

In the pursuit of sustainable and energy-efficient building solutions, underground structures such as deep foundations and tunnels are emerging as promising candidates for geothermal energy utilization [2]. These structures, known as energy geostructures, incorporate absorber pipes to facilitate thermal energy exchange between the ground and infrastructure [3]. Ground source heat pump (GSHP) and groundwater heat pump (GWHP) systems are well-established in this field [4]. By embedding heat exchange systems directly into foundations—referred to as geothermal or energy foundations—there is a significant opportunity to enhance the use of renewable energy in the built environment [5].

Geothermal pile foundations, commonly implemented as energy foundations, serve a dual function: they provide structural support while acting as geothermal heat exchangers [1]. This dual role helps reduce energy consumption for heating and cooling systems, contributing to the decarbonization of building operations [3]. However, these foundations' performance is influenced by complex interactions involving thermal, mechanical, and hydraulic factors, especially when subjected to combined thermal and mechanical loading [6]. Accurately understanding these interactions is critical for optimizing the design and performance of geothermal foundations [1].

Numerical modeling plays a crucial role in assessing settlement response and load distribution in geothermal pile foundations under different loading conditions [2]. Simulations are essential for analyzing the effects of thermal and mechanical loads on deformation and stress distribution, thus

¹Ing. Bahman Zarazvand, Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, e-mail: bahman.zarazvand@stuba.sk

ensuring structural integrity and optimizing energy efficiency [1]. This study employs an axisymmetric numerical modeling approach to investigate the settlement behavior of a long, flexible geothermal pile resting on a stiff soil layer under extreme thermal and mechanical scenarios [3]. The research is divided into three primary analysis scenarios to thoroughly understand the foundation's behavior:

Thermal Analysis (Scenario 1): The first stage involves a transient thermal analysis aimed at establishing the appropriate model dimensions and simulating heat transfer within the pile and surrounding soil. This scenario serves a dual purpose: it not only sets the foundation for subsequent analyses by modeling the thermal boundary conditions and capturing deformation induced by thermal gradients but also acts as a verification and validation step for the numerical model. A thermal response test (TRT) from Laloui et al. [1] is used to define the thermal properties and boundary conditions.

Mechanical Analysis (Scenario 2): Following the thermal analysis, a purely mechanical loading scenario is performed to assess the settlement response of the pile under mechanical loads alone. This analysis serves as a baseline for understanding deformation, stress distribution, and load transfer mechanisms in the absence of thermal influences [7]. By isolating the mechanical effects, the study can more effectively evaluate the contribution of thermal loading in subsequent scenarios [3].

Thermomechanical Coupling Analysis (Scenario 3): In the final scenario, a coupled thermomechanical analysis is conducted to investigate the settlement response when thermal and mechanical loads are applied simultaneously. This analysis captures the interactions between thermal expansion and mechanical stresses within the pile and the surrounding soil, providing a realistic representation of operational conditions [8]. The results aim to demonstrate the ability of geothermal piles to reduce settlement through thermomechanical coupling, as compared to the outcomes observed under mechanical loading alone. The effects of temperature-induced changes on soil-pile interaction and overall settlement behavior are visualized through 2D contour plots, which help to illustrate the distribution and magnitude of deformation under different loading scenarios [3].

The comprehensive approach employed in this study addresses the challenges associated with modeling the complex thermomechanical interactions in geothermal pile foundations. By comparing the results of mechanical-only loading and coupled thermomechanical loading, the study evaluates the effectiveness of geothermal piles in mitigating settlement. This investigation contributes to the optimization of geothermal foundation designs, offering valuable insights for engineers and researchers aiming to enhance the efficiency and sustainability of energy foundations in geotechnical engineering. Ultimately, the findings provide essential knowledge for the development of advanced design strategies that integrate structural support with renewable energy solutions, promoting the broader adoption of energy-efficient practices in the construction industry. The study emphasizes the importance of accurate numerical modeling in predicting the behavior of geothermal foundations under extreme conditions, thus supporting the ongoing transition toward sustainable and resilient building practices.

2. Methodology

Mechanical Behavior of Pile Foundations

The mechanical behavior of pile foundations in coarse-grained soils, such as sands and gravels, is fundamentally governed by three key components: skin friction, end bearing, and settlement. These factors collectively determine how loads are transferred from the pile to the surrounding soil, influencing the load-bearing capacity and overall settlement characteristics. Understanding these components is crucial for optimizing the design and performance of geothermal pile foundations, especially when subjected to combined mechanical and thermal loads [9].

- **Skin Friction (Shaft Resistance)**

Skin friction, also known as shaft resistance, is the frictional force developed along the surface of the pile due to interaction with the surrounding soil. In coarse-grained soils, skin friction plays a significant role in the pile's load-bearing capacity, particularly for longer piles or those embedded in dense soils. The magnitude of skin friction is influenced by soil properties such as compaction, particle interlocking, and the friction angle [10]. The skin friction capacity, Q_s , is determined by integrating the shear stress along the pile shaft over the embedded length of the pile. It is calculated as:

$$Q_s = \int_0^L \tau(z) \cdot A_s(z) \cdot dz \quad (1)$$

Where $\tau(z)$ is the shear stress at depth z , determined by the normal stress acting at the pile-soil interface and the soil's friction angle. $A_s(z)$ is the surface area of the pile at depth z . L is the embedded length of the pile.

In this equation, the shear stress $\tau(z)$ is influenced by the normal stress σ_v at the pile-soil interface and the friction angle of the soil. Denser soils with higher compaction and greater particle interlocking tend to produce higher skin friction, thus enhancing the pile's overall load capacity [11]

- **End Bearing (Tip Resistance)**

End bearing, also known as tip resistance, refers to the load transferred directly to the soil at the base of the pile. This component is particularly important for determining the ultimate load-carrying capacity, especially in dense, coarse-grained soils where the pile tip resistance becomes more significant [12]. The end bearing capacity, Q_b , is expressed as:

$$Q_b = A_b \cdot q_b \quad (2)$$

where: A_b is the cross-sectional area of the pile base. q_b is the bearing pressure at the pile tip.

The bearing pressure q_b is determined by the interaction between the pile base and the surrounding soil, as well as the soil's inherent strength. It is influenced by several factors, including the embedded depth of the pile, the effective vertical stress σ_v' at the pile base, the soil's internal friction angle (ϕ'), and the cohesion (c') of the soil at the base [13]. These parameters collectively affect the ability of the soil to resist deformation and support the load transferred from the pile.

- **Settlement**

Settlement refers to the vertical displacement experienced by a pile under applied loading. In coarse-grained soils, such as sands and gravels, immediate settlement dominates due to rapid dissipation of excess pore pressures, while consolidation settlement is minimal because these soils exhibit low compressibility. The total settlement, S , for a pile in a layered soil system is the combined effect of settlements due to skin friction and end bearing:

$$S = \int_0^L \left(\frac{\tau(z)}{G(z)} + \frac{q_b}{E_s(z)} \right) \cdot dz \quad (3)$$

where: $\tau(z)$ is the shear stress acting along the pile shaft at depth z , resulting from skin friction. $G(z)$ is the shear modulus of the soil at depth z , reflecting the variation in soil stiffness across different layers, $E_s(z)$ is the modulus of elasticity of the soil at depth z , accounting for variations across different soil layers [14].

Thermal Behavior of Pile Foundations

In energy foundations, thermal behavior significantly influences performance, particularly when piles serve as heat exchangers. The thermal response of piles embedded in the ground is governed by

factors such as the thermal properties of the soil and pile materials, heat transfer mechanisms, and boundary conditions at the pile-soil interface. Accurately modeling these systems requires capturing the complex interaction between heat conduction, mechanical deformations, and any effects from groundwater movement [15].

- **Heat Transfer Mechanisms in Piles and Soil**

The primary heat transfer mechanism in pile foundations is conduction, where heat flows from the pile (acting as a heat exchanger) into the surrounding soil. This process is governed by Fourier's law:

$$J_w^h = \lambda \cdot \nabla T \quad (4)$$

Where, J_w^h is the heat flux, λ is the thermal conductivity of the medium (pile or soil). ∇T is the temperature gradient [16].

- **Thermal Expansion and Deformation in Piles**

Temperature variations cause the pile to expand or contract according to the linear thermal expansion equation:

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \quad (5)$$

Where, α is the coefficient of thermal expansion. ΔT is the temperature change.

This thermal expansion or contraction generates thermal stresses, which can induce deformation in both the pile and surrounding soil, potentially affecting structural performance and load-bearing capacity [17].

- **Transient Thermal Response of Energy Piles**

Simulating the heating and cooling cycles of energy pile foundations is essential for understanding their thermal response over time. The transient heat conduction equation is used to model the temperature distribution

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \cdot \nabla^2 T \quad (6)$$

Where, α_s is the thermal diffusivity of the pile or soil.

This equation accounts for the radial outward heat transfer from the pile during heating and inward during cooling, providing insight into the dynamic thermal behavior of the pile [18].

Coupled Thermo-Mechanical Effects in Pile Foundations

Energy piles experience complex interactions between thermal and mechanical processes, known as coupled thermo-mechanical effects. Temperature changes directly influence the mechanical response of the pile and surrounding soil, impacting load transfer mechanisms, settlement, and overall structural performance [19].

- **Thermal Stresses and Deformations**

When energy piles undergo temperature changes, thermal expansion or contraction generates internal stresses within both the pile and the surrounding soil. These thermal stresses can alter the load distribution between the pile and soil, potentially leading to long-term deformations, which must be considered in the design process [20].

- **Influence on Load Transfer Mechanisms**

Temperature variations impact the pile-soil interface. Heating increases contact pressure and enhances skin friction, while cooling reduces contact pressure, potentially lowering load-bearing capacity. Thus, temperature fluctuations significantly influence both skin friction and end bearing [21].

- **Thermal Effects on Settlement**

Settlement in energy piles is affected by both thermal and mechanical loading. Thermal expansion typically reduces settlement as it counteracts mechanical compression, while thermal contraction can increase settlement, especially in coarse-grained soils [22].

A fully coupled thermo-mechanical analysis utilizing numerical finite element methods (FEM) through advanced programs such as PLAXIS enables a comprehensive integration of heat transfer and mechanical equilibrium equations. This integrated approach facilitates the precise prediction of temperature distribution and mechanical stresses within energy foundations, accounting for the complex interactions between thermal and mechanical processes. By simultaneously solving the governing equations for heat transfer and mechanical behavior, this analysis captures the dynamic response of geothermal piles under varying operational conditions, including thermal cycling and mechanical loading. The capability to model these interactions in detail is crucial for optimizing the design and performance of energy foundations, ensuring both structural integrity and energy efficiency in real-world applications.

3. Models

Axisymmetric Model for Geothermal Pile

Axisymmetric modeling simplifies the computational effort required to analyze complex interactions in geothermal foundations [23]. By reducing a three-dimensional problem to a two-dimensional representation, it allows for efficient simulation of heat transfer, mechanical behavior, and the interaction of thermal and mechanical processes in energy piles [24]. This reduction is particularly beneficial in scenarios involving long, slender structures like geothermal piles, where the behavior can be effectively captured in an axisymmetric framework without significant loss of accuracy [25].

Geometric Configuration and Dimensions

The energy pile modeled in this study is designed as a cylindrical structure, which is representative of typical energy piles used in geothermal applications. This geometric configuration is essential for effectively capturing the thermal and mechanical behaviors inherent in geothermal systems, with a pile length of 26 meters and a pile diameter of 1 meter. The model incorporates an arrangement of fluid pipes embedded within the pile, reflecting the standard configuration employed for effective heat exchange in geothermal systems. Although the pipes and circulating fluid are not explicitly modeled in this simulation, the interaction between the pile and the surrounding soil is represented through the application of thermal boundary conditions at the pile-soil interface. This methodology facilitates an effective simulation of heat transfer dynamics, eliminating the need for detailed fluid flow modeling while still providing valuable insights into thermal performance.

To achieve a more accurate representation of the interaction between the soil and the concrete pile, the model employs a volume cluster method instead of traditional one-dimensional (1D) pile elements. The volume cluster method models the pile as a three-dimensional continuum, enabling a more precise simulation of stress and strain distributions within the pile and its interaction with the surrounding soil.

Additionally, interface elements are defined at the contact surfaces between the soil and the concrete, reducing the soil material strength. These interface elements are crucial for modeling the complex soil-structure interactions, as they allow for the simulation of potential slip and separation at the pile-soil interface under thermal and mechanical loading conditions. By incorporating both the volume cluster method and interface elements, the model effectively captures the pile's response to thermal and mechanical loads, leading to a more comprehensive understanding of the energy pile's performance in geothermal applications.

This modeling approach enhances the accuracy of the simulation results, providing valuable insights into the design and optimization of geothermal pile foundations.

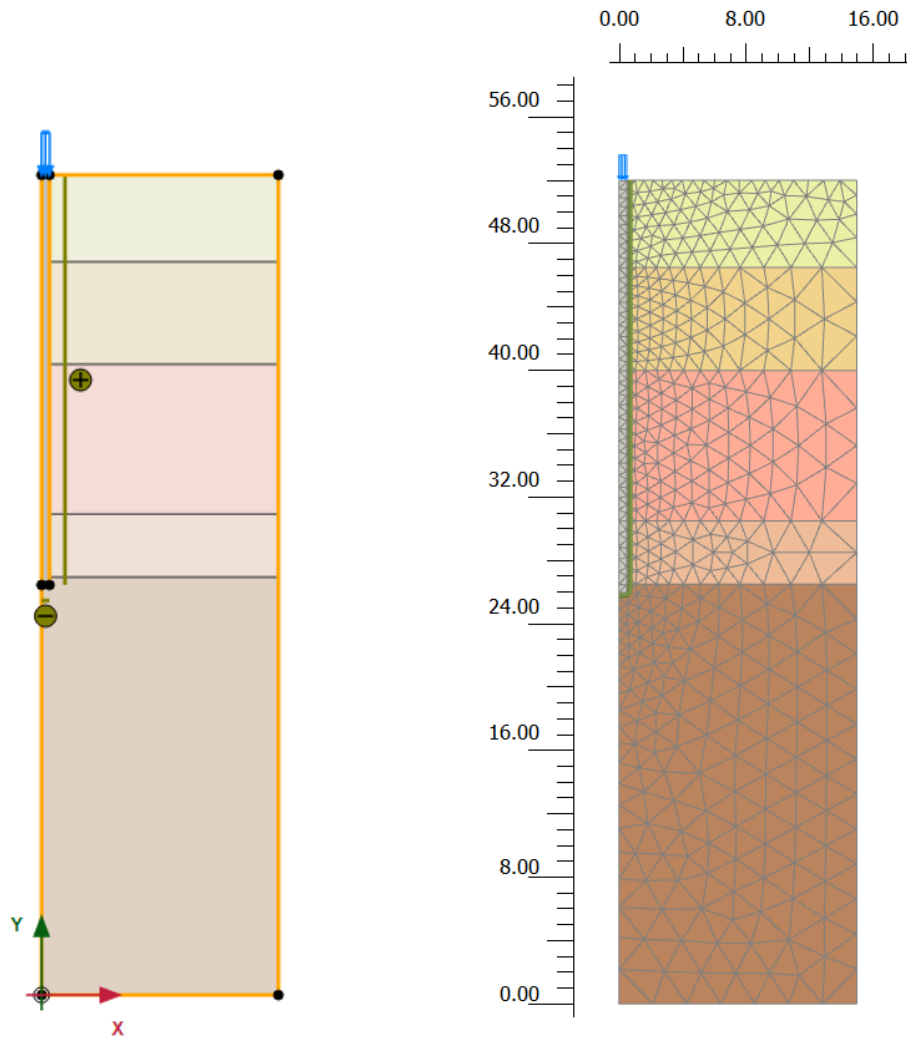


Figure 1: Axisymmetric model

Boundary Conditions

In the axisymmetric model, boundary conditions are applied to accurately simulate the physical constraints and interactions of the energy pile and surrounding soil. These conditions are essential for capturing the pile's mechanical and thermal responses under realistic loading scenarios. The boundary conditions are tailored to represent typical geotechnical conditions and heat transfer processes encountered in geothermal applications.

Mechanical Boundary Conditions

The mechanical boundary conditions for the axisymmetric model are set up to realistically simulate the constraints and interactions in the energy pile system. At the bottom boundary, both radial (horizontal) and vertical displacements are fixed to represent a rigid base, effectively preventing any movement and simulating the support from a stiff underlying layer. Along the axis of symmetry, which represents the centerline of the model, horizontal displacement is restricted to reflect the axisymmetric nature of the system, ensuring that no radial movement occurs along the central axis. The lateral boundary at the outer radial edge is constrained horizontally while allowing vertical displacement, which permits free soil deformation in the vertical direction and accurately captures the settlement and radial soil movements induced by mechanical loading. At the pile head,

mechanical loading is applied incrementally to simulate typical operational forces, such as those imposed by structural loads from a building. The incremental application of loads enables a detailed evaluation of the pile's response under varying mechanical stress conditions, providing insight into the system's behavior across different loading scenarios.

Thermal Boundary Conditions

The radial boundary at the outer radial edge is set to the initial temperature of 284°K, as it is assumed that the heat flux will not significantly affect this radius during the simulation. This distance, which also determines the overall dimensions of the model, was established during the preliminary scenario analysis to ensure accurate results. Similarly, the bottom and surface of the model are treated as initial temperature conditions, representing the uniform ambient ground temperature before thermal loading. The radial boundary along the axisymmetric axis (centerline of the model) is considered a closed boundary, consistent with the mechanical boundary conditions. This setup ensures that there is no heat transfer across the axis, reflecting the radial symmetry of the model and maintaining realistic constraints for the thermal simulation. Together, these boundary conditions provide a comprehensive representation of the thermal environment, capturing the heat transfer processes while maintaining stability and accuracy in the analysis.

Temperature change by time interval

The TRT test simulates a complete cycle of thermal injection and extraction, including phases of heating and cooling, as shown in Table 1. The specified time intervals represent the temperature fluctuations over the simulation period, capturing both the heating and cooling phases. These cycles are essential for analyzing the effects of thermal expansion and contraction, as well as their impact on the coupled thermal and mechanical behavior of the pile foundation system.

Table 1: Heating and Cooling cycle

Time Interval (t)	Temperature Change (Δt)
$0 \leq t \leq 5$	Increases by +2°
$5 \leq t \leq 12$	increases by +20°
$12 \leq t \leq 15$	decreases by -10°
$15 \leq t \leq 28$	decreases by -5°

4. Material

The material properties assigned to the pile and soil layers are crucial for simulating the mechanical, and thermal behavior of the system. The soil layers are modeled using Mohr-Coulomb model, while the pile is treated as elastic material.

Table 2: Material Properties

Parameter	Concrete	Layer 1 SC	Layer 2 SM	Layer 3 SG	Layer 4 GF	Layer 5 GP	Unit
Wet Unit Weight	25.0	19.5	19.5	21.3	22.2	23.5	kN/m ³
Initial Void Ratio	-	0.111	0.111	0.538	0.429	-	-
Stiffness	2.92×10^7	1.4×10^5	1.4×10^5	8.4×10^4	9.0×10^4	2.0×10^5	kN/m ²
Poisson's Ratio	0.2	0.25	0.25	0.4	0.4	0.2	-
Cohesion	-	5	3	2	3	3	kPa

Friction Angle	-	30	27	23	27	35	degrees
Dilation Angle	-	7.5	7.5	7.5	7.5	-	degrees
Permeability	0	2.0×10^{-6}	7.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	2.0×10^{-10}	0	m/s
Specific Heat Capacity	800	863	863	890	748	640	J/kg/K
Thermal Conductivity	2.1	1.8	1.8	4.45	4.17	1.1	W/m/K
Solid Density	2500	2780	2780	2735	2740	2550	kg/m ³
Thermal Expansion	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-6}	1/K

5. Results

The results presented in Figure 2 illustrate the thermal distribution around the energy pile during different stages of the heating and cooling cycles. The four subfigures capture the transient thermal behavior of the system, showing temperature contours for two heating phases (a and b) followed by two cooling phases (c and d).

Figure 2a (Heating Phase 1, $\Delta T = +2^\circ\text{C}$): The initial temperature of the soil and the pile was 284 K. During the first heating phase, the temperature at the pile-soil interface increased by 2 K, reaching 286 K, while the temperature at the outer boundary remained unchanged. The temperature distribution indicates a gradual increase near the pile-soil interface, with the highest temperatures concentrated around the pile. The thermal gradient decreases radially outward, suggesting efficient heat transfer into the surrounding soil. This phase represents the system's initial response to heating, where heat begins to penetrate the near-field area surrounding the pile, initiating thermal diffusion into the adjacent soil.

Figure 2b (Heating Phase 2, $\Delta T = +20^\circ\text{C}$): In the second heating phase, the temperature at the pile's boundary increased significantly by 20 K, reaching 306 K, while the temperature at the outer boundary of the soil was maintained at 284 K. The thermal distribution reveals a more pronounced temperature rise compared to Heating Phase 1, with higher temperatures extending further into the soil. The thermal influence zone has expanded, indicating continued propagation of heat from the pile into the surrounding soil. This phase represents the sustained heating period, where the temperature at the pile-soil interface reaches its peak. The higher temperature gradient enhances thermal conductivity, allowing heat to diffuse more deeply into the soil, thereby increasing the extent of the thermal impact zone.

Figure 2c (Cooling Phase 1, $\Delta T = -10^\circ\text{C}$): After reaching 306 K, the pile's boundary temperature decreased by 10 K during the first cooling phase, dropping to 296 K, while the temperature at the outer boundary remained constant at 284 K. The temperature near the pile-soil interface begins to decrease, and the cooling effect gradually extends outward into the soil. The thermal gradients observed during this phase are less steep than those seen in the heating phases, reflecting the slower rate of heat dissipation from the soil back into the environment. This phase captures the initial cooling

effect, where heat is gradually withdrawn from the pile, lowering the temperature in the surrounding soil and reducing the thermal stress in the system.

Figure 2d (Cooling Phase 2, $\Delta T = -5^\circ\text{C}$): In the final cooling phase, the temperature at the pile boundary decreased further by 5 K to 291 K, while the temperature at the outer soil boundary remained unchanged. The thermal distribution shows a continued reduction in temperature throughout the soil, with the cooling effect reaching deeper layers and closer to the initial temperature condition of the system. This phase confirms the effectiveness of the cooling process, indicating that residual heat from the pile has largely dissipated, allowing the temperature distribution to stabilize as the system returns to near ambient conditions.

Overall, the results from Figure 2 highlight the dynamic thermal response of the pile-soil system during a complete heating and cooling cycle. The changes in thermal gradients and the expansion of the thermal influence zones between phases illustrate the time-dependent nature of heat transfer. This transient behavior is critical for understanding the thermal effects on the structural behavior of the pile and the surrounding soil, providing insights essential for optimizing geothermal energy applications and ensuring the long-term stability of energy foundation systems.

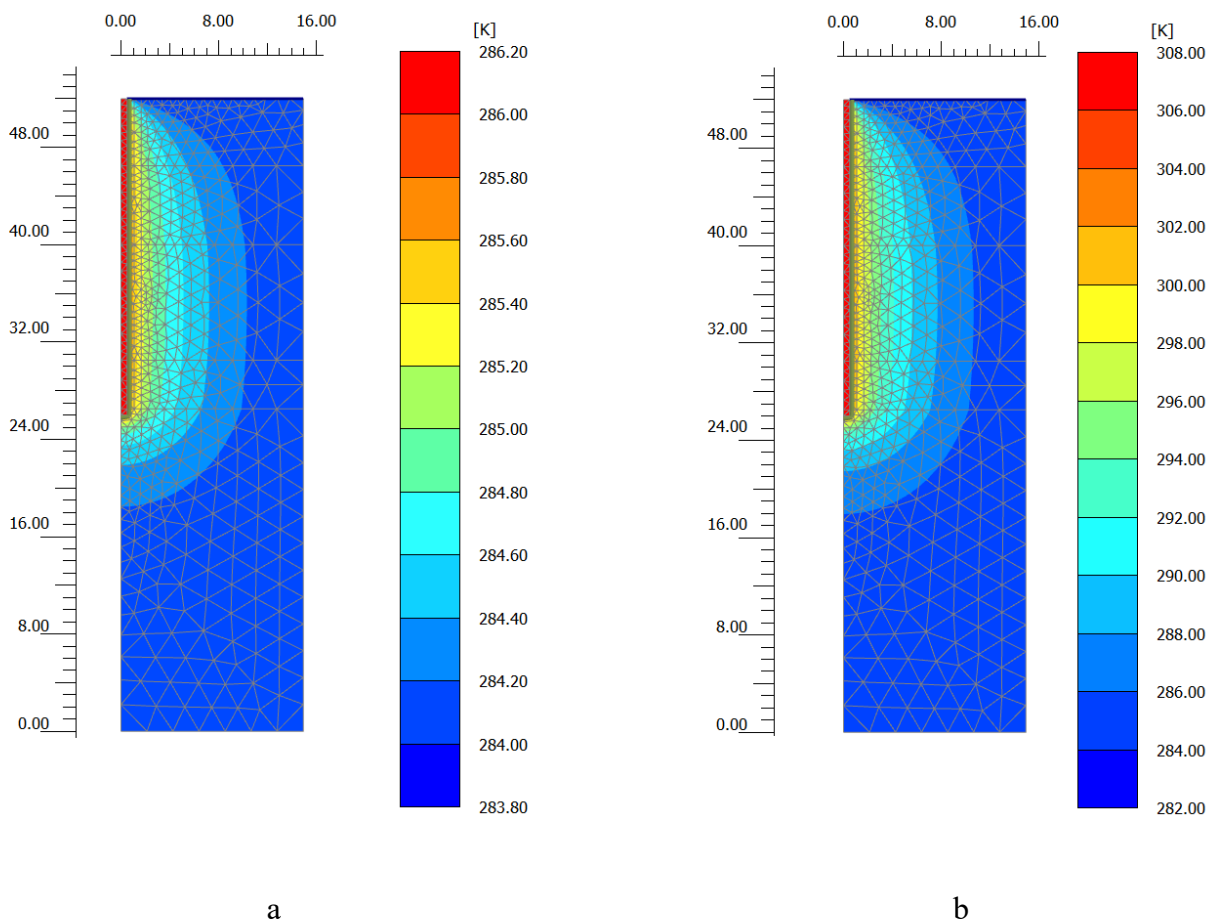


Figure 2: Thermal distribution; a-Heating phases 1, b-Heating phase 2

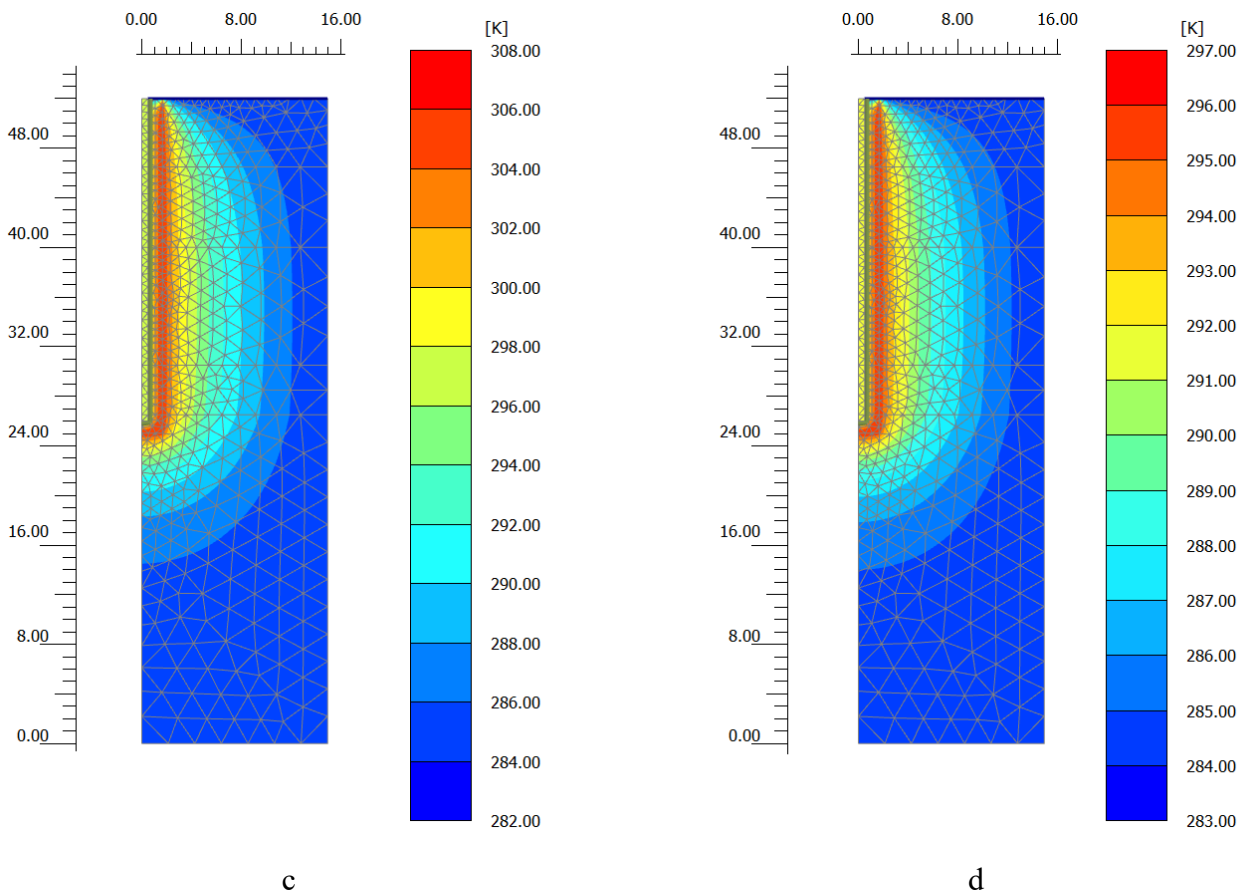


Figure 2 (continue): c-Cooling phase 1, d-cooling phase 2

The results for Scenario 2, the load-settlement curve in the figure 3 illustrates the relationship between the applied load and the resulting settlement of the pile under mechanical loading. The graph shows that as the load is gradually increased up to 3 MN, the mechanical applied load, the settlement follows a nonlinear pattern. Initially, the settlement increases gradually with loading, indicating a relatively stiff response of the pile and soil. As the load continues to rise beyond approximately 3 MN, the rate of settlement accelerates, reflecting a more significant deformation of the pile-soil system. The maximum settlement observed in the curve reaches nearly -34 mm, indicating that the pile experiences considerable displacement under higher loads. This pattern suggests that the pile-soil interaction becomes increasingly critical as the load approaches the upper limit, potentially indicating the onset of non-linear soil behavior or plastic deformation in the soil surrounding the pile. The contour plot shown in Figure 4 illustrates the settlement distribution of the pile and surrounding soil at the end of the mechanical loading process. The results indicate that the most significant settlement occurs near the bottom of the pile, reaching a maximum displacement of approximately -34 mm. This pronounced settlement at the pile base reflects the effective transfer of the applied load to the surrounding soil, causing higher stress concentrations in the lower portion of the pile. The color gradient in the contour plot shows a gradual decrease in settlement with increasing distance from the pile. The blue and green zones near the bottom of the plot represent areas of higher settlement, while the red and orange regions closer to the top indicate areas with lesser displacement. This distribution pattern suggests that the deformation is more concentrated around the pile, particularly in the deeper soil layers, due to the localized mechanical stresses.

Additionally, the settlement extends outward from the pile, forming a bowl-shaped deformation zone around the foundation. This pattern illustrates the impact of the mechanical loading on the adjacent soil, demonstrating how the load is distributed through both the pile and the surrounding soil layers. The observed deformation profile emphasizes the importance of accurately modeling soil-pile interactions when evaluating settlement behavior in pile foundation systems.

The results for Scenario 3, Figure 5 shows the settlement distribution of the pile and surrounding soil under coupled thermo-mechanical loading. The analysis captures the effects of both mechanical forces and temperature-induced deformations. The results indicate the presence of soil heave in response to the temperature rise, which acts in the opposite direction to the mechanical settlement, partially counteracting the downward movement of the pile. The contour plot reveals that the upper portion of the soil exhibits upward displacement (heave), as represented by the blue and green regions, indicating that thermal expansion is most significant near the surface. The heave results from the temperature rise causing thermal expansion of the soil, which acts to push the soil upward, reducing the overall settlement in this region. The magnitude of the upward displacement reaches up to approximately -12 mm, highlighting the extent of thermal effects on the soil. In contrast, deeper soil layers and the pile itself still experience net settlement due to the mechanical load, with the most pronounced settlement occurring near the pile's base, where the mechanical stress is higher. The contour plot demonstrates that the combined effects of thermal expansion and mechanical compression create a complex deformation pattern, with the thermal expansion working against the settlement at shallower depths, while deeper regions continue to undergo downward movement.

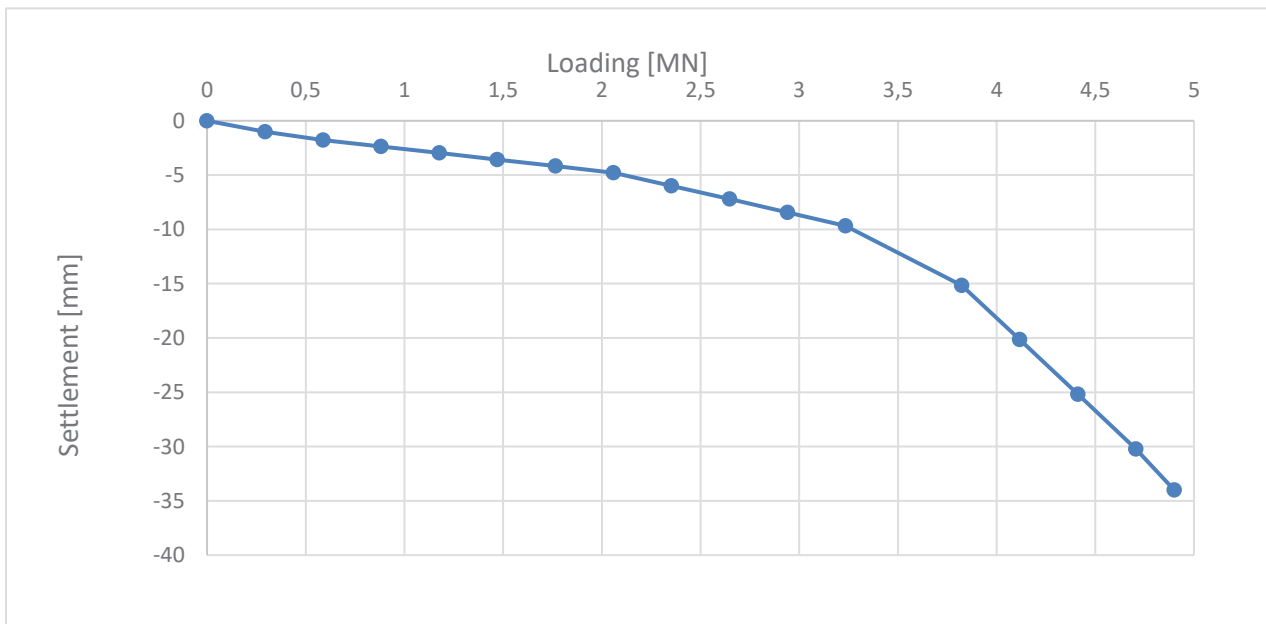


Figure 3: Load-settlement graph of pile under mechanical load

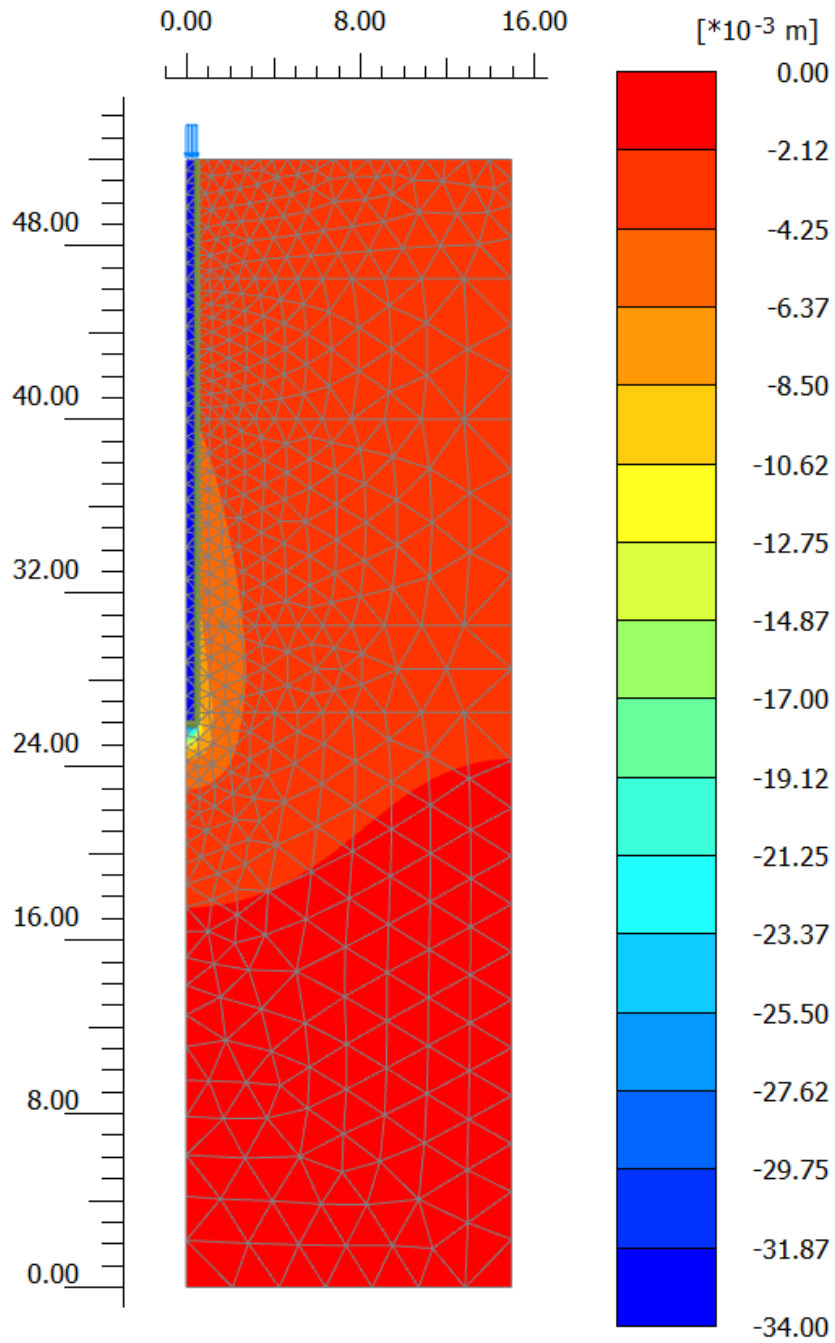
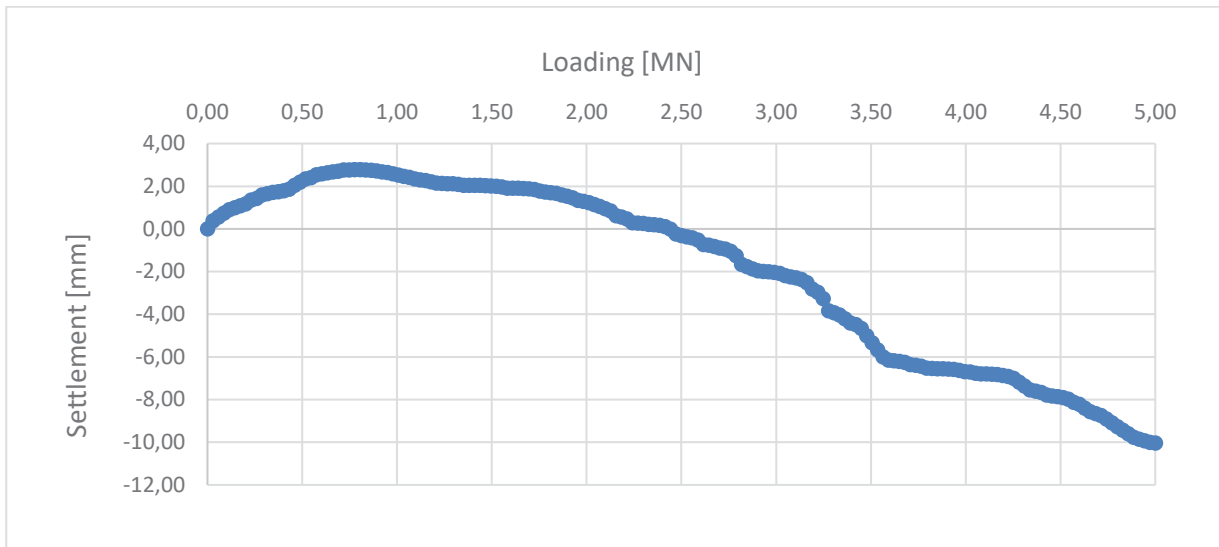


Figure 4: Settlement contour around the pile under mechanical load



6. Conclusions

This study provides a detailed investigation into the behavior of geothermal energy piles under different loading conditions, including thermal, mechanical, and coupled thermo-mechanical scenarios. The findings offer valuable insights into the performance of energy foundations and highlight several key aspects that are crucial for their design and analysis. The conclusions drawn from the analysis emphasize the following points:

The coupled thermo-mechanical analysis reveals that thermal loading plays a significant role in modifying the deformation behavior of the pile and surrounding soil. Thermal expansion can reduce the overall settlement by introducing upward displacement (heave) in the soil, counteracting the downward deformation caused by mechanical loading. This dual effect results in a more complex settlement profile compared to purely mechanical loading. The findings underscore the importance of considering coupled thermo-mechanical interactions in the design of geothermal piles, as neglecting these effects could lead to inaccurate predictions of settlement and structural performance. The results suggest that geothermal piles, which undergo repeated heating and cooling cycles, are subject to time-dependent thermal effects that could influence long-term deformation behavior. Cumulative thermal strains due to frequent temperature fluctuations may gradually affect the load distribution between the pile and the surrounding soil, potentially leading to changes in settlement patterns over time. Therefore, it is essential to account for thermal fatigue and potential creep effects in the design of energy foundations, particularly in applications where temperature variations are significant. Long-term monitoring and adaptive design strategies may be required to mitigate potential risks associated with thermal cycling.

The study demonstrates that the influence of thermal expansion is more pronounced in the upper soil layers, where the temperature changes are greater. The interplay between thermal-induced heave near the surface and mechanical settlement at deeper levels highlights the need for a detailed understanding of soil-pile interaction mechanisms. Accurately modeling the effects of temperature on the soil's stiffness and thermal expansion properties is crucial for predicting how the pile and soil will behave under operational conditions. This has practical implications for improving the accuracy of settlement predictions in geothermal pile designs.

The dual role of geothermal piles as both structural elements and heat exchangers presents unique challenges and opportunities for optimization. By incorporating thermal effects into the design process, it is possible to enhance the energy efficiency of the foundation while maintaining structural integrity. This requires a balance between optimizing the heat exchange capacity and minimizing the associated structural deformations. The findings suggest that careful selection of pile material

properties, such as thermal conductivity and expansion coefficients, can help manage thermal stresses and improve the overall performance of the foundation system.

The study identifies several areas for future research that could further enhance the understanding of geothermal pile behavior. These include the long-term effects of thermal cycling on soil-pile interaction, the impact of groundwater flow on heat transfer and settlement, and the influence of varying soil properties on thermo-mechanical behavior. Additionally, investigating different pile configurations and materials may provide insights into optimizing geothermal foundations for diverse geotechnical conditions.

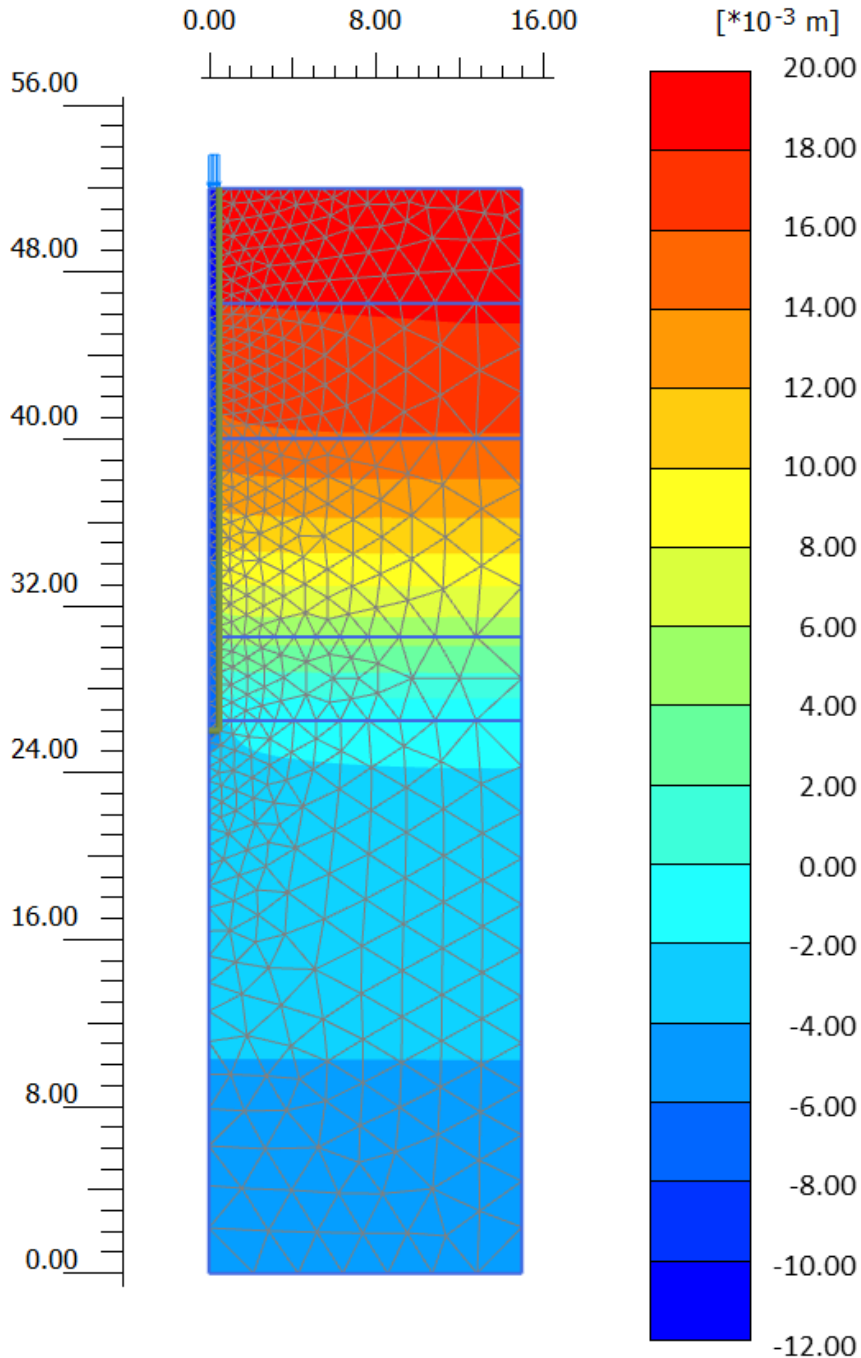


Figure 5: Settlement contour around the pile under Thermomechanical load

7. References

- [1] Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 763-781.
- [2] Amis, T., & Banks, D. (2000). Thermo-active ground engineering: the application of energy piles in UK. *Ground Engineering*, 33(10), 26-30.
- [3] Di Donna, A., & Laloui, L. (2015). *Energy geostructures: Innovation in underground engineering*. Wiley-ISTE.
- [4] Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D., & Rybach, L. (2003). Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, 32(4-6), 579-588.
- [5] Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.
- [6] Abdelaziz, S. L., & Ozudogru, T. Y. (2016). Numerical study on the thermo-mechanical behavior of energy piles. *Acta Geotechnica*, 11(3), 431-447.
- [7] Amatya, B., Soga, K., Bourne-Webb, P., Amis, T., & Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6), 503-519.
- [8] Bourne-Webb, P. J., Amis, T., Soga, K., & Nicholson, D. (2009). The design and performance of thermo-active ground structures. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 162(6), 277-287.
- [9] Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. Wiley.
- [10] Randolph, M. F., & Wroth, C. P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(12), 1465-1488.
- [11] Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., & Elson, W. K. (1992). *Piling Engineering*. Blackie Academic & Professional.
- [12] Meyerhof, G. G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, 2(4), 301-332.
- [13] Vesic, A. S. (1977). Design of pile foundations. *National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice*, 42.
- [14] Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [15] Laloui, L., & Di Donna, A. (2013). *Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering*. Wiley-ISTE.
- [16] Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids* (2nd ed.). Oxford University Press.
- [17] Davies, M., & Davies, C. (1998). Thermal performance and strain distribution in heat exchanger piles. *Géotechnique*, 48(3), 409-412.
- [18] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1996). *Introduction to Heat Transfer* (3rd ed.). Wiley.
- [19] Bourne-Webb, P. J., Amis, T., Soga, K., & Nicholson, D. (2009). The design and performance of thermo-active ground structures. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 162(6), 277-287.
- [20] McCartney, J. S., & Murphy, K. D. (2017). Strain distributions in geothermal energy foundations under operational conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(12), 04017094.
- [21] Amatya, B., Soga, K., Bourne-Webb, P., & Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6), 503-519.
- [22] Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.
- [23] Aydin, A. G., & Yilmaz, H. (2016). An axisymmetric finite element model for the analysis of energy piles. *International Journal of Geomechanics*, 16(5), 04016001.
- [24] Pujol, J. M., & Gálvez, J. (2015). An axisymmetric model for the thermal analysis of energy foundations. *Soils and Foundations*, 55(3), 598-609.

[25]. Ramm, H., & Boller, R. (2013). Numerical modelling of energy piles using an axisymmetric approach. *Geotechnical Testing Journal*, 36(5), 1-13.

Asad Zia¹, Ivan Holly²

Študijný program: D-TKeIS4 Theory and Structures of Civil Engineering Works

Enhancing Mechanical and Toughness Properties of Concrete Using Industrial and Waste Tire Steel Fibers: A Hybrid Fiber Approach

Abstract

The performance of concrete structures under extreme events like earthquakes, floods, and winds is of growing concern, especially regarding their post-crack behavior. Plain concrete is vulnerable due to its brittle failure and limited energy absorption. While industrial fibers are commonly used to enhance concrete, their high cost and environmental impact pose challenges to sustainability. This study explores the use of waste tire steel fibers (TFs) as a cost-effective alternative to improve concrete performance. Experimental evaluation was conducted on C20/25 concrete using TFs in both hybrid (30% industrial fibers and 70% TFs) and non-hybrid (100% TFs) formulations. Four concrete mixtures, including plain concrete and industrial fiber-reinforced concrete, were tested for bending and split-tensile strengths. The hybrid fiber mix showed good performance, suggesting that waste tire fibers, especially in hybrid form, can effectively enhance concrete properties.

Key Words

Concrete structures; Post-crack behavior; waste tire steel fibers; hybrid fibers; industrial steel fibers.

1. Introduction

The increasing frequency of earthquakes and floods has posed significant challenges to the sustainability and serviceability of concrete structures. Particularly, the brittle nature of plain concrete reduces its ability to sustain long-term durability and performance. In response, modern construction practices aim to develop durable, sustainable concrete structures capable of withstanding harsh environmental conditions and ensuring longevity. Additionally, the rising volume of waste emphasizes the need for effective recycling practices, particularly in the construction sector, where materials such as waste concrete and tires offer promising reuse potential. Recent research has increasingly focused on the use of steel fibers derived from waste tires to enhance the properties of concrete [1].

Statistics show that a mere 3.03% (3,148,900 tonnes) of waste tires are used in civil engineering applications, while certain countries like Slovakia, Bulgaria, Denmark, and Poland report no use of ELTs (End-of-Life Tires) in construction [2]. In Slovakia, where zero ELTs were utilized in 2018, there is an urgent need to explore the potential of waste tire steel fibers (TFs) in improving the mechanical properties of concrete. These recycled fibers, whether in raw or processed forms, have demonstrated promising results in enhancing concrete's performance. Commercially available recycled tire steel fibers (RWFs) typically include various sizes of steel fibers mixed with small quantities of rubber and impurities.

¹ Asad Zia, MSc., Department of Concrete Structures and Bridges, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia

² Ivan Holly, Ing., Doc., Department of Concrete Structures and Bridges, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia

Several studies have assessed the effects of waste tire steel fibers (TFs) on concrete properties. Some have explored the partial replacement of fine aggregates with pretreated crumb rubber and steel fibers to improve mechanical properties. However, the variability in fiber size and type across studies has hindered the establishment of an optimal TF content for enhanced tensile strength. Research has reported improvements in concrete properties ranging from 3% to 29% with the addition of 0.13% to 1% TFs by volume, depending on fiber length [3,4]. A reduction of 21% to 26% was noticed in the SS of concrete reinforced with clean TFs [5]. A maximum enhancement of 42% is reported in the FS of TFRC compared to 0FM using 0.5% TFs by weight of concrete [6]. Nonetheless, the available data is insufficient to identify a precise dosage of TFs to achieve consistent strength enhancements, prompting calls for further experimental investigations. Additionally, raw waste tire fibers, which contain impurities, have shown limited effectiveness in improving compressive and tensile strength, making it challenging to fully replace industrial hook-end steel fibers. The blending of industrial fibers with waste fibers has emerged as a strategy to optimize performance.

Several studies have been conducted to examine the effects of blending raw discarded tire fibers with industrial steel fibers on enhancing the properties of concrete. Compared to polypropylene and glass fibers, industrial steel fibers (ISFs) have demonstrated superior performance in concrete due to their enhanced bonding with the binder matrix, primarily attributed to the hooks at their ends [7]. These hooks prevent fiber slippage, allowing ISFs to maximize their contribution to resisting tensile cracking. Notably, researchers have reported significant improvements in both toughness and ductility when ISFs are incorporated into recycled aggregate concrete and slag-based high-workability concrete [8].

In contrast, the use of waste tire fibers (TFs) alone has shown limited success in improving the strength of conventional concrete, often falling short of the performance achieved with hook-end industrial steel fibers. However, hybridizing different types of fibers has emerged as an effective strategy to achieve superior enhancements in concrete performance. Numerous studies suggest that blending fibers of varying lengths, diameters, and shapes can be more effective at enhancing concrete properties than using fibers of uniform dimensions [9]. Industrial steel fibers, particularly those with hooked ends, are more effective than polypropylene and glass fibers in improving the bond between the fiber and the concrete matrix [10]. Consequently, research has explored the potential of hybridizing raw RWFs with industrial fibers, particularly hook-end steel fibers, to further improve performance [11]. Despite these advancements, significant gaps remain in understanding the long-term behavior of hybrid fiber-reinforced concrete.

The present study aims to assess the impact of incorporating both industrial and waste tire steel fibers on the performance of concrete. This investigation focuses on mechanical strength, energy absorption, and cracking behavior. Locally sourced tire fibers from Bratislava, Slovakia, are combined with industrial steel fibers, with hybrid blends consisting of 30% ISFs and 70% TFs. The volumetric proportion for each fiber type—ISFs, hybrid fibers, and TFs—is set at 0.50%.

2. Experimental program

Locally sourced C20/25 ready-mixed dry concrete was used for this study. The main constituents included Ordinary Portland cement, sand, water-reducing superplasticizer, and natural aggregate with a maximum particle size of 4 mm. Discarded tire steel fibers (TFs), compliant with the EN 14889-1:2006 standard, were incorporated. The TFs used had lengths ranging from 0.066 mm to 1.88 mm, an aspect ratio of 2.99 to 233.92, and diameters between 1.55 mm and 59.3 mm. Industrial steel fibers (ISFs), product code DE 30/0.80 N, were also used, complying with the DIN EN 14889-1 standard. The ISFs had a nominal length of 30 mm ($\pm 10\%$) and a diameter of 0.80 mm ($\pm 10\%$).

The mix design for both the plain concrete and the fiber-reinforced mixtures remained consistent, with the same water content across all mixes. The only difference was the addition of hybrid tire fibers (HTF) and ISFs to the respective HTFRC and ISFRC mixtures. A traditional concrete mixer was used for mixing for producing plain and fiber-reinforced concrete. Slump tests were conducted on the fresh concrete prior to molding. The ASTM standard method was followed for concrete

compaction using a vibrator. After casting, all specimens were cured in water tanks for 28 days and then tested in accordance with ASTM standards. The workability of the fresh concrete mixtures was assessed in accordance with the procedure outlined in ASTM C143/C143M-20. The splitting tensile strength and bending strength tests were conducted following ASTM C496/C496M-17 and ASTM C78/C78M-16, respectively.

3. Experimental results and discussion

The ingredients and proportions are the same for each mixture except for adding fibers in fiber reinforced concrete. The characteristics of zero-fiber concrete and industrial steel fiber-reinforced concrete are used as references. Percent comparisons are presented for considered strength properties.

3.1 Mechanical properties

The mechanical properties presented in Figure 1 illustrate the comparison of splitting tensile strength (SS) and flexural strength (FS) for four different concrete mixtures, expressed as a percentage relative to the baseline values. The mixtures include plain concrete (0TF), concrete with 0.5% tire fibers (5TF), concrete with 0.5% industrial steel fibers (5ISF), and a hybrid mixture containing both types of fibers (5HTF).

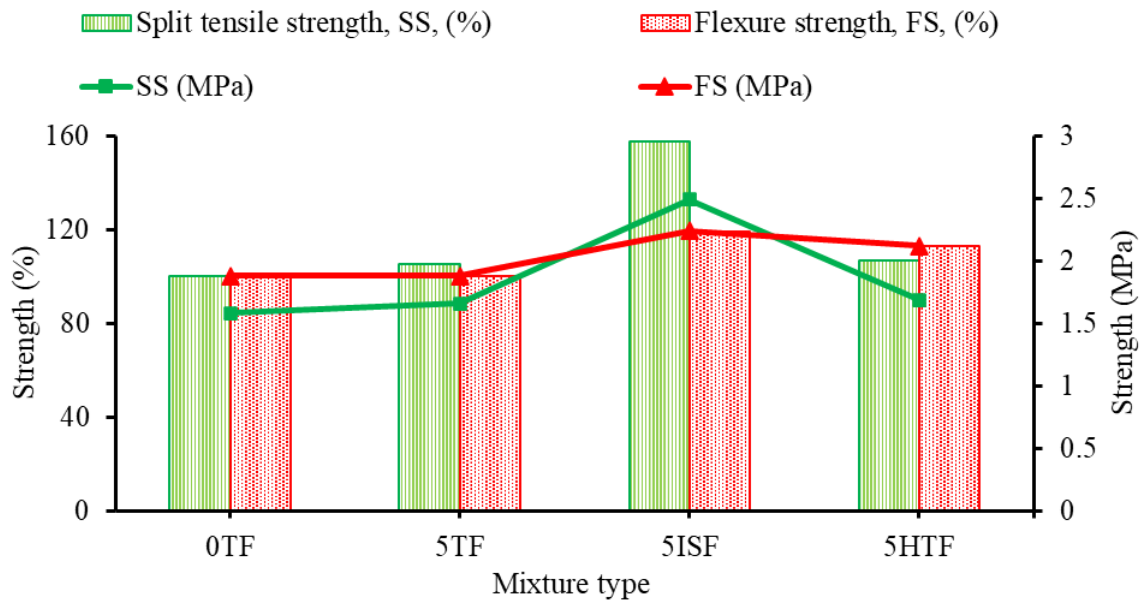


Figure 1: Mechanical Properties of mixtures

The split tensile strength (SS) for 0TF, the reference mix without fibers, is taken as 100%. When tire fibers are introduced (5TF), a slight improvement is observed, with SS exceeding the baseline by a small margin. This indicates that tire fibers provide some enhancement to the tensile properties, although the effect is relatively modest. The concrete reinforced with industrial steel fibers (5ISF) exhibits the highest SS, significantly surpassing the baseline at over 158%, demonstrating the superior tensile reinforcement provided by these fibers. In the hybrid mixture (5HTF), which combines 30% industrial steel fibers and 70% tire fibers, the SS is lower than the 5ISF mixture, though it remains higher than both the plain concrete and the tire fiber-reinforced mixture, highlighting the potential of hybridization for tensile performance improvement.

A similar trend is observed for flexural strength (FS). The plain concrete mixture (0TF) shows the lowest FS, and while the introduction of tire fibers in the 5TF mix yields some improvement, it is relatively minimal. The use of industrial steel fibers in the 5ISF mix results in the highest flexural strength, peaking at approximately 130%, indicating their significant contribution to enhancing the bending resistance of concrete. The hybrid mixture (5HTF) achieves a flexural strength slightly lower than the pure industrial steel fiber mix but still shows a notable improvement over both 0TF and 5TF. This suggests that while hybrid fibers can improve flexural strength, the performance is not as high as when industrial fibers are used alone.

Overall, the results demonstrate that industrial steel fibers provide the most substantial improvement in both tensile and flexural strength. However, the hybrid fiber mixture offers a balanced, cost-effective option with significant strength gains, particularly compared to plain or tire fiber-reinforced concrete.

3.2 Cracking behavior of specimens

Figure 3 presents the cracking patterns of specimens subjected to both bending and split tensile tests for the four different concrete mixtures: plain concrete (0TFRC), concrete reinforced with 0.5% tire fibers (5TFRC), concrete with 0.5% industrial steel fibers (5ISFRC), and the hybrid fiber mix (5HTFRC). In the plain concrete (0TFRC) specimens, the cracks appear sharp and propagate rapidly, typical of brittle failure behavior. This rapid crack propagation indicates low energy absorption and poor post-cracking performance. When tire fibers are introduced (5TFRC), the cracking pattern shows some improvement, with more distributed cracks and reduced crack width, reflecting enhanced energy absorption and resistance to sudden failure, though not as pronounced as in fiber-reinforced specimens.

The specimens reinforced with industrial steel fibers (5ISFRC) exhibit a significantly improved cracking pattern, characterized by smaller and more distributed cracks. The hooks at the ends of the steel fibers help bridge the cracks, providing better control over crack propagation and enhancing the material's toughness. This results in a more ductile failure mode compared to plain concrete. The hybrid fiber mixture (5HTFRC) shows a cracking pattern that combines the characteristics of both tire fiber and industrial steel fiber specimens. While not as fine or distributed as in the 5ISFRC mix, the hybrid fibers still manage to improve crack control compared to plain concrete and the tire fiber-reinforced mix. The combination of tire and industrial fibers seems to offer a balanced improvement in crack distribution, suggesting an enhancement in both tensile and flexural performance.

In summary, the cracking patterns confirm the superior crack control offered by industrial steel fibers, while hybrid fibers provide a cost-effective middle ground with notable improvements in the structural integrity of concrete under both bending and tensile stress.

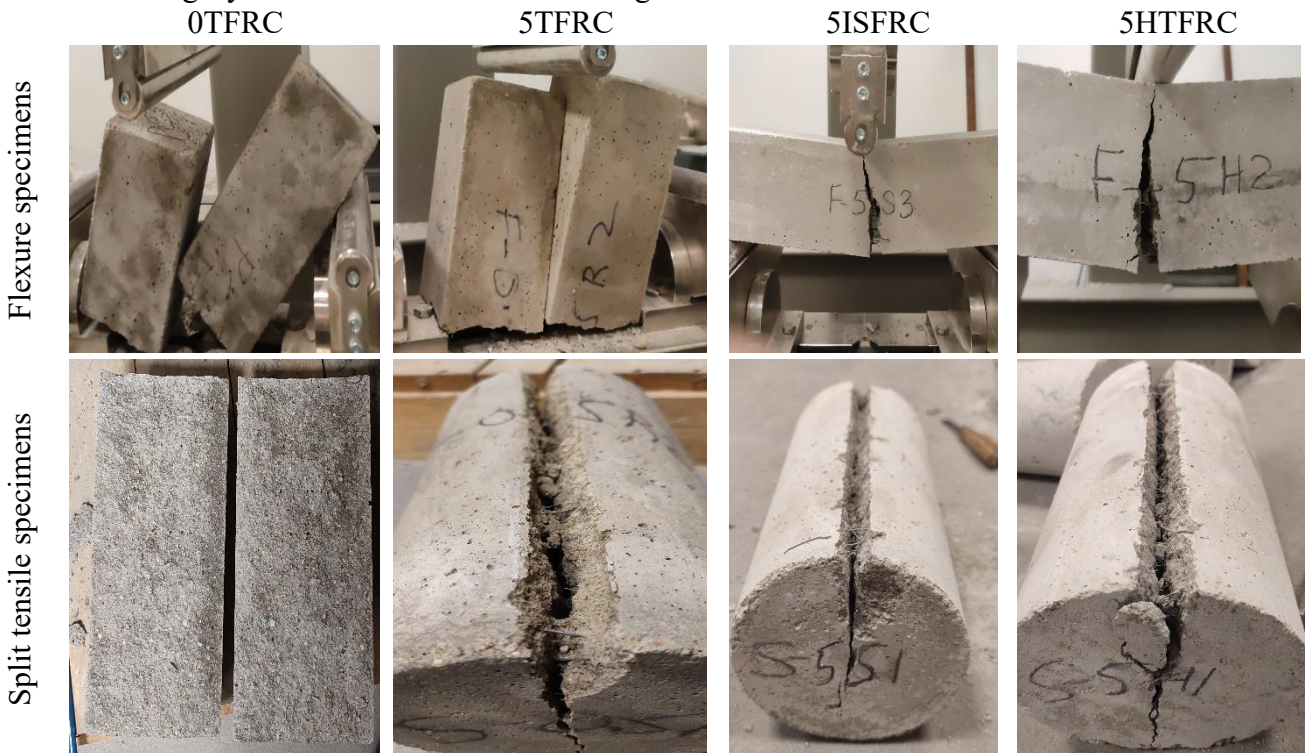


Figure 2: The cracking pattern of specimens during bending and split tests

3.3 Toughness of the specimens

Figure 4 presents the toughness indices for the different concrete mixtures, focusing on both flexure toughness (FTI) and split tensile toughness (SSTI). The percentage values indicate the relative

enhancement compared to the control mixture (0TF), while the toughness index (denoted by FTI and SSTI) represents the absolute measure of toughness. The split pre-crack energy is taken as the area below curves till the initial crack. The region under the entire curve is taken as total energy. The toughness index for each strength is taken as the ratio of total energy to pre-crack energy (TE/PE).

For the control mixture (0TF), the flexure and split tensile toughness indices are minimal, indicating that plain concrete exhibits low resistance to energy absorption during failure. The introduction of tire fibers (5TF) significantly improves the toughness in both flexure and split tensile scenarios. However, the improvement is more pronounced in the flexural toughness, showing a considerable increase compared to 0TF. This suggests that tire fibers enhance the energy absorption capacity in bending more effectively than in tension.

The highest improvement is observed in the concrete reinforced with industrial steel fibers (5ISF). The flexure toughness index (FTI) reaches its peak, with an increase of over 1000%, indicating that the industrial fibers greatly enhance the toughness in bending. This substantial increase highlights the effectiveness of steel fibers in controlling crack propagation and improving post-cracking behavior. Split tensile toughness (SSTI) also improves, though to a lesser extent than flexure toughness, reflecting that while steel fibers improve tensile toughness, their primary contribution is to flexural behavior. In the hybrid fiber mixture (5HTF), the toughness indices show a moderate reduction compared to 5ISF but remain significantly higher than the control mixture and 5TF. This suggests that the hybridization of tire and steel fibers provides a balanced improvement in both flexural and tensile toughness, though not as high as industrial steel fibers alone. The hybrid mixture, therefore, offers a cost-effective compromise, enhancing toughness while using a blend of recycled materials.

Overall, the data from Figure 4 highlights that industrial steel fibers provide the most significant improvement in toughness, particularly in flexure, while hybrid fibers offer a balanced yet slightly lower enhancement compared to pure industrial fiber reinforcement.

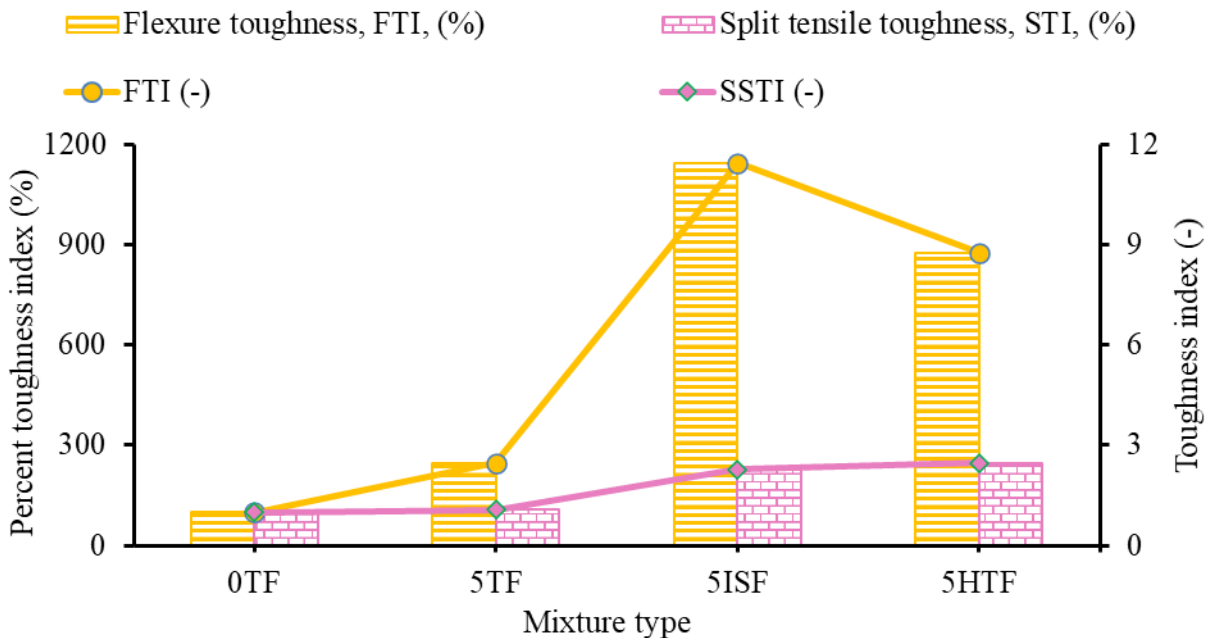


Figure 3: Toughness of the specimens

4. Conclusion and Recommendations

Based on the experimental results, it can be concluded that incorporating tire fibers (TFs) and industrial steel fibers (ISFs) significantly enhances the mechanical properties and toughness of concrete mixtures. The addition of ISFs demonstrated the highest improvements in flexural and split tensile strengths, indicating their superior performance in crack control and energy absorption. Hybrid fibers, consisting of a blend of TFs and ISFs, showed moderate enhancements, providing a balanced improvement in both mechanical strengths and toughness indices. This suggests that hybrid fiber-

reinforced concrete (HFRC) can be a viable option for achieving cost-effective solutions while utilizing waste materials like discarded tires.

The experimental findings also indicate that while tire fibers alone contribute to mechanical strength and toughness improvements, their effectiveness is limited compared to industrial steel fibers. However, their combination with ISFs in hybrid mixtures offers a promising approach for enhancing concrete properties while promoting the sustainability of concrete structures through the use of recycled materials.

In light of these results, the following recommendations are proposed:

- Further investigations should be conducted to optimize the proportion of hybrid fibers to achieve a more effective balance between cost and performance.
- The use of TFs should be promoted in construction applications to encourage sustainable practices and reduce waste from discarded tires.
- The influence of TFs coarse aggregate concrete also needs to be explored.

Acknowledgment

This work was supported by the Scientific Grant Agency VEGA under the contract No. VEGA 1/0358/23, APVV-23-0193 and APVV-23-0383.

References

- [1] A. Zia, P. Zhang, I. Holly, Effectiveness of hybrid discarded tire/Industrial steel fibers for improving the sustainability of concrete structures, *Constr Build Mater* 378 (2023) 131226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131226>.
- [2] ETRMA, ELT-Management-Figures-2017-vf, 2019. <https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/11/ELT-Management-Figures-2017-vf.xlsx.pdf> (accessed December 19, 2023).
- [3] S.A. Rossli, I.S. Ibrahim, Mechanical Properties of Recycled Steel Tire Fibres in Concrete, Technical Report, Faculty of Civil Engineering, University Technology Malaysia, 2012. <https://people.utm.my/iznisyahrizal/files/2013/02/Technical-Report-1.pdf> (accessed November 16, 2022).
- [4] M. Chen, H. Si, X. Fan, Y. Xuan, M. Zhang, Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete, *Constr Build Mater* 316 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125896>.
- [5] G. Grolí, A. Pérez Caldentey, A.G. Soto, Cracking performance of SCC reinforced with recycled fibres - An experimental study, *Structural Concrete* 15 (2014). <https://doi.org/10.1002/suco.201300008>.
- [6] S.H.A. Shah, B. Ali, G.H. Ahmed, S.M.T. Tirmazi, M.H. El Ouni, I. Hussain, Effect of recycled steel fibers on the mechanical strength and impact toughness of precast paving blocks, *Case Studies in Construction Materials* 16 (2022) e01025. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01025>.
- [7] I. Hussain, B. Ali, T. Akhtar, M.S. Jameel, S.S. Raza, Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene), *Case Studies in Construction Materials* 13 (2020) e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
- [8] J.A. Ortiz, A. de la Fuente, F. Mena Sebastia, I. Segura, A. Aguado, Steel-fibre-reinforced self-compacting concrete with 100% recycled mixed aggregates suitable for structural applications, *Constr Build Mater* 156 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.188>.
- [9] D.-Y. Yoo, S.-W. Kim, J.-J. Park, Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers, *Constr Build Mater* 132 (2017) 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.104>.
- [10] I. Hussain, B. Ali, T. Akhtar, M.S. Jameel, S.S. Raza, Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene), *Case Studies in Construction Materials* 13 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
- [11] L. Vistos, D. Galladini, H. Xargay, A. Caggiano, P. Folino, E. Martinelli, Hybrid industrial/recycled SFRC: Experimental analysis and design, in: *Proceedings of Italian Concrete Days 2016, Rome, Italy, 27–28 October 2016*, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78936-1_8.

WATER RESOURCES ENGINEERING

Wael Almikaeel¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 4. ročník

HODNOTENIE ŠTATISTICKÝCH ROZDELENÍ DENNÝCH PRIETOKOV: POSTREHY Z NORMÁLNYCH, MOKRÝCH A SUCHÝCH ROKOV

EVALUATING STATISTICAL DISTRIBUTIONS FOR DAILY DISCHARGE: INSIGHTS FROM NORMAL, WET, AND DRY YEARS

Abstract

This study explores the statistical behavior of hydrological data from a single river system, focusing on its variability under three distinct conditions: normal, wet, and dry years. Using the Water-Bearing Coefficient (WBC), discharge data were categorized and analyzed with statistical distributions to model daily discharge patterns. The Johnson SU and Burr distributions were identified as suitable models, effectively capturing the variability and skewness of the data across different hydrological scenarios. Logarithmic transformations were applied to enhance the fit of the distributions, providing a clearer representation of central tendencies and tail behaviors. These results underscore the impact of varying hydrological conditions on discharge distribution and emphasize the importance of selecting appropriate statistical models to improve prediction accuracy in water resource management and flood risk mitigation.

Keywords:

Hydrological data, statistical distributions, log transformation, water resource management, flood risk.

1. Introduction

Accurately modeling hydrological data, particularly discharge data, is essential for understanding water resource dynamics and supporting effective water management strategies. Due to the high variability driven by climatic conditions, discharge data often require statistical modeling to account for these fluctuations. Identifying the best theoretical distribution to fit such data can significantly improve predictions of extreme hydrological events, thus informing decision-making in water management [1]. However, the non-stationary nature of hydrological data, especially under varying climatic conditions such as wet, normal, and dry years, presents a challenge in finding appropriate models [2]. This study applies the Water-Bearing Coefficient (WBC) to classify annual hydrological periods and identify the optimal statistical distributions for each.

The use of statistical distributions in hydrological studies is well-established, with models such as the normal, log-normal, Gamma, Weibull, and Generalized Extreme Value (GEV) distributions commonly used to capture the skewness and heavy tails present in discharge data [3]. These distributions are favored for their ability to reflect the data's variability, particularly in the context of extreme events such as floods, which often exhibit heavy-tailed characteristics [4]. Studies have shown that hydrological data, especially discharge data, frequently follow a log-normal or similarly skewed distribution, emphasizing the need for transformations to better fit the data [5]. By categorizing discharge data into wet, normal, and dry periods, this study seeks to refine the process

¹ Wael Almikaeel, Ing., Radlinského 11, 811 05 Bratislava

of fitting statistical distributions, ultimately improving the accuracy of these models in capturing distinct hydrological conditions.

To achieve this, we developed a methodology for fitting multiple theoretical distributions to the discharge data and evaluated the goodness-of-fit using statistical tests such as the Kolmogorov-Smirnov (K-S) test and the Anderson-Darling test [6]. Given that discharge data frequently exhibit log-normal characteristics, log transformations were applied to enhance model performance [4]. By identifying the top five best-fitting distributions and optimizing their parameters, this study provides insights into the suitability of different statistical models for raw and transformed data, improving understanding of discharge behavior across varying hydrological conditions and supporting more effective water resource management strategies [2].

2. Methods

2.1 Study area

This study utilized data sourced from the Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI), comprising hourly discharge measurements for the Topľa River, a significant tributary of the Ondava River in eastern Slovakia. The Topľa River drains a catchment area of 1,544 km² and spans 129.8 km in length. The river experiences a temperate climate with annual rainfall between 600 to 1,000 mm. Our dataset includes discharge data from 2008 to 2020, focusing on hydrological distributions [7, 12].

2.2 Data Classification

We classified the hydrological data into three categories: wet, normal, and dry years, using the Water-Bearing Coefficient (WBC). The WBC is a widely recognized hydrological measure that assesses annual discharge variability relative to long-term averages. It is calculated as the ratio of a given year's discharge to the multi-year average. Years with a WBC above a certain threshold were considered wet, those below a lower threshold as dry, and the intermediate values as normal. This classification enables structured analysis under different climatic regimes, allowing for a detailed examination of discharge patterns over time [1, 2].

2.3 Distribution Fitting

To model the classified discharge data, a wide range of continuous probability distributions was analyzed. These included commonly applied models in hydrology such as the normal, log-normal, gamma, exponential, Pareto, generalized extreme value (GEV), and Weibull distributions. Each of these distributions is well-suited to modeling various hydrological scenarios, particularly extreme events like floods and droughts, which often display non-normal data distributions [8]. By selecting these distributions, we aimed to account for the significant variability in discharge data across different hydrological conditions.

Maximum Likelihood Estimation (MLE) was employed to fit the selected distributions to the data. MLE is widely regarded as one of the most robust methods for parameter estimation, providing unbiased and consistent estimates, making it ideal for hydrological analysis [9]. The implementation of MLE was carried out using the Python-based SciPy library, which offers an extensive suite of functions tailored for fitting probability distributions to empirical data [9]. A summary of the fitted distributions can be found in Table 2, which presents the top five best-fitting distributions for each hydrological scenario, based on the results of goodness-of-fit tests.

2.4 Goodness-of-Fit Tests

Kolmogorov-Smirnov (KS) Test: This test compares the empirical distribution function of the data with the cumulative distribution function (CDF) of the fitted models, assessing the largest difference between the two. A p-value of 0.05 or higher was considered evidence of an acceptable fit [6]. The KS test is particularly useful in hydrological applications, as it does not require the data to be normally distributed and offers a broad assessment of fit quality across different distributions.

2.5 Parameter Estimation and Top Distributions

Following the goodness-of-fit tests, the parameters for each acceptable distribution were refined using MLE to ensure the most accurate model representations. The top five distributions for each hydrological class—wet, normal, and dry years—were selected and ranked based on their statistical fit. This method helps in determining the most suitable distribution for modeling the discharge data in varying hydrological situations, ensuring that the chosen models can accurately reflect the observed patterns [10]. The distributions and their associated p-values are summarized in Table 2.

2.6 Visualization and Log-Transformation

Given the skewed nature of hydrological discharge data, log-transformations were applied to the dataset to normalize the data and enhance model fit. This process is widely used in hydrology, where discharge data often follow log-normal distributions due to the inherent variability in water flow and extreme events [11]. The log-transformed data, along with the raw data, were visualized to overlay histograms with the Probability Density Functions (PDFs) of the fitted distributions. This visualization allowed for an intuitive understanding of how well the distributions modeled both central tendencies and tail behaviors of the discharge data under different hydrological scenarios.

3. Results and Discussion

3.1 Drought Assessment Using WBC

Using the Water-Bearing Coefficient (WBC), the discharge data were classified into three categories: normal, dry, and wet years. This classification revealed that normal years were the most frequent, accounting for 39% of the total data, while dry and wet years represented 33% and 28%, respectively. Specific years, such as 1990, 1991, and 2013, were categorized as normal, while years like 1988 and 1994 were classified as dry. The wettest years included 1989 and 2017. This breakdown provides insight into how discharge patterns vary across different hydrological periods, and a summary of the classification results is shown in Table 1. Additionally, figure 1 presents the original distribution of the data on the left, reflecting the hydrological situation, which exhibits a strong skew due to the presence of extreme values. On the right, the same data is displayed after applying log transformation, providing a clearer comparison of the three distributions. This transformation reduces skewness, bringing the distributions closer to a skewed normal distribution.

Table 1. Hydrological classification of the daily discharge data using WBC.

Hydrological classification	Frequency	% of occurrences	Years
Normal	13	39%	1990, 1991, 1997, 1999, 2000, 2002, 2004, 2007, 2013, 2014, 2016, 2019, 2020
Dry	11	33%	1988, 1993, 1994, 1995, 1996, 1998, 2003, 2011, 2012, 2015, 2018
Wet	10	28%	1989, 1992, 2001, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2017

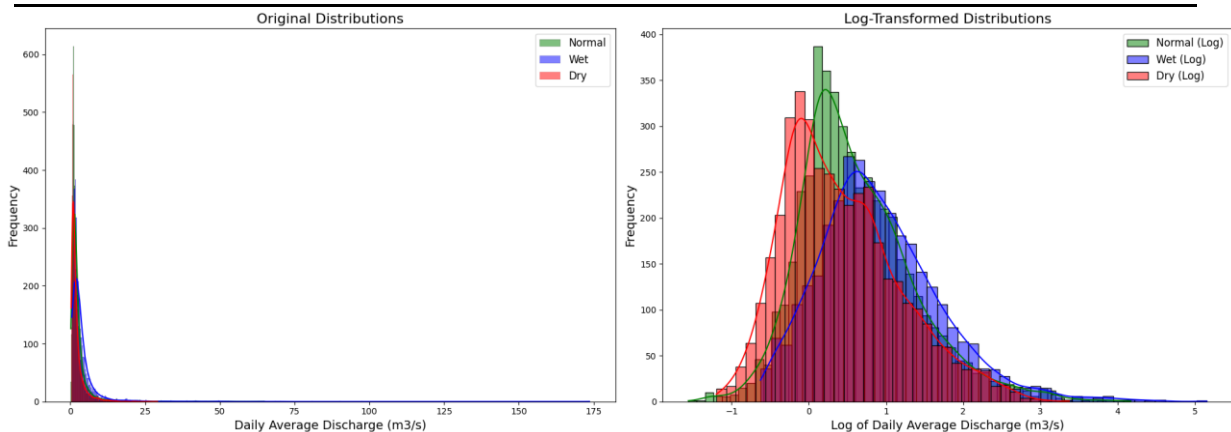


Figure 1: The original and log-transformed distributions of the data in three different hydrological situations

3.2 Theoretical distributions meet empirical data

Hydrological The behavior of river discharge data can vary significantly depending on the hydrological situation, and this study confirms that different distributions fit the data better under wet, normal, and dry conditions. As shown in Table 2, during wet years, the Burr distribution (p-value = 0.975) and Mielke distribution (p-value = 0.941) provided the best fits, reflecting the higher skewness and heavy tails associated with extreme discharge events. In contrast, during dry years, the Beta Prime (p-value = 0.330) and F distribution (p-value = 0.469) proved to be more appropriate, capturing the lower variability and more stable discharge patterns typical of such conditions.

Despite the variability between wet and dry years, some distributions, like the Johnson SU and Burr distributions, were consistently effective across different scenarios, demonstrating their robustness in capturing skewed hydrological data. However, their parameters—particularly the scale and shape factors—differed across hydrological categories, reflecting the changing flow magnitudes and variability between wet and dry periods. For instance, the Inverse Gamma distribution provided an excellent fit during wet years (p-value = 0.960), while it was less suitable for normal or dry conditions due to the reduced occurrence of extreme discharge values.

These findings emphasize the importance of selecting the appropriate statistical model based on the hydrological context, ensuring accurate predictions, and improving water resource management and flood risk assessment strategies. The results suggest that hydrological data cannot be effectively modeled with a single distribution but rather require adaptive approaches tailored to specific environmental conditions [8,10].

Tables summarizing the classification of hydrological conditions and the best-fitting distributions for each condition can be referenced throughout the sections, with a particular focus on highlighting the p-values that indicate the goodness-of-fit for each tested model.

Table 2. Table of Theoretical distributions that fitted the empirical data with the corresponding p-values

Distribution	P-value (Normal)	P-value (Wet)	P-value (Dry)
Johnson SU Distribution	0.594	Not Fitted	0.650
Non-central t Distribution	0.432	Not Fitted	Not Fitted
Alpha Distribution	0.389	Not Fitted	Not Fitted
Burr Distribution	0.286	0.975	Not Fitted
Mielke Distribution	0.233	0.941	Not Fitted
Inverse Gamma Distribution	Not Fitted	0.960	Not Fitted
Fisk Distribution	Not Fitted	0.930	Not Fitted
Inverse Weibull Distribution	Not Fitted	0.930	Not Fitted
F Distribution	Not Fitted	Not Fitted	0.469
Beta Prime Distribution	Not Fitted	Not Fitted	0.330
Power Lognormal Distribution	Not Fitted	Not Fitted	0.290

3.3 Best theoretical distribution for different hydrological situations

The fitted graphs demonstrate how different distributions adapt to the discharge data under varying hydrological conditions. For normal hydrological years, the Johnson SU distribution was applied to the daily average discharge data [Fig. 2]. In the left graph, the original data displays considerable skewness, with a rapid decrease in density as discharge values rise. The Johnson SU distribution (represented by the blue line) adequately fits the right tail but has difficulty capturing the higher density of lower discharge values. In contrast, the log-transformed data in the right plot significantly reduces skewness, resulting in a more symmetrical shape that allows for a better fit by the Johnson SU distribution. The transformation shows a closer alignment between the log-transformed data and the fitted distribution, especially around the peak and tails, making it easier to model the variability

and range of discharge data. This underscores the importance of log transformations when dealing with highly skewed hydrological data.

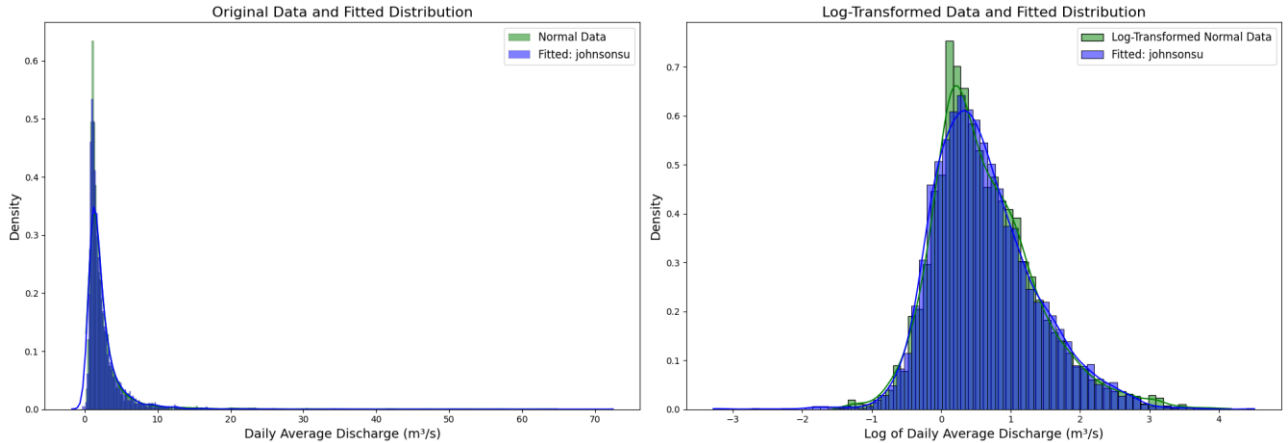


Figure 2: Johnson SU Distribution Fitted to Normal Hydrological Data

In wet hydrological conditions [Fig. 3], the Burr distribution was applied. In the original data (left plot), significant skewness is evident, characterized by a long right tail indicating extreme discharge events during wet years. The Burr distribution, shown by the orange line, captures some of the data's shape but struggles with the extreme tail behavior. Applying a log-transformation (right plot) mitigates the skewness, leading to a closer alignment between the transformed data and the Burr distribution. This transformation normalizes the data, resulting in a more accurate fit, especially around the peak and tails. The improved fit suggests that the Burr distribution, combined with log-transformation, is well-suited for capturing both typical and extreme discharge events during wet year.

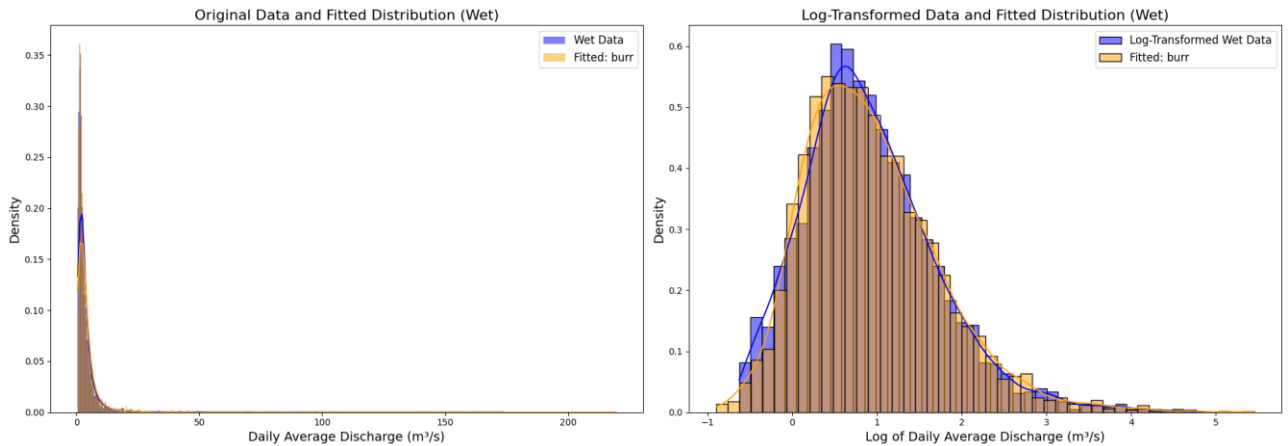


Figure 3: Burr Distribution Fitted to Wet Hydrological Data

Under dry hydrological conditions (Fig. 4), the Johnson SU distribution was also applied. The left graph depicts the original data, showing a high concentration of values near zero and a long right tail. While the Johnson SU distribution (represented by the purple line) can capture some aspects of this skewness, it does not fully account for extreme discharge events. In the right graph, the log-transformation reduces the skewness, normalizing the data and enabling a closer fit by the Johnson SU distribution. This transformation allows for a more accurate representation of both the central tendency and tail behavior, which are essential for modeling discharge patterns in dry years.

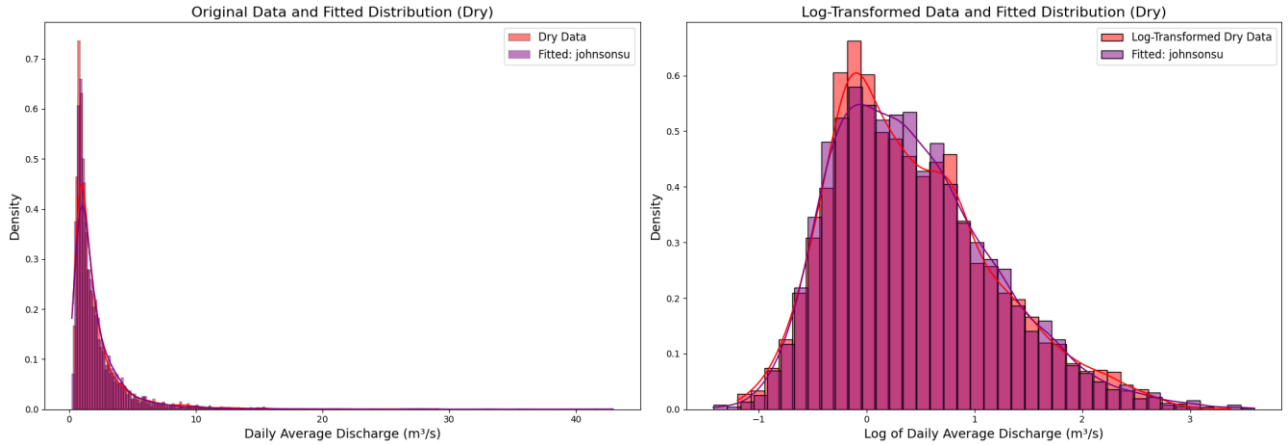


Figure 4: Johnson SU Distribution Fitted to Dry Hydrological Data

3.4 Discussion

The analysis of discharge data across normal, wet, and dry hydrological years reveals key differences in the statistical properties of the data. As shown in Figures 1, 2, and 3, these varying hydrological situations significantly affect both the central tendency and shape of the discharge data, necessitating different statistical distributions for accurate modeling.

For normal years, the Johnson SU distribution proved to be an effective model, particularly when the data were log-transformed to reduce skewness. This transformation allowed for a better fit, especially around the central tendency and tails (Figure 2), highlighting the importance of using log-transformation to enhance the model's ability to handle highly skewed data.

During wet years, the extreme variance and occasional flood events introduced substantial skewness in the data, which was best handled by the Burr distribution. The log-transformation of the wet year data resulted in a more symmetrical distribution, improving the fit of the Burr distribution, as shown in Figure 3. This suggests that distributions capable of modeling heavy tails and high variance, such as the Burr distribution, are particularly useful for capturing extreme hydrological events in wet conditions.

Dry years presented a pattern similar to normal years, though with less variability and smaller overall discharge values. The Johnson SU distribution again provided a good fit, especially after log-transforming the data (Figure 4), which reduced the skewness and enhanced the distribution's fit to both the central and extreme values. The lower variance in dry years resulted in a more stable dataset, better suited for distributions that handle less pronounced tail behavior.

Across all hydrological scenarios, log-transformation proved to be a critical step in improving the goodness-of-fit for the distributions. By addressing the skewness inherent in the discharge data, the transformation allowed for more accurate statistical modeling, ensuring that the selected distributions could effectively represent the discharge patterns across varying hydrological situations. This underscores the importance of adaptive modeling approaches when analyzing hydrological data under changing environmental conditions.

4. Conclusion

This study highlights the critical importance of selecting appropriate statistical distributions to model discharge data under different hydrological conditions—normal, wet, and dry years. The Johnson SU and Burr distributions emerged as strong candidates for modeling these data, with log-transformations playing a pivotal role in improving the overall fit. The results demonstrate how hydrological conditions influence both the central tendency and variability of discharge data, leading to different statistical behaviors that necessitate distinct modeling approaches. The use of log transformations was particularly effective in reducing skewness, thereby providing a more accurate representation of the data and improving the ability to model extreme events.

These findings contribute to a more nuanced understanding of hydrological dynamics, offering valuable insights for developing robust predictive models in water resource management and flood risk assessment. By tailoring statistical distributions to specific hydrological conditions and employing transformations to improve fit, this study offers a pathway to more accurate and reliable predictions of discharge patterns, which are vital for managing water resources under the impacts of climate variability and extreme weather events.

Acknowledgments: This contribution was developed within the framework and based on the financial support of the APVV-19-0383 project, together with APVV-20-0023 project.

References

- [1] Khaledi, K., Ahmadi, A., & Ahmadinejad, M.: *Evaluating the Best Fit Distribution for Annual Maximum Discharge Data in Semi-Arid Areas of Iran*, Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2020, pp. 125-134.
- [2] Marković, G., Đorđević, A., & Đorđević, N.: *Application of Probability Distributions for Flood Frequency Analysis in Serbia*, Water Resources Management, 35(10), pp. 3265-3280
- [3] Cunnane, C.: *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis*, World Meteorological Organization, 1989.
- [4] Helsel, D. R., & Hirsch, R. M.: *Statistical Methods in Water Resources*, U.S. Geological Survey, 2002.
- [5] Vogel, R. M., & Wilson, I.: *Probability Distribution of Annual Maximum, Minimum, and Average Streamflow in the United States*, Journal of Hydrology, 1996, pp. 189-209.
- [6] Stephens, M. A.: *EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons*, Journal of the American Statistical Association, Geneva, 1974, pp. 730-737.
- [7] Almikaeel, W., & Cubanova, L: *Unraveling seasonal dynamics: Inter-station correlations and hydrological assessments of Topľa River in the Bardejov Basin*, 3S Web of Conferences, 2024.
- [8] Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R.: *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*, Cambridge University Press, 1997.
- [9] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, Í., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald, A. M., Ribeiro, A. H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., & SciPy 1.0 Contributors: *SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python*, Nature Methods, 2020, pp. 261–272.
- [10] Madsen, H., & Rosbjerg, D.: *Estimation of Regional Flood Frequency Distributions*, Hydrological Sciences Journal, 2020, pp. 29-43.
- [11] Lye, L. M., & Lin, Y. L.: *Simulation of Floods using the Burr and Extreme Value Distributions*, Journal of Hydrology, 1997, pp. 71-84.
- [12] SHMÚ: *Hydrologická ročenka, povrchové vody 2018*, SHMÚ, Bratislava, 2019, p. 195. In Slovak.

Ing. Raghad Awad

Študijný program: D-VH14, ročník: (2)

HODNOTENIE EFEKTÍVNOSTI HOSPODÁRENIA SO ZRÁŽKOVOU VODOU POMOCOU RACIONÁLNEJ METÓDY A PROGRAMOVANIA R

ASSESSING STORMWATER MANAGEMENT EFFICIENCY USING RATIONAL METHOD AND R PROGRAMMING

Abstract

Urban stormwater management is increasingly challenged by the effects of climate change, particularly changes in rainfall patterns. This paper focuses on the effect of intense rainfall on the efficiency of stormwater management using R programming. The urbanized area of the town levice is used for the study, which appears to be a very suitable area for the accumulation of precipitation. Over a period of 3 years, the stormwater system was analysed for its effectiveness in managing daily runoff and preventing overflow events. Using R programming for data analysis and visualisation, the study identified 5 overflows days over the study period indicating that the system was generally effective in handling most rainfall events. The results highlight the sufficiency of the current system capacity for typical weather conditions but also reveal targeted improvements such as implementing green infrastructure solutions to reduce peak runoff volumes.

Keywords

rainfall patterns , stormwater management , R programming , runoff , green infrastructure

1. Introduction

Climate change is one of the most pressing global challenges, with far reaching impacts on weather patterns, ecosystems and infrastructure. The increased concentration of greenhouse gases in the atmosphere, primarily due to human activities such as burning fossil fuels and deforestation has led to significant shifts in global climate patterns. Among the many consequences, changes in precipitation intensity and frequency have become particularly concerning for urban areas. Extreme rainfall events, prolonged periods of drought and unpredictable weather patterns have started to strain stormwater management systems, which were often designed based on historical climate conditions. According to studies, annual rainfall trends in some parts of the world have increased significantly over the last 50 years. [1] In recent decades, climate change has been a global environmental issue, which has led to the international United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris agreement which aims to contribute to sustainable development at a global level and to ensure collective action to limit the impact of climate change [2]. According to various studies, average annual precipitation across Europe has increased by between 10 and 40% in recent years [1]. This has been particularly marked in the countries of north-eastern and north-western Europe, while rainfall in the southern part of Europe has decreased. Over the last 10 years, Slovakia has experienced alternating extremely wet and extremely dry months and years. Despite the sufficient availability of water resources, the occurrence of extreme climatic events brings significant changes in hydrological and climatic conditions. A frequent manifestation of climate change is extreme daily torrential rainfall, which has occurred frequently in Slovakia over the last 15 years and has caused significant

environmental and economic damage [3]. As impermeable surfaces increase, stormwater runoff increases, causing river channels to fill up more quickly during floods and extreme rainfall events. Such consequences can be prevented by capturing surface runoff in large profile storm drains or storm tanks. This study aims to assess the performance of Levice's stormwater management system over a three-year period, focusing on its capacity to handle daily runoff and prevent overflow events using R programming. R Programming has emerged as a powerful tool for hydrological modelling, data analysis and visualization in urban stormwater management. It can be used to simulate the impacts of rainfall on urban drainage systems, particularly as climate change alters traditional rainfall patterns, leading to increasing flooding risks and infrastructure challenges. This research evaluates how well the system meets the demands of changing climate conditions and extreme weather conditions.

2. Methodology

2.1 Study Area

The urbanized area of the town Levice is used for the study, which is part of the urban district Vinohrady. Figure 1 shows the selected study area. The area appears to be a very suitable area for the accumulation of precipitation. The area of interest belongs to the north-eastern part of the Danube Lowland. The territory of the town belongs to the Hron river basin, where the podlužianka stream and the pereg artificial canal flow directly through the town. Hydrographically, the town is part of the Hron basin with an average annual flow of 50 m³. Surface water in the vicinity of the wider area of interest are drained by the receiving watercourses pereg, podlužianka and teler. The area is classified as a warm region of Slovakia, dry with mild winters and long sunshine, with an average annual temperature of 9-10 C. The annual average rainfall is 600 mm and the evaporation is around 464-484 mm. The prevailing wind direction is NW to W. The territory lies in the hron river, which belongs to the Danube basin. The Hron has a snow-rainfall type of runoff regime. It is characterized by accumulation in November -February, high water content in March and April, with a slightly significant increase in water content in late autumn and early winter. The area is dominated by evaporation over runoff. [4] In Levice, the study was primarily focused on solving the housing estate of vinohrady. Figure 2 shows the area of Interest in Vinohrady. Due to the fact that it is a housing estate with a sloping terrain where there is surface runoff, the proposal for rainwater management directly in the proposed location since it is a housing estate with a high content of green areas. At present Wastewater disposal in Levice is provided by a single sewerage system. During the Visual Inspection after opening the manholes, the flow in the manholes was confirmed and the actual connection of the individual street drains was also obtained. No damage to manholes or pipes was found during the inspection of the actual condition. The pipes in the project area are reinforced concrete pipes with DN 300- DN800. The sewer manholes were measured using a LeicaViva GS15 GPS instrument. The GPS Instrument was used to measure the location and elevation of all sewer manholes in project area. As the Estate is largely impermeable, the drainage of stormwater from the area is provided by street drains on each street. The total area of the development is 117 326 m², of which is 74 055.7m² (63.12%) is made up of paved areas including roofs from residential dwellings. [5] Stormwater from the roofs of the surrounding residential buildings is transported to the sewerage system using the rainwater drains and connections. The stormwater is relieved in an appropriate relief chamber. Wastewater discharged through the single sewer is disposed of in the levice WWTP in the Géna location. The sewage network is heavily burdened by the ballast water, where diluted sewage water causes problems in the process of technological cleaning. The recipient of treated wastewater is the Podlužianka River.

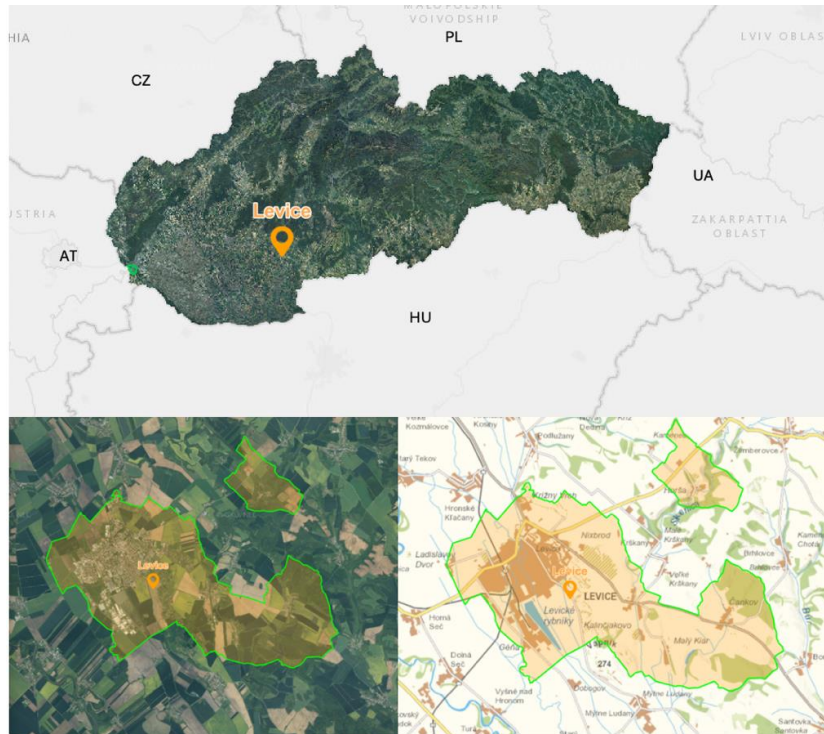


Figure 1: The location of the study area Levice and the situation [6]

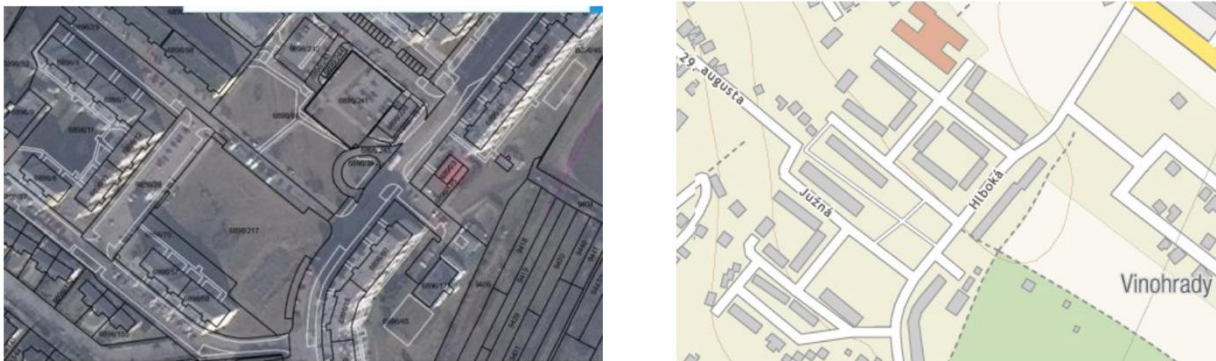


Figure 2: Area of Interest and development of the area- Vinohrady

2.2 Surface Runoff Formation and the Effects of urbanisation on Urban drainage

The process of capturing a specific amount of rainfall water in a catchment as a result of hydrological processes is known as surface runoff generation. [7] When precipitation falls on a natural surface in the natural world, some of the water evaporates and returns to the atmosphere through transpiration by plants, while some seeps through and turns into groundwater, and some runs off the surface. The relative proportions change throughout the storm depending on the surface's characteristics. (Surface runoff tends to rise with increasing ground saturation.) A river will probably receive both surface runoff and groundwater, but surface runoff gets there much more quickly. These processes are significantly impacted by the development of an urban area, which involves covering the ground with artificial surfaces. The man-made surfaces raise the ratio of surface runoff to infiltration, which raises the overall amount of water that reaches the river during or shortly after rain. Surface runoff moves through sewers and across hard surfaces more quickly than it does along natural streams and surfaces. As a result, the flow will arrive and disappear more quickly, resulting in a larger peak flow. It goes without saying that this makes the river more likely to suddenly flood. It

significantly affects the quality of the water as well. Thus, higher and more abrupt peaks in river flow, the introduction of pollutants, and the requirement for artificial wastewater treatment are the general effects of urbanization on drainage. [8]

2.3 Choice of Surface Runoff calculation method

The magnitude and frequency of rainfall are unpredictable and cannot be known in advance, so drainage systems are designed by the general method illustrated in Figure 3. Design is accomplished by first choosing a suitable *design storm*. The physical properties of the storm *contributing area* must then be quantified. A number of methods of varying degrees of sophistication have been developed to estimate the *runoff flows* resulting from rainfall. In the correct choice of the surface runoff calculation method depends mainly on the type of task to be solved (sizing of the sewer network or determination of surface runoff). When selecting the method, it is also important to consider: availability of input data, size of the catchment, determine the level of protection of the catchment, objectives and level of outputs. Several globally recognised methods have been developed for the calculation of surface runoff:

- Design methods (Bartosek method and Rational method),
- Hydrogram methods,
- Empirical methods (isochron method, unit hydrograph method and others)
- and Deterministic models. [9]

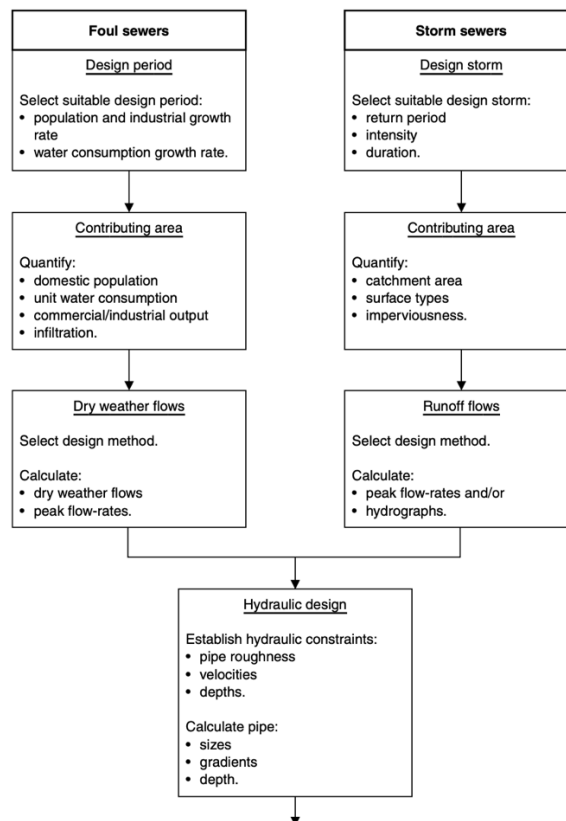


Figure 3: General method for the drainage system design [8]

2.4 Rational Method

The Rational Method has a long history dating back to the middle of the nineteenth century. The Irish engineer Mulvaney (1850) was probably the first to publish the principles on which the method

is based, although Americans tend to credit Kuichling (1889) and the British credit Lloyd-Davies (1906) for the method itself. The method and its further development are described. The rational method is simple and widely used approach to estimate the peak discharge (maximum run off rate) from small drainage areas , typically for designing stormwater management systems.It provides a single peak flow value based on the assumption that rainfall intensity is uniform over the area and duration and not a hydrograph of flow against time.Hydrographs have been later developed to overcome this limitation and show the full runoff response . [8]

2.4.1 Steady-State Runoff

Considering a simple, flat, fully impervious rectangular catchment with area A . A depth of rain, I , falls in a time, t . If there were also an impervious wall along the edges of the catchment, and no sewers, this rain would simply build up over the area to a depth, I . The volume of water would be $I \times A$. Now I that the runoff is flowing into a sewer inlet at point X with steady-state conditions: water is landing on the area, and flowing away, at the same rate. The sewer will carry the volume of rain ($I \times A$) at a steady, constant rate over the time (t) of the rainfall. So for flow rate (Q),

$$Q = \frac{IA}{t} \quad (1)$$

and since the intensity of rain, $i = I/t$,

$$Q = iA$$

Now, since catchments are not totally impervious, and there will be initial and continuing losses, the runoff coefficient C can be introduced, to give $Q = CiA$, Adjusting for commonly used units gives $Q = 2.78CiA$, where Q is the maximum flow rate (L/s), i is the rainfall intensity (mm/h), and A is the catchment area (ha). [8]

2.4.2 Run-off Coefficient

The coefficient actually accounts for the initial runoff losses (e.g. depression storage), continuing losses (e.g. surface infiltration) and implicitly accounts for the hydrodynamic effects encountered as the water flows over the catchment surface. Therefore, C must be related to $PIMP$, but not necessarily equal to it – some runoff will come from pervious surfaces, for example. So considerable knowledge of the catchment is required for accurate determination. For design purposes, standard values of C such as those in Table 1 are often used. Weighted average coefficients are needed for areas of mixed land use. [8]

Table 1: Typical Values of Runoff Coefficient in Urban areas

Area description	Runoff Coefficient	Surface Type	Runoff Coefficient
City centre	0.70 – 0.95	Asphalt and concrete paving	0.70–0.95
Suburban business	0.50 - 0.70	Roofs	0.75–0.95
Industrial	0.50 - 0.90	Lawns	0.05–0.35
Residential	0.30 - 0.70	Unpaved area-Forrest areas	0.05-0.25
Parks and gardens	0.05- 0.30		

2.4.3 Critical Rainfall Intensity

For this method to be used for design purposes, the rainfall intensity that causes the catchment to operate at steady state needs to be known. This should give the maximum flow from the catchment. The Rational Method states that a catchment just reaches steady state when the duration of the storm (and hence intensity i) is equal to the time of concentration of the area. The basis of the Rational Method is, therefore, an engineering ‘worst case’. [8] The duration of the storm must be at least the time of concentration; otherwise, the maximum flow would not be reached. However, it should not be longer, because storms with longer durations have statistically lower intensities. Therefore the worst case is when the duration is equal to the time of concentration. A fixed rainfall intensity of 50mm/h is often used for small areas (main sewer length <200m). This avoids using inappropriately high intensities calculated using very low concentration times. [9]

2.5 Data processing using R

The study focuses on analysing stormwater runoff using observed rainfall data over three years, providing a snapshot of the system’s efficiency under realistic conditions. The required data included rainfall data with hourly precipitation which provides detailed information on rainfall patterns, including both short, intense rain events and prolonged wet periods. The purpose is essential for understanding the volume and intensity rainfall that contributed to stormwater runoff. The readr package is used to import the rainfall data into R. The dplyr package facilitates data cleaning, ensuring that all records are consistent and complete over the two-year period. The hourly precipitation data is converted into a time series object using the xts package, allowing for temporal analysis of rainfall patterns. Using dplyr and lubridate, significant rainfall events are identified based on their intensity and duration. Events that produce substantial hourly rainfall are classified as storms likely to generate notable runoff. For each event, the peak rainfall intensity is calculated (measured in mm/hr) is calculated. This value is critical for estimating peak runoff and assessing the stormwater system’s response. The necessary library packages were installed first using the R code shown below in figure 4. [10]

```
# Load necessary libraries
install.packages(c("readr", "dplyr", "ggplot2"))
library(readr)
library(dplyr)
library(ggplot2)
```

Figure 4: Library packages installed for the R simulation

2.5.1 Modelling Run-off using the Rational method and R

The rational method is widely used and simple approach for estimating peak runoff in small urban catchments depending on the day stamp given for the precipitation. The formula 1 is used as explained earlier using Precipitation values for the 3-time period

$$Q = C.P.A \quad (2)$$

where Q is for the daily runoff measured volume of water in cubic metres C is the runoff coefficient which a value between 0 and 1 that depends on the surface type, representing the

fraction of rainfall that becomes runoff. P is the daily precipitation, and the coefficient A stands for the catchment area in hectares. [11]

2.5.2 Calculating the Runoff Coefficient

To calculate the runoff coefficient for the catchment, first we need to determine the land use types based on whether it is impervious (pavements, rooftops, parking lots etc.), Residential areas (lawns, driveways and homes), Agricultural land (field, pasture, etc.) or Natural areas (forests and meadows). Then assigning runoff coefficient to each land use type; For each land use type assigning a typical runoff coefficient, the common values for runoff coefficient has been classified in table 1. The third step would be to determine the area for each land use type in the catchment or study area. Then for an area that contains multiple land uses, one needs to calculate the weighted average of the runoff coefficient considering the area of each land type.

The formulae for the composite runoff coefficient is

$$C_{composite} = \frac{\sum(c_i \times A_i)}{\sum A_i} \quad (3)$$

; where c_i is the runoff coefficient for each land type and A_i is the area for each land use type. The area of the catchment is 11.7326 ha with 7.40557 ha has been identified as paved area with a runoff coefficient 0.7. Then we can compute the rest of unpaved area to be total area minus the paved area which was induced as 4.2944 ha. Hence the computed Runoff Coefficient for this Catchment would be

$$C_{composite} = \frac{(0.7 \times 7.40557 \text{ ha}) + (0.25 \times 4.2944 \text{ ha})}{11.7326 \text{ ha}} = 0.18$$

Thus, the runoff coefficient for the entire catchment is 0.18. Then, using the dplyr package on R studio the rational method is applied to each significant rainfall event. The formulae is used to calculate the peak runoff Q by multiplying the weighted runoff coefficient C, the peak rainfall intensity i, and the area A. [12]

2.5.3 Plotting daily Precipitation and Runoff

The ggplot2 package on R was used to create a visualisation of the daily precipitation and runoff. The catchment area used for the simulation was 11.7 hectares. The total Cumulative runoff over the entire period was estimated to be 23334.62 m³ and with the 5 days with the highest runoff shown in table 2 were induced from the time period 1-1-2021 till 31-01-2023 presented on the histogram graph in figure 5. The following R code was used for calculating the daily runoff and plotting the precipitation and runoff in figure 6. The graph for plotting the precipitation and runoff vs date is induced in figure 7.

Table 2: 5 days with the highest runoff

Date	Precipitation_mm	Temperature_C	Runoff_Coefficient	Runoff_m ³
1	2022-08-22	36.256	19.3	0.18
2	2021-05-17	31.138	11.4	0.18
3	2021-09-17	30.741	17.2	0.18
4	2021-07-17	27.111	22.6	0.18
5	2021-07-18	26.627	22.2	0.18

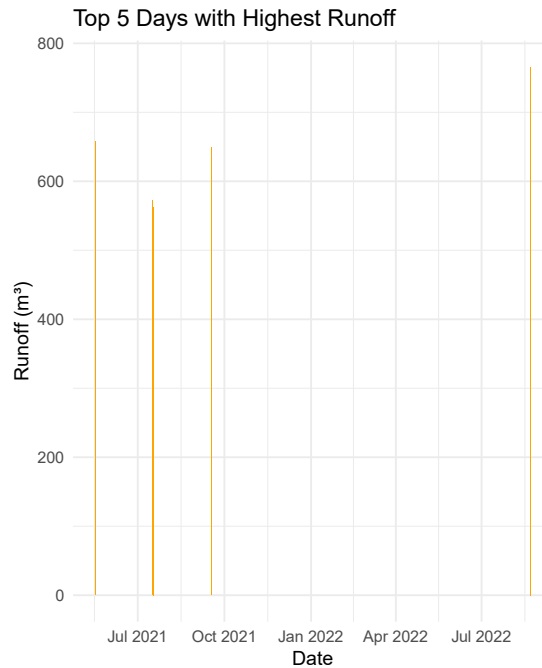


Figure 5: Histogram graph for the runoff through this duration

```
# Define catchment area in hectares
catchment_area_ha <- 11.7326

# Calculate daily runoff in cubic meters
# Assuming your data contains a 'runoff_coefficient' and 'precipitation_mm' columns
data <- data %>%
  mutate(runoff_m3 = runoff_coefficient * precipitation_mm * catchment_area_ha * 10)

# View the first few rows with calculated runoff
head(data)

# Create a plot of daily precipitation and runoff
ggplot(data, aes(x = date)) +
  geom_bar(aes(y = precipitation_mm), stat = "identity", fill = "blue", alpha = 0.4) +
  geom_line(aes(y = runoff_m3 / catchment_area_ha), color = "red", size = 1) + # Normalize runoff for visualization
  labs(title = "Daily Precipitation and Runoff",
       x = "Date",
       y = "Precipitation (mm) / Runoff (m³ per hectare)") +
  theme_minimal()

# Calculate total runoff over the period (in cubic meters)
total_runoff <- sum(data$runoff_m3, na.rm = TRUE)
print(paste("Total runoff (m³) over the period:", total_runoff))

# Define stormwater system capacity (in m³/day)
system_capacity_m3_per_day <- 550

# Identify overflow days where runoff exceeds system capacity
overflow_days <- data %>%
  filter(runoff_m3 > system_capacity_m3_per_day)

# View the days with overflow
print(overflow_days)

# Count the number of days with overflow
num_overflow_days <- nrow(overflow_days)
print(paste("Number of days with overflow:", num_overflow_days))
```

Figure 6: calculating daily runoff and plotting the precipitation and runoff in R console

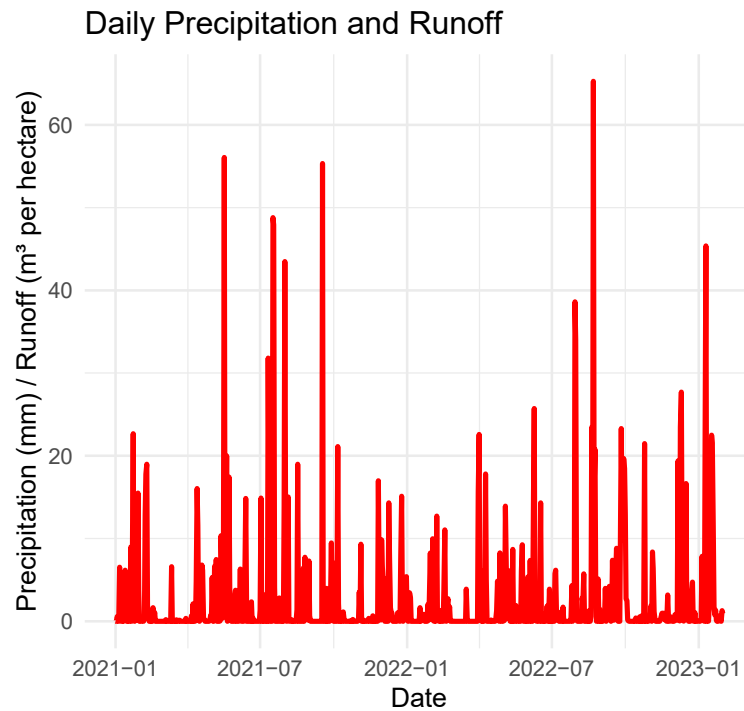


Figure 7: Precipitation and Runoff plot

3. Results and Discussion

After calculating the Runoff, analyzation of how rainfall impacts storm water management by examining factors like stormwater infrastructure capacity and system performance during extreme events. The stormwater system capacity for this catchment area was assumed to be 550 m³ per day without flooding. This information has be used to compare against daily Runoff and determining overflow events. Identifying days exceeding stormwater capacity were also assessed indicating potential overflow or flooding. The number of days assessed with overflow were 5 with a total overflow volume of 457.357 m³. Then, the daily runoff against the stormwater system capacity was

easily plotted to visualize overflow events in figure 8. The relationship between daily precipitation and overflow status was then plotted and shown in figure 9.

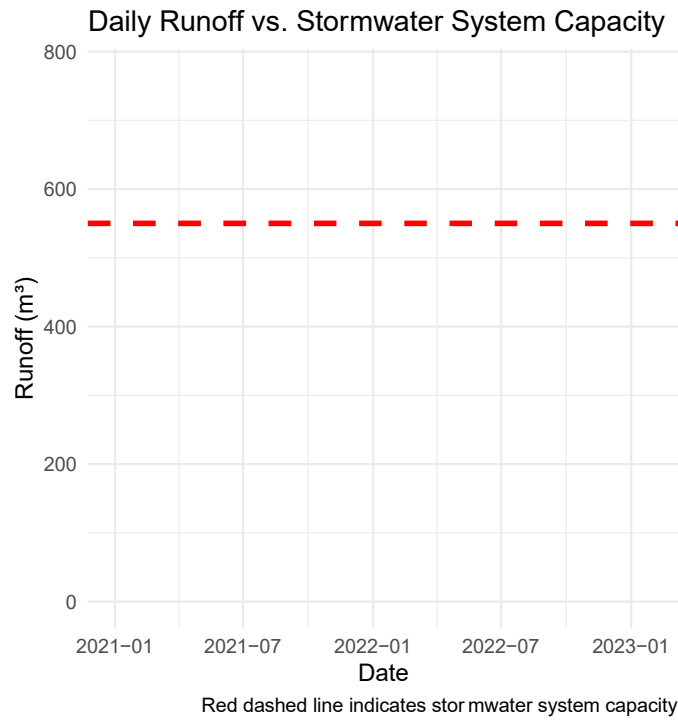


Figure 8: Daily runoff vs stormwater system capacity

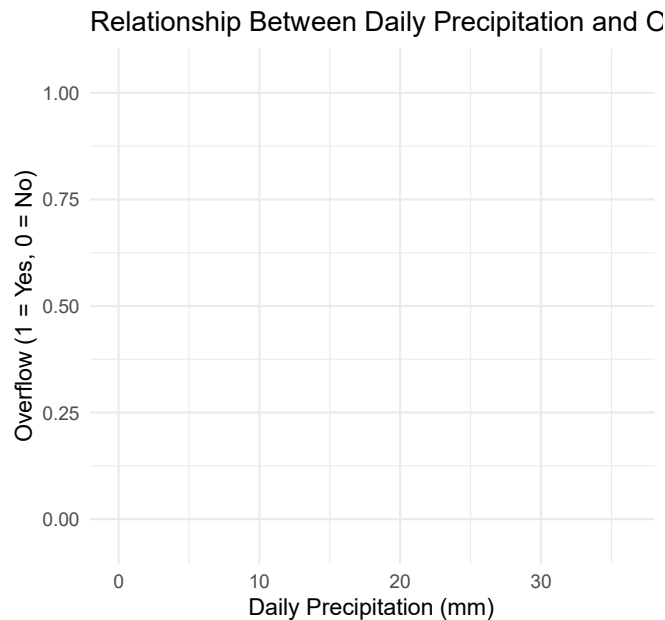


Figure 9: Relationship between Daily Precipitation and Overflow Status

4. Conclusion

The study simulated the precipitation runoff process in an urbanized area. The developed area of Vinohrady in Levice was chosen as the research area. The study identified total runoff volume

23334.62 m³ and estimated 5 days with the highest runoff. The results have simulated 5 overflow days with a total runoff overflow volume of 457.357 m³, which is relatively small. The overflow number indicates that the system was able to manage the runoff effectively on most days. The overflow days represent only a small proportion of the total days analysed, suggesting that the current system capacity is adequate for typical and moderate rainfall events. Although the number of overflow days is relatively small, improvements can be made to further minimize these events for example, implementing further green infrastructure for extreme events for a sustainable approach such as rain gardens and green roofs, which can mitigate peak runoff volumes by promoting infiltration, evapotranspiration and temporary storage. The R programming language is a powerful tool for analyzing, modelling and optimizing stormwater system design capacity. It is regarded as a high-level language for programming. [13] The degree of abstraction from machine language serves as the basis for this classification. It simply enables efficient data realization and visualisation providing valuable insights into stormwater system performance and capacity planning by performing statistical computations. Stormwater management is highly dependent on temporal and spatial patterns of rainfall. It can handle complex data formats and allow user to analyse rainfall on a daily, seasonal or yearly basis revealing patterns that might not be apparent in raw data. This stage of analysis is crucial for understanding the baseline performance of the stormwater system and for detecting trends or anomalies that could perform design improvements.

5. Acknowledgment

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 1/0682/23, co-funded by the Slovak Research and Development Agency under contract No. APVV-22-0564

6. References

[1] LOGGIA, LA. G., FONTANAZZA, M.C., FRENI, G., NOTARO, V., OLIVERI, E., PULEO, V. Urban drainage and sustainable cities: how to achieve flood resilient societies? *WIT Transactions on the Built Environment*, 2012. Volume 122. Pages 203-214. ISSN 1743-3509.

[2] *PARIS AGREEMENT*, 2016 - United Nations Framework Convention on Climate Change, 12 December 2015, Paris.

[3] *ENVIROPORTAL - Information portal of the Ministry of the Environment of the Slovak Republic*. Adaptation strategy of the Slovak Republic to the adverse effects of climate change - update [online]. © 2005- 2021 www.enviroportal.sk .Available From: <https://www.enviroportal.sk/sk/eia/detail/strategia-adaptacie-slovenskej-republiky-na-adverse-consequences-of-change>.

[4] LAURENČÍK ,J.Final Report of hydrogeological survey.Nitra :Geo spol.s.r.o. Nitra 2005.p.16

[5] ŽIARAN , J.The town zoning plan (UPN-O)Levice . Košice: architectural office ARKA, spol.s.r.o.,2015 p.187-198

[6] ZBGIS , Available at:
<https://zbgis.sk/geodesy.sk/mapka/sk/kataster?pos=48.800000,19.530000,8>

[7] SZTRUHÁR, D., SOKÁČ, M. *Hydrology of urbanized areas*. Slovak University of Technology in Bratislava, STU Publishing House. Bratislava, 2005. ISBN 80-227- 2220-0.

[8] DAVID BUTLER, CHRISTOPHER DIGMAN , CHRISTOS MAKROPOULUS , JOHN W.DAVIES :Urban Drainage 4th Edition: 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2018 by Taylor & Francis Group, LLC , ISBN : 978-1-4987-5058-5 (Paperback) , 978-1-4987-5293-0 (Hardback)

[9] SZTRUHÁR, D., SOKÁČ, M. *Hydrology of urbanized areas*. Slovak University of Technology in Bratislava, STU Publishing House. Bratislava, 2005. ISBN 80-227- 2220-0.

[10] RUNOFF AND PEAK FLOW. DESIGN MANUAL STORMWATER URBAN STORMWATER URBAN HYDROLOGY AND RUNOFF. Available at: <https://cdn-wordpress.webspec.cloud/intrans.iastate.edu/uploads/sites/15/2020/03/2B-4.pdf>

[11] R ENVIRONMENT, Available at <https://www.r-project.org/about.html>

[12] RATIONAL METHOD , HydroCAD Stormwater Modelling , Available at: <https://www.hydrocad.net/rational.htm#:~:text=The%20Rational%20method%20predicts%20the,as%20consistent%20units%20are%20employed.>

[13] RUNOFF, available at : https://bbec.ac.in/wp-content/uploads/wpforo/default_attachments/1629365440-Module-5-Runoffpdf.pdf

[14] WHAT IS R? AN INTRODUCTION TO THE STATISTICAL COMPUTING POWERHOUSE, available at : <https://www.datacamp.com/blog/all-about-r>

Jana Grečnárová¹

Študijný program: názov, ročník: Vodohospodárske inžinierstvo, 3. ročník

LABORATÓRNA ANALÝZA RETENČNÝCH VLASTNOSTÍ STREŠNÉHO SUBSTRÁTU PRI RÔZNYCH VHLKOSTNÝCH PODMIENKACH

THE LABORATORY ANALYSIS OF THE RETENTION PROPERTIES OF ROOF SUBSTRATE AT VARIOUS MOISTURE CONDITIONS

Abstract

The laboratory analysis of the retention properties of the roof substrate focused on the initial moisture conditions of the Bratislava roof substrate at levels < 5% and 15-17%. The water retention capacity of the substrate was investigated using a simulation of a 15-minute rain event with intensities of 1.3 mm/min, 2.7 mm/min and 3.8 mm/min. The resulting measurements were compared with each other. We hypothesized that a substrate with an initial moisture content < 5% would be able to retain a greater volume of rainwater, which was confirmed by laboratory tests. It should be noted, however, that this analysis was for only one layer of the vegetated roof. In order to obtain more comprehensive results, it is necessary to carry out measurements in combination with all relevant layers of the roof system, which also have absorption capacities and contribute significantly to the retention of rainwater.

Kľúčové slová / Key Words

strešný substrát; vlhkosť substrátu; simulovaný dážď; výška substrátu; retenčná schopnosť / roof substrate; substrate moisture; rainfall simulation; substrate depth; substrate retention

1. Úvod

Postupne sa meniace klimatické podmienky podnecujú mestské oblasti k začleneniu modro-zelenej infraštruktúry. Kľúčovými faktormi podporujúcimi jej zavádzanie sú časté obdobia sucha, extrémne teploty a intenzívne, krátkodobé prívalové zrážky. Tieto extrémne udalosti vedú k značným finančným stratám, environmentálnym škodám a, v neposlednom rade, k stratám na ľudských životoch. Hoci súčasným klimatickým zmenám nedokážeme zabrániť, môžeme ich negatívne dôsledky zmierniť vhodnými opatreniami.

Modro-zelená infraštruktúra predstavuje komplexnú sieť prvkov zahŕňajúcich vodné a zelené systémy. Jej hlavným cieľom je efektívne hospodárenie s dažďovou vodou, zlepšovanie mikroklimy prostredníctvom ozelenenia mestských priestorov (napríklad zmiernenie efektu tepelných ostrovov), a poskytovanie ďalších environmentálnych a sociálnych výhod. Táto infraštruktúra zahŕňa rôzne strategické adaptačné opatrenia a plány, prispôbosené konkrétnym potrebám a cieľom daného územia.

Podľa Katalógu vybraných adaptačných opatrení Slovenskej agentúry životného prostredia existuje niekoľko typov opatrení v extraviláne, ako napríklad nelesná drevinová vegetácia, vetrolamy, zatravnňovacie vsakovacie pásy, infiltračné priekopy, prielohy, terasy a úpravy prietokových profilov. V intraviláne sú to dažďové záhrady, sídelná zeleň v uličných priestoroch, zatravnňovacie a priepustné plochy na parkoviskách, vegetačné steny a vegetačné strechy [1].

¹ Jana, Grečnárová, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Viacere štúdie poukazujú na rastúcu urbanizáciu, pričom do roku 2050 sa očakáva, že v mestách bude žiť približne 67 % populácie [2]. Tento nárast obyvateľstva vedie k zvýšenému dopytu po nehnuteľnostiach, čo spôsobuje rozmach bytovej výstavby a rozširovanie nepriepustných plôch. Na týchto plochách dochádza k akumulácii znečisťujúcich látok, ako sú oleje, ťažké kovy, pesticídy či živočíšny odpad, a k neefektívnemu odvádzaniu dažďových vôd. Znečistené dažďové vody môžu kontaminovať vodné toky, čím sa zhoršuje ich kvalita. Z tohto dôvodu je nevyhnutné implementovať vhodné adaptačné opatrenia, prispôbené špecifickým potrebám danej lokality.

V príspevku sa zameriame na jeden z typov adaptačných opatrení, konkrétne na extenzívne vegetačné strechy. Experimentálne meranie bude orientované na skladbu vegetačnej strechy s Bratislavským extenzívnym strešným substrátom, pričom sa bude analyzovať a porovnávať jeho retenčná kapacita za rôznych vlhkostných podmienok.

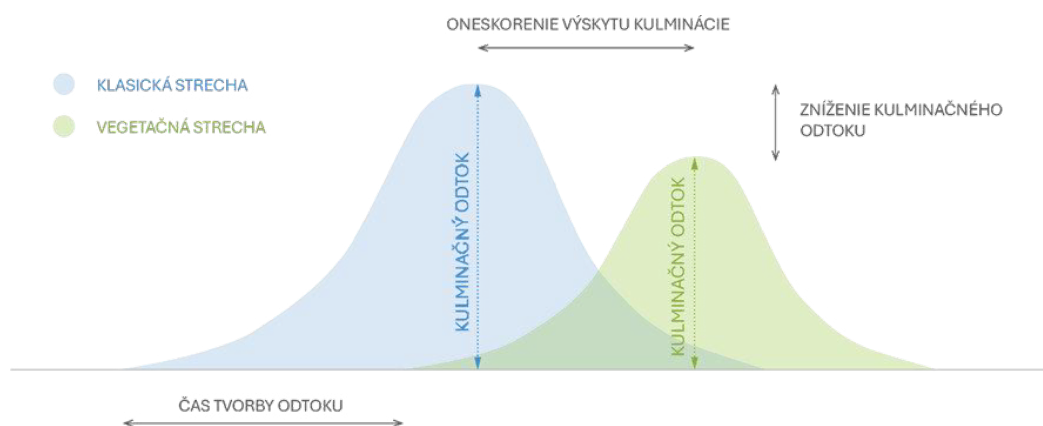
2. Materiál a metodika

2.1 Hydrologické vlastnosti

Vegetačné strechy sú schopné zadržiavať väčší objem zrážok v substráte, čím efektívne znižujú odtok v porovnaní s tradičnými strechami, kde dochádza takmer okamžite k odtoku. Miera redukcie odtoku je ovplyvnená rôznymi faktormi, ako sú typ vegetácie, zloženie strešného substrátu, počiatočný obsah vody, sklon a konštrukcia strechy, ako aj aktuálne meteorologické podmienky a charakter zrážok. Štúdie dokumentujú priemerné zníženie objemu odtoku na základe jednotlivých zrážkových udalostí, sezónnych údajov alebo ročných kumulatívnych zrážok. Porovnanie výsledkov medzi rôznymi štúdiami je limitované rozdielmi v klimatických podmienkach, vlastnostiach striech, dĺžke trvania meraní a použitých metódach. Zohľadnenie odtoku v zimnom období, keď sa sneh akumuluje a následne topí, je tiež nevyhnutné.

Kulminálny odtok, definovaný ako maximálny objem odtoku zo zrážok, predstavuje kľúčový hydrologický parameter. Hydrologický výskum v UK vo svojom 2,5-ročnom výskume experimentálnej zelenej strechy s 22 zrážkovými udalosťami preukázal 60 % zníženie kulminálneho prietoku v porovnaní s kontrolnou strechou [3].

Vegetačné strechy nielen znižujú objem a maximálny odtok, ale aj oneskorujú kulminálny odtok, čím zmiernujú negatívne dopady dažďovej vody. Fungujú ako záchytné nádrže, ktoré spomaľujú kulmináciu a začiatok odtoku. Tento proces je ovplyvnený počiatočnou vlhkosťou a zložením strechy.



Obr. č. 1 - Všeobecný priebeh odtoku zo zrážok na klasickej a vegetačnej streche

Prehľad literatúry naznačuje, že vegetačné strechy môžu znížiť celkový objem odtoku v rozmedzí od 30 % do 90 %, kulminálny odtok o 20 % až 90 % a oneskoriť jeho nástup až o 30 minút. Tieto

štúdie sa nezameriavajú na aspekt návrhu vegetačných striech, ale zdôrazňujú ich význam a očakávané prínosy pre hospodárenie s vodou v mestskom prostredí.

2.2 Strešný substrát

Strešný substrát (rastové médium) plní kľúčovú úlohu v podpore rastu rastlín a zároveň prispieva k spomaleniu a zadržiavaniu dažďového odtoku. Strešný substrát je základnou zložkou vegetačných striech. Pri správnom zložení, vrátane odľahčujúcich prímiesí, nemusí byť vysoké zaťaženie nosnej konštrukcie budovy.

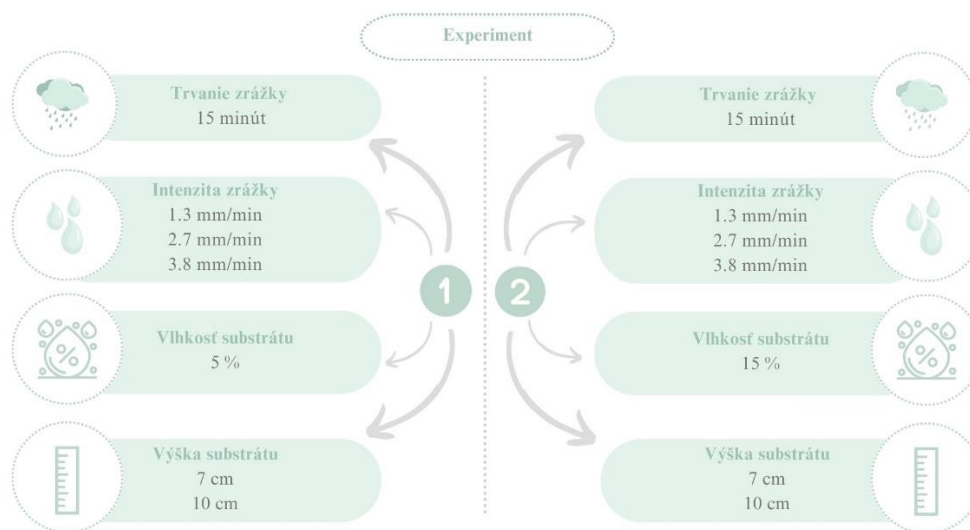
Na trhu existuje široké spektrum substrátov prispôbených špecifikám regiónov a klimatickým podmienkam, pričom ich výber závisí od zaťaženia strechy a typu vegetácie. Ideálny substrát by mal poskytovať primeranú výživu pre rastliny a obsahovať zmes organických látok, ľahkého minerálneho kameniva, prírodných aj umelých minerálov a recyklovaných materiálov. Dôležité sú aj fyzikálne vlastnosti substrátu, ako nízka objemová hmotnosť, vysoká kapacita na zadržiavanie vody, optimálny obsah organických látok pre rast vegetácie a schopnosť sorpcie, ktorá minimalizuje riziko kontaminácie vody.

Strešný substrát výrazne ovplyvňuje zadržiavanie dažďového odtoku, čo prispieva k zníženiu a oneskoreniu kulminačného prietoku v odvodňovacom systéme. Vegetačné strechy navyše vďaka vysadenej vegetácii využívajú evapotranspiračné procesy, ktoré znižujú objem odtoku. Pri realizácii vegetačných striech je dôležité venovať pozornosť manažmentu dažďovej vody, konkrétne redukcii celkového objemu odtoku, zníženiu kulminačného prietoku a časovému oneskoreniu odtoku.

V mnohých štúdiách o strešných substrátoch je diskutovaný aj vplyv výšky substrátu – s rastúcou výškou substrátu sa očakáva zvýšenie jeho retenčnej kapacity.

3. Laboratórna analýza a výsledky merania

Laboratórne merania budú analyzované na základe rôznych počiatočných vlhkosťných podmienok Bratislavského strešného substrátu. Laboratórne meranie bolo rozdelené na dve fázy, ktoré sú znázornené na obr. č. 2.



Obr. č. 1 – Schéma experimentu

Prvá fáza zahŕňa substrát s vlhkosťou do 5 % (suchý substrát), druhá fáza substrát s vlhkosťou približne 15% (vlhký substrát, meraný rozsah počiatočnej vlhkosti 15-17 %) (obr. č. 3). Simulácia zrážky trvala 15 minút a intenzity boli nastavené na 1.3 mm/min (19.5 mm/min), 2.7 mm/min (40.5

mm/min) a 3.8 mm/min (57 mm/min). Z dôvodu merania odtoku a vlhkosti musel byť dážď rozdelený na niekoľko časových úsekov (3, 6, 9, 12, 15 minút).



Obr. č. 3 – Strešný substrát v suchom a mokrom stave

Vlhkostné parametre boli monitorované pomocou vlhkomeru HH2 od spoločnosti Delta-T Devices na začiatku, počas a na konci merania (obr. č. 4). Na konci merania by mala byť dosiahnutá maximálna vlhkosť substrátu (cca 30%). Očakáva sa, že retenčná kapacita substrátu pri vlhkosti 15 % bude nižšia ako pri 5 %. Cieľom štúdie je analyzovať správanie substrátu pri rôznych počiatočných vlhkosťových úrovniach, najmä množstvo zadržaných zrážok a čas potrebný na ich absorpciu. Simuláciu zrážok zabezpečí prenosný simulátor dažďa Eijkelkamp s kapacitou 2.3 l a plochou 0.0625 m², ktorý umožňuje nastaviť intenzitu a trvanie dažďa.



Obr. č. 4 – Meranie vlhkosti vzorky strešného substrátu

Výsledky merania

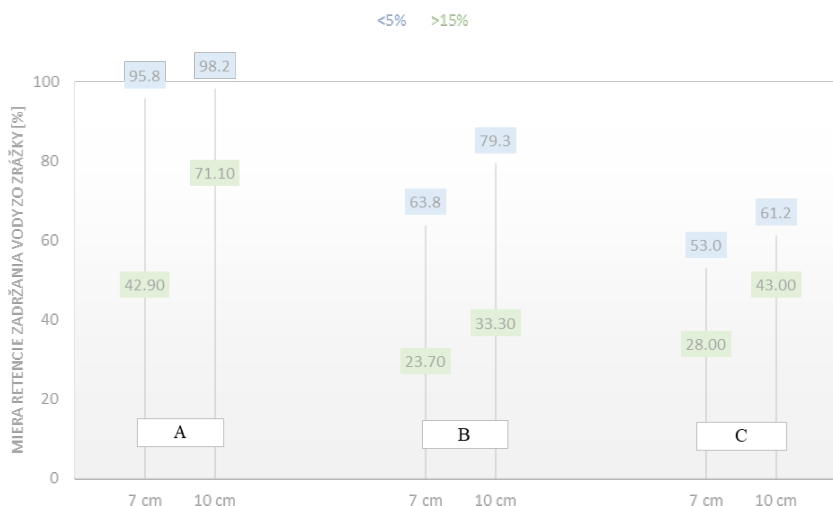
Laboratórna analýza sa zamerala na porovnanie retenčnej kapacity vzoriek Bratislavského strešného substrátu pri odlišných počiatočných úrovniach vlhkosti, konkrétne pri hodnotách nižších ako 5 % a približne 15 %. Cieľom experimentu bolo vyhodnotiť vplyv rôznych počiatočných vlhkosťových podmienok na retenčný výkon substrátu počas krátkodobých zrážok s rozdielnou intenzitou. Výsledky meraní sú zaznamenané v tabuľke 1. Grafické znázornenie výsledkov je na obrázku 5.

Tab. č. 1 Výsledky meraní -výška strešného substrátu 7 cm

Testovaná výška substrátu [cm]	Počiatočná vlhkosť [%]	Intenzita dažďa	Úhrn zrážok [mm]	Čas tvorby odtoku [min]	Odtok z dažďa [ml]	Miera retencie substrátu [%]	Rozdiel [%]
7 cm	< 5%	1.3 mm/min	19.5	5.0	47	95.8	52.9
	15 - 17 %		19.5	2.15	720	42.9	
7 cm	< 5%	2.7 mm/min	40.5	2.6	849	63.8	40.1
	15 - 17%		40.5	0.44	1968	23.7	
7 cm	< 5%	3.8 mm/min	57	0.55	1647	53.0	25.0
	15 - 17%		57	1.36	2282	28.0	

Tab. č. 2 Výsledky meraní – výška strešného substrátu 10 cm

Testovaná výška substrátu [cm]	Počiatočná vlhkosť [%]	Intenzita dažďa	Úhrn zrážok [mm]	Čas tvorby odtoku [min]	Odtok z dažďa [ml]	Miera retencie substrátu [%]	Rozdiel [%]
10 cm	< 5%	1.3 mm/min	19.5	5.80	45	98.2	27.1
	15 – 17 %		19.5	5.59	382	71.1	
10 cm	< 5%	2.7 mm/min	40.5	3.20	394	79.3	46.0
	15 – 17 %		40.5	2.59	1528	33.3	
10 cm	< 5%	3.8 mm/min	57	1.26	1509	61.2	18.2
	15 – 17 %		57	1.54	2600	43.0	



Obr. č. 5 – Porovnanie retenčnej schopnosti substrátu pri rozdielnych počiatkových podmienkach (<5% a približne 15%) 15 minútového dažďa, A – intenzita dažďa 1.3 mm/min, B – intenzita dažďa 2.7 mm/min, C – intenzita dažďa 3.8 mm/min

7 cm vrstva strešného substrátu

Pri intenzite dažďa 1.3 mm/min (celkový úhrn dažďa 19.5 mm) dosiahla retencia pri počiatkovej vlhkosti substrátu pod 5 % hodnotu 95.8 %. Pri vyššej počiatkovej vlhkosti (nad 15 %) klesla retenčná schopnosť na 42.9 %. Došlo k rozdielu 52.9 %. Pri intenzite dažďa 2.7 mm/min (celkový úhrn dažďa 40.5 mm) bola retencia pri počiatkovej vlhkosti pod 5 % 63.8 %, pričom pri počiatkovej vlhkosti nad 15 % bola retenčná schopnosť 23.70 %. Došlo k poklesu o 40.1%. Pri intenzite dažďa 3.8 mm/min (celkový úhrn dažďa 57 mm) dosiahla retencia pri počiatkovej vlhkosti pod 5 % hodnotu 53.0 %, zatiaľ čo pri počiatkovej vlhkosti nad 15 % bola 21.70%. Došlo tak k poklesu o 25%.

10 cm vrstva strešného substrátu

Pri intenzite dažďa 1.3 mm/min (celkový úhrn dažďa 19.5 mm) dosiahla retencia pri počiatkovej vlhkosti pod 5 % 98.2 %, zatiaľ čo pri počiatkovej vlhkosti nad 15 % klesla na 71.10 %. Došlo k rozdielu 27.10%. Pri intenzite dažďa 2.7 mm/min (celkový úhrn dažďa 40.5 mm) bola retenčná schopnosť pri vlhkosti pod 5 % na úrovni 79.3 %, pričom pri počiatkovej vlhkosti nad 15 % bola nižšia, a to 33.3 %. Došlo k rozdielu 46 %. Pri intenzite dažďa 3.8 mm/min (celkový úhrn dažďa 57 mm) dosiahla retencia pri vlhkosti pod 5 % hodnotu 61.2 %, zatiaľ čo pri počiatkovej vlhkosti nad 15% bola 43.0%. Došlo tak k poklesu o 18.2%.

Záver a diskusia

V rámci laboratórnej analýzy bola potvrdená hypotéza o zníženej retenčnej schopnosti strešného substrátu pri zvýšenej počiatkovej vlhkosti. Dôvodom je skutočnosť, že častice substrátu sú pri vysokom stupni vlhkosti plne nasýtené, čím dochádza k zvýšeniu odtoku vody, pretože substrát už nie je schopný absorbovať väčší objem vody. Substrát pri počiatkovej vlhkosti vyššej ako 15% dosiahol pri meraní maximálnu vlhkosťnú kapacitu 32,6%.

Testované boli dve výšky strešného substrátu. Vzorky substrátu boli na začiatku simulácie extrémneho dažďa v suchom (do 5% vlhkosti média) a vlhkom stave (približne 15%). Potvrďilo sa, že vyššia mocnosť vrstvy substrátu ma vyššiu retenčnú schopnosť, a to pre obe počiatkové vlhkosti. Zníženie retenčnej schopnosti vlhkého substrátu s výškou 7 cm bolo až 25-52% pri

simuláciách 3 extrémnych dažďoch (1.3 mm/mm, 2.7 mm/min, 3.8 mm/min). V prípade vlhkého substrátu s výškou 10 cm došlo k zníženiu retenčnej schopnosti až 18-45%. Ak by bola počiatočná vlhkosť substrátu na začiatku extrémneho dažďa približne 15%, zníženie odtoku z vegetačnej strechy by bolo podstatne nižšie.

Takéto experimenty majú významný vplyv na navrhovanie vegetačných striech. V prípade častých zrážok substrát môže dosiahnuť vysokú úroveň vlhkosti, čo pri nedostatočnom vyschnutí medzi jednotlivými zrážkami vedie k zvýšeniu odtokového objemu dažďovej vody. V tejto súvislosti je vhodné zvážiť začlenenie akumuláčnych nádrží, ktoré by zabezpečili zadržiavanie prebytočnej vody, ktorá by následne mohla byť využitá v suchších obdobiach.

Je potrebné zdôrazniť, že táto laboratórna analýza bola zameraná len na jednu vrstvu vegetačných striech, konkrétne na Bratislavský strešný substrát. V reálnej konštrukcii vegetačných striech však budú prítomné aj ďalšie vrstvy, ako napríklad vegetačná vrstva, ktorá môže prispieť k vyššej absorpcii vlhky.

Pod'akovanie

Spracovanie štúdie bolo podporené prostredníctvom finančnej podpory grantovým projektom VEGA č. 1/0577/23 a Programu na motiváciu a podporu zvyšovania kvality a efektívnosti vedecko-výskumnej činnosti mladých vedecko-výskumných pracovníkov (názov projektu: TESTRE).

Literatúra

[1] ANDREJČÍNOVÁ, D., MIHOVÁ, E., VAČOKOVÁ, L. Katalóg vybraných adaptačných opatrení na nepriaznivé dôsledky zmeny klímy vo vzťahu k využitiu krajiny. *Slovenská agentúra životného prostredia*. 2018, ISBN: 978-80-89503-89-6.

[2] ZHENG, X., ZOU, Y., LOUNSBURY, A.W., WANG, C., WANG, R. 2021. Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance [Zelené strechy na zadržiavanie dažďovej vody: Globálna kvantitatívna syntéza výkonnosti.]. *Resources, Conservation and Recycling [online]*. 2021, roč. 170, č., s. 105577. ISSN 18790658. Dostupné na: doi:10.1016/j.resconrec.2021.105577

[3] STOVIN, V., VESUVIANO, G., KASMIN, H. 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions [Hydrologická výkonnosť experimentálnej zelenej strechy v klimatických podmienkach Spojeného kráľovstva]. *Journal of Hydrology [online]*. 2012, roč. 414–415, s. 148–161. ISSN 00221694. Dostupné na: doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.022

[4] AMPIM, P.A.Y., SLOAN, J.J., CABRERA, R.I., HARP, D.A., JABER, F.H. 2010. Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties 1 [Substráty na pestovanie zelených striech: Typy, zložky, zloženie a vlastnosti 1] [online]. Dostupné na: http://meridian.allenpress.com/jeh/article-pdf/28/4/244/1754271/0738-2898-28_4_244.pdf

[5] VANDEGRIFT, D.A., ROWE, D.B., CREGG, B.M., LIANG, D. 2019. Effect of substrate depth on plant community development on a Michigan green roof [Vplyv výšky substrátu na vývoj rastlinných spoločenstiev na zelenej streche v Michigane.]. *Ecological Engineering [online]*. 2019, roč. 138, č. July, s. 264–273. ISSN 09258574. Dostupné na: doi:10.1016/j.ecoleng.2019.07.032

[6] GETTER, K.L., ROWE, D.B., ANDRESEN, J.A., WICHMAN, I.S., 2011. Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate [Vlastnosti sezónneho tepelného toku extenzívnej zelenej strechy v stredozápadnom podnebí USA]. *Energy and Buildings [online]*. 2011, roč. 43, č. 12, s. 3548–3557. ISSN 03787788. Dostupné na: doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.018

[7] SAILOR, D.J., HAGOS, M. 2011. An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media [Aktualizovaný a rozšírený súbor údajov o tepelných vlastnostiach rastových médií pre zelené strechy.]. *Energy and Buildings* [online]. 2011, roč. 43, č. 9, s. 2298–2303. ISSN 03787788. Dostupné na: doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.014

[8] SCHULTZ, I., SAILOR, D.J., STARRY, O. 2018. Effects of substrate depth and precipitation characteristics on stormwater retention by two green roofs in Portland OR [Vplyv výšky substrátu a vlastností zrážok na zadržiavanie dažďovej vody na dvoch zelených strechách v Portlande OR]. *Journal of Hydrology: Regional Studies* [online]. 2018, roč. 18, č. June, s. 110–118. ISSN 22145818. Dostupné na: doi:10.1016/j.ejrh.2018.06.008

Adam Kollár¹

Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, 2. ročník

MATEMATICKÉ MODELOVANIE A SPRÁVA ODPADOVÝCH VÔD V URBANIZOVANÝCH OBLASTIACH

MATHEMATICAL MODELING and Management Of Wastewater In Urbanized Areas

Abstrakt

Water is a key natural resource whose protection is essential for the health and quality of the environment. This paper deals with the mathematical modeling and management of wastewater in urbanized areas, with an emphasis on the analysis of sewerage systems. With increasing urbanization, the capacity of land to absorb stormwater is reduced, leading to surface runoff and the risk of localized flooding. The case study shows that the outdated sewerage network suffers from congestion and pollution. Simulations using software tools such as MIKE+ identified critical sections and highlighted the need for improved water management and environmental protection.

Kľúčové slová / Key Words

urabnizácia; matematický model; odpadové vody; optimalizácia

1. Úvod

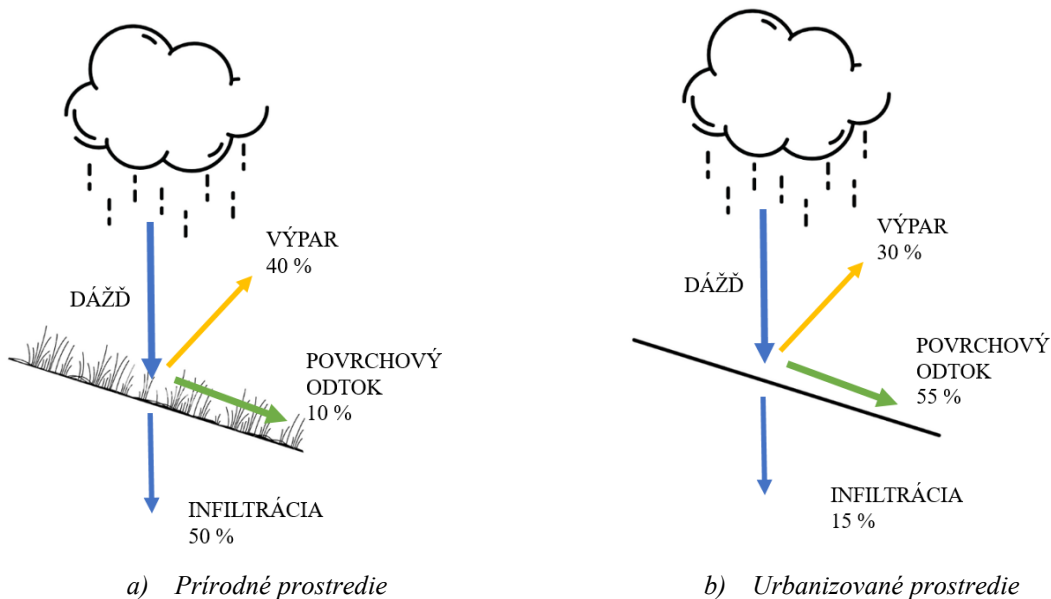
Voda je najdôležitejším prírodným zdrojom ľudstva preto je potrebné ju chrániť a zabrániť škodlivým účinkom ohrozujúcim naše vodné útvary.[1] Kanalizačné siete zabezpečujú bezpečný odvod a spracovanie odpadových vôd z domácností, priemyslu a verejných priestorov, čím chránia zdravie a životné prostredie. Delia sa na jednotné a delené systémy. Jednotné siete odvádzajú dažďovú aj splaškovú vodu cez jedno potrubie, čo je lacnejšie, no pri silných dažďoch hrozí preťaženie. Delené siete majú oddelené potrubia pre dažďovú a splaškovú vodu, čo znižuje riziko záplav, no je drahšie na výstavbu. Ich hlavnou úlohou je odvádzanie a čistenie vôd, čím pomáhajú predchádzať znečisteniu a záplavám.

Miera urbanizácie v súčasnosti neustále rastie, čo má zásadný dopad na infraštruktúru a životné prostredie, vrátane kanalizačných systémov. V oblastiach s nižšou mierou urbanizácie je vsakovanie dažďovej vody do pôdy prirodzenejšie a efektívnejšie, pretože väčšina povrchov zostáva priepustná, čo umožňuje vode pomaly sa vsakovať, dopĺňať podzemné zdroje a znižovať riziko povrchového

¹ Ing. Adam Kollár - Vazovova 5, 812 43 Bratislava

odtoku. Tento prirodzený proces napomáha aj k zlepšeniu kvality vody, keďže pôda pôsobí ako filter, ktorý zachytáva nečistoty skôr, než sa dostanú do podzemných vôd.

Naopak, v mestských oblastiach s vysokou mierou urbanizácie a množstvom spevnených povrchov, ako sú cesty, parkoviská a chodníky, je vsakovanie dažďovej vody výrazne obmedzené. Voda namiesto toho rýchlo odteká po povrchoch a musí byť odvádzaná cez kanalizačné siete. Tento zvýšený povrchový odtok nielenže môže preťažiť kanalizačný systém, ale zároveň akumuluje znečisťujúce látky z ciest, ako sú ropné produkty, ťažké kovy a iné nečistoty. V oblastiach s obmedzeným vsakovacím potenciálom môže tento odtok viesť k znečisteniu povrchových vôd a dokonca preniknúť do podzemných vodných zdrojov, čo zvyšuje riziko kontaminácie pitnej vody.



Obrázok 1. Vplyv urbanizácie na vodnú bilanciú povrchového odtoku[2]

2. Matematické modelovanie

Ako bolo spomenuté rastúca urbanizácia mestského prostredia má za následok zníženie schopnosti infiltrácie dažďovej vody, čo vedie k zvýšenej koncentrácii povrchového odtoku z mestských systémov. Tento pokles infiltrácie môže spôsobiť vznik lokálnych povodní v mestách, predovšetkým v dôsledku nedostatočnej hydraulickej kapacity zastaraných kanalizačných sietí.

Vzhľadom na tieto výzvy je nevyhnutné analyzovať a posúdiť existujúcu kanalizačnú infraštruktúru v zvolenej oblasti. Na tento účel sa využívajú moderné softvérové nástroje, ako je napríklad matematický softvér MIKE+, ktoré umožňujú efektívne posúdenie stavu kanalizačnej siete.

MIKE+ je komplexná platforma s integrovanými modulmi a nástrojmi určenými na modelovanie, analýzu rôznych aspektov vodných systémov. Patria sem potrubné siete, rieky, prílivové oblasti a ďalšie. Zjednodušením modelovania a konsolidáciou technológií umožňuje MIKE+ používateľom optimalizovať systémy vodného hospodárstva a posilňovať udržateľnosť a odolnosť globálnej vodnej infraštruktúry.[3] Ďalším softvérom na matematické modelovanie je SWMM, model manažmentu dažďovej vody vyvinutý agentúrou EPA, ktorý sa používa po celom svete na plánovanie, analýzu a navrhovanie systémov súvisiacich s odtokom dažďovej vody, kombinovanou a kanalizačnou kanalizáciou a inými odvodňovacími systémami. SWMM umožňuje hodnotenie stratégií kontroly sivej infraštruktúry dažďových vôd, ako sú potrubia a dažďová kanalizácia, a slúži ako užitočný

nástroj na vytváranie nákladovo efektívnych hybridných riešení kombinujúcich zelené a sivé opatrenia. Tento softvér bol navrhnutý na podporu miestnych, štátnych a národných cieľov riadenia dažďových vôd, pričom sa zameriava na zníženie odtoku prostredníctvom infiltrácie a retencie a na pomoc pri znižovaní vypúšťania, ktoré prispieva k zhoršeniu kvality vodných útvarov.[4]

Matematické modelovanie sa čoraz častejšie aplikuje pri navrhovaní a plánovaní vodovodných a kanalizačných systémov, čím sa zvyšuje ekologická efektívnosť odvádzania odpadových vôd. Tento prístup prispieva k znižovaniu rizika záplav v mestských oblastiach a zabezpečuje udržateľnejšie hospodárenie s vodnými zdrojmi.

3. Dažde

Odtok v mestských oblastiach je vo všeobecnosti spôsobený dažďom. Hoci existuje mnoho rôznych foriem zrážok, ako napríklad sneh, zrážky sú najvýznamnejším prispievateľom k odtoku dažďovej vody vo väčšine oblastí. Množstvo zrážok sa teda mení v závislosti od času a priestoru. Intenzívne zrážky majú tendenciu pochádzať z malých dažďových mrakov (s priemerom približne jeden kilometer), ktoré buď trvajú krátko, alebo rýchlo prechádzajú povodím. Na druhej strane zrážky, ktoré trvajú dlhšie, zvyčajne vznikajú z väčších zrážkových buniek. V závislosti od rozlohy povodia a počtu zrážkomerných staníc je možné zohľadniť lokálne rozdiely. [5]

Matematický model pracuje s návrhovými zrážkami, ktoré sú kľúčovým parametrom pri navrhovaní a hodnotení sietí dažďovej kanalizácie. Návrhový úhrn zrážok predstavuje objem dažďovej vody, ktorý sa má odvádzat' do systému dažďovej kanalizácie. Návrhová periodičita dažďa vyjadruje pravdepodobnosť výskytu určitého zrážkového úhrnu v priebehu roka. Pri modelovaní systému kanalizácie sa vychádza z týchto návrhových dažďov a periodicit, ktoré sa určujú na základe typu lokality.

4. Matematický model

Matematické modelovanie je nástroj na analýzu kanalizačných sietí, ktorý sa zameriava na hodnotenie ich hydraulickej kapacity a sledovanie ich fungovania za rôznych podmienok. Cieľom je predpovedať budúci stav týchto sietí. Prostredníctvom simulácií budúceho stavu je možné efektívne navrhovať kanalizačné systémy.

Simulačné modely sú zjednodušené, no podrobné reprezentácie procesov dažďa a odtoku, ktoré využívajú matematické rovnice na opis vzťahov medzi vstupmi a výstupmi. Tieto modely integrujú jednotlivé komponenty kanalizačných sietí do jedného systému, čím umožňujú sledovanie každého prvku samostatne alebo celej siete ako celku. Okrem hydraulického posúdenia dokážu niektoré simulačné modely modelovať aj prenos znečisťujúcich látok do recipientu. Proces modelovania zrážkovo-odtokových vzťahov prebieha v niekoľkých vzájomne prepojených fázach.

Pred modelovaním je potrebné určiť cieľ. Je to dôležité kvôli modifikácii nasledujúcich fáz. Po stanovení cieľov sa začína samostatná príprava modelovaného systému, a to príprava a inventarizácia vstupných údajov. Prípravná fáza zahŕňa zber a inventarizáciu údajov, ktoré vstupujú do matematického modelu. Pri modelovaní kanalizačných sietí vstupné údaje zahŕňajú najmä údaje o dažďových udalostiach, charakteristiky povodia, charakteristiky kanalizačných sietí, celkový objem

prepadu, počet kombinovaných kanalizačných prepadov (CSO) a retenčných nádrží, údaje o čerpacích staniách a údaje o recipientoch.[6]

Väčšina modelov pokrýva všetky dôležité aspekty procesu zrážkovo-odtoku. Zvyčajne sa skladajú z dvoch hlavných častí: hydrologického modelu, ktorý sa zaoberá povrchovým odtokom, a hydraulického modelu, ktorý skúma transformáciu prítoku a odtoku dažďovej vody v kanalizačnej sieti. Presnosť simulácie závisí od zložitosti modelu.

5. Charakteristika územia

Predmetná oblasť sa nachádza na západnom Slovensku, pričom vybrané územie je prevažne situované v centre mesta. V tejto lokalite je zastaraná kanalizačná sieť, ktorá trpí nedostatočnou hydraulickou kapacitou. Mesto leží na brehu rieky, do ktorej sú vypúšťané čistené odpadové vody z miestneho kanalizačného systému.

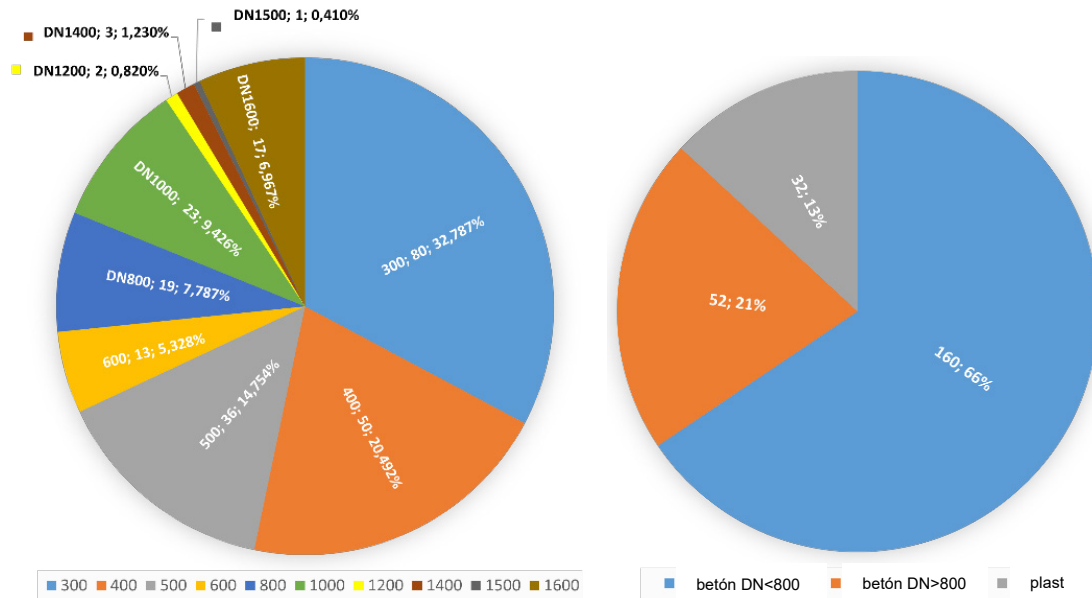
5.1. Charakteristika siete

V oblasti, ktorá je predmetom analýzy a kde sa zameriavame na kanalizačnú infraštruktúru, je celkovo 244 potrubí rozdelených podľa materiálu, priemeru a drsnosti povrchu. Z tohto počtu je 160 betónových potrubí s priemerom menším než DN800 a drsnosťou 3, čo predstavuje 66 % všetkých potrubí. Ďalej sa v oblasti nachádza 52 betónových potrubí s priemerom väčším ako DN800 a drsnosťou 6, ktoré tvoria 21 % celkového počtu. Vyššia drsnosť týchto rúr má významný vplyv na hydraulické vlastnosti, čím ovplyvňuje ich prietokovú kapacitu a tlakové straty v kanalizačnej infraštruktúre. Zvyšných 32 potrubí je vyrobených z plastu, charakterizovaných veľmi nízkou drsnosťou s hodnotou 1, čo predstavuje 13 % celkového počtu potrubí. Nízka drsnosť plastových rúr prispieva k zníženiu tlakových strát a zlepšeniu prietokových charakteristík kanalizačného systému, čo je výhodné najmä pre dlhšie trasy alebo systémy, ktoré vyžadujú vysokú účinnosť.

Priemery potrubí v tejto oblasti sa pohybujú od DN300 do DN1600, čo ilustruje široké spektrum rozmerov použitých v simuláciách. Tento rozptyl veľkostí je zásadný pre presné modelovanie a porozumenie správania sa systému odvodňovania dažďovej vody za rôznych podmienok. Zohľadnením rozmanitosti priemerov potrubí môže simulácia účinnejšie predpovedať dynamiku prietoku a možné výzvy v rámci mestských odvodňovacích systémov. Najpočetnejšie sú potrubia s priemerom DN300, ktoré tvoria 32,8 % celkového počtu, čím zdôrazňujú svoju dôležitosť v infraštruktúre odpadových vôd tejto oblasti.

Grafické zobrazenie poskytuje prehľad o počte a rozdelení rôznych typov potrubí podľa a priemeru. Ďalší graf detailne zobrazuje rozdelenie priemerov potrubí v analyzovanej oblasti, čo napomáha lepšiemu pochopeniu infraštruktúrnej siete a jej vlastností.

Podrobná analýza je zásadná pre plánovanie údržby, optimalizáciu prevádzky a potenciálne modernizácie kanalizačnej siete. Týmto spôsobom sa zabezpečuje efektívne a spoľahlivé riadenie odpadových vôd v danej oblasti, čo je kľúčové pre jej ekonomický a technický rozvoj.



a) Priemery potrubí v záujmovej oblasti

b) Materiál potrubí v záujmovej oblasti

Obrázok 1. Vplyv urbanizácie na vodnú bilanciú povrchového odtoku[2]

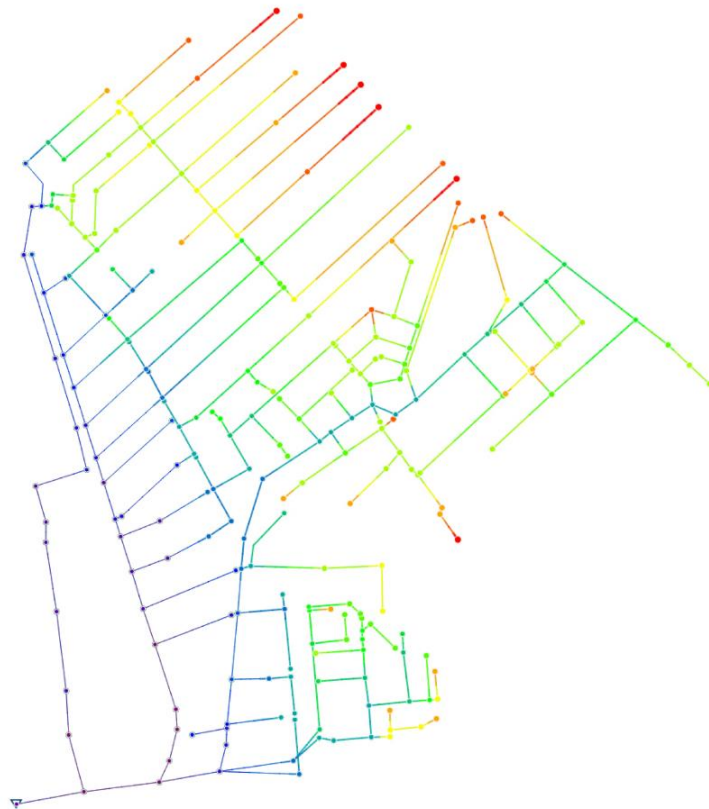
Predmetná kanalizačná sieť, čelí viacerým vážnym problémom, ktoré ovplyvňujú jej funkčnosť a efektívnosť. Jedným z najvýraznejších problémov je nedostatočná hydraulická kapacita systému. To znamená, že sieť nie je schopná účinne odvádzať odpadové vody v prípade silných zrážok alebo zvýšenej prevádzky, čo môže viesť k preplneniu a následným záplavám v oblasti.

Okrem toho sú odľahčovacie komory tejto predmetnej kanalizačnej siete zanesené sedimentami, odpadmi a inými znečisťujúcimi látkami. Tieto zanesené komory sťažujú odvádzanie nadmerného prietoku a zabraňujú správnejmu fungovaniu systému. Nedostatočná hydraulická kapacita a zanesené odľahčovacie komory vedú aj k zhoršeniu kvality vody v recipientoch. Pri preplnení kanalizácie môže dôjsť k vypúšťaniu nečistôt a odpadových vôd priamo do riek alebo iných vodných tokov, čo negatívne ovplyvňuje ekosystémy a zdravie obyvateľstva.

Vzhľadom na existujúce problémy, ktoré vznikajú v kanalizačnej sieti, je potrebné vytvoriť matematický model na optimalizáciu predmetnej kanalizácie. Tento model pomôže identifikovať slabé miesta, predpovedať prietoky a navrhnúť efektívne riešenia, čím sa zabezpečí spoľahlivý a efektívny systém správy odpadových vôd, ktorý bude schopný zvládnuť rastúce nároky a zabezpečiť ochranu životného prostredia a zdravia obyvateľov.

6. Výsledky

Výsledky simulácie ukázali, že v niekoľkých úsekoch kanalizačnej siete je potrubie naplnené až po horný okraj, čo naznačuje, že prúdenie vody prechádza z režimu voľného povrchového prúdenia na tlakové. Poruchy v kanalizačných sieťach môžu zahŕňať netesnosti, trhliny alebo úplné zlyhanie potrubia, čo vedie k nekontrolovanému vypúšťaniu odpadových vôd a kontaminácii životného prostredia. Tieto udalosti môžu mať nepriaznivý vplyv na verejné zdravie a životné prostredie, čo zdôrazňuje význam pravidelného monitorovania a údržby kanalizačných systémov s cieľom minimalizovať riziká takýchto nežiaducich udalostí.



Obrázok 2. Výsledky simulácie - zaplnenie kanalizačnej siete (autor)

Obrázok 2 zobrazuje výsledky simulácie jednotnej kanalizačnej siete, vytvorenej pomocou matematického modelu, pričom farebná škála znázorňuje úroveň zaplnenia jednotlivých úsekov kanalizačného systému. Farebné čiary predstavujú potrubia, zatiaľ čo body na obrázku znázorňujú kanalizačné šachty.

Modrá farba na potrubíach reprezentuje úseky s najnižším zaplnením, kde je dostatok voľnej kapacity a systém funguje bez rizika preťaženia. Tento stav ukazuje, že prítok v týchto úsekoch je plynulý a dostatočne zvláda odvádzať dažďovú a odpadovú vodu.

Ako sa farebné línie menia na zelenú, žltú a oranžovú, úseky potrubia vykazujú postupne vyššie zaplnenie. Tieto časti systému sú vyťažené, ale stále sú schopné efektívne odvádzať vodu. Napriek tomu tieto úseky môžu byť rizikové, ak dôjde k zvýšeniu prítoku počas silných zrážok.

Červené úseky na simulácii predstavujú miesta s plným naplnením potrubia, čo signalizuje, že tieto časti sú na hranici svojej kapacity. V týchto oblastiach môže pri ďalšom prítoku vody dôjsť k preťaženiu, čo môže viesť k záplavám, spätným tokom alebo pretečeniu.

Simulácia MIKE+ poskytuje presný obraz o zaplnení potrubí a kanalizačných šácht, čím umožňuje efektívne monitorovať stav siete a plánovať potrebné údržbové a modernizačné zásahy. Tento nástroj pomáha minimalizovať riziko preťaženia a zabezpečiť bezpečnú a spoľahlivú prevádzku kanalizačného systému.

Je nevyhnutné realizovať sanáciu postihnutých úsekov kanalizačnej siete z dôvodu zistených problémov. Sanácia môže zahŕňať rôzne technické opatrenia, ako je zvýšenie kapacity potrubí, inštalácia dodatočných odtokových zariadení alebo optimalizácia celkového návrhu kanalizačného

systemu. Dôležité je tiež implementovať moderné monitorovacie technológie na sledovanie prietoku v kanalizácii, čo umožní včas identifikovať a vyriešiť potenciálne komplikácie.

Jedným z efektívnych riešení sú retenčné nádrže, ktoré slúžia ako zásobníky pre dažďovú vodu. Tieto nádrže zadržiavajú prebytočnú vodu a následne ju regulovane vypúšťajú do kanalizácie. Kľúčové je správne nastavenie režimov vypúšťania, aby sa predišlo preťaženiu systému počas období zvýšeného prietoku.

Okrem toho môžu byť nápomocné aj vsakovacie zariadenia, ako sú vsakovacie priekopy a šachty, ktoré umožňujú vodám vsakovanie do pôdy. Tieto systémy využívajú priepustné materiály, ktoré podporujú prenikanie vody do podlažia, čím sa znižuje objem vody v kanalizácii.

Priepustné povrchy, ako dlažba s priepustnými spojmi alebo priepustný betón, umožňujú, aby dažďová voda vsakovala priamo na mieste dopadu. Tieto materiály sú navrhnuté tak, aby podporovali infiltráciu vody do pôdy namiesto povrchového odtoku. Kombinácia priepustných povrchov s infiltračnými zariadeniami zvyšuje účinnosť hospodárenia s dažďovou vodou.

Zavedenie duálnych kanalizačných systémov, ktoré oddelene odvádzajú splaškovú a dažďovú vodu, predstavuje ďalšiu efektívnu stratégiu. Tento prístup zefektívňuje hospodárenie s oboma typmi vody a znižuje riziko preťaženia kombinovanej kanalizácie. Okrem toho znižuje objem vody, ktorú je potrebné čistiť v čističkách odpadových vôd, čo zlepšuje ich prevádzku.

Implementácia týchto technických opatrení môže výrazne prispieť k zníženiu rizika preplnenia šacht a preťaženia kanalizačnej siete počas silných zrážok. Kombinácia rôznych prístupov zvyčajne poskytuje najlepšie výsledky a zabezpečuje efektívne hospodárenie s vodnými zdrojmi v mestských oblastiach.

Pod'akovanie

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra MŠVVaŠ SR a Slovenská akadémia vied v rámci projektu VEGA 1/0682/23 s názvom Výskum interakcie kvality povrchového odtoku a kvality podzemných vôd v urbanizovaných územiach spolufinancované Agentúrou na výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-22-0564 s názvom Analýza vplyvov kvality vypúšťaných vôd z domových ČOV na miestne zdroje pitnej vody.

7. Referencie

- [1] LI, L. et al. The Effect of Urban Land-Use Change on Runoff Water Quality: A Case Study in Hangzhou City. In International Journal of Environmental Research and Public Health . 2021. Vol. 18, no. 20, s. 10748.
- [2] R. Wittmanová, " Matematické modelovanie odtokového procesu v urbanizovanom území v kontexte klimatickej zmeny", Dizertačná práca, číslo. SvF-104305-55673, Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, 2021.
- [3] DHI MIKE+ | Integrated Water Modelling Platform. [online]. 2024 [cit. 2024-17-10]. Dostupné na: <<https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi/mikeplus>>.

- [4] US EPA, O. Storm Water Management Model (SWMM). [online]. 2014 [cit. 2024-17-10]. Dostupné na : <<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>>.
- [5] Cadus Sebastian, Poetsch, Marco “Dynamic Modelling of Urban Rainfall Runoff and Drainage Coupling DHI MIKE URBAN and MIKE FLOOD” [online] 2012 [cit. 2024-17-10]. Dostupné na: https://www.geography.at/study/analysis/cadus_poetsch_seminar-paper.pdf
- [6] WITTMANOVÁ, R. et al. Dynamic modeling of flow in combined sewer network using the mouse model. In Pollack Periodica . 2022. Vol. 17, no. 3, s. 89–93.

Anna Liová¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 4. ročník

JEDNODUCHÝ VS. KOMPLEXNÝ PRÍSTUP STANOVENIA PRIETOKOV DO VODNEJ NÁDRŽE LIPTOVSKÁ MARA

SIMPLE VS. COMPLEX APPROACH OF DETERMINING INFLOWS INTO THE LIPTOVSKÁ MARA RESERVOIR

Abstract

Effective flood risk management requires accurate design of water structures such as reservoirs, dams and weirs. For this purpose, design flood waves are often used, which describe the impacts of floods with a certain probability of exceedance. An important hydrological basis for the design and safety assessment of water structures is the control flood wave, which is based on flow data. The paper compares two approaches for determining the discharge time series into the Liptovská Mara reservoir: i) simple increase of discharges from the main stream; ii) complex addition of individual tributaries. The results showed minimal difference between the approaches (2.06%), suggesting the possibility of using the first approach for further analyses.

Kľúčové slová

Vodné dielo Liptovská Mara; metóda pomeru odtokovej plochy; časový rad prietokov

1. Úvod

Aby sme mohli efektívne riadiť povodňové riziká, je nevyhnutné správne odhadnúť objemy nádrží a dimenzovať kapacity bezpečnostných priepadov a ochranných hrádzí. Pre návrh spoľahlivých vodných stavieb sa často využívajú návrhové povodňové vlny, ktoré popisujú vplyvy povodní s určitým pravdepodobnostným rozdelením. Jedným z kľúčových hydrologických podkladov pri návrhu a hodnotení bezpečnosti vodných stavieb počas povodňových udalostí je kontrolná povodňová vlna (resp. prípadný súbor kontrolných povodňových vln). Tá je definovaná ako teoretická prietoková vlna určená kulmináčnym prietokom so zvolenou pravdepodobnosťou prekročenia, časovým priebehom a objemom s prislúchajúcou pravdepodobnosťou prekročenia[1]. 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 charakteristiky ako kulmináčny prietok, objem alebo trvanie vlny a jej tvar. Pre získanie týchto charakteristík je potrebné poznať časový rad prietokov, prítokov do nádrže, z ktorého vyberáme konkrétne prietokové vlny vhodné na analýzu.

V tomto príspevku sa zameriavame na porovnanie dvoch prístupov určenia prietokov do vodnej nádrže Liptovská Mara. Základom prvého prístupu, ktorý považujeme za jednoduchý, je dopyčítanie prietokov na základe meraní z hlavného toku tak, aby zodpovedali odtoku z plochy povodia po korunu hrádze, zatiaľ čo druhý zložitejší prístup spočíva v postupnom sčítavaní prietokov z hlavného toku, pravostranných a ľavostranných prítokov do nádrže. Výsledkom je zodpovedanie otázky ohľadom aplikovateľnosti prístupov stanovenia prietokov do vodnej nádrže, ich odchýlky a teda poukázanie na možných neistôt v ďalších analýzach prietokového režimu v rámci vybraného povodia.

¹ Anna Liová, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Metodika práce

Porovnanie zvolených prístupov určenia prítokov do vodnej nádrže: i) jednoduché dopočítanie prítokov na základe meraných prítokov na hlavnom toku tak, aby zodpovedali odtoku z plochy povodia po korunu hrádze; ii) zložitejší prístup, ktorý zahŕňa postupné sčítavanie jednotlivých prítokov do nádrže (hlavný tok a prítoky). Vzhľadom na obmedzené merania na jednotlivých prítokoch, oba prístupy využívajú hydrologickú analógiu, ktorá predpokladá podobné správanie sa povodí s podobnými fyzickými charakteristikami. Tento prístup nám umožňuje doplniť chýbajúce údaje a odhadnúť prítoky na základe pomeru plôch povodí a meraných údajov z blízkych staníc, teda údaje sú doplnené pomocou nepriameho určenia hydrologického prvku, v našom prípade prítoku, na základe podobných fyzicko-geografických podmienok v rámci blízkych povodí [2,3].

Ako bolo spomínané vyššie jednoduchá a často používaná metóda na doplnenie chýbajúcich prítokových údajov je založená na úprave meraných údajov na základe pomeru plochy povodia [4]. Tento prístup predpokladá, že povodia s podobnými hydrologickými charakteristikami a v tesnej blízkosti budú vykazovať porovnateľný priebeh prítoku. Odtok zo susedných, hydrologicky charakteristicky blízkych, meraných povodí sa proporcionálne upraví podľa plochy povodia, ktoré nedisponuje priamou meranou hodnotou prítoku (chýbajúci prítokové časové rady údajov), pričom prítok bez pozorovaní možno odhadnúť vynásobením pomeru plochy povodia záujmovej lokality a plochy povodia po blízku pozorovanú stanicu s prítokom z pozorovanej stanice [5, 6]. Prítoky na meraných povodiach boli korigované pomocou tohto princípu tak, aby zodpovedali celkovej ploche ústia toku do nádrže, keďže vodomerné stanice sa vo väčšine prípadov nachádzajú vyššie na toku. Na jednoduchý prepočet použijeme vzťah:

$$Q_{ZP} = k \cdot Q_{VS} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

$$k = \frac{A_{ZP}}{A_{VS}} \quad [-] \quad (2)$$

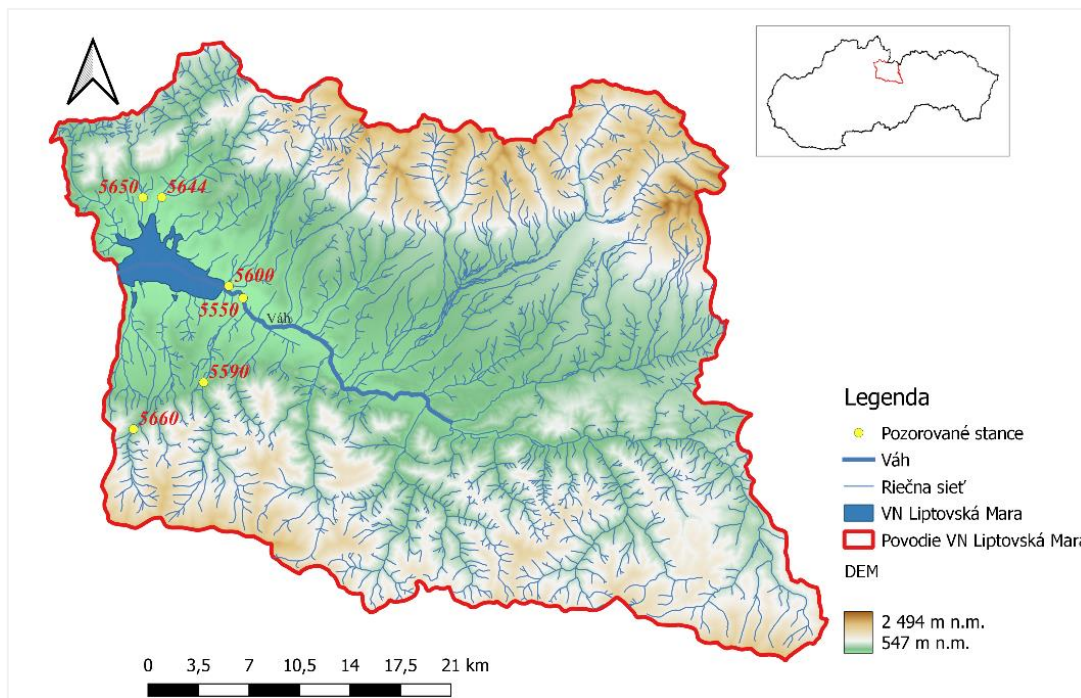
kde Q_{ZP} – prítok v záverečnom profile povodia [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 Q_{VS} – meraný prítok vo vodomernej stanici na povodí [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 k – koeficient vyjadrujúci pomer medzi plochou povodia po záverečný profil a plochou povodia po vodomernú stanicu (VS) [–],
 A_{ZP} – plocha povodia v záverečnom profile povodia [km^2],
 A_{VS} – plocha povodia po vodomernú stanicu s meranými údajmi [km^2].

3. Opis územia a vstupné údaje

V príspevku sme sa zamerali na analýzu prítokov do vodnej nádrže Liptovská Mara (obrázok 1), ktoré sa nachádza v severnej časti Slovenska, v Liptovskej kotline. Toto pomerne široké údolie Váhu v priehradnom profile je na severnej strane ohraničené Liptovskými Tatrami s paleogénom vo flyšovom vývoji a na južnej strane Nízkymi Tatrami z druhohorných vápencov. Na konci vzdutia hladiny vody v nádrži odbočuje z diaľnice cesta do Demänovských jaskýň Slobody a na Chopok. Vápencové útvary južného ohraničenia neovplyvnili vodné dielo, pretože priehľadné jazero je na južnej strane zaviazané do starých terás, ktoré sú morfológicky dosť nevýrazne vyvinuté. Minimálna prevádzková hladina nádrže je 456.36 ha, maximálna prevádzková hladina 2112.73 ha, celkový objem nádrže 361.9 mil. m^3 [8, 9].

Vodná nádrž je vybudovaná na hlavnom toku nazývanom Váh, ktorá vzniká sútokom riek Čierny Váh a Biely Váh, pričom medzi jeho ďalšie významnejšie prítoky, po vtok do nádrže, patria: pravostranné prítoky - Hybica, Belá, Trnovec a Smrečianka; a ľavostranné prítoky – Boca, Štiavnica a Ilanovka. Ďalšie prítoky do nádrže, s ktorými sme pracovali a vstupovali do našej analýzy, sú:

pravostranné prítoky – Mútnik, Jalovský potok, Petruška, Kvačianka, Prosiečanka, Sestrč; a ľavostranné prítoky – Demänovka, Paludžanka a Dúbravka. V rámci Slovenska sa jedná o najväčšiu nádrž s množstvom prítokov preto je stanovenie množstva vody pritekajúcej do nádrže komplexný a zložitý problém. Zhrnutie jednotlivých prítokov do nádrže je v tabuľke 1. Celková plocha povodia je približne 1477 km², nadmorská výška sa pohybuje v rozmedzí od 547 m n. m. do 2494 m n. m.



Obrázok 1: Povodie Vodnej nádrže Liptovská Mara a jeho lokalizácia v rámci Slovenska.

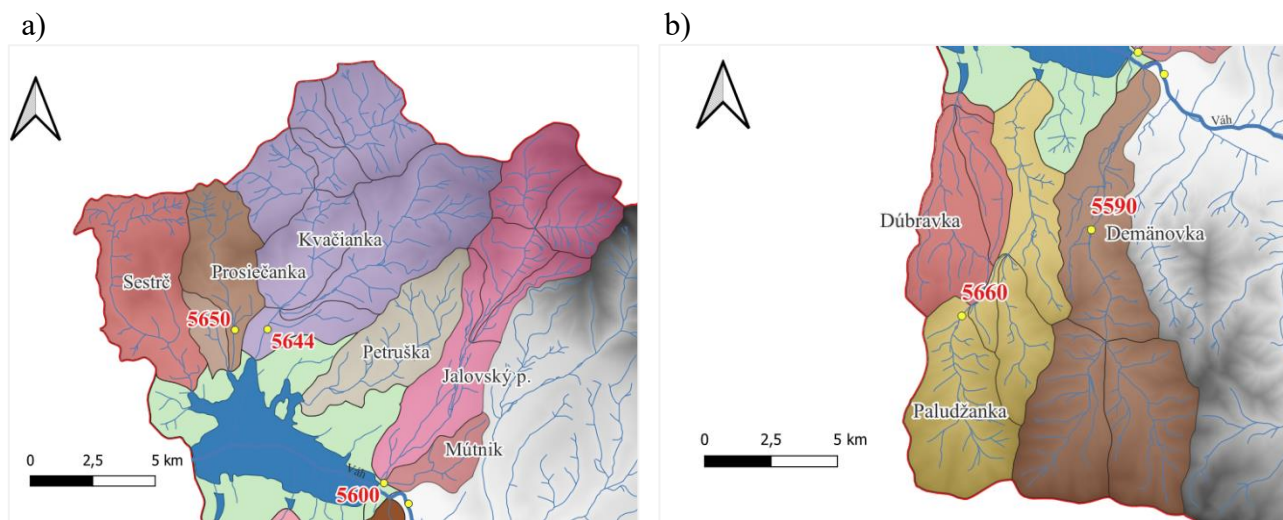
Vstupné údaje do našej analýzy, ktoré sme využili v tomto príspevku, boli poskytnuté Slovenským hydrometeorologickým ústavom (SHMÚ). Keďže sme skúmali celkový prítok do nádrže, najhlavnejšou informáciou boli údaje o prietokoch, konkrétne časové rady prietokov v dennom kroku. Zhrnutie vstupných údajov a ich bližší popis je zobrazený v tabuľke 1., poloha jednotlivých staníc je zobrazená na obrázku 1 a 2. Plochy jednotlivých povodí po záverečný profil sme určili v prostredí GIS.

Tabuľka 1: Vstupné údaje a základné charakteristiky povodí na prítokoch do nádrže.

	ID stanice	Stanica	Povodie / tok	Plocha povodia po VS [km ²]	Plocha povodia po záverečný profil [km ²]	Pozorovanie v rokoch	Časový krok
Pravostranné prítoky	-	-	Sestrč	-	24.92	-	-
	5650	Prosiek	Prosiečanka	13.76	18.23	1968 - 2021	Denný
	5644	Liptovská Sielnica	Kvačianka	73.40	75.41	1976 - 2021	Denný
	-	-	Petruška	-	18.78	-	-
	5600	Liptovská Ondrašová	Jalovský potok	44.86	44.86	1971 - 2021	Denný
	-	-	Mútnik	-	6.21	-	-

	5550	Liptovský Mikuláš	Váh	1103.03	1103.03	1920 - 2021 1988 - 2021	Denný Hodinový
Ľavostranné prítoky	5590	Demänová	Damänovka	47.98	61.38	1968 - 2021	Denný
	5660	Horáreň Hluché	Paludžanka	21.09	47.38	1969 - 2021	Denný
	-	-	Dúbravka	-	21.70	-	-
			Okolie nádrže		55.23	-	-
				Σ	1477.13		

Na obrázku 2 môžeme vidieť podrobnejšie zobrazenie jednotlivých prítokov a polohu vodomerných staníc.



Obrázok 2: a) Pravostranné prítoky do nádrže; b) Ľavostranné prítoky do nádrže

4. Výsledky práce

Ako bolo spomenuté v metodickej časti, našim cieľom bola analýza dvoch prístupov určenia prítoku do vodnej nádrže. Z dostupných vstupných údajov v tabuľke 1 môžeme vidieť, že máme k dispozícii rôzne obdobia pozorovania, preto sme v tomto príspevku pracovali s obdobím od roku 1976 do roku 2021, kedy máme údaje dostupné súčasne zo všetkých vodomerných staníc v rámci zvoleného povodia.

4.1 Prístup1 – úprava meraných prietokov na hlavnom toku po profil koruny hrádze nádrže

V tomto prístupe pracujeme s meranými údajmi z vodomernej stanice 5550 Váh – Liptovský Mikuláš, v dennom kroku. Pri výpočte sme vychádzali zo vzťahov (1) a (2), kedy sme pre každý priemerný denný prietok vo vodomernej stanici $Q_{d,VS}$ dopočítali priemerný denný prietok v záverečnom profile $Q_{d,ZP}$, v tomto prípade po korunu hrádze. Koeficient k vyjadrujúci pomer medzi plochami po VS a plochou po korunu hrádze bola stanovená na hodnote 1.34. Merané prietoky $Q_{d,VS}$ boli teda korigované a navýšené o približne 34%. Pre zjednodušenie porovnania výsledkov vyjadríme

dlhodobý ročný priemer $\bar{Q}_{a,ZP}$, ktorý sa po úprave rovná $26.64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Priemerný ročný prietok za skúmané obdobie 1976 – 2021 v stanici 5550 Váh - Liptovský Mikuláš je $19.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2 Prístup 2 – sčítavanie jednotlivých prítokov do nádrže

Ako môžeme vidieť v tabuľke 1, k dispozícii nemáme merania prietokov na každom prítoku do nádrže, preto sme postupovali pomocou metódy hydrologickej analógie a pre nepozorované povodia sme použili časové rady prietokov zo susedných povodí (hydrologicky podobných), pričom sme opäť použili vzťahy (1) a (2). Prietoky boli opäť počítané v dennom kroku, no pre zjednodušenie porovnaní sme ako výsledky uviedli dlhodobé ročné priemery. V nasledujúcej tabuľke 2 môžeme vidieť zhrnutie výsledkov a výsledný súčet jednotlivých prítokov.

Tabuľka 2: Dlhodobé ročné priemerné prietoky na hlavnom toku, pravostranných a ľavostranných prítokov do nádrže za obdobie 1976 - 2021.

Prítok do nádrže		Plocha [km ²]	Plocha VS [km ²]	$\bar{Q}_{a,VS}$ [m ³ ·s ⁻¹]	Použité $Q_{d,VS}$	k	$\bar{Q}_{a,ZP}$ [m ³ ·s ⁻¹]
Pravostranné prítoky	Sestrč	24.92			5650	1.81	0.59
	Prosiečanka	18.23	13.76	0.325	5650	1.32	0.43
	Kvačianka	75.41	73.40	1.275	5644	1.03	1.31
	Petruška	18.78			5644	0.26	0.33
	Jalovský potok	44.86	44.86	0.998	5600	1	1.00
	Mútnik	6.21			5600	0.14	0.14
Váh		1103.03	1103.03	19.897	5550	1	19.90
Ľavostranné prítoky	Damánovka	61.38	47.98	1.220	5590	1.28	1.56
	Paludžanka	47.38	21.09	0.593	5660	2.25	1.33
	Dúbravka	21.70			5660	1.03	0.61
							Σ 27.19

5. Diskusia a záver

V tomto príspevku sme sa zamerali na metodický postup pre potreby analýzy prítokov, resp., množstva vody smerujúceho do nádrže, pretože v ďalšom pokračovaní výskumu sa budeme venovať metodike tvorby súboru kontrolných povodňových vln slúžiacich na posúdenie bezpečnosti vodných stavieb. Pre tieto potreby je však výhodnejšie pracovať s prietokovými údajmi v hodinovom kroku, ktoré nie sú vždy dostupné. Daný metodický postup v príspevku bol aplikovaný v záujmovom území povodia rieky Váh po záverečný profil Liptovská Mara, kde boli k dispozícii na hlavnom toku aj hodinové údaje v stanici 5550 Váh – Liptovský Mikuláš. Ako už bolo spomenuté, na prítokoch máme k dispozícii len denné prietoky, preto sme zvolili celkovú analýzu v dennom kroku, pričom sme sa snažili zodpovedať na otázky ohľadom aplikovateľnosti prístupov stanovenia prietokov do vodnej nádrže, ich odchýlky a teda poukázať na možné neistoty v ďalších analýzach prietokového režimu v rámci vybraného povodia.

V prvom prístupe sme ako vstupné údaje použili iba denné prietoky zo stanice 5550 Váh-Liptovský Mikuláš, z hlavného prítoku, ktoré sme pomocou pomerného výpočtu na základe plochy povodia upravili po profil koruny hrádze. Priemerný ročný prietok za skúmané obdobie 1976 – 2021

v stanici 5550 Váh - Liptovský Mikuláš je $19.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a po prepočte po korunu hrádze vodnej nádrže je o hodnote $26.64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

V druhom spôsobe sme taktiež použili pomerný výpočet prietoku na základe plochy povodia, ale v tomto prípade sme uvažovali s jednotlivými prítokmi samostatne, s následným sčítaním v každom dni v rámci uvažovaného obdobia. Dlhodobý priemerný ročný prietok získaný týmto spôsobom je $\bar{Q}_a = 27.19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Rozdiel hodnôt dlhodobých priemerných ročných prietokov určených oboma prístupmi je rovný $0.55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, čo predstavuje približne 2.06%. Na základe tohto rozdielu môžeme usúdiť, že prístupy sa výrazne nelíšia, a preto je možné do ďalších analýz v rámci vybraného povodia využiť jednoduchší prvý prístup, teda v tomto prípade by postačovali merané údaje o prietokoch len na hlavnom toku, čo je výhoda, pretože nie pri každej vodnej nádrži máme dostatočné merania aj na prítokoch. Prietokové vlny je potrebné selektovať na hodinových údajoch, pretože zachytávajú lepší časový priebeh a následne sa navýšia o danú pomernú časť prietoku. V príspevku sme skúmali aplikovanie prístupu na jednu konkrétnu stavbu, no je možné ho využiť aj na iné povodia.

Pod'akovanie

Práca bola vytvorená s podporou Agentúry na podporu výskumu a vývoja APVV 20-0374 a APVV-23-0332 a Grantovej agentúry VEGA 1/0577/23.

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] SZOLGAY, J., DZUBÁK, M., HLAVČOVÁ, K., KOHNOVÁ, S.: *Hydrológia: Odtokový proces a hydrológia povrchových vôd*. Slovenská technická univerzita, 2004.
- [3] MINISTERSTVO ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SLOVENSKEJ REPUBLIKY. *Terminologický výkladový slovník: Hydrológia*
- [4] ARCHFIELD, S. A. a VOGEL, R. M.: *Map correlation method: Selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungaged catchments*. Online. Water Resources Research. 2010, roč. 46, č. 10. ISSN 0043-1397. DOI: 10.1029/2009WR008481.
- [5] EMERSON, D. G., VECCHIA, A. V., & DAHL, A. L.: *Evaluation of drainage-area ratio method used to estimate streamflow for the Red River of the North Basin, North Dakota and Minnesota*. US Geological Survey, 2005.
- [6] ASQUITH, W. H., ROUSSEL, M. C., & VRABEL, J.: *Statewide analysis of the drainage-area ratio method for 34 streamflow percentile ranges in Texas*. US Geological Survey, 2006.
- [7] CHMELÁR V.: *Vodné dielo Liptovská Mara*. Bratislava: Alfa, 1979. 77s.
- [8] SLOVENSKÝ VODOHOSPODÁRSKY PODNIK, š. p.: *Manipulačný poriadok pre vodné stavby Liptovská Mara-Bešeňová*. Piešťany, 2019. 41 s.

Martin Meliška¹

Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, 2. ročník

Význam domových čistiarní odpadových vôd pre udržateľnosť: Digitalizácia a riešenie súčasných výziev

The Importance of Domestic Wastewater Treatment Plants for Sustainability: Digitalization and Addressing Current Challenges

Abstrakt

The current state of wastewater management and wastewater treatment plants plays a crucial role in ensuring the sustainable use of water resources. The ongoing discussion about the insufficient number of wastewater treatment plants and their effects on clean water availability and public health underscores the significant challenges we face. In smaller communities, the development of centralized sewerage systems is often impractical, making decentralized wastewater treatment solutions necessary. This study emphasizes the importance of identifying and mapping domestic wastewater treatment plants to effectively monitor the quality, location, and concentration of wastewater in various areas. Additionally, it highlights the key challenges and the need to optimize wastewater treatment systems by accurately locating and tracking these plants across different communities and regions.

Kľúčové slová / Key Words

odpadové vody; čistiarne odpadových vôd; decentralizované riešenia; udržateľnosť; monitorovanie

1. Úvod

Udržateľný manažment zohráva čoraz dôležitejšiu úlohu pri ochrane vodných zdrojov, vzhľadom na rastúce znečistenie a častý nedostatok vody. Súčasné životné prostredie čelí opakovaným a vážnym problémom spojeným s nedostatočnými alebo neexistujúcimi zariadeniami na čistenie odpadových vôd a odpadu. Tento stav ohrozuje dostupnosť čistej vody a primeranej sanitácie, čo môže viesť k zdravotným komplikáciám. V mestských oblastiach rozvinutých krajín sú zvyčajne zavedené centralizované systémy, zatiaľ čo v rozvojových krajinách často dominuje decentralizovaný prístup. V týchto regiónoch býva odpadová voda z domácností, podnikov a priemyslu často neošetrená alebo

¹ Ing. Martin Meliška - Vazovova 5, 812 43 Bratislava

ošetrená priamo na mieste a následne vypúšťaná (upravená či neupravená) na pozemky alebo do miestnych odvodňovacích kanálov a vodných tokov [1].

Na Slovensku napreduje výstavba kanalizácie pomaly, najmä kvôli veľkému počtu malých obcí, kde efektívne využitie verejných financií na výstavbu nie je možné. Pri plánovaní výstavby kanalizačných sietí je potrebné zohľadniť všetky kľúčové aspekty, ako sú optimálna funkčnosť, stabilná prevádzka, nákladová efektívnosť, požiadavky na údržbu, udržateľnosť a environmentálne dopady.

Definovanie týchto funkčných požiadaviek zahŕňa celý kanalizačný systém s cieľom zabezpečiť, aby jeho budúce rozšírenie, rekonštrukcia alebo úprava boli v súlade s platnými legislatívnymi požiadavkami a normami [2]. V malých obciach, na miestach so sporadickým osídlením (napr. vzdialené sídla mimo hlavných aglomerácií, izolované domy v horách) a v oblastiach, kde prevažujú rekreačné chaty, nie sú investičné a prevádzkové náklady na dlhodobú udržateľnosť centralizovaných systémov vhodné. V týchto prípadoch sa odporúča použitie decentralizovaných a individuálnych riešení na čistenie odpadových vôd. Decentralizované možnosti čistenia sú vhodnou alternatívou k centralizovaným systémom [3]. Výsledky štúdie preukázali, že nedostatok údržby spôsobil výrazné rozdiely v chemických a mikrobiálnych vlastnostiach dvoch identických lokálnych čistiarní odpadových vôd [4]. Pri navrhovaní sietí by mal byť kľúčovým faktorom posúdenie vplyvu prevádzky zariadení na klímu, energetickú účinnosť a ekonomickú udržateľnosť poskytovaných služieb, a to v súvislosti so znížením biologického a chemického znečistenia [5].

V Slovenskej republike sú dostupné údaje o počte obyvateľov pripojených na verejnú kanalizáciu, no v oblastiach, kde ešte nie je vybudovaná, sa využíva decentralizovaný prístup s použitím žump, septikov a domových čistiarní odpadových vôd. Je preto dôležité identifikovať a mapovať umiestnenie týchto čistiarní, aby bolo možné monitorovať nielen kvalitu vypúšťaných vôd, ale aj umiestnenie a hustotu týchto zariadení.

2. Zber údajov a metodológia

V rámci tejto štúdie som využil údaje zo Štatistického úradu Slovenskej republiky za rok 2000 a obdobie rokov 2015 až 2022, ktoré poskytli prehľad o podiele obyvateľov pripojených na verejnú kanalizáciu. Cieľom bolo analyzovať vývoj pripojených obyvateľov na verejnú kanalizačnú sieť, identifikovať regionálne rozdiely a zhodnotiť výzvy spojené s nedostatočným pokrytím v menej rozvinutých oblastiach Slovenska.

2.1. Kroky metodológie

Zber údajov: Získal som štatistické údaje zo Štatistického úradu SR o podiele obyvateľov pripojených na verejnú kanalizáciu z roku 2000 a v rokoch 2015 až 2022. Tieto údaje poskytovali prehľad o pripojení obyvateľov na verejnú kanalizáciu v rôznych regiónoch Slovenska.

Analýza vývoja pripojenia obyvateľov na verejnú kanalizáciu: Údaje o pripojení obyvateľstva som porovnal medzi jednotlivými rokmi, čím som sledoval medziročné zmeny v pripojení na verejnú kanalizáciu a identifikoval som trendy v rozvoji kanalizačných sietí.

Identifikácia regionálnych rozdielov: Analyzoval som regionálne rozdiely, kde mestské oblasti ako Bratislava a Košice vykazujú vysokú mieru pripojenosti na kanalizáciu, zatiaľ čo v riedko osídlených regiónoch, ako Krupina, Bytča a Trebišov, je pripojenosť výrazne nižšia.

Návrh riešenia: Na základe zistení o nedostatočnej pripojenosti v určitých oblastiach a o absencii systematického mapovania a monitorovania decentralizovaných systémov som navrhol vytvorenie digitálnej platformy.

3. Súčasný stav domových čistiarní odpadových vôd

Čistenie odpadových vôd v malých obciach je definované aj v zákone č. 364/2004 o vodách, ktorý uvádza, že hospodárenie s komunálnymi odpadovými vodami z aglomerácií s menej ako 2 000 obyvateľmi, ktoré nemajú verejnú kanalizáciu, je možné riešiť individuálnymi alebo vhodnými systémami. Medzi tieto systémy patria vodotesné žumpy a malé čistiarne odpadových vôd, ktoré musia zabezpečiť splnenie environmentálnych cieľov pre povrchové a podzemné vody podľa § 5. Odpadové vody zo žump sa musia spracovať v súlade s predpismi 46(b) a následne zlikvidovať v čistiarni odpadových vôd [6].

Vo všeobecnosti musia čistiarne odpadových vôd spĺňať základné požiadavky stanovené slovenskou a európskou legislatívou, a to:

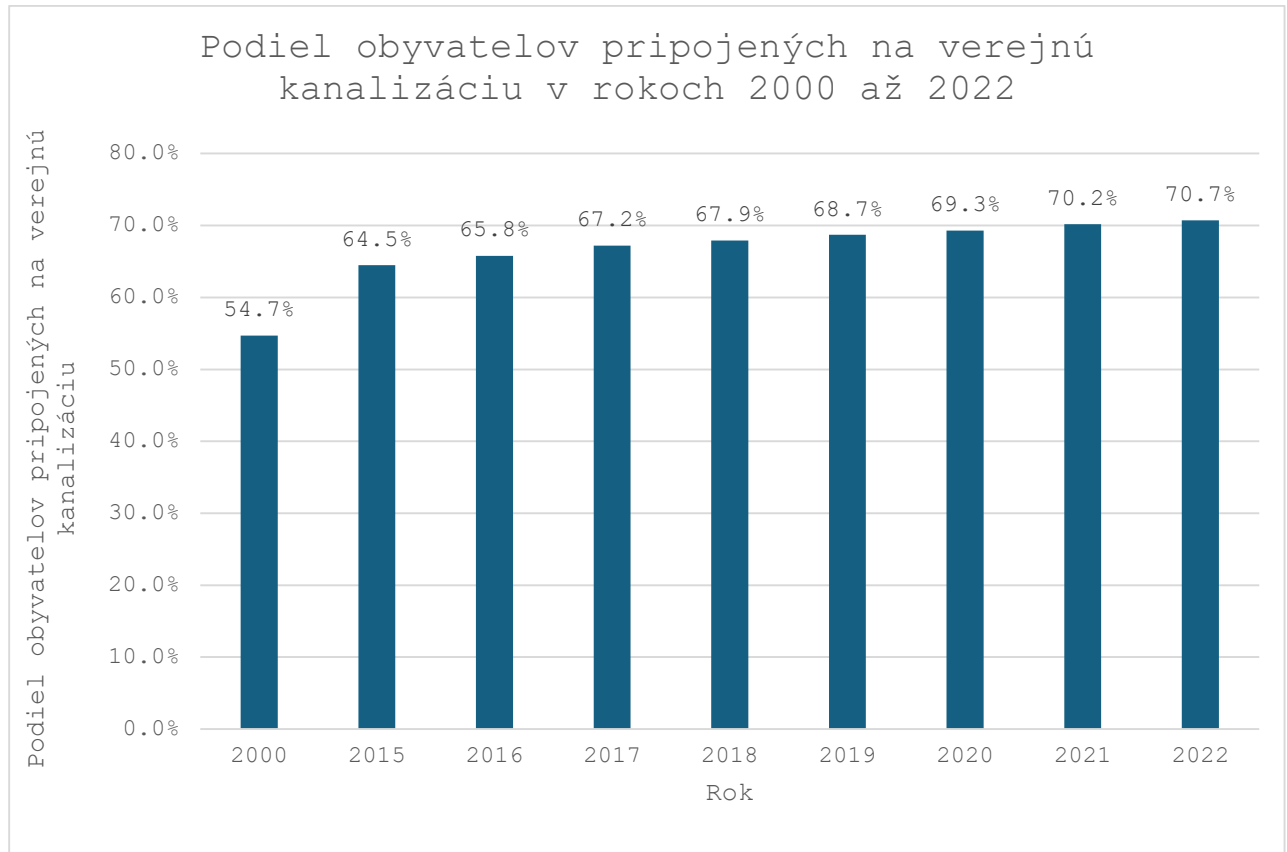
- zabezpečenie dodržiavania limitných hodnôt pre vypúšťané odpadové vody,
- schopnosť efektívne spracovávať odpadové vody v období bez zrážok aj počas povolených objemov dažďových vôd,
- zabezpečenie bezpečnosti obsluhy,
- nevytváranie nadmerného zápachu, hluku, toxicity, aerosólov či peny, pričom tieto parametre musia byť v súlade s príslušnými normami,
- možnosť budúceho rozšírenia alebo rekonštrukcie,
- vysoká prevádzková spoľahlivosť,
- ekonomická efektívnosť celkových nákladov,
- minimalizácia odpadu a vytváranie možností na opätovné využitie [5].

Decentralizovaný prístup k čisteniu odpadových vôd je celoeurópskym problémom, pričom jednotlivé krajiny k nemu pristupujú rôznymi spôsobmi. Medzi najrozšírenejšie metódy patria malé čistiarne do 2000 EO, koreňové čistiarne alebo čistiarne do 50 EO [7]. Rast počtu malých domových čistiarní odpadových vôd zohráva dôležitú úlohu pri zlepšovaní kvality vody v riekach, jazerách, deltách riek a akviferoch v porovnaní s centralizovanými systémami [1]. V domových čistiarniach odpadových vôd sa používajú štyri základné metódy čistenia:

- mechanické,
- fyzikálno-chemické,
- biologické (aeróbne a anaeróbne),

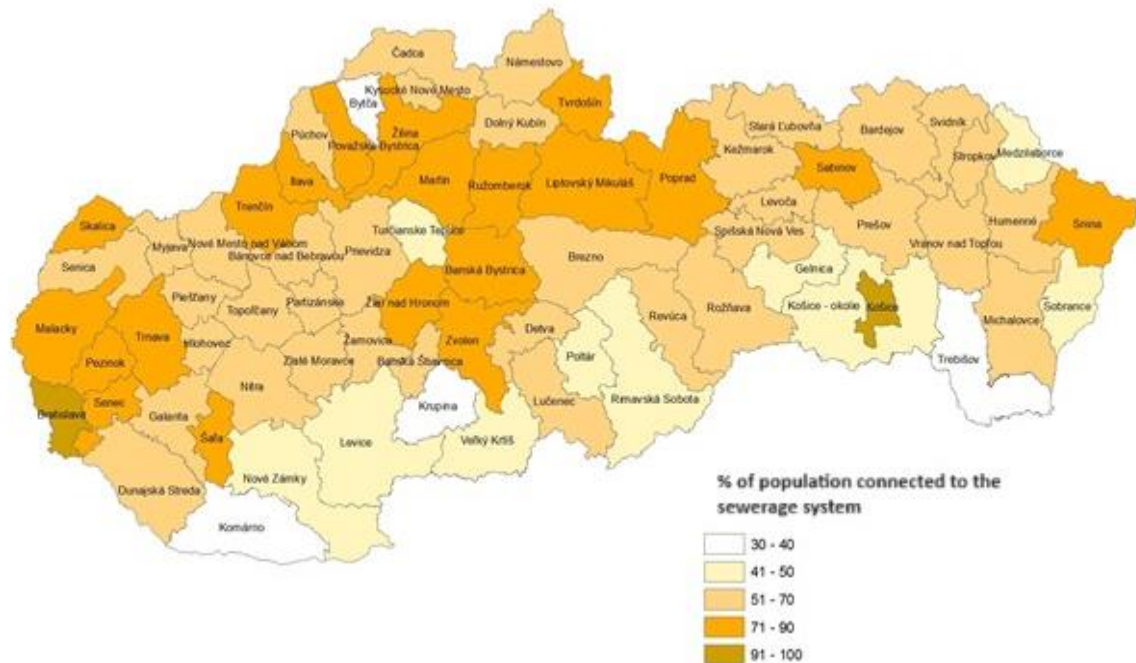
- extenzívne metódy čistenia.

Pri porovnaní údajov o podiele obyvateľov pripojených na verejnú kanalizáciu v rokoch 2000 a 2022 sa ukázalo, že pripojenosť vzrástla o 16 %. V porovnaní rokov 2015 a 2022 zaznamenávame nárast o 5,8 %, pričom priemerný medziročný nárast predstavoval len 0,83 % (Obrázok 1).



Obrázok 1 Podiel obyvateľov pripojených na verejnú kanalizáciu v rokoch 2000 až 2022[8]

Obrázok 2 zobrazuje mapu Slovenskej republiky s podielom obyvateľstva pripojeného na verejnú kanalizáciu v roku 2020 podľa regiónov. Najvyšší podiel pripojenia na verejnú kanalizáciu je v mestách Bratislava a Košice, vďaka dobre vybudovanej infraštruktúre a hustote obyvateľstva. Naopak, najnižší podiel pripojenosti je v regiónoch Krupina, Bytča a Trebišov, čo je spôsobené vysokým počtom malých obcí, kde budovanie verejnej kanalizácie nie je ekonomicky efektívne.



Obrázok 2 Podiel obyvateľov pripojených na verejnú kanalizáciu v roku 2020 [9]

Odpadové vody z menších domových čistiarní sa zvyčajne vypúšťajú do najbližšieho povrchového vodného toku, prípadne do podzemných vôd. V prípade, že sa vypúšťajú do podzemných vôd, je potrebné pravidelne odoberať vzorky vypúšťanej vody na kontrolu. V odľahlých oblastiach existuje riziko kontaminácie vodných zdrojov, ak domové čistiarne odpadových vôd nie sú správne prevádzkované, čo môže ohroziť kvalitu životného prostredia. Hlavným dôvodom takejto kontaminácie je nedostatok systematického monitorovania kvality vypúšťaných vôd. Aktuálne legislatíva neobsahuje efektívne opatrenia na kontrolu funkčnosti a neexistuje ani centrálna databáza domových čistiarní odpadových vôd, čo znemožňuje efektívne monitorovanie ich vplyvu na životné prostredie.

4. Návrh a digitalizácia kontroly domových čistiarní odpadových vôd

Na základe analyzovaných údajov a s cieľom zvýšiť efektívnosť kontrol a získať prehľad o aktuálnom stave funkčnosti domových čistiarní odpadových vôd navrhujem vytvoriť digitálnu platformu pre inšpekčných technikov a majiteľov malých domových čistiarní s kapacitou do 50 ekvivalentných obyvateľov. Podľa Zákona o vodách je majiteľ malej čistiarne odpadových vôd s kapacitou do 50 ekvivalentných obyvateľov povinný vykonávať technickú kontrolu raz ročne, ak čistiareň nemá vzdialené monitorovanie, a raz za dva roky, ak je takéto monitorovanie zabezpečené. Výsledky týchto kontrol musia byť do 30. januára nasledujúceho roku predložené štátnemu vodohospodárskemu orgánu prostredníctvom kontrolného technika [7]. Vzhľadom na legislatívne požiadavky na kontrolu domových čistiarní odpadových vôd s kapacitou do 50 ekvivalentných obyvateľov, navrhujem vytvoriť digitálnu platformu na zber údajov o umiestnení týchto čistiarní a kvalite vody vypúšťanej do prostredia. Táto platforma by umožnila vytvoriť centrálnu databázu s pomocou inšpekčných technikov.

Digitálna platforma na zber údajov o domových čistiarniach odpadových vôd a na tvorbu kontrolných správ by mala byť prehľadná, ľahko použiteľná a umožňovať efektívny zber a spracovanie údajov. Nasleduje návrh, ako by mohla platforma vyzeráť:

Používateľské rozhranie:

- **Dashboard:** Prehľadné rozhranie so zhrnutím počtu čistiarní, ich umiestnenia, aktuálneho stavu kontrol a informácií o prevádzke.
- **Mapové rozhranie:** Interaktívna mapa, ktorá umožňuje zobraziť umiestnenie jednotlivých čistiarní s detailmi o každej z nich.
- **Formuláre na zber údajov:** Štandardizované formuláre na zadávanie informácií o čistiarniach odpadových vôd, vrátane umiestnenia, kapacity, typu, technických parametrov a ďalších dôležitých informácií.
- **Fotodokumentácia:** Možnosť pridávať fotografie čistiarní pre vizuálnu dokumentáciu a podporu údajov.
- **Sledovanie stavu kontrol:** Sekcia na sledovanie aktuálneho stavu kontrol, pripomienky termínov a možnosť pridávať aktualizácie o vykonaných kontrolách.

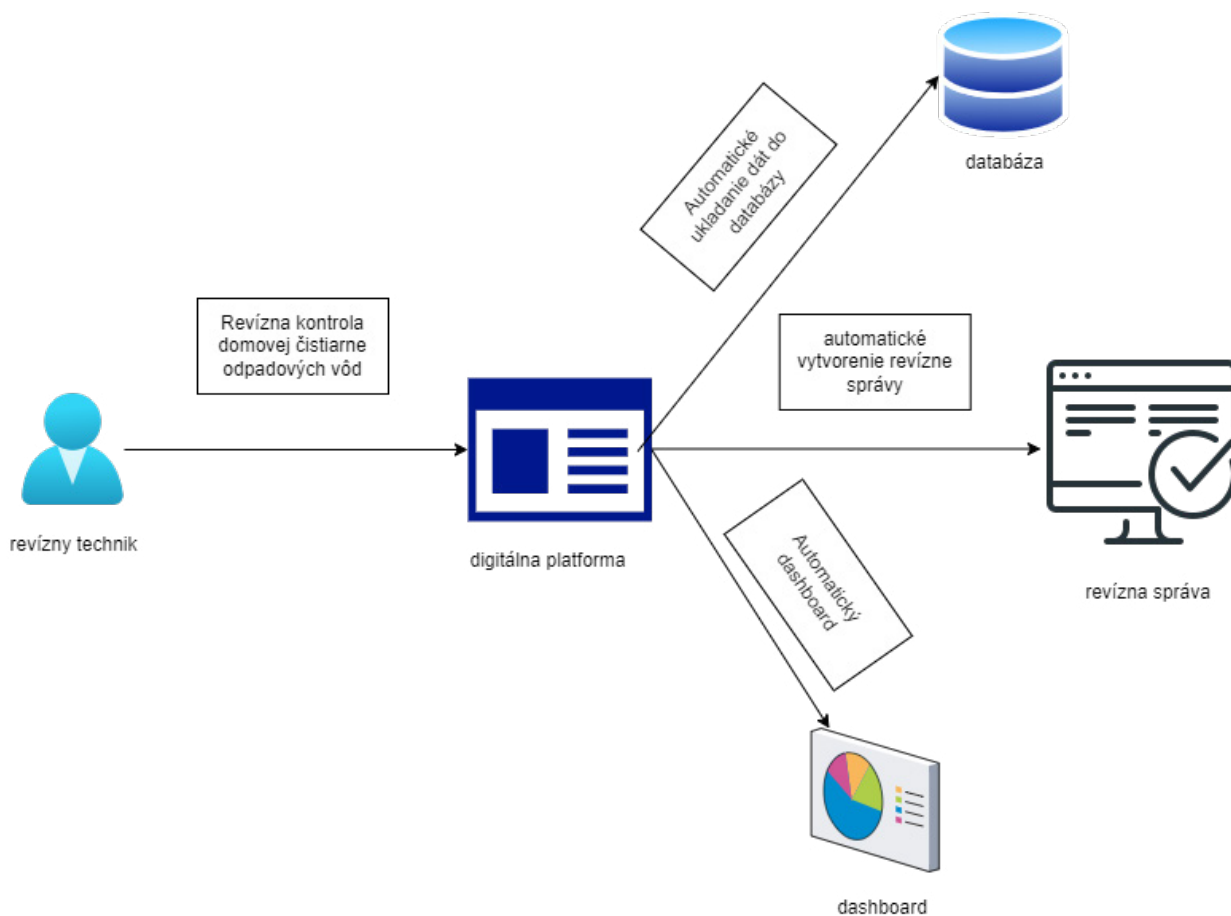
Funkcionality:

- **Centralizované úložisko dát:** Databázové úložisko, kde budú zhromaždené všetky údaje o čistiarniach pre ďalšie spracovanie a analýzu.
- **Spracovanie údajov:** Nástroje na spracovanie a filtrovanie údajov podľa rôznych kritérií s možnosťou generovať štandardné kontrolné správy.
- **Notifikácie a upozornenia:** Možnosť nastaviť upozornenia na termíny kontrol, aktualizácie údajov alebo iné dôležité udalosti.
- **Mobilná aplikácia:** Možnosť používať mobilnú aplikáciu v teréne, ktorá umožní technikom prístup k databáze a priame zadávanie údajov z terénu.

Bezpečnosť a správa dát:

- **Zabezpečený prístup:** Možnosť nastaviť rôzne úrovne prístupu pre rôzne typy používateľov s ohľadom na citlivosť údajov.
- **Zálohovanie a obnova dát:** Pravidelná záloha a obnova údajov na ochranu proti strate dát.
- **Sledovateľnosť zmien:** Funkcie na sledovanie zmien, ktoré umožnia spätné dohľadanie úprav a prístupu k údajom.

Takáto digitálna platforma by poskytla inšpekčným technikom účinný nástroj na zber údajov o čistiarniach odpadových vôd, vytváranie kontrolných správ a efektívne monitorovanie stavu a údržby čistiarní. Počas inšpekcie by technik nahral údaje o čistiarni odpadových vôd na platformu, kde by sa automaticky uložili do centrálnej databázy. Automatizovaná správa by sa následne vytvorila a údaje o mieste a kvalite vody by sa zobrazili na interaktívnom online paneli. Pracovný proces navrhovanej digitálnej platformy je znázornený na Obrázku 3.



Obrázok 3 Proces navrhovaného systému kontroly malých domových čistiarní odpadových vôd

5. Záver

Domové čistiarne odpadových vôd sú neoddeliteľnou súčasťou environmentálnych a technologických riešení v oblasti čistenia odpadových vôd. Ich význam spočíva v ochrane vodných zdrojov a zlepšovaní kvality vody, čo priamo prispieva k udržateľnosti a ochrane životného prostredia. Výzvy týkajúce sa ich prevádzky, údržby a regulácie si však vyžadujú riešenia, ktoré by zvýšili efektívnosť týchto zariadení.

Navrhnutá digitálna platforma môže slúžiť ako dôležitý nástroj na monitorovanie a správu týchto zariadení. Vytvorenie centrálnej databázy umožní nielen lepšiu kontrolu kvality vypúšťaných vôd, ale aj efektívne mapovanie a evidenciu umiestnenia jednotlivých čistiarní. Tento prístup by zároveň zlepšil proces inšpekcií a umožnil zber a spracovanie údajov, čo by viedlo k lepšej udržateľnosti a ekologickej stabilite v oblasti odpadového hospodárstva.

Pre úspešnú realizáciu tejto platformy je nevyhnutná spolupráca medzi zainteresovanými stranami. Zapojenie všetkých zainteresovaných strán do tvorby a implementácie systému zabezpečí, že platforma bude reflektovať potreby všetkých zúčastnených a prinesie maximálnu efektívnosť v oblasti správy odpadových vôd.

6. Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Programom na motiváciu a podporu zvyšovania kvality a efektívnosti vedecko-výskumnej činnosti mladých vedecko-výskumných pracovníkov s názvom projektu Optimalizácia prevádzky domových čistiarní odpadových vôd. Túto prácu podporila aj Vedecká grantová agentúra MŠVVaŠ SR a Slovenská akadémia vied v rámci projektu VEGA 1/0682/23 s názvom Výskum interakcie kvality povrchového odtoku a kvality podzemných vôd v urbanizovaných územiach spolufinancované Agentúrou na výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-22-0564 s názvom Analýza vplyvov kvality vypúšťaných vôd z domových ČOV na miestne zdroje pitnej vody.

7. Referencie

- [1] LIBRALATO G., GHIRARDINI A. V., AVEZZÙ F. *To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management*, Journal of Environmental Management, vol. 94, no. 1, 2012, pp. 61–68., ISSN 0301-4797
- [2] Development plan of public water supply and public sewerage for the territory of the Slovak Republic [online]. [cited 2023-11-20]. Available: <<https://www.minzp.sk/voda/verejne-vodovodyverejne-kanalizacie/>>
- [3] BÁBA, Barnabás; KARCHES, Tamás. *Sizing of a decentralized wastewater treatment unit supported by biokinetic modeling*. Pollack Periodica, 2020, vol. 15, no. 1: pp. 103-111., ISSN 1788–1994
- [4] GYÖRKI, Gábor; PÁLNÉ SZÉN, Orsolya; KNISZ, Judit. *Impact of maintenance on domestic wastewater treatment systems*. Pollack Periodica, 2023, vol. 18, no. 2: pp. 60-65. ISSN 1788–1994
- [5] HRUDKA, Jaroslav, et al. *MANAŽMENT DECENTRALIZOVANÉHO ČISTENIA ODPADOVÝCH VÔD*. KOMVY 2022, 2022, pp. 13-14., ISBN 978-80-227-5209-1
- [6] Terms and Definitions of the Urban Wastewater Treatment Directive (91/271/EEC) [online]. [cit. 2023-11-3]. Available: <<https://ec.europa.eu/environment/water/waterurbanwaste/info/pdf/terms.pdf>>
- [7] Act No. 364/2004 Coll. of 13 May 2004 on water and amending Act No. 372/1990 Coll. of the Slovak National Council on offences, as amended (Water Act).
- [8] STATISTICAL OFFICE OF THE REPUBLIC OF SRP, (2023). DataCube. [online] Available: <https://datacube.statistics.sk/#!/view/en/VBD_SK_WIN/vh3001rr/v_vh3001rr_00_00_en>
- [9] Connecting the population to public sewerage [online] 16.12.2021 © 2022 www.enviroportal.sk [cited 2023-10-20]. Available: <<https://www.enviroportal.sk/indicator/detail?id=1276.>>

Lynda Paulíková

Studijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 3. ročník

POROVNANIE METÓD ODHADU VRCHOLOVÉHO SÚČINITEĽA ODTOKU V NÍŽINNÝCH LOKALITÁCH (PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA: ZÁPADNÉ SLOVENSKO)

COMPARISON OF THE METHODS OF ESTIMATING THE PEAK RUNOFF COEFFICIENT IN LOWLAND LOCATIONS (CASE STUDY: WESTERN SLOVAKIA)

Abstract

The presented study aims to analyse peak runoff coefficients (φ_N) in small catchments of Slovakia using two estimation methods. The first method, the so-called "indirect method", is based on the rational formula. This method estimates the peak runoff coefficient in ungauged small catchments for a return period once in 100 years. For the estimation, eight small catchments from west Slovakia were selected. The second method is based on direct flow observations from direct measurements of rainfall-runoff data series over 33 years in the selected small watershed Parná - Horné Orešany. The estimated peak runoff coefficients are used to compare the two methods and their application in practice.

Kľúčové slová / Key Words

Vrcholový súčiniteľ odtoku; racionálny vzorec, malé povodie; IDF krivky

1. Úvod

Koncepcia tvorby odtoku na povodí je predmetom diskusií už od antiky. Mnoho filozof, napríklad Aristoteles (384 – 323 p. n. l.) či Seneca (3 p. n. l. – 65 n. l.) riešili otázku tvorby odtoku v krajine [1,2]. Prvé kroky, ktoré zohľadňujú všetky nám známe parametre pre výpočet odtoku sa objavili až v polovici 19. stor. v Írsku, z kade sa rozšírila do celého sveta. Takzvaná racionálna rovnica, ktorá je zásluhou viacerých inžinierov a vedcov, uvažuje pri tvorbe odtoku so základnými charakteristikami povodia [3,4,5,6,7]. Najväčšiu neistotu v rovnici predstavuje najmä súčiniteľ odtoku (φ_N). Na rozdiel od ostatných vstupných údajov, ako je čas koncentrácie (t_c), návrhová intenzita dažďa (i_{IN}) či plocha povodia (F), ktoré sa dajú určiť podľa rôznych metód [8,9,10,11,12,13], zostáva súčiniteľ odtoku naďalej na subjektívnom uvážení užívateľa. Napriek tomu, že existujú i v súčasnosti metódy a tabuľkové údaje [14,15,16,17,18,19,20,21,22] na dosadenie premennej φ_N (alebo jej alternatívy) do vzorca, zostávajú výsledné odhady so značnou neistotou. Vstupujúca hodnota nemusí v sebe zahŕňať všetky vlastnosti povodia, ktoré ovplyvňujú výsledný odtok v danom povodí. Hlavne malé povodia sú citlivé na výber vstupných údajov [23]. Existuje aj viacero štúdií, ktoré potvrdzujú, že nasýtenosť pôdy [14,24,25], nadmorská výška a sklon povodia [21,24,26] ovplyvňujú výsledný odtok z povodia. Odhadovanie odtoku na základe fyzickej či priestorovej podobnosti povodí sa ukazuje byť tiež nie vždy ako správny krok, nakoľko povodia nemusia byť hydrologicky podobné [27,28]. Trvanie návrhového dažďa a povodňovej vlny sa menia v čase a priestore v závislosti od polohy povodia [26,29], pričom výsledný hydrogram môže pozostávať aj z vody z predošlých zrážok (ako následok nasýtenia povodia) [30]. Pre niektoré enviromenty to však nemusí platiť [30,31,32]. Niektoré štáty preto upúšťajú od racionálnej rovnice a zameriavajú sa radšej na priamy odhad súčiniteľa odtoku odvodený z časových radov pozorovania zrážkovo-odtokových procesov v povodí. Nevýhodou týchto metód [32,33,34,35,36] je, že v mnohých oblastiach chýbajú dáta na základe ktorej by sa dala

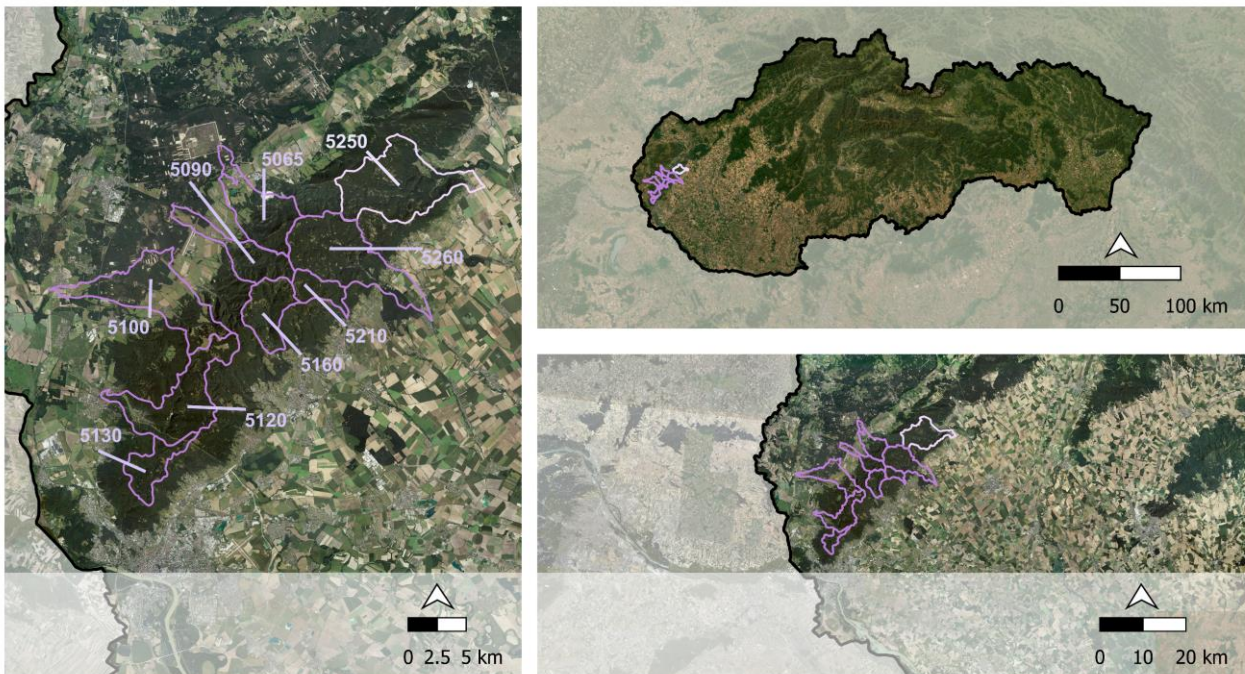
postaviť analýza. Taktiež nie sú stále ešte úplne známe všetky fyzické procesy, ktoré v povodí prebiehajú pri extrémnych javoch [37].

Cieľom predloženej štúdie je preto zamerať sa na odhad súčiniteľa odtoku nepriamou metódou (t.j. racionálny vzorec) a priamou metódou (štatistické spracovanie časových radov údajov) na malých povodiach Slovenska. Výsledné odhady sú na záver porovnané.

2. Vstupné údaje

Predloženú analýzu je možné rozdeliť na dve časti. Prvá časť štúdie sa zaoberá využitím nepriamej metódy v praxi pre dobu opakovania $N = 100$ rokov. Metóda vychádza zo základných princípov racionálnej rovnice, kde ako vstupné údaje slúžia čas koncentrácie (t_c); návrhová intenzita dažďa ($i_{t,N}$); plocha povodia (F) a maximálny odtok (Q_N). Pre účely výpočtu storočného vrcholového súčiniteľa odtoku nepriamou metódou vstupovali do prvej časti štúdie osem povodí lokalizované na západe Slovenska. Povodia sa rozprestierajú v oblasti Malých Karpát v západnej časti Trnavskej pahorkatiny. Prevažnú časť povodí tvorí krajina, ktorú môžeme charakterizovať ako poľnohospodársko-vidieckú (viď Obrázok 1).

Druhá časť štúdie sa zaoberá využitím priamej a nepriamej metódy v praxi. Predmetom analýzy je vidiecke povodie 5250: Horné Orešany – Parná (Obrázok 1). Jednotlivé parametre povodí (veľkosť plochy, priemerný sklon, priemerná nadmorská výška a odhadnutý čas koncentrácie odhadnutý podľa Kirpicha [38,39] sú zobrazené v Tabuľke 1.



Legenda:

- hranica Slovenskej republiky
- Povodia
- Povodie Horné Orešany - tok Parná

Obrázok 1: Zobrazenie povodí na území Slovenska

Tabuľka 1: Charakteristiky analyzovaných povodií

Číslo povodia	Povodie	Tok	Priemerná nadmorská výška [m n. m.]	Priemerný sklon [°]	t_c - Kirpich (1940) [min]	Plocha [km ²]
5065	Rohožník	Rudávka	353.42	1.23	69.42	26.1
5090	Kuchyňa	Malina	394.77	10.22	32.38	7.94
5100	Láb	Močiarka	257.67	3.29	89.32	47.1
5120	Borinka	Stupávka	446.37	8.06	80.54	33.76
5130	Spariská	Vydrica	383.55	7.32	35.86	7.25
5160	Pezinok	Blatina	483.17	11.94	35.56	19.09
5210	Modra	Stolicny potok	483.44	8.09	41.35	9.88
5250	Horné Orešany	Parná	388.29	12.27	62.17	45.59
5260	Píla	Gidra	381.23	7.48	39.48	32.95

Dôvodom selekcie vybraných povodií je ich veľkosť a charakter krajiny. Predmetom výskumu sú malé povodia, ktoré disponujú odlišnými zrážkovo-odtokovými procesmi ako veľké povodia. Zobrazené povodia nie sú väčšie ako 50 km². Zároveň podobný charakter krajiny má pomôcť eliminovať niektoré javy, ktoré momentálne nevieme v analýze spracovať (údaje o snehovej pokrývke, nasýtenosť pôdy z predošlých zrážok a pod.).

Pri priamej metóde sme analyzovali malé povodie 5250: Horné Orešany – Párna. Boli použité zrážkovo-odtokové údaje od 1. januára 1989 do 31. decembra 2021, pričom zrážky boli merané v dennom kroku a prietok v hodinovom kroku. Údaje boli rozdelené na letnú sezónu (mesiace V. – X.) a zimnú sezónu (mesiace I. – IV. a XI. – XII.). Dáta boli poskytnuté od SHMÚ zo zrážkomernej stanice Dolné Orešany. V každom roku bol vyselektovaný kulminačný prietok a jeho základné charakteristiky, akým sú objem vlny, začiatok a koniec povodňovej udalosti. Bližšie je postup opísaný v zdroji [40,41]. Spolu bolo vyselektovaných 33 vln pre každú sezónu.

Vplyvom topiaceho snehu či nasýtenosťou pôdy nebolo možné použiť všetky vyselektované vlny, nakoľko údaje o zrážkach chýbali alebo nezodpovedali skutočnému vzniku vlny. Pri letnej sezóne sa štatisticky spracovalo 32 vln a pri zimnej sezóne 30 kulminačných prietokov.

3. Metodika

Predmetom analýzy je odhadnutie vrcholového súčiniteľa odtoku za použitia nepriamej metódy (vychádza z racionálneho vzťahu) a priamej metódy (štatistické spracovanie pozorovaných zrážkovo-odtokových údajov) a ich následné porovnanie.

Nepriama metóda vychádza zo základného racionálneho vzorca pre výpočet odtoku zobrazený nižšie [3,23,42].

$$Q_N = F * i_{D,N} * \varphi_{V,N} \quad (1)$$

Kde:

Q_N – kulminačný prietok pre doba opakovania N [m³*s⁻¹],

F – plocha povodia [km²],

$i_{D,N}$ – intenzita návrhového dažďa pre periodicitu N [mm*min⁻¹],

$\varphi_{V,N}$ – vrcholový súčiniteľ odtoku [-].

Pri stanovení intenzity návrhového dažďa sa použili tri metódy: rovnica Urcikán-Horváth (výsledok interpolácie troch najbližších staníc) [42,43,44], odčítanie tabuľkových údajov z

Národného klimatického programu SR NKP 17/22 (t.j. odčítanie z IDF krivky z najbližšej vodomernej stanice Smolenice) [13] a použitie rastrových máp z Digitálneho atlasu návrhovej intenzity dažďa (odčítane z centroidu povodia) [45], pričom pri odhade sa vychádzalo z doby trvania kritického návrhového dažďa (t_c) určená podľa Kirpicha (1940) [38,39]. Smolenice.

Druhá časť predloženej štúdie je venovaná výpočtu vrcholového súčiniteľa odtoku nepriamou a priamou metódou.

Pri nepriamej metóde boli použité kulminačné prietoky (Q_N) pre dobu opakovania $N = 2, 5, 10, 20, 50$ a 100 rokov zvlášť pre letnú a zimnú sezónu. Údaje boli poskytnuté od SHMÚ.

Pre výpočet vrcholového súčiniteľa odtoku priamou metódou bol použitý vzorec vychádzajúci zo základnej trojuholníkovej schematizácie povodňovej vlny (vzorec 2 -3 [17,23]). Pri použití priamej metódy bol celkový objem kulminačného odtoku (φ_0) spracovaný v programe FloodSep (verzia 1.0) [41].

$$\varphi_0 = \frac{O_V}{H_Z} \quad (2)$$

$$\varphi_{v,N} = 2 * \frac{\varphi_0}{1 + \left(\frac{t_p}{t_v}\right)} \quad (3)$$

Kde:

O_V - celkový kulminačný objem odtoku - priamy [m^3*s^{-1}],

H_Z - príčné zrážky [mm],

$\varphi_{v,N}$ - vrcholový súčiniteľ odtoku [-],

φ_0 - objemový odtokový súčiniteľ odtoku [-],

t_v - trvanie vzostupnej vetvy prietokovej vlny [hod],

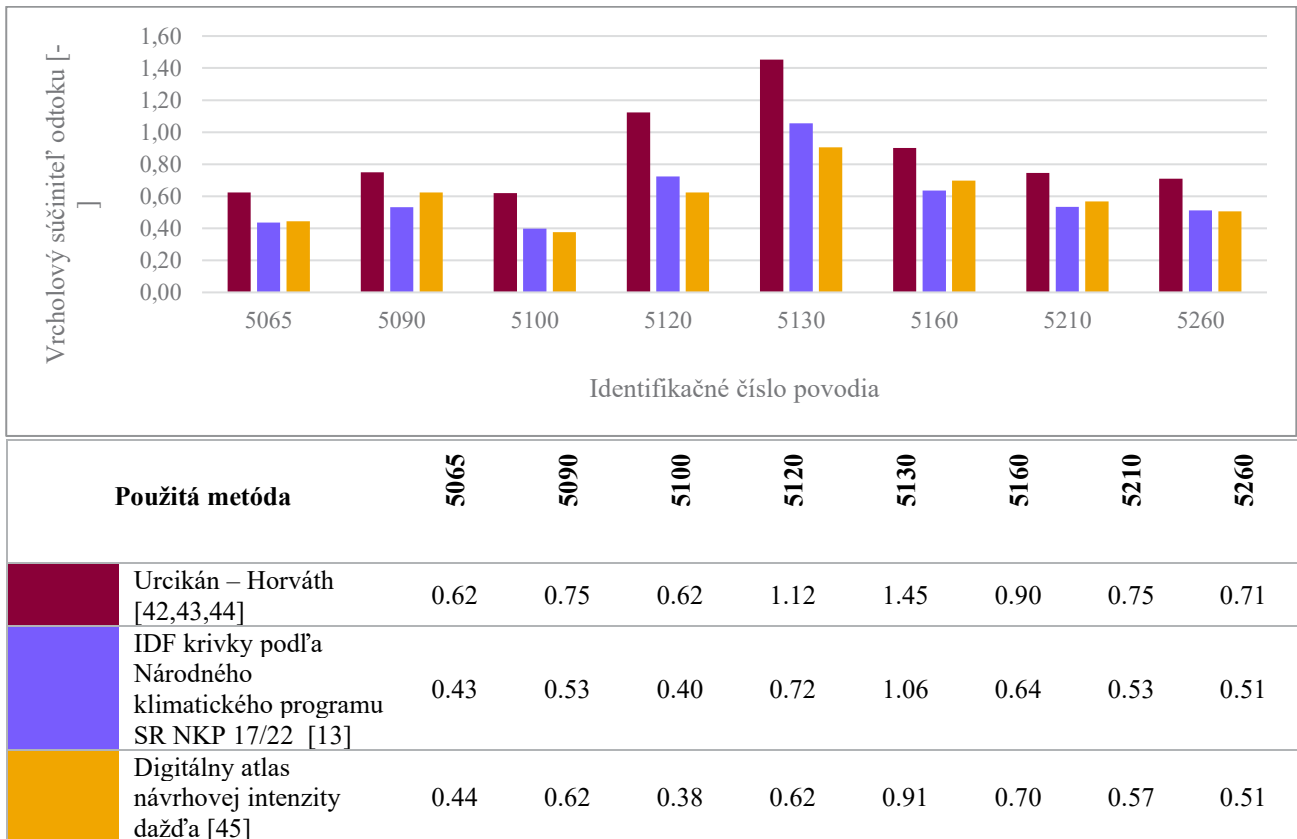
t_p - trvanie zostupnej vetvy prietokovej vlny [hod].

Výsledné hodnoty boli ďalej štatisticky spracované. Pre odhad $\varphi_{v,N}$ bolo použité Johnsonovo rozdelenie pravdepodobnosti, nakoľko sa distribúcií dajú zadať limitné hodnoty (v našom prípade odtok od 0 do 100%) .

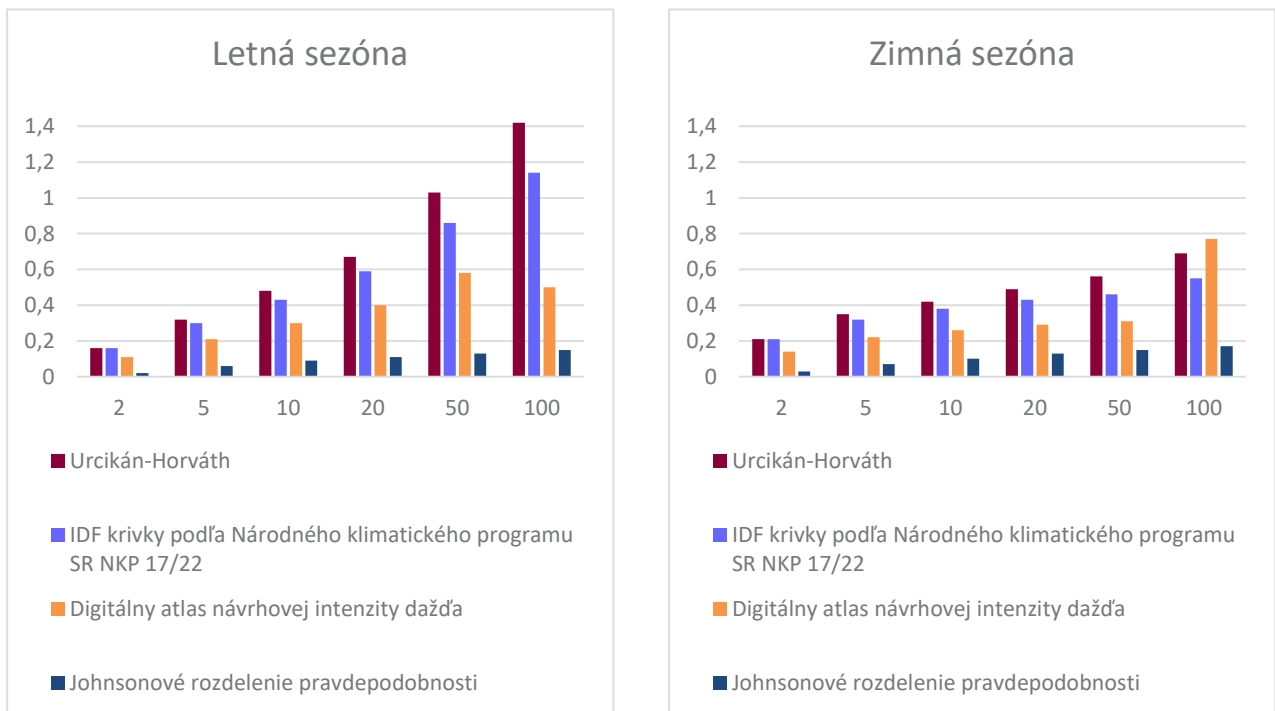
4. Výsledky práce

Výsledky prvej časti štúdie sú zobrazené na Obrázok 2. Výsledné hodnoty sa pohybujú v rozpätí od 38 do 145 %. Najväčšieho odtoku pri tom dosahuje u všetkých troch metódach povodia 5130: Spariská – Vydrica. Z celkového pohľadu sa výška odtoku zvyšuje priblížením povodia k hraniciam štátu. Tieto údaje môžu byť výsledkom neúplných informácií pri odhade intenzity návrhového dažďa, nakoľko do spracovaných dát vstupovali len údaje z územia Slovenska. Najväčšej variability pri tom dosahuje metóda Urcikán – Horváth, ktorá je limitovaná len na 68 staníc na Slovensku [13,43,44,45].

Pre porovnanie výsledkov nepriamej a priamej metódy odhadu vrcholového súčiniteľa odtoku bol vytvorený graf zobrazený na Obrázok 3. V grafe je možné vidieť, že nepriama metóda nadhodnocuje výsledné hodnoty oproti priamemu odhadu. Rozdiel v niektorých prípadoch je viac ako trojnásobný. Zo všeobecného pohľadu je možné si všimnúť, že nepriama metóda nadhodnocuje najmä letnú sezónu.



Obrázok 2: Odhadnutý vrcholový súčiniteľ odtoku pre dobu opakovania $N = 100$ rokov



Obrázok 3: Odhadnutý vrcholový súčiniteľ odtoku priamou a nepriamou metódou

5. Záver

Predložená štúdia poukázala na rozdiely pri odhade vrcholového súčiniteľa odtoku za použitia dvoch rozdielnych postupov. Problémom nepriamej metódy je jej jednoduchosť, ktorá spravila zo základnej rovnice pre výpočet drenážneho odtoku na malom území [3] všade aplikovateľnú metódu, ktorá zahŕňa v sebe veľa nejasností. Niektoré fyzikálne procesy, ktoré sa podieľajú na celkovom odtoku vody z povodia nemajú dostatočný priestor v rovnici, prípadne sú úplne zanedbané. To vedie k nadhodnoteniu výsledného odhadu a niekedy nereálnym odhadom vrcholového súčiniteľa odtoku väčším ako 1. Pri použití IDF kriviek môžu výsledné nadhodnotenú hodnoty predstavovať zaobalenú čiaru hodnôt. Rovnica Urcikán-Horváth môže naopak poukazovať na neúplnosť dát, nakoľko výpočtové parametre sú spracované len pre niektoré stanice na Slovensku. Digitálny atlas návrhových intenzít dažďa zobrazuje najnižšie výkyvy zo všetkých troch metód odhadu intenzity dažďa.

Výsledky priamej metódy sa viacej približujú predpokladanej skutočnosti, nakoľko v sebe zahŕňa nepriamo aj údaje o charaktere povodia z dlhodobého hľadiska. Nemôžeme ich však považovať za úplne dáta. Napriek tomu, že odhadnuté výsledky predložené v texte sa viacej približujú realite, je otázne do akej miery sa približujú možným extrémnym javom na povodí. Ďalším problémom pre odhad vrcholového súčiniteľa odtoku ostáva skutočnosť, že priame merania zrážok a odtoku v krátkom časovom kroku nie sú dostupné pre každé povodie na Slovensku a preto potreba nepriameho odhadu je stále aktuálna.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporená projektom VEGA 1/0782/21. Autori sú veľmi vďační za podporu výskumu.

Literatúra

[1] BRUTSAERT, W. *Hydrology: An Introduction* [online]. 1. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 618 s. ISBN 9780521824798.

[2] DUFFY, C.J. The terrestrial hydrologic cycle: an historical sense of balance. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* [online]. 2017. Vol. 4, no. 4. [cit. 2024-05-16]. . Dostupné na internete:

<https://www.researchgate.net/publication/315830521_The_terrestrial_hydrologic_cycle_an_historical_sense_of_balance_The_terrestrial_hydrologic_cycle>.

[3] MULVANY, T.J. *On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and of flood discharges in a given catchment*. [s.l.]: Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 1851. 19–31 s.

[4] BISWAS, A. History of Hydrology - Chapter 13: The Nineteenth Century. In *History of Hydrology* [online]. Amsterdam: North-Holland Publishing, 1970. s. 224–265. [cit. 2024-05-28]. ISBN 720480183. Dostupné na internete: <<https://thirdworldcentre.org/wp-content/uploads/2022/07/History-of-Hydrology-Asit-K.-Biswas.pdf>>.

[5] DOOGE, J. C. I. The development of hydrological concepts in Britain and Ireland between 1674 and 1874. In *Hydrological Sciences Bulletin* [online]. 1974. Vol. 19, no. 3, s. 279-302. [cit. 2024-05-23]. Dostupné na internete: <<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626667409493917>>.

[6] KUICHLING, E. The Relation Between the Rainfall and the Discharge of Sewers in Populous Districts. In *American Society of Civil Engineers. Transactions* . 1889. Vol. 20, no. 1, s. 60.

[7] LLOYD-DAVIES, D. E. The elimination of storm water from sewerage systems. In *Minutes of proceedings of the Institution of Civil Engineers (London)* . 1906. Vol. 164, s. 41–67.

- [8] RAVAZZANI, G. et al. Review of Time-of-Concentration Equations and a New Proposal in Italy. In *Journal of Hydrologic Engineering* [online]. 2019. Vol. 24, no. 10, s. 4019039. Dostupné na internete: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001818>>.
- [9] EVANGELISTA, G. et al. Dimensional analysis of literature formulas to estimate the characteristic flood response time in ungauged basins: A velocity-based approach. In *Journal of Hydrology* [online]. 2023. Vol. 627, s. 130409. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169423013513>>.
- [10] AZIZIAN, A. Uncertainty Analysis of Time of Concentration Equations based on First-Order-Analysis (FOA) Method. In *American Journal of Engineering and Applied Sciences* [online]. 2018. Vol. 11, s. 327–341. [cit. 2024-08-05]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/324327890_Uncertainty_Analysis_of_Time_of_Concentration_Equations_based_on_First-Order-Analysis_FOA_Method>.
- [11] KUPČO, M. et al. Problém určovania intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku. In *Meteorologický časopis* [online]. 2021. Vol. 24, no. 1, s. 3–10. [cit. 2024-08-02]. Dostupné na internete: <https://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/MET_CASOPIS/1628855854_MC_2021-1.pdf>.
- [12] ONDERKA, M. et al. Vzťahy medzi intenzitou, trvaním a frekvenciou krátkodobých dažďov určené pomocou bayesovskej inferencie parametrov GEV rozdelenia (Relationships between intensity, duration and frequency of short-term rains determined by Bayesian inference of GEV distribution parameters). In *Meteorologické zprávy* [online]. 2022. Vol. 75, s. 81–88. [cit. 2024-08-02]. Dostupné na internete: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2022/MZ_03_2022.pdf>.
- [13] ONDERKA, M. - PECHO, J. Národný klimatický program Slovenskej republiky, Zväzok 17/22. Návrhové hodnoty intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku - lokálne odhady. Bratislava: Slovak Hydrometeorological Institute, 2022.
- [14] LAPIDES, D.A. et al. Implications of Distinct Methodological Interpretations and Runoff Coefficient Usage for Rational Method Predictions. In *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* [online]. 2021. Vol. 57, no. 6, s. 859–874. Dostupné na internete: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1752-1688.12949>>.
- [15] LAPIDES, D.A. et al. Rational Method Time of Concentration Can Underestimate Peak Discharge for Hillslopes. In *Journal of Hydraulic Engineering* [online]. 2021. Vol. 147, no. 10, s. 6021014. Dostupné na internete: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001900>>.
- [16] WORKING PARTY ON THE HYDRAULIC DESIGN OF STORM SEWERS Volume 1. Principles, methods and practice. In *Design and analysis of urban storm drainage : the Wallingford procedure* [online]. [s.l.]: National Water Council, Department of the Environment, 1983. s. 173. [cit. 2024-08-06]. ISBN 0901090271. Dostupné na internete: <https://eprints.hrwallingford.com/37/1/Volume1_principles_methods_practice.pdf>.
- [17] HRÁDEK, F. *Aplikace genetického vzorce intenzivního typu pro výpočet kulminačných průtoků Q100 na malých povodí*, Katedra základů vodního hospodářství. Praha: AF VŠZ, 1989.
- [18] UNITED STATES. SOIL CONSERVATION SERVICE [online]. 1972. [cit. 2024-06-14]. Dostupné na internete: <<https://ia601205.us.archive.org/27/items/CAT71334647003/CAT71334647003.pdf>>.
- [19] NRCS Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds. In *USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55* [online]. 1986. [cit. 2024-05-20]. Dostupné na internete: <https://books.google.sk/books?id=LiJ46ycWdlQC&printsec=frontcover&hl=sk&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>.
- [20] BAIAMONTE, G. SCS Curve Number and Green-Ampt Infiltration Models. In *Journal of Hydrologic Engineering* [online]. 2019. Vol. 24, no. 10, s. 4019034. Dostupné na internete: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001838>>.

- [21] BAIAMONTE, G. A rational runoff coefficient for a revisited rational formula. In *Hydrological Sciences Journal* [online]. 2020. Vol. 65, no. 1. [cit. 2024-06-05]. Dostupné na internete: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2019.1682150>>.
- [22] PETROSELLI, A. - GRIMALDI, S. Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. In *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques* [online]. 2015. Vol. 60. [cit. 2024-08-07]. Dostupné na internete: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2014.880546#d1e209>>.
- [23] KOHNOVÁ, S. et al. On the regionalization of runoff coefficient for the rational formula in small catchments of Slovakia. In *Acta Hydrologica Slovaca* [online]. 2005. Vol. 6, no. 1, s. 107–116. Dostupné na internete: <http://www.uh.sav.sk/ah_articles/2005_6_1_Kohnova_107.pdf>.
- [24] MERZ, R. - BLÖSCHL, G. A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. In *Water Resources Research* [online]. 2009. Vol. 45, no. 1, s. n/a-n/a. Dostupné na internete: <<https://doi.org/10.1029/2008WR007163>>.
- [25] CHEN, X. et al. Spatial and temporal variability of event runoff characteristics in a small agricultural catchment. In *Hydrological Sciences Journal*. 2020.
- [26] CERETTI, L. *The runoff coefficient for a T-year design flood, using data from Austrian catchments* [online]. Torino: Politecnico di Torino, 2023. Dostupné na internete: <<https://webthesis.biblio.polito.it/secure/26263/1/tesi.pdf>>.
- [27] OUDIN, L. et al. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? In *Water Resources Research* [online]. 2010. Vol. 46, no. 11, s. n/a-n/a. Dostupné na internete: <<https://doi.org/10.1029/2009WR008887>>.
- [28] OUDIN, L. et al. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. In *Water Resources Research* [online]. 2008. Vol. 44, no. 3. Dostupné na internete: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007WR006240>>.
- [29] TARASOVA, L. et al. Causative classification of river flood events. In *WIREs Water* [online]. 2019. Vol. 6, no. 4, s. e1353. Dostupné na internete: <<https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wat2.1353>>.
- [30] BERGHUIJS, W.R. - ALLEN, S.T. Waters flowing out of systems are younger than the waters stored in those same systems. In *Hydrological Processes* [online]. 2019. Vol. 33, no. 25, s. 3251–3254. Dostupné na internete: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.13569>>.
- [31] GALLART, F. et al. Technical note: An improved discharge sensitivity metric for young water fractions. In *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 2020. Vol. 24, no. 3, s. 1101–1107. Dostupné na internete: <<https://hess.copernicus.org/articles/24/1101/2020/>>.
- [32] GIANI, G. et al. A Practical, Objective, and Robust Technique to Directly Estimate Catchment Response Time. In *Water Resources Research* [online]. 2021. Vol. 57, no. 2, s. e2020WR028201. Dostupné na internete: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020WR028201>>.
- [33] FISCHER, S. et al. A statistics-based automated flood event separation. In *Journal of Hydrology X* [online]. 2021. Vol. 10. [cit. 2024-05-23]. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589915520300213?via%3Dihub>>.
- [34] MERZ, R. et al. Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. In *Journal of Hydrology* [online]. 2006. Vol. 331, no. 3, s. 591–604. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406003192>>.
- [35] ZHANG, Q. et al. Automatic procedure for selecting flood events and identifying flood characteristics from daily streamflow data. In *Environmental Modelling & Software* [online]. 2021. Vol. 145, s. 105180. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481522100222X>>.

- [36] FISCHER, S. - SCHUMANN, A. *Type-Based Flood Statistics. An Interlink Between Stochastic and Deterministic Flood Hydrology* [online]. . [s.l.]: Springer Cham, 2023. 275 s. ISBN 978-3-031-32710-0.
- [37] BLÖSCHL, G. et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. In *Hydrological Sciences Journal* [online]. 2019. Vol. 64, no. 10, s. 1141–1158. Dostupné na internete: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>>.
- [38] KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. In *Journal of Civil Engineering* . 1940. Vol. 10, no. 6, s. 362. .
- [39] CIVILWEB SPREADSHEETS. Kirpich Formula [online]. 2024. [cit. 2024-03-15]. Dostupné na internete: <<https://civilweb-spreadsheets.com/drainage-design-spreadsheets/runoff-and-rainfall-intensity-calculator-spreadsheet/kirpich-formula/>>.
- [40] LIOVÁ, A. et al. A methodology for the estimation of control flood wave hydrographs for the Horné Orešany reservoir. In *Acta Hydrologica Slovaca* [online]. 2022. Vol. 23, no. 1, s. 52–61. [cit. 2024-07-24]. . Dostupné na internete: <<http://www.ih.sav.sk/ah>>.
- [41] VALENT, P. FloodSep: užívateľská príručka. Verzia 1.0. Bratislava, 2019.
- [42] ANTAL, J. et al. *Hydrológia poľnohospodárskej krajiny*. 2. vyd. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2018. 371 s. ISBN 978-80-552-1820-5.
- [43] URCIKÁN, P. - IMRIŠKA, L. Stokovanie a čistenie odpadových vôd. Tabuľky na výpočet stôk. Bratislava: Alfa, 1986. 237 s.
- [44] URCIKÁN, P. - HORVÁTH, J. *Matematické závislosti intenzít krátkodobých náhradných dažďov v Slovenskej socialistickej republike*. . Bratislava: Slovak University of Technology, 1979. 113 s.
- [45] ONDERKA, M. et al. Digital atlas of rainfall design intensities in Slovakia. In [online]. 2023. Vol. 26, s. 27–38. [cit. 2024-03-16]. . Dostupné na internete: <https://www.shmu.sk/File/met_cas/RR/2023-1_3%20Onderka.pdf>.

Maksim Portnov¹
Water Resources Engineering, 4th year

Modro-zelená infraštruktúra a jej vplyv na odľahčovacie komory a kvalitu odľahčovaných vôd

Blue-green infrastructure and its impact on combined sewer overflowed chambers and the quality of overflowed waters

Abstract

The increasing frequency of extreme rainfall events due to climate change poses significant challenges to urban drainage systems, particularly in cities that rely on combined sewer systems. Combined sewer systems collect rainwater runoff, domestic sewage, and industrial wastewater into a single pipe that normally transports all wastewater to a treatment plant. However, during periods of heavy rainfall, the volume of runoff can exceed the system's capacity. When this occurs, a mix of untreated stormwater and wastewater is discharged directly into nearby water bodies, an event known as a combined sewer overflow. This paper investigates the role of blue-green infrastructure in mitigating the frequency and impact of combined sewer overflows. By integrating natural and semi-natural systems such as green roofs, permeable pavements, rain gardens, and wetlands into urban environments, blue-green infrastructure enhances water retention and filtration, reducing stormwater runoff and the pollutant load. The research assesses the effects of blue-green infrastructure on both the quantity and quality of combined sewer overflow discharges, drawing on case studies and simulations. The findings suggest that blue-green infrastructure can significantly improve urban water management, decrease overflow events, and enhance the quality of water entering ecosystems, contributing to healthier urban environments.

Kľúčové slová

Čistiareň odpadových vôd (ČOV), modro-zelená infraštruktúra, odľahčovacie komory (OK), odľahčovacie vody (OV), povrchový odtok.

1. Úvod

Urbanizácia a klimatické zmeny v dnešnej dobe výrazne zaťažujú jednotnú stokovú sústavu. Táto sústava, ktorá zbiera dažďovú vodu, splaškovú vodu z domácností a priemyselnú odpadovú vodu do jedného potrubia, obvykle prepravuje všetku odpadovú vodu do čistiarne odpadových vôd (ČOV). Počas intenzívnych alebo dlhotrvajúcich dažďov však môže kapacita verejnej kanalizácie byť prekročená, čo vedie k zvýšeniu odľahčovaných vôd (OV). V takýchto prípadoch je nezriedená dažďová voda spolu so splaškami priamo vypustená do prírodných vodných tokov, čo predstavuje významné riziko pre životné prostredie [1].

Zvyšujúca sa frekvencia silných dažďov v dôsledku klimatických zmien zhoršuje výskyt týchto OV. Tie nielenže prispievajú k znečisteniu riek, jazier a pobrežných oblastí, ale aj poškodzujú ekologické zdravie vodných systémov a znižujú kvalitu mestského života.

Modro-zelená infraštruktúra ponúka inovatívne, na prírode založené riešenia pre správu mestských vôd. Integráciou prvkov, ako sú zelené strechy, priepustné chodníky, dažďové záhrady a konštruované mokrade, modro-zelená infraštruktúra znižuje odtok dažďovej vody priamo pri zdroji,

¹ Maksim Portnov, Mgr., Faculty of Civil Engineering STU in Bratislava, Department of Sanitary and Environmental Engineering, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

zlepšuje jej zadržanie a filtráciu. Tieto systémy napodobňujú prírodné procesy, čím zmiernujú záťaž na jednotnú stokovú sústavu a znižujú frekvenciu a intenzitu OV [2]. Okrem toho modro-zelená infraštruktúra prináša množstvo ďalších výhod, vrátane zlepšenia kvality ovzdušia, zvýšenej biodiverzity a zlepšenia kvality života v mestách.

Kvalita OV sa môže meniť v závislosti od viacerých faktorov, napríklad od zdroja pretečenej vody, od povahy kontaminantov a od stupňa riedenia. Vo všeobecnosti môžu pretečené vody obsahovať celý rad znečisťujúcich látok vrátane odpadových vôd, poľnohospodárskych odpadových vôd a priemyselného odpadu. Slovenská agentúra životného prostredia (SAŽP) pravidelne monitoruje kvalitu OV na území Slovenskej republiky (SR) a podáva správy o úrovni kontaminácie. Podľa najnovšej správy, ktorú zverejnila SAŽP, je väčšina OV na SR kontaminovaná baktériami, živinami a organickými látkami [3].

Vzhľadom na trvanie odľahčenia, ktoré sa môže pohybovať od niekoľkých minút do niekoľkých hodín, je potrebné nepretržité monitorovanie kvality vody, pretože tradičné metódy odberu vzoriek nepostačujú na presnú kvantifikáciu úrovni kontaminácie. Silné dažde spôsobujú častejšie problémy prevádzkovateľom kanalizácie a ČOV. V kombinovaných systémoch môže zaťaženie splaškami viesť k hydraulickému preťaženiu ČOV, keď sa zmenia podmienky prítoku [4].

Modro-zelená infraštruktúra prináša výhody, ako je zníženie zaťaženia jednotných stokových sústav, minimalizácia rizika odľahčovacích udalostí a zlepšenie kvality OV. Okrem toho pomáha regulovať teplotu v mestách, zmiernuje vplyvy tepelných ostrovov a podporuje zdravšie životné prostredie tým, že poskytuje priestor pre prírodu a rekreáciu.

2. Modro-zelená infraštruktúra v rámci moderného mesta

Modro-zelená infraštruktúra predstavuje prístup k urbanistickému plánovaniu, ktorý integruje prírodné a technické riešenia s cieľom podporiť udržateľné riadenie mestských vôd, zlepšiť kvalitu života a zmierniť negatívne dôsledky urbanizácie. Modro-zelená infraštruktúra kombinuje zelené prvky, ako sú stromy, rastliny a vegetácia, s modrými prvkami, ktoré zahŕňajú vodné útvary a vodné toky. Tento synergický systém pomáha zadržiavať a spracovávať dažďovú vodu priamo na mieste, čím zmiernuje tlak na jednotnú stokovú sústavu a znižuje riziko vzniku odľahčovacích komôr počas silných dažďov.

Dažďová voda v mestách často zachytáva rôzne znečisťujúce látky z povrchov, ako sú oleje, ťažké kovy a chemikálie, ktoré pochádzajú z ciest a budov. Zvyšujúce sa množstvo zrážok môže viesť k tomu, že sa do kanalizačných systémov dostáva viac týchto škodlivých látok. S rozvojom miest a narastajúcou urbanizáciou čelia existujúce verejné kanalizačné systémy výzvam v podobe spracovania stále väčšieho objemu dažďovej vody [5]. Výsledkom môžu byť častejšie záplavy a pretečenia splaškov, ktoré negatívne ovplyvňujú kvalitu vôd v mestskom prostredí.

Zároveň klimatická zmena vedie k čoraz intenzívnejším zrážkam, ktoré môžu rýchlo preťažiť existujúcu kanalizačnú infraštruktúru. Silné dažde môžu spôsobiť náhle preplnenie verejnej kanalizácie, čo vedie k záplavám, pri ktorých dažďová voda zaplavuje mestské oblasti bez toho, aby sa absorbovala alebo odvedla.

Klimatická zmena a mestská infraštruktúra majú teda významný vplyv na manažment dažďovej a odpadovej vody. Zmeny klímy prinášajú čoraz výraznejšie a nepredvídateľnejšie poveternostné podmienky, vrátane extrémnych zrážok a častejších výkyvov počasia. To má negatívne dôsledky na kanalizačné systémy, ktoré sa často nedokážu vyrovnáť s takýmito intenzívnymi nárazovými zrážkami [6]. Počas obdobia sucha sú mestá vystavené nedostatku vody, zatiaľ čo prudké búrky spôsobujú záplavy, ktoré poškodzujú mestskú infraštruktúru.

Jedným z riešení týchto problémov je koncept “špongiového mesta“. Tento model mestského rozvoja pomáha zmiernovať následky záplav a nedostatku vody tým, že mesto absorbuje a zadržiava dažďovú vodu, ktorú následne využíva. Týmto spôsobom špongiové mestá prispievajú k zlepšeniu životného prostredia, podpore biodiverzity a udržateľnému manažmentu vodných zdrojov.

Modro-zelená infraštruktúra ponúka ekologickejší a flexibilnejší prístup, ktorý umožňuje efektívne riadenie vody pri zdroji. Zadržiava dažďovú vodu, podporuje jej prirodzené vsakovanie a zlepšuje jej kvalitu predtým, ako sa dostane do jednotnej stokovej sústavy. Hlavné komponenty modro-zelenej infraštruktúry

Zelené strechy sú strešné konštrukcie pokryté vegetáciou, ktoré zadržiavajú dažďovú vodu a znižujú povrchový odtok. Okrem toho regulujú teplotu budov, čím znižujú náklady na klimatizáciu v horúcich obdobiach. Zelené strechy tiež prispievajú k zlepšeniu kvality vzduchu v mestách a vytvárajú priestor pre mestskú biodiverzitu [7].

Priepustné chodníky a cestné plochy umožňujú vode prenikať do pôdy, namiesto toho, aby sa hromadila na povrchu alebo tiekla do kanalizačného systému. Tieto povrchy znižujú objem dažďovej vody, ktorá preťažuje verejnú kanalizáciu alebo jednotnú stokovú sústavu, čím pomáhajú znižovať riziko vzniku odľahčovacích udalostí.

Dažďové záhrady sú špeciálne navrhnuté vegetačné plochy, ktoré sú schopné zachytávať dažďovú vodu z nepriepustných povrchov, ako sú chodníky, parkoviská a strechy. Tieto záhrady pomáhajú zlepšovať kvalitu vody filtráciou znečisťujúcich látok, ako sú sedimenty, ťažké kovy a organické látky, skôr než sa voda dostane do vodných tokov alebo jednotných stokových sústav [8].

Konštruované mokrade a prírodné retenčné oblasti slúžia na zadržiavanie väčších objemov vody počas dažďových udalostí. Tieto oblasti napodobňujú prirodzené ekosystémy, pričom poskytujú dôležité ekosystémové služby, ako je filtrácia vody, podpora biodiverzity a regulácia miestnej mikroklímy.

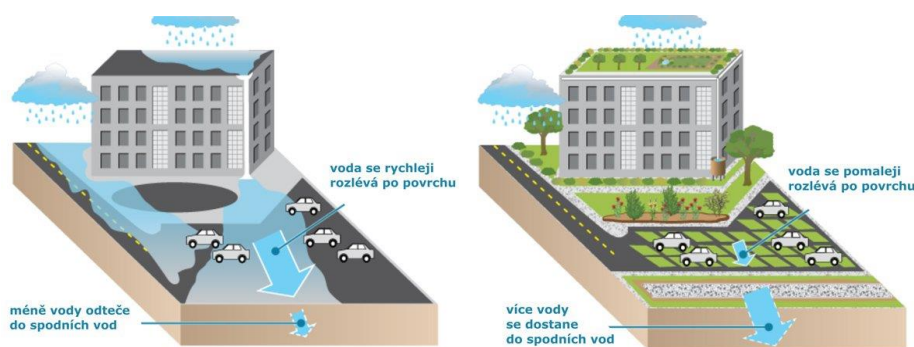


Figure 1: Výhody modro-zelenej infraštruktúry [8]

Výhody modro-zelenej infraštruktúry [8]

Zlepšenie správy dažďových vôd

Jednou z najväčších výhod modro-zelenej infraštruktúry je jej schopnosť efektívne riadiť dažďovú vodu a znížiť zaťaženie jednotnej stokovej sústavy. Zadržiavaním vody priamo na mieste a podporovaním jej prirodzenej infiltrácie sa výrazne znižuje objem odtoku, ktorý inak prispieva k odľahčovacím udalostiam.

Zlepšenie kvality vody

Modro-zelené systémy tiež pomáhajú zlepšiť kvalitu dažďovej vody tým, že odstraňujú znečisťujúce látky, ako sú oleje, ťažké kovy, chemikálie a sedimenty. Filtrácia cez vegetačné prvky a priepustné materiály znižuje množstvo škodlivých látok, ktoré by inak skončili v riekach, jazerách alebo pobrežných oblastiach.

Prínosy pre mestské prostredie

Okrem svojho primárneho účelu správy dažďovej vody prináša modro-zelená infraštruktúra aj množstvo ďalších prínosov pre mestské prostredie. Zlepšuje kvalitu ovzdušia, znižuje mestský tepelný ostrov, podporuje biodiverzitu a poskytuje zelené verejné priestory, ktoré prispievajú k vyššej kvalite života obyvateľov.

Podpora biodiverzity a ekosystémov

Modro-zelená infraštruktúra vytvára prostredie, ktoré podporuje miestnu faunu a flóru, čím sa zvyšuje biologická rozmanitosť mestských oblastí. Mokrade, dažďové záhrady a zelené strechy poskytujú útočisko pre hmyz, vtáky a ďalšie druhy, čím prispievajú k zachovaniu ekosystémov, ktoré by inak mohli byť zničené rozširujúcou sa urbanizáciou.

Aj keď modro-zelená infraštruktúra ponúka množstvo výhod, jej implementácia môže byť náročná. Mnohé mestá čelia problémom s priestorovými obmedzeniami, financiami a dlhodobou údržbou týchto systémov. Okrem toho je potrebné prekonávať aj legislatívne a plánovacie prekážky, aby bola modro-zelená infraštruktúra plne integrovaná do mestských plánov. Pre úspešné zavádzanie modro-zelenej infraštruktúry je kľúčové posilniť spoluprácu medzi samosprávami, súkromným sektorom, odborníkmi a verejnosťou.

3. Metódy, metodiky a stratégie odberu vzoriek

Potenciál zberu a manažmentu dažďovej vody na zmiernenie odtoku dažďovej vody bol v súčasnej spoločnosti do značnej miery prehliadaný. Toto prehliadnutie možno čiastočne pripísať miestnym podmienkam vrátane sezónnych výkyvov zrážok, súvisiacich nákladov na skladovanie, úpravu, modernizáciu vodných systémov, ako aj politických a inštitucionálnych prekážok [9].

Monitorovanie kvality vody je pre výskum veľmi dôležité, no okrem toho stojí za to analyzovať životné prostredie, ako aj mestskú infraštruktúru. Vzhľadom na kvalitu mestskej infraštruktúry bude množstvo prepadovej vody závisieť, čím nižšia infiltrácia, tým vyššie množstvo prepadovej vody. Ciele monitorovania OV [10]:

1. Identifikujte a kvantifikujte znečisťujúce látky vstupujúce do vodných útvarov počas povodní;
2. Poskytovať údaje pre dodržiavanie predpisov a vývoj účinných stratégií vodného hospodárstva;
3. Uľahčiť systémy včasného varovania a plánovanie núdzovej reakcie v oblastiach ohrozených záplavami;
4. Posúdiť vplyv OV na kvalitu vody, vodné organizmy a ekosystémy;
5. Podporovať hodnotenie účinnosti opatrení na kontrolu znečistenia počas povodní a po nich.

V dôsledku klimatických zmien dochádza k situáciám, kedy kanalizačné siete prestávajú plniť svoju funkciu. V súčasnosti sa pozornosť venuje tvorbe prírode blízkych podujatí. Účelom nie je odvádzať, ale zachytávať dažďovú vodu v mestách. Zadržovanie dažďovej vody v mestskej infraštruktúre zníži tlak na kanalizačnú sieť počas zrážok.

Každá nová spevnená plocha narúša prirodzený stav a neefektívne obhospodarovanie územia a má aj negatívny vplyv na hydrologické parametre urbanizovaného územia. OK patria medzi najdôležitejšie a zároveň najzložitejšie objekty stokovej siete z hydraulického, hygienického a konštrukčného hľadiska, pričom tieto jednotlivé aspekty sa navzájom ovplyvňujú a sú úzko prepojené. Hygienická a technická problematika OK je spojená s celkovým koncepčným riešením stokových sietí, následným návrhom technológie čistenia odpadových vôd a čistotou zberača.

Laboratórny rozbor zohráva kľúčovú úlohu pri určovaní koncentrácií špecifických znečisťujúcich látok v OV. Na meranie parametrov sa používajú štandardné analytické techniky: živiny (zlúčeniny dusíka a fosforu), ťažké kovy, pesticídy, organické znečisťujúce látky a mikrobiologické kontaminanty. Vzorky odobraté z terénu sa prepravujú do akreditovaných laboratórií, kde sa podrobujú prísny testom a analýze pomocou zavedených protokolov a zariadení.

Výskum sa uskutočnil v meste, ktoré má jednotnú stokovú sieť, percento infiltrácie je priemerné, okrem starého mesta je však vytvorené pomerne malé percento opatrení na zadržovanie vody v mestskej infraštruktúre počas zrážok. Na dosiahnutie maximálnych výsledkov a väčšieho počtu vzoriek musia byť poveternostné podmienky v súlade s tým, že bude veľké množstvo zrážok. Týmže bude pretekať do recipientu veľa OV.

Takto možno zlepšiť kvalitu výskumu v tejto oblasti. Analýzou údajov Slovenského hydrometeorologického ústavu možno konštatovať, že najviac denných zrážok spadne v období od mája do júna, v auguste, od októbra do decembra. Väčšina výdatných zrážok sa vyskytuje v týchto

mesiacoch, čo spôsobuje nadmerné zaťaženie kanalizačnej siete. Údaje o zrážkach zo Slovenského hydrometeorologického ústavu za rok 2022 možné vidieť na grafe, rok 2022 bol abnormálny rok s množstvom suchých dní a v tom roku boli v EÚ a iných krajinách abnormálne zrážky a sucho [11].

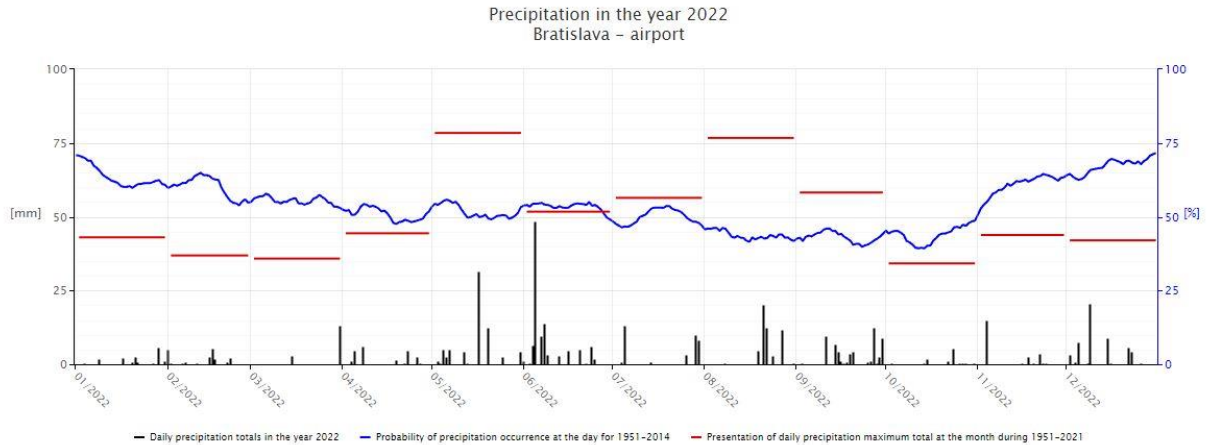


Figure 2: Údaje o zrážkach v roku 2022 [11]

Treba analyzovať kvalitu vody v recipiente, pomôže to určiť existujúce znečistenie v rieke skôr, ako ju zasiahne OV. Boli analyzované rôzne parametre ako pH, biochemická spotreba kyslíka počas 5 dní (BSK5), chemická spotreba kyslíka (CHSK) a vodivosť vody.

V rámci výskumu sa konkrétne miesto nezverejňuje, pretože tím nemá povolenie na jeho odhalenie. Išlo o podmienku stanovenú prevádzkovateľom zodpovedným za obsluhu vodných zariadení v oblasti. Celková vzdialenosť odberu vzoriek je 1 km. Na ceste boli dve OK s priemerom väčším ako 500 mm. Prvá bola umiestnená na pravej strane recipientu po prúde a druhá na ľavej strane. Je potrebné pripomenúť, že v deň odberu vzoriek neboli žiadne zrážky.

Podľa zákona 269/2010 Nariadenie vlády SR z údajov možno konštatovať, že všetky ukazovatele, ktoré boli získané počas prvej časti odberu vzoriek 12.12.2022 kvality vody v recipiente vyhovujú normám SR [12].

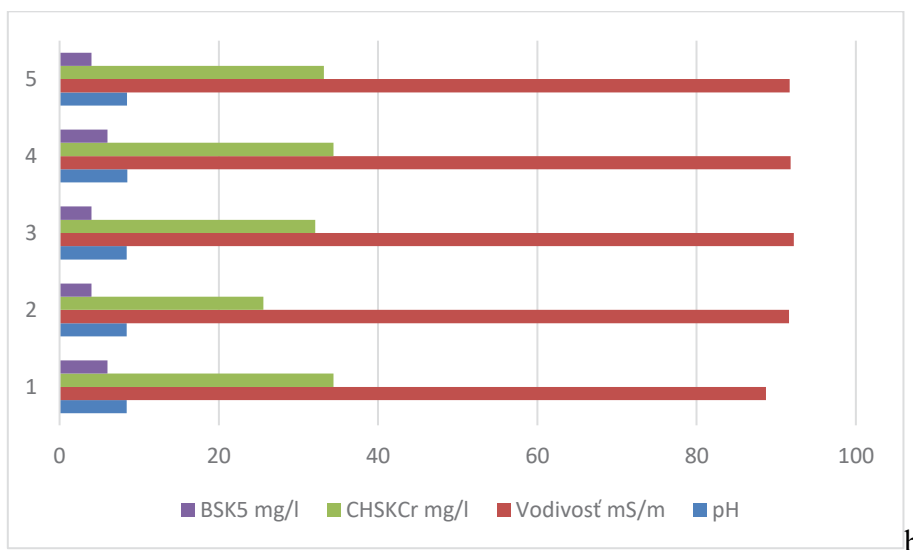


Figure 3: Kvalitatívne parametre vzoriek odobratých v 12/2022

Druhá časť výskumu zahŕňala odber vzoriek vody 10. novembra 2023, kde bolo odobratých osem vzoriek vody. Proces odberu vzoriek bol na tom istom mieste, kde sa vzorky odoberali v decembri minulého roku, tento proces je rozdelený do dvoch fáz odberu vzoriek. Celkovo bolo odobraných 8

vzoriek vody. Prvá etapa odberu vzoriek zahŕňa 6 vzoriek, ktoré boli odobraté počas prvých minút. Proces odberu vzoriek zahŕňa (3 vzorky vody):

- odber vzoriek vody z rieky nad OK (vzorka 1.1).
- odber vzoriek vody, ktorá tečie z OK (OV, vzorka 1.2).
- odber vzoriek vody po prúde OK (vzorka 1.3).

Potom sa tento proces zopakoval (3 vzorky, 2,1-2,3). Druhá etapa odberov pokračovala v oblasti druhého OK, čo je cca 700 m po prúde od prvej OK. Z tejto oblasti boli odobraté dve vzorky vody (vzorka 3.2, 3.3).

№	P	Cr	Pb	Zn	Mg	As
	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l
1,1	0,2	<0.005	<10	0	<0.005	12
1,2	0,2	0,01	13	0,1	0,035	<10
1,3	0,2	<0.005	<10	0	<0.005	<10
2,1	0,2	<0.005	<10	0	<0.005	<10
2,2	0,2	0,01	12	0,1	0,035	<10
2,3	0,2	<0.005	<10	0	<0.005	<10
3,1	0,4	0,01	<10	0,1	0,012	<10
3,2	0,4	0,01	<10	0,1	0,012	<10

Table 1: Kvalitatívne parametre vzoriek odobratých v 11/2023

Tieto ukazovatele zodpovedajú právnym normám, ktoré boli uvedené skôr. Výsledná tabuľka tiež ukazuje, že existuje malé množstvo znečistenia, ktoré bolo prijaté z OV. Znečistenie nie je výrazné. Tabuľka ukazuje, že vzorky 1.2 a 2.2, ktoré boli odobraté z OK, naznačujú, že je prítomná iná kontaminácia ako vzorky 1.1 a 2.1. Znečistenie je nepatrné a pri veľkom prietoku vody v rieke je zrejmé, že údaje zo vzoriek 1.3 a 2.3 sú podobné vzorkám 1.1 a 2.1. Na základe údajov získaných z tabuľky sa usudzuje, že OV pri výdatných zrážkach neznečisťuje životné prostredie.

Záver

Modro-zelená infraštruktúra predstavuje inovatívne a udržateľné riešenie pre výzvy, ktorým čelia mestské oblasti v dôsledku klimatických zmien a zvyšujúcej sa urbanizácie. Ako bolo preukázané v tejto práci, jej integrácia môže výrazne znížiť frekvenciu a objem odľahčovacích vôd, čím sa minimalizuje riziko znečistenia vodných tokov. Prvky, ako sú zelené strechy, priepustné povrchy, dažďové záhrady a mokrade prinášajú dodatočné environmentálne a spoločenské výhody, ako je zlepšenie kvality vzduchu, podpora biodiverzity a zvyšovanie kvality života v mestách.

Zároveň je zrejmé, že pre účinnú implementáciu modro-zelenej infraštruktúry je potrebná spolupráca rôznych zúčastnených strán, vrátane miestnych samospráv, urbanistov, ekológov a verejnosti. Investície do takýchto riešení môžu nielen riešiť problémy spojené s odľahčovacími vodami, ale aj dlhodobu podporovať udržateľný rozvoj mestských oblastí, ktorý bude odolný voči klimatickým zmenám.

Vzhľadom na rastúce problémy s preťažením verejnej kanalizácie, je modro-zelená infraštruktúra kľúčovou súčasťou adaptácie na klimatické zmeny a zabezpečenia zdravého a odolného mestského prostredia. Ďalší výskum v tejto oblasti môže pomôcť optimalizovať tieto systémy a zlepšiť ich integráciu v rôznych mestských prostrediach, čím sa ešte viac posilnia výhody, ktoré prinášajú pre životné prostredie a ľudí.

Okrem implementácie modro-zelenej infraštruktúry je kľúčové neustále monitorovanie OV a OK. Efektívne monitorovanie pomáha sledovať frekvenciu, objem a kvalitu OV a poskytuje základné údaje na posúdenie vplyvu zásahov a optimalizáciu výkonu existujúcich systémov. Monitorovanie

tiež umožňuje včasné odhalenie OV, čo umožňuje včasné úpravy infraštruktúry alebo postupov riadenia. Integráciou technológií monitorovania v reálnom čase môžu mestá nielen znížiť environmentálne riziká, ale aj zlepšiť rozhodovacie procesy, čím sa zabezpečí, že modrozelená infraštruktúra zostane účinná pri zmiernovaní negatívnych dôsledkov OK v priebehu času.

Na základe výsledkov, ktoré boli získané po odbere vzoriek vody, môžeme posúdiť, že táto lokalita je relevantná pre vedecký výskum. Na základe získaných výsledkov možno konštatovať, že niektoré OK boli navrhnuté alebo postavené v rozpore s technickými normami, keďže vo vzorkách bola zistená menšia kontaminácia. Toto je subjektívny posudok, ale stojí za to zamyslieť sa nad modelovaním hydraulických procesov v OK za účelom zlepšenia kanalizačnej siete.

PodĎakovanie

Výskum vznikol s podporou „Grantovej schémy na podporu mladých vedeckých pracovníkov v podmienkach Slovenskej technickej univerzity (STU) v Bratislave“ financovanej z centrálnych zdrojov Rektorátu STU v Bratislave, riadenej na Katedre zdravotného a environmentálneho inžinierstva STU so skratkou HOKOMOKOZ. Túto prácu podporila aj Vedecká grantová agentúra MŠVVaŠ SR a Slovenská akadémia vied v rámci projektu VEGA 1/0682/23 s názvom Výskum interakcie kvality povrchového odtoku a kvality podzemných vôd v urbanizovaných územiach spolufinancované Agentúrou na výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-22-0564 s názvom Analýza vplyvov kvality vypúšťaných vôd z domových ČOV na miestne zdroje pitnej vody.

Literatúra

[1] LABUDOVÁ, L., TURŇA, M., NEJEDLÍK, P. Drought monitoring in Slovakia. Towards climatic services. Slovakia. 2015, s. 3.

[2] S. Babei, R. Ghazavi, and M. Erfanian, “Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach,” *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, vol. 105, pp. 3–11, 2018.

[3] C. Li, M. Liu, Y. Hu, T. Shi, X. Qu, and M. T. Walter, “Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones,” *Sci. Total Environ.*, vol. 634, pp. 301–311, 2018.

[4] POLLERT, J. Ecological aspect in combined sewer overflows chamber design. *Water Practice & Technology*, Vol. 8, No 3-4, 2013

[5] D. Rusnák, S. Stanko, and M. Trošanová, “Design rainfall analysis tool for urbanized areas in Slovak Republic,” *Pollack Period.*, vol. 12, no. 2, pp. 117–128, 2017.

[6] URCIKÁN P., RUSNÁK D.: Stokovanie a čistenie odpadových vôd: Stokovanie I. Navrhovanie stokových sietí. Bratislava: STU v Bratislave, 2011.

[7] 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

[8] M. Alhumaid, A. R. Ghumman, H. Haider, I. S. Al-Salamah, and Y. M. Ghazaw, “Sustainable evaluation framework of urban stormwater drainage options for arid environments using hydraulic modeling and multicriteria decision-making,” *Water*, vol. 10, no. 5, pp. 1–21, 2018.

[9] D. Rusnák, S. Stanko, and I. Skultétyová, “Rain model - Boundary condition in sewer network appraisal,” *Pollack Period.*, vol. 11, no. 2, pp. 105–112, 2016.

[10] S. Stanko, D. Rusnák, I. Skultétyová, M. Holubec, and K. Galbová, “Impact of topology and map precision on designed flow in rain sewers,” *MM Sci. J.*, vol. 2017, pp. 1806–1809, 2017.

[11] Slovak Hydrometeorological Institute (in Slovak), 2024. [Online]. Available: <https://www.shmu.sk/>.

[12] Regulation of the Government of the Slovak Republic (in Slovak), №269/2010, 2024. [Online]. Available: www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2010/269/.

CALIBRATION-FOCUSED STUDY OF THE HYDROLOGICAL MODEL UNDER SUB-DECADES TIME PERIODS

Mitra Tanhapour

*Department of Land and Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Slovak
University of Technology, Bratislava, Slovakia*

*Corresponding author e-mail: mitra.tanhapour@stuba.sk

Abstract

This study aims to evaluate the performance of the TUW (Technische Universität Wien) hydrological model over different calibration periods, focusing on the entire calibration period from 1991 to 2020 as well as three dynamic sub-decade calibration schemes for four river basins in Slovakia. The research assesses how well the model captures the mean monthly variations in observed streamflow using the Serial Calibration Scheme (SCS) and Parallel Calibration Scheme (PCS). The findings demonstrated that the model effectively reflects overall streamflow patterns, although the greatest mismatch between observed and simulated streamflow were occurred during peak flow months in the spring season. Statistical analyses revealed that the SCS generally yielded more reliable results compared to the PCS for all basins. Among all river basins, the Hron River basin indicated the best performance under various calibration periods. Furthermore, parameters such as DDF, F_c , k_1 , k_2 , $lsuz$, and $croute$ revealed greater sensitivity to changes during calibration periods.

Keywords: TUW model, sub-decade, streamflow simulation, model calibration

1. Introduction

Hydrological model calibration is an essential step in model development, where key parameter values are derived from observed system response data. Objective functions, like the Nash–Sutcliffe efficiency [1], are commonly employed to reduce inconsistencies between observed and simulated streamflow. Hydrological model validation involves testing the model with data outside the calibration period to assess model efficacy.

One of the well-known challenges in hydrological modeling is uncertainty, often stemming from errors in parameterization. Another significant source of uncertainty lies in time-varying parameters, which can result from catchment changes (e.g., land use or cover modifications) and climate variability or change, such as shifts in vegetation evapotranspiration dynamics due to temperature fluctuations [2]. Several factors can explain the rationale behind time-varying model parameters. Structural errors within the hydrological model may lead to changes in calibrated parameters across different time periods, as these adjustments help compensate for deficiencies in the model's structure [3]. In addition, changes in catchment characteristics, such as variations in land use and vegetation cover, can also result in adjustments to calibrated parameters [4]. However, the complex relationships between parameters make it difficult to fully understand the underlying causes of these temporal parameter changes.

Model performance during the validation period is influenced by the selection of the calibration period [5]. Therefore, the choice of data splitting scheme plays a critical role in model development. Additionally, the length of the calibration period has been shown to have varying impacts on hydrological modeling [6]. Some studies recommend using a sufficiently long calibration period to capture both dry and wet conditions [7]. Others propose calibrating models on a subset of the full-period record that reflects the hydrological dynamics expected during the evaluation period [8]. Here, this study examines both full-period and sub-period calibration schemes during 1991–2020 to simulate streamflow.

The aim of this study is to comprehensively evaluate the performance of the TUW (Technische Universität Wien) hydrological model across different calibration schemes during the period from 1991 to 2020. This evaluation focuses on Serial Calibration Scheme (SCS) for the sub-decades and the Parallel Calibration Scheme (PCS) for the full period. By applying these methods, the study seeks to assess the model's ability to accurately simulate streamflow in four distinct river basins in Slovakia. Additionally, the research also aims to identify the most sensitive parameters on time-varying calibration periods.

2. Material and methods

2.1 Case study and data

Four river basins, covering from east to central parts of Slovakia, are selected as case studies to simulate streamflow (Fig. 1). Table 1 shows the physical characteristics of the selected river basins. The mean basin elevations vary from 421.7 m a.s.l. for the Laborec River basin to 1090.1 m a.s.l. for the Váh River basin. Moreover, the basin areas range from 1050 Km² to 1766 Km², corresponding to the Topla and Hron basins, respectively. The primary criterion for selecting the basins is based on areas with different climate characteristics. The rainfall-runoff model is calibrated on streamflow at the outlet gauging station.

Table 1: Summary of physical characteristics of the selected study areas

No.	Basin	Gauging station	Area (Km ²)	Mean. Elevation (m a.s.l.)
1	Laborec	Hummene	1272	421.7
2	Topla	Hanušovce nad Topľou	1050	435.4
3	Hron	Banská Bystrica	1766	844.4
4	Vah	Liptovský Mikuláš	1107.21	1090.1

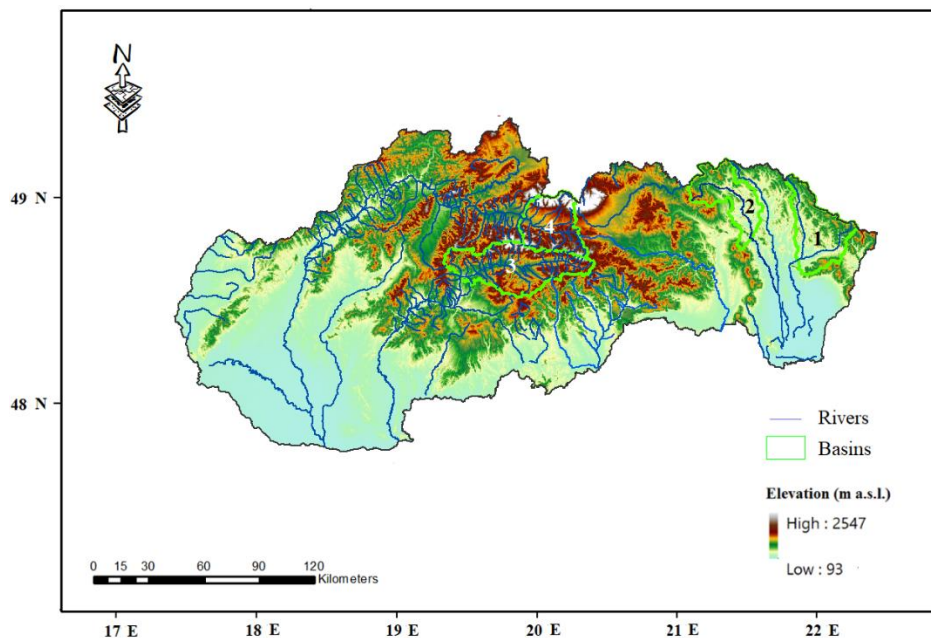


Figure 1: The location of study areas

In current research, a dataset including discharge, precipitation, average temperature, and Potential Evapotranspiration (PET) with a daily timescale was applied to simulate streamflow. In order to interpolate precipitation over the basin uniformly, the inverse distance weighting (IDW) method was used in this study. The altitude gradient method was used to convert point air temperatures into the

mean areal values of the basins. Additionally, the PET was calculated using the modified Blaney-Criddle approach. A visual assessment demonstrated that there are no observation gaps in any of the data from the chosen river basins.

2.2 Hydrological model

The conceptual rainfall-runoff hydrological TUW model [9] to simulate streamflow based on different calibration strategies. The TUW model used in this research is one of the lumped versions of the Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) model [10]. It supports most major runoff generation processes and requires a relatively small number of input variables, e.g., daily precipitation, temperature, and PET [11].

The model comprises three sub-models, including (1) the snow sub-model, which calculates the snow accumulation and melt in the basin using the degree-day approach; (2) the soil sub-model, describing variations in runoff production and soil moisture, i.e., water evapotranspiration, snow infiltration to the soil, and water distribution in soil, which are the processes that contribute to the formation of surface and subsurface flow; and (3) the runoff sub-model, in which water excess from the soil sub-model is transformed into discharge at the basin outlet. Moreover, runoff propagation to the basin's outlet is performed using a triangular weighting function [12]. The TUW model utilized in current research has 15 parameters, representing different sub-models of this model. Table 2 shows the HBV model parameters along with their range and optimized values for the Hron River basin. The optimal values of the TUW model's parameters were automatically estimated using the differential evolution algorithm in the calibration process. Accordingly, the model calibration was carried out during the sub-decades from 1991 to 2020 and for the full period.

Table 2: Description of the HBV model parameters along with their range

Sub-Models	Parameters	Description of the Parameters	Range
Snow	Tr	Temperature threshold above which precipitation is liquid [°C]	1–3
	Ts	Temperature threshold below which precipitation is solid [°C]	-3–1
	Tm	Temperature threshold above which snowmelt starts [°C]	-2–2
	DDF	Degree-day factor determines the speed of the snow melting [mm/°C/day]	0–5
	SCF	Factor for correcting snow measurements [-]	0.9–1.5
Soil moisture	FC	Field capacity- maximum soil moisture storage [mm]	0–600
	Lp	A limit for potential evapotranspiration [-]	0–1
	BETA	Coefficient influencing the amount of water caused by soil moisture and the upper reservoir [-]	0–20
Runoff response	perc	Constant percolation rate from the upper to the bottom reservoir [mm/day]	0–8
	L	Threshold storage state for initiating very fast surface runoff [mm]	1–100
	K ₀	The recession coefficients associated with the surface (K ₀), sub-surface (K ₁), and base flow (K ₂) [days]	0–2
	K ₁		2–30
	K ₂		30–250
Bmax	Maximum base parameter [days]	0–30	

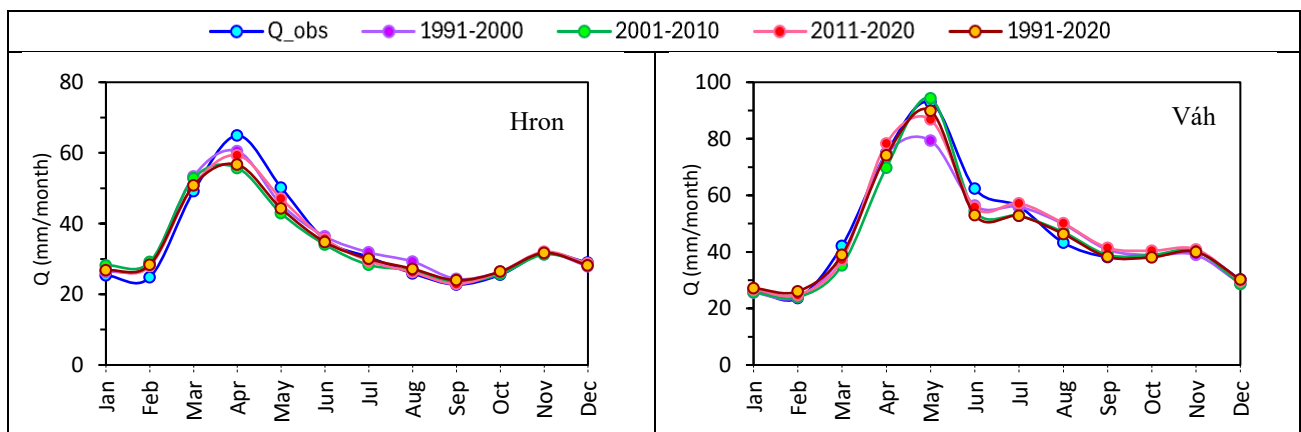
	Croute	Free scaling parameter [day ² /mm]	0–50
--	--------	-----------------------------------------------	------

3. Results and discussion

This section first presents the results of the hydrological model's streamflow simulations for the various time periods used in model calibration. It then assesses the model's effectiveness in estimating annual peak discharge for each river basin across four calibration periods: the sub-decades within 1991–2020, as well as the entire period.

Figure 2 illustrates the long-term variations in observed and simulated mean monthly streamflow for selected basins across the evaluated calibration periods. The visual assessment of the simulated streamflow indicates that there is strong seasonality in spring season in all basins. The hydrological model successfully captures the general trend of observed flows for all river basins. However, discrepancies between the observed and simulated streamflow are most pronounced during peak flow months, specifically in spring (March, April, and May). Moreover, the differences in simulated streamflow for different calibration periods are more evident during peak flow months. This highlights that the model's performance analysis during the calibration period, particularly determining the optimal calibration period, has a greater impact on peak flow estimation. To sum up, while the hydrological model captures the overall flow patterns well, the model's performance during peak flows, especially in spring, can be influenced by the chosen calibration period.

Several factors influence the performance of hydrological models in estimating peak flows. Firstly, model structural limitations often lead to oversimplified representations of complex hydrological processes, which can hinder accurate simulations of rapid flow changes during extreme events. Secondly, uncertainty in input data, particularly during extreme weather events, can result in significant errors in predictions, as these inaccuracies propagate through the model [13]. Lastly, the temporal resolution of models may not align with the rapid dynamics of peak flows, as many models operate on daily or monthly scales, which ignores short-term fluctuations [14]. Addressing these factors is essential for improving peak flow estimation and enhancing model reliability in hydrological applications.



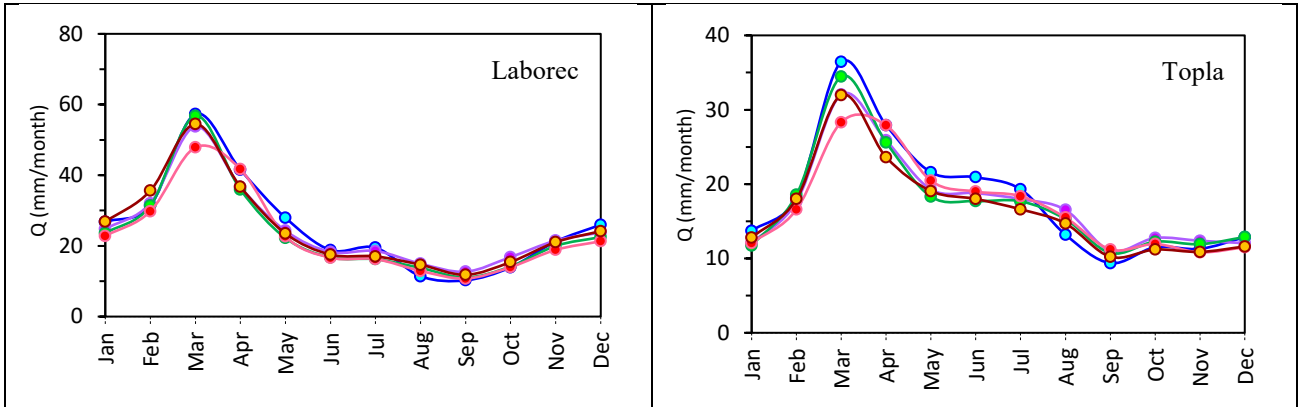
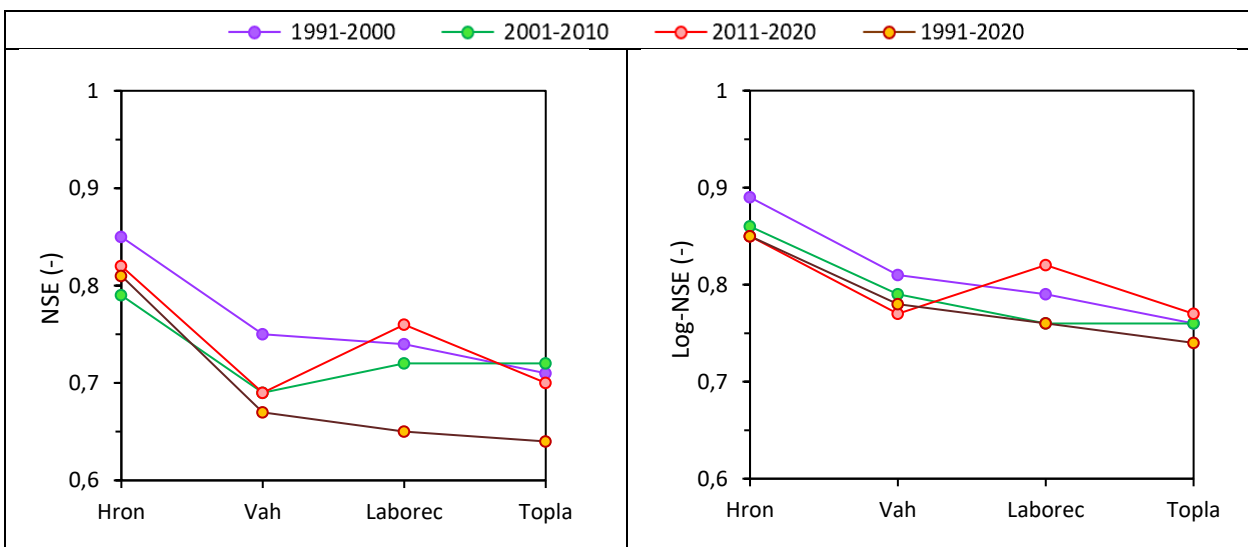


Figure 2: Comparison of the measured and simulated mean monthly streamflow for river basins in all evaluated calibration periods

Figure 3 shows the values of goodness-of-fit criteria to simulate daily streamflow over three decades during 1991–2020 and entire time period. Given all evaluation metrics presented in this figure, it is evident that the model performed better based on serial calibration scheme compared to the parallel calibration scheme for all river basins. By calibrating serially, the model can potentially capture the relationship between rainfall and runoff more effectively [2].

The comparative evaluation of the basins indicates that the Hron and Topla basins perform best among the high-altitude and low-altitude basins, respectively. Overall, the Hron River basin demonstrated the highest performance across all basins, with *NSE* values ranging from 0.79 to 0.85 and *MAE* values between 0.21 and 0.25 for the various calibration periods. Additionally, among the sub-decades, the lowest streamflow simulation error was achieved using the calibration period 2011–2020. In summary, the results suggest that serial calibration approach results in better efficiency of the hydrological model due to their ability to account for temporal variations in hydrological processes. Serial calibration way calibrates the model over smaller, distinct time periods (e.g., sub-decades), allowing the model to capture variability in climate conditions. This approach results in more accurate parameter tuning for different sub-periods, improving model performance.



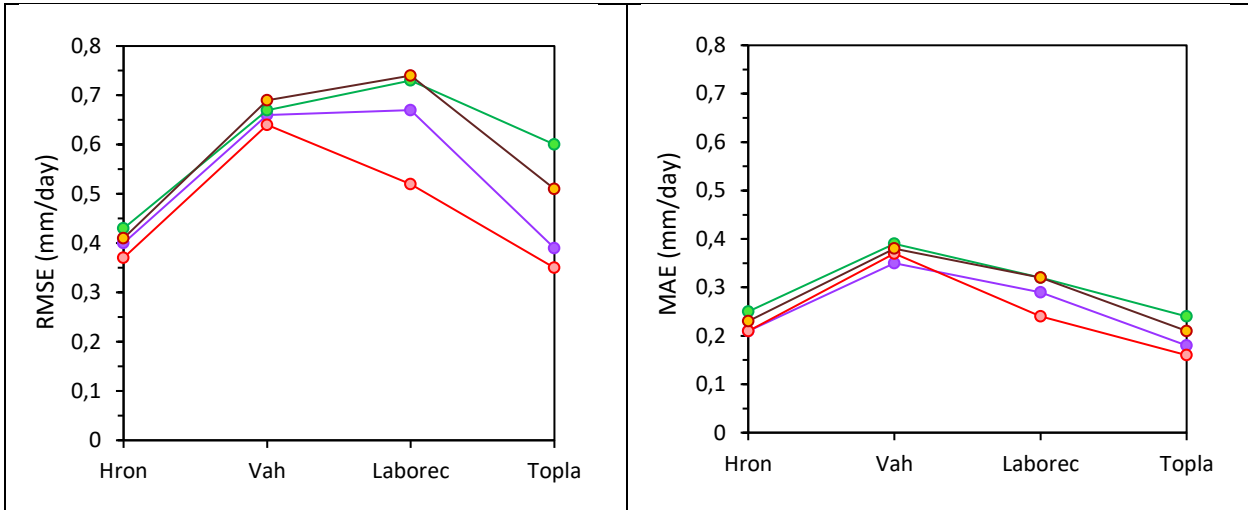


Figure 3: Statistical assessment of the simulated streamflow during calibration periods for all basins

Table 3 presents the optimized values of parameters for the Hron River basin across multiple calibration periods. The bold values in the table indicate greater variability of the corresponding parameters compared to others throughout the calibration periods. It can be seen that parameters such as DDF, Fc, k1, k2, lsuz, and croute show higher sensitivity to changes in the calibration period than other parameters. This sensitivity suggests that these parameters play a more critical role in accurately simulating flow dynamics under different hydrological conditions. For instance, DDF is linked to snowmelt processes, making it highly variable in response to seasonal changes. Similarly, the recession coefficients (k1, k2) control how quickly water is routed through the system, and their sensitivity reflects how calibration periods with differing rainfall or runoff patterns influence the basin's response to hydrological regimes.

Table 3: The optimal values of parameters for the Hron river basin over all calibration periods

Parameters	Calibration (1991-2000)	Calibration (2001-2010)	Calibration (2011-2020)	Calibration (1991-2020)
SCF	0.95	0.92	0.96	0.91
DDF	0.88	3.41	1.30	1.41
Tr	1.10	1.06	1.66	1.29
Ts	-1.92	-2.54	-3.00	-2.97
Tm	-1.94	0.31	-0.92	-0.60
Lprat	0.75	0.16	0.03	0.26
Fc	313.32	189.09	249.01	209.53
BETA	2.19	0.83	0.54	0.94
k0	0.21	0.20	0.19	0.24
k1	21.37	21.36	12.47	12.00
k2	67.90	59.55	47.81	47.85
Lsuz	13.55	23.46	17.02	71.27
perc	0.62	1.19	1.48	1.33
Bmax	2.22	0.58	0.53	2.70
Croute	8.24	39.56	34.38	16.90

The variability of the most sensitive parameters for all basins during different calibration periods is illustrated in Figure 4. It highlights the importance of selecting appropriate calibration strategies for

improving model performance under changing climate conditions. It is clear that the optimized values of parameters may differ based on varying climatic and catchment conditions. Since these parameters are sensitive to hydrological regime changes, their accurate calibration is critical for predicting how basins will respond to altered climate patterns, including shifts in precipitation and snowmelt. It can be concluded that a well-chosen calibration period ensures that the model remains robust under future climate scenarios, leading to more reliable predictions of water availability and peak flows under changing conditions.

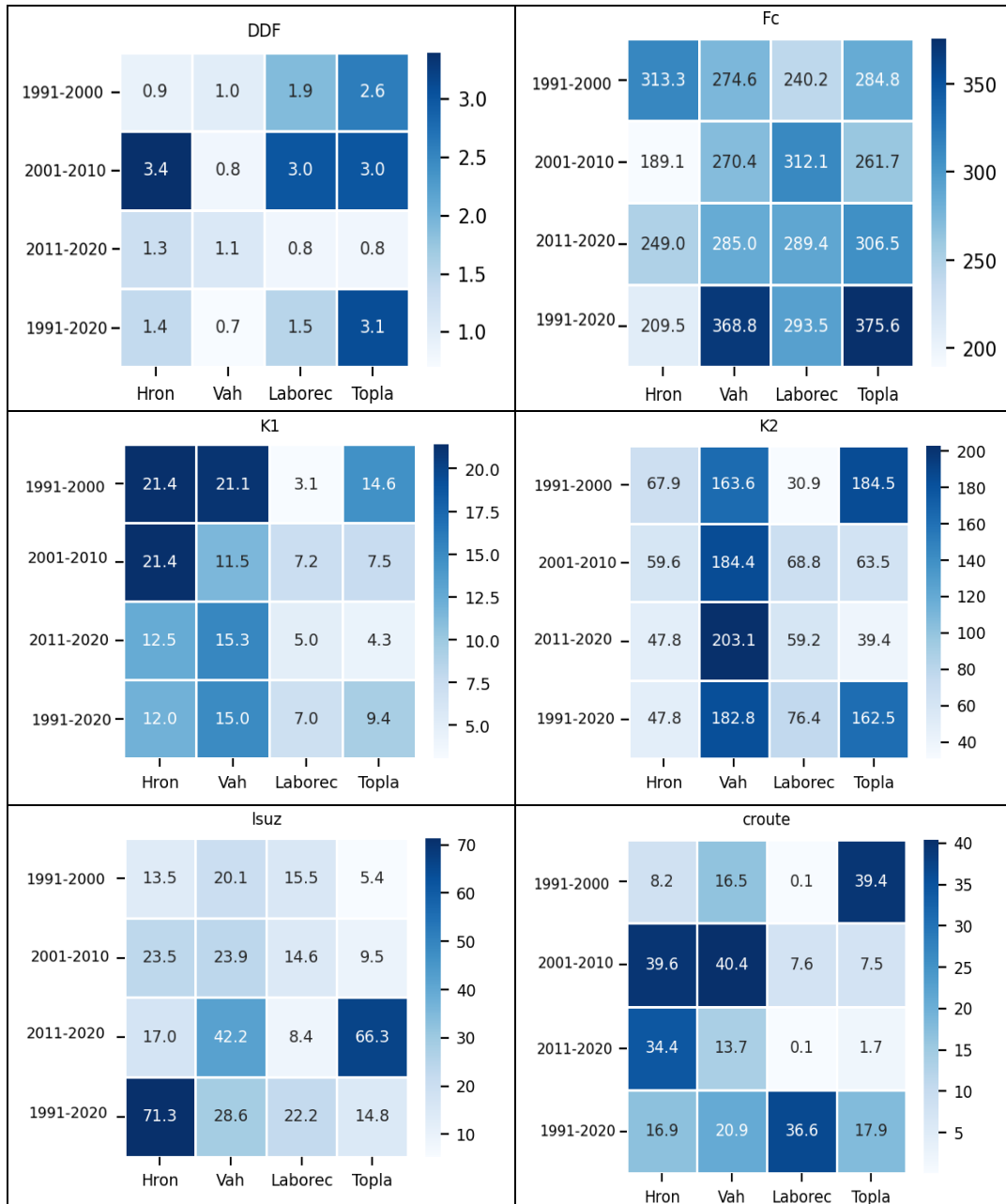


Figure 4: The variability of the most sensitive parameters for all basins during different calibration periods

4. Conclusion

This research evaluates the hydrological model performance in different calibration periods over sub-decades during 1991–2020 and entire time period in four river basins in Slovakia. The results indicated that the hydrological model effectively captured the overall pattern of mean monthly

variations in observed streamflow across all river basins. The greatest mismatch between observed and simulated streamflow occurred during peak flow months in the spring season. Given different statistical criteria used in this research the model could provide more accurate results based on serial calibration scheme compared to the parallel calibration scheme for all river basins. Among all river basins, the Hron River basin exhibited the best performance compared to the other basins under various calibration periods. In addition, parameters, e.g., DDF, Fc, k1, k2, Isuz, and croute, revealed greater sensitivity to changes across the calibration periods compared to other parameters, indicating their crucial role in model performance and the need for careful adjustment during calibration.

Acknowledgements: This work was supported by the Slovak Research and Development Agency (No. APVV 20-0374, No. APVV-23-0332) and the VEGA Grant Agency (No. VEGA 1/0577/23).

References

1. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe, *River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles*. Journal of hydrology, 1970. **10**(3): p. 282-290.
2. Kim, K.B. and D. Han, *Exploration of sub-annual calibration schemes of hydrological models*. Hydrology Research, 2017. **48**(4): p. 1014-1031.
3. Wagener, T., et al., *Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: Dynamic identifiability analysis*. Hydrological processes, 2003. **17**(2): p. 455-476.
4. Brown, A.E., et al., *A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation*. Journal of hydrology, 2005. **310**(1-4): p. 28-61.
5. Myers, D.T., et al., *Choosing an arbitrary calibration period for hydrologic models: How much does it influence water balance simulations?* Hydrological processes, 2021. **35**(2): p. e14045.
6. Knoben, W.J., et al., *A brief analysis of conceptual model structure uncertainty using 36 models and 559 catchments*. Water Resources Research, 2020. **56**(9): p. e2019WR025975.
7. Gupta, V.K. and S. Sorooshian, *The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models*. Journal of Hydrology, 1985. **81**(1-2): p. 57-77.
8. Li, C., et al., *The transferability of hydrological models under nonstationary climatic conditions*. Hydrology and Earth System Sciences, 2012. **16**(4): p. 1239-1254.
9. Parajka, J., R. Merz, and G. Blöschl, *Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments*. Hydrological Processes: An International Journal, 2007. **21**(4): p. 435-446.
10. Bergström, S. and G. Lindström, *Interpretation of runoff processes in hydrological modelling—experience from the HBV approach*. Hydrological Processes, 2015. **29**(16): p. 3535-3545.
11. Tanhapour, M., et al., *Forecasting the Ensemble Hydrograph of the Reservoir Inflow based on Post-Processed TIGGE Precipitation Forecasts in a Coupled Atmospheric-Hydrological System*. Water, 2023. **15**(5): p. 887.
12. Valent, P., J. Szolgay, and C. Rivero, *Assessment of the uncertainties of a conceptual hydrologic model by using artificially generated flows*. Slovak journal of civil engineering, 2012. **20**(4): p. 35-43.
13. Hossain, S., G.A. Hewa, and S. Wella-Hewage, *A comparison of continuous and event-based rainfall-runoff (RR) modelling using EPA-SWMM*. Water, 2019. **11**(3): p. 611.
14. Petroselli, A., R. Piscopia, and S. Grimaldi, *Design discharge estimation in small and ungauged basins: EBA4SUB framework sensitivity analysis*. Journal of Agricultural Engineering, 2020. **51**(2): p. 107-118.

Matúš Tomaščík¹

Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, IV. Ročník

ANALÝZA ODTOKOVÝCH POMEROV V OBCI SMREČANY

ANALYSIS OF RUNOFF RATIOS IN THE MUNICIPALITY OF SMREČANY

Abstract (Grammarly)

The topic of this contribution is focused on a practical demonstration of the use of one of the soil erosion modelling approaches as a tool for evaluating the threat to the area of interest due to soil water erosion or a flash flood caused by torrential rains, which, in addition to the volume of water, also carries the soil itself, i.e. mud. The area of interest, which is the subject of modelling, is not only threatened by a "classic" flood but also by a so-called mud flood, which is more dangerous and causes much more significant damage to property or loss of life. In general, we observe an increasing trend in the threat to the territory by water soil erosion, i.e., also by mud floods. One factor that adversely contributes to this phenomenon is climate change to a large extent. Many agriculturally cultivated areas are cultivated using the wrong method of ploughing or the overall setting of slope management, from the territory's location through the cultivation method to the cultivated crop. Unfortunately, in many cases, the absence of anti-flood measures, which include protection against water erosion of the soil, contributes to the threat to the territory. The consequences of improper land management, associated with the impact of water erosion on this process, are also mentioned and discussed in more detail in the document " Vývoj trendov erózie pôdy a obsahu organickej hmoty v pôde pre hodnotenie PRV SR 2014-2020" [3].

Kľúčové slová / Key Words

Vodná erózia pôdy; modelovanie vodnej erózie pôdy, protierózne opatrenia

1. Úvod

Veľkú rolu pri ochrane poľnohospodárskej pôdy (na poliach), ale aj pri ochrane území, nachádzajúcich sa pod nimi, či v ich bezprostrednej blízkosti zohráva protierózna ochrana, spôsobom využitia protieróznych opatrení. O tom aký druh protieróznych opatrení použijeme na konkrétnom území rozhoduje hlavne ich účinnosť, požadované parametre pri znížení povrchového odtoku a v neposlednom rade aj ochrana objektov v povodí (vodných tokov, zdrojov, ochrana miest a obcí) [1]. Protipovodňové a protierózne opatrenia, ich návrh, môžeme chápať ako komplex viacerých opatrení, ktorý zahŕňa poznatky o konkrétnom území: prieskum, posúdenie, výpočet a návrh [2].

Pre posúdenie miery erózneho ohrozenia, či tvorby povrchového odtoku na svahoch sa využíva niekoľko dostupných matematických modelov. Jedna skupina erózných modelov má empirický charakter a zameriava sa na odhad straty z erózne uzatvorených oblastí, pričom intenzita erózneho procesu sa vyjadruje ako funkcia rôznych pôsobiacich faktorov. Druhá skupina modelov má fyzikálne orientované prístupy, kde je proces erózie chápaný ako súčasť širšieho systému transportných javov, vrátane modelovania pohybu erodovaného materiálu v prostredí a bilancie materiálu. Najzakladanejšie a najvšeobecnejšie rozdelenie erózných modelov môžeme definovať podľa prístupu, na ktorom sú postavené, a to na deterministické a stochastické prístupy. Stochastický prístup - vyznačuje sa tým, že premenné sú náhodné, keďže sú určené na základe pravdepodobnosti alebo

¹ Matúš Tomaščík, Ing. – Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

analýzy štatistických údajov. Deterministický prístup – v týchto modeloch je možné presne určiť konečný výsledok, pretože fungujú na základe dopredu známych vstupných údajov [6].

Príspevok je zameraný na analýzu odtokových pomerov z dôvodu výskytu extrémneho povrchového odtoku, ktorý ohrozuje a zaplavuje areál domova sociálnych služieb v centre obce Smrečany.

2. Vstupné údaje a metodika

Obec Smrečany sa nachádza na severe Slovenska v blízkosti mesta Liptovský Mikuláš. Katastrálne územia obce má rozlohu 881 ha. Zaujmové územie, ktoré je predmetom riešenia je areál domova sociálnych služieb – ďalej len DSS (Obrázok 1), kde dochádza k zaplaveniu územia a k škodovým udalostiam nehnuteľností po výdatnejších zrážkových udalostiach (predovšetkým v jarnom a letnom období).



Obrázok 1 – Obec Smrečany a poloha záujmového územia- areál DSS (zdroj: mapy.cz).

Na obrázku 2 je poskytnutá fotodokumentácia zo Žilinského samosprávneho kraja po jednej zo škodových udalostí, kde bola voda odčerpávaná z podpivničených priestorov, ako aj v prízemných miestnostiach. Vzhľadom na opakované zaplavovanie tohto súkromného pozemku je potrebné vykonať expertízu, určiť príčine faktory a navrhnúť protipovodňové opatrenia.



Obrázok 2 – Fotodokumentácia z areálu DDS po prívalevej zrážke (zdroj: Žilinský samosprávny kraj).

Areál DDS je svahovité územie a je využívané na voľnočasové aktivity, časť na chov hydiny a oviec. Plochy sú zväčša zatrávnené (Obrázok 3). Hornej časti je rigol, kde sa počas dažďa sústreďuje a odvádza povrchový odtok. V strednej a spodnej časti je v krytom profile odvádzaná popod komunikáciu, cestou do toku.

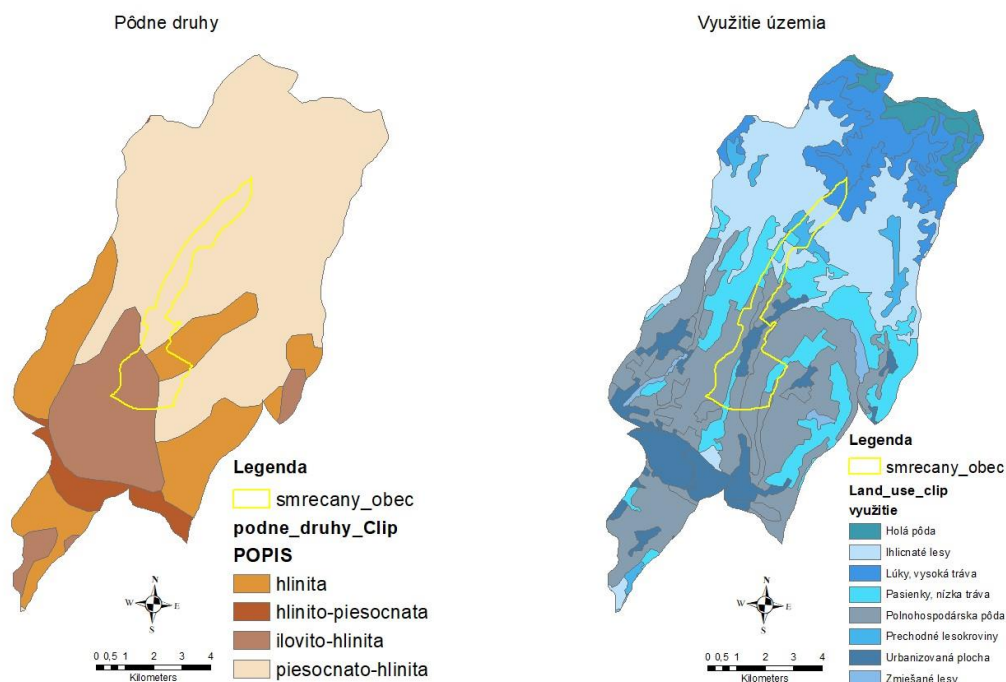


Obrázok 3 – Fotodokumentácia záujmového územia z obliadky terénu (zdroj: KVHK) .

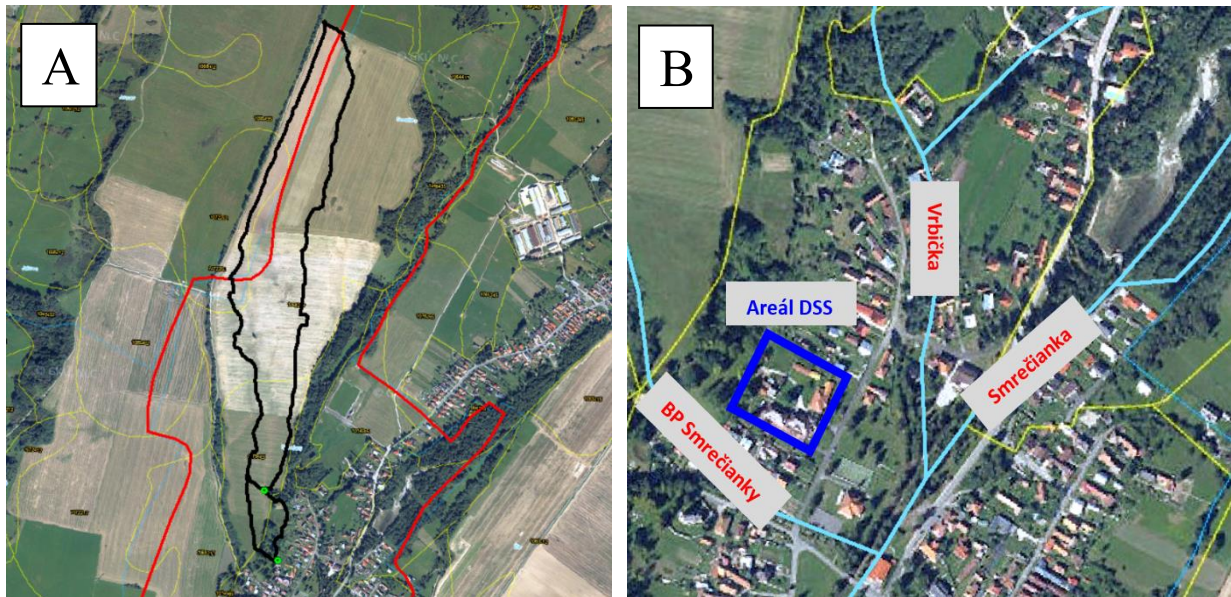
Nad areálom DDS je svah s lúčnym porastom a poľnohospodársky využívané polia. Prevládajúci druh pôdy v záujmovom území je piesočnato-hlinitá pôda (Obrázok 4).

Obcou Smrečany preteká vodný tok – Smrečianka s dvoma pravostrannými prítokmi (BP Smrečianky a Vrbička) v blízkosti areálu DSS (Obrázok 5B). Priemerný ročný úhrn zrážok (obdobie 2019 – 2023) v tejto oblasti je 684mm [7].

Pre areál DSS bola pomocou GIS nástroja určené zberná plocha. Vyčlenené boli dve sub-povodia (čierna línia, Obrázok 5A), kde bol použitý digitálny model reliéfu (rozlíšenie 1x1m). Povodie č.1 (väčšie) má rozlohu 30,94 ha a priemerný sklon 2,40°, Povodie č. 2 (menšie) má rozlohu 2,63 ha a priemerný sklon 8,29°. Súčasne pre jednotlivé povodia boli identifikované odtokové dráhy v softvéri ArcMap, pomocou nástroja ArcToolbox – Spatial Analyst tools – Hydrology (fill dem – flow direction – flow accumulation – pour – snap pour – watershed). Výsledkom boli vektorové súbory (shapefile), teda vrstvy sub-povodí, stanovené na základe hydrologických charakteristík posudzovaného územia.



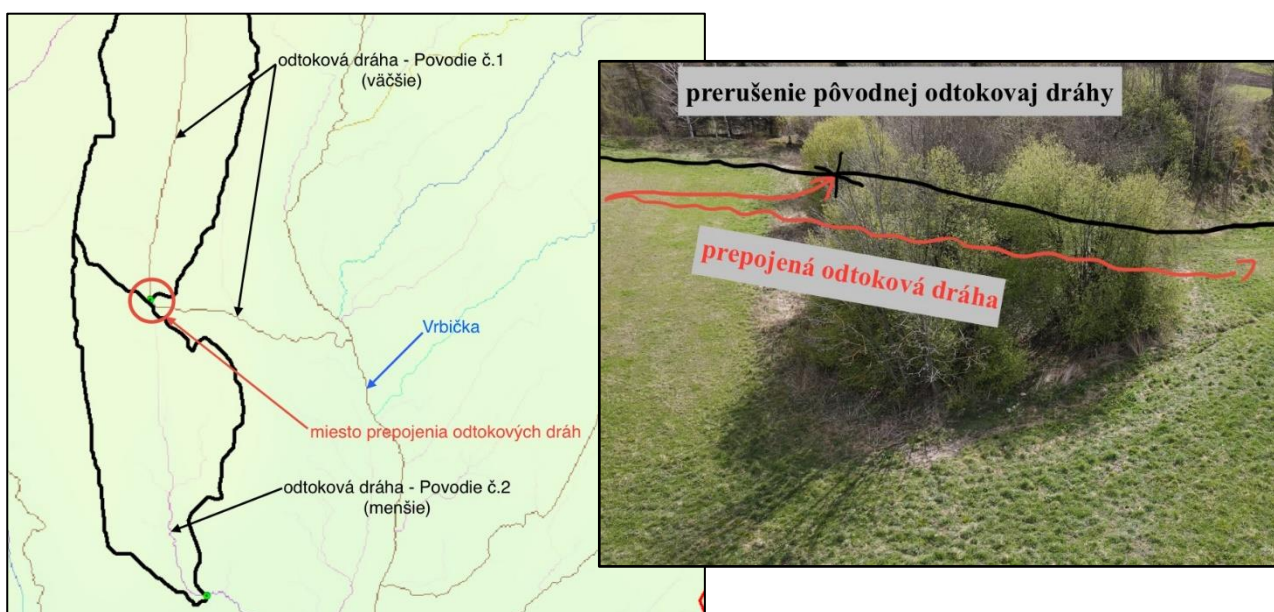
Obrázok 4 – Charakteristika územia – pôdne druhy a využitie krajiny.



Obrázok 5 – A) Pomocou GIS určené sub-povodia nad areálom DSS, B) vodný tok Smrečianka s prítokmi v blízkosti areálu DSS.

Rekognoskáciou terénu v obci bolo zistené, že bol vykonaný zásah do odtokovej dráhy (povodie č. 1) v podobe jej prehradenia, čím došlo k jej odkloneniu odvádzaného odtoku do povodia č. 2 (Obrázok 6). Tento zásah bol realizovaný so zámerom ochrany osobného majetku pred extrémnym odtokom z poľnohospodárskych plôch nad obcou z povodia č. 1. Na hranici pozemkov a cestnej komunikácii je síce priekopa na odvádzanie odtoku, avšak s nedostatočnou kapacitou. Dôsledkom čoho bol častý výskyt udalostí, kedy dochádzalo k zaplaveniu pozemkov a nehnuteľností. Problém s vytápaním tým však nebol postačujúco vyriešený, iba bol presunutý na nižšie miesto.

Na obrázku 6 je prepojenie odtokových dráh, ktoré vzniklo vytvorením bariéry. Odklonom došlo k spojeniu odtokovej dráhy z povodia č.1 a odtokovej dráhy povodia č. 2. A práve táto skutočnosť spôsobuje časté zaplavenie pozemkov DDS.



Obrázok 6 – Miesto prepojenia odtokových dráh medzi Povodím č. 1 a Povodím č. 2.

Pre stanovenie návrhového kulminačného prietoku, z vypočítaných povodí možno použiť racionálny povodňový vzorec – intenzitný vzorec (1), ako súčin plochy povodia, maximálnej intenzity dažďa a vrcholového odtokového súčiniteľa (empirický model) [4].

$$Q_n = Fi \cdot i_{\tau,N} \cdot \varphi_N \quad (1)$$

Kde F – plocha povodia [ha],
 $i_{\tau,N}$ – návrhová intenzita dažďa,
 φ_N – vrcholový súčiniteľ odtoku.

$$\tau = t_k \quad (2)$$

Kde t_k – doba koncentrácie odtoku,
 τ – doba trvania dažďa.

Pre stanovenie kritickej dĺžky na svahu, t.j. miesto, kde je potrebné prerušiť resp. zachytiť plošný povrchový odtok možno použiť niekoľko metodík, modelov. V tomto prípade bol použitý hydrologický model Smoderp, ktorý je určený na simuláciu povrchového odtoku v malých povodiach, ako aj na simuláciu erózie pôdy (manuál). Tento distribuovaný model zohľadňuje faktory, ako sú vlastnosti pôdy, využitie pôdy, vegetačný kryt a topografia. Vstupné údaje predstavujú:

1. údaje morfológické,
2. údaje pedologické,
3. údaje o vegetačnom kryte pozemku a používané agrotechnike,
4. údaje o zrážkach.

Model je založený na bilančnej rovnici vychádzajúca z rovnice kontinuity (3). V základnej podobe to znamená, že rozdiel zásob vody (dS) v čase sa rovná rozdielu medzi prítokom (I) a odtokom (O).

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (3)$$

Kde dS/dt – zmena stavu S v čase. Vyjadruje rýchlosť, s akou sa množstvo S mení závislosti od času
 $I(t)$ – prítok v čase t
 $Q(t)$ – odtok v čase t

Model Smoderp je možné využiť pri riešení úloh ak sú napríklad:

- Určenie hydrologických charakteristík povrchového odtoku v jednotlivých profiloch
- Návrh odvodňovacieho alebo vsakovacieho prvku (priekopa,
- Prvky meniace pozdĺžny sklonu terénu (terasy, medze)
- Dráhy sústredeného odtoku
- Posúdenie priepustov, korýt, malých vodných nádrží a iné.

3. Výsledky a diskusia

V prvom kroku bola stanovená doba koncentrácie odtoku pre obe povodia, na základe intenzity prívalových dažďov [$l \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$], pre periodicitu $P = 0,1$ podľa autorov Šamaja a Valoviča [5]. Následne bol na základe sklonových pomerov a typu pôdy stanovený vrcholový odtokový súčiniteľ φ_N . Plochy jednotlivých povodí boli vypočítané v softvéri ArcMap. Výsledné hodnoty návrhového kulminačného prietoku sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (Tabuľka 1).

Tabuľka 1 – Výsledné hodnoty návrhového kulmináčného prietoku Q_n .

	ϕ_N	F [ha]	$i_{\tau,N}$ [l/s/ha]	$\tau=t_k$ [min]	Q [l/s]
Povodia spolu	0.152	33.53	18.09	141.03	91.94

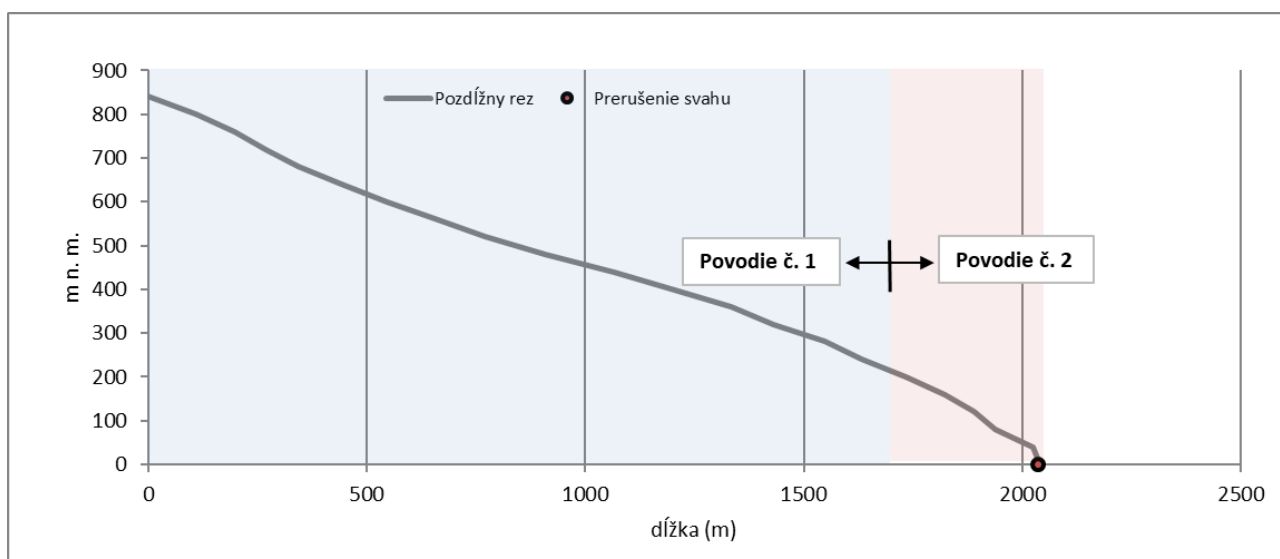
Areál DSS je aktuálne ohrozený pri návrhovej zrážke s dobou opakovania $N=10$ koncentrovaným povrchovým odtokom približne 90 [l/s], pritekajúcim z poľnohospodársky obrábaných plôch nad jeho hornou hranicou. Areál svojou polohou a skutočnosťou, že sa nachádza na rovinnom teréne je miestom pre akumuláciu pritečenej vody a bahna z povrchového odtoku spolu s objemom vody zo spadnutých zrážok.

Model Smorderp bol využitý pre určenie prerušenia svahu vhodné pre návrh protierózneho opatrenia. Keďže model pracuje v elementoch, zadaním ich veľkosti a charakteru profilu dokážeme určiť miesto potrebné na prerušenie povrchového odtoku. Následne v týchto miestach sa navrhne protipovodňové opatrenie. Vybrané vstupné údaje sú uvedené v nasledujúcej tabuľke 2 pre druh pôdy v záujmovom území. Dĺžka odtokovej dráhy je 2034 m, kde priemerný sklon je 4%. Pri simulácii bola použitá návrhová zrážka s dobou opakovania 10 rokov pre danú lokalitu Liptovský Mikuláš (27.5 mm, trvanie sa rovná doby koncentrácie 141min, a bilineárny priebeh s kulmináciou v 1/3 trvania zrážky).

Tabuľka 2 – Vybrané vstupné hodnoty do modelu SMODERP pre piesčito-hlinitú pôdu

Plodina	Sorptivita pôdy ($cm.min^{-0.5}$)	Nasýtená hyd. vodivosť ($cm.min^{-1}$)	Pomerná listová plocha (-)	Potenciálna intercepcia (mm)	Manningov súčiniteľ (-)
úžko- riadkové	0.065	0.029	0.3	0.2	0.040
TTP	0.066	0.030	1.0	0.4	0.100

Posudzovaná odtoková dráha, ktorá vznikla spojením odtokových dráh povodia č. 1 a č. 2. Na obrázku č. 7 je graficky zobrazený pozdĺžny profil aj s miestom jeho prerušenia.



Obrázok 7 – pozdĺžny odtokovej dráhy z povodia č. 1 a 2 s vyznačeným potrebným prerušením v svahu

Ako možno vidieť na uvedenom pozdĺžnom profile je potrebné v jednom mieste prerušiť povrchový odtok a navrhnuť opatrenie na jeho zachytenie. Ako ideálne riešenie sa javí návrh vsakovacej priekopy, ktorá zachytí odtok v celom objeme.

4. Závěry

Cieľom príspevku bolo zistiť príčinu častého zaplavenia areálu DDS povrchovým odtokom a vznik škodových udalostí na objektoch. Po získaní potrebných priestorových údajov, následnej analýze územia (sklonové pomery, pôdne charakteristiky vrátane agrotechniky) bola vykonaná potrebná rekognoskácia územia. Tento areál je vytápaný dominantne vplyvom povrchového odtoku z poľnohospodárskych plôch nad jeho hornou hranicou a to aj vplyvom nepostačujúcich, resp. vplyvom absencie protieróznych opatrení. Z rozhovorov s pracovníkmi DSS bolo potvrdené, že v čase jarného topenia snehu taktiež dochádza k vytápaniu areálu DSS. Nie však do takej miery, ako pri extrémnych letných zrážkových udalostiach. Z rekognoskácie bolo zistené, že v území nad areálom došlo k terénnym úpravám, ktoré spôsobili zvýšené objemy povrchového odtoku.

V rámci tohto príspevku bol vypočítaný kulminačný odtok z aktuálnej plochy povodia (prepojenie povodí v dôsledku bariéry). Bol použitý aj hydrologický model Smoderp, ktorý sa stanovil povrchový odtok, čo nám pomáha pri plánovaní a manažmente vodných zdrojov, vrátane navrhovania systémov ochranných priekop a hodnotenia povodňových rizík. V tomto prípade boli zistené potrebné dve prerušenia. V celkovej dĺžke 2034m je vhodné prerušenie v dĺžke svahu 480m a 1490m.

Možným riešením tohto problému je teda vybudovanie protieróznych opatrení na spomínaných poľnohospodárskych poliach a pasienkoch nachádzajúcich sa nad areálom DSS. Konkrétne opatrenia by mohli byť napríklad v podobe vsakovacích, či odvodňovacích priekop. Rovnako je na mieste uvažovať s odvodnením areálu v podobe odvodňovacieho kanála či potrubia s vyústením do vodného toku Smrečianka. Návrh týchto opatrení však nie je predmetom tohto príspevku a bude predmetom ďalšieho postupu v riešení problematiky spojenej s týmto územím.

Pod'akovanie

Článok bol vytvorený a podporený grantom VEGA 1/0782/21. Článok bol taktiež podporený koordinátormi enviro projektov – Odbor regionálneho rozvoja – Žilinský samosprávny kraj.

Literatúra

- [1] JANEČEK, Miloslav. Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika. Praha: Powerprint, 2012. ISBN 978-80-87415-42-9.
- [2] KAVKA, Petr. Kalibrace a validace modelu SMODERP. Dizertačná práca. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [3] STYK, Ján a Boris PÁLKA. Vývoj trendov erózie pôdy pre hodnotenie PRV SR 2014-2020. Bratislava, 2019, 80 s. Dostupné také z: <https://www.mpsr.sk/vyvoj-trendov-erozie-pody-a-obsahu-organickej-hmoty-v-pode-pre-hodnotenie-prv-sr-2014-2020/1289-43-1289-15457/>. Zmluva o dielo č. 76/2018-600/MPRV SR uzatvorená v zmysle § 536 a nasl. zákona č. 513/1991 Zb. Obchodný zákonník v znení neskorších predpisov.
- [4] SZOLGAY, Ján - DZUBÁK, Milan - HLAVČOVÁ, Kamila. Hydrológia. Odtokový proces a hydrológia povrchových vôd. Bratislava : STU v Bratislave, 1994. 277 s. ISBN 80-227-0641-8.
- [5] ŠAMAJ, František., VALOVIČ, Šimon. Zborník prác SHMÚ č.5. Intenzity krátkodobých dažďov na Slovensku. Slovenské pedagogické nakladateľstvo, Bratislava, 1973.

- [6] XIAOQING, Yang. Manual on sediment management and measurement. World meteorological organization. 948. Geneva – Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 2003, 1 - 176. 4. ISBN 92-63-10948-6.
- [7] <https://www.lvsas.sk/fakturacia-za-vodne-a-stocne/zrazkove-vody>.

Alexandra Vidová¹

Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, ročník: druhý

SIMULÁCIA PRÚDENIA V PRÍRODE BLÍZKOM RYBOVODE

SIMULATION OF FLOW IN NATURE-LIKE FISH PASS

Abstract

This study focuses on the simulation of flow dynamics within a nature-like fish pass designed to facilitate aquatic organism movement while maintaining ecological integrity. Utilizing computational fluid dynamics tools, the research analyzes water flow patterns, velocity distributions, and potential barriers to fish passage. The simulation aims to evaluate the effectiveness of various design parameters by replicating natural river conditions. The findings are expected to inform the design and implementation of environmentally friendly fish passes that support biodiversity, contribute to sustainable river management, and assist in the decision-making process when choosing appropriate mathematical models within HEC-RAS software.

Kľúčové slová

prírode blízky rybí priechod; HEC-RAS; 2D simulácie prúdenia, zvislicové rýchlosti.

1. Úvod

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centre-River Analysis System) je široko používaný nástroj na modelovanie prúdenia vody a hydrodynamickú analýzu. Zahŕňa rovnice plytkej vody (Shallow Water Equations – SWE), a aj rovnice difúznej vlny (Diffusion Wave Equations – DWE), čo vytvára flexibilitu v hydrodynamickom modelovaní a používateľom umožňuje nájsť rovnováhu medzi výpočtovou efektívnosťou a presnosťou podľa ich konkrétnych potrieb. Rovnice plytkej vody (SWE) sú komplexnejšie a zahŕňajú konvekčnú akceleráciu, čo ich robí vhodnými na podrobné modelovanie záplav, najmä v zložitom teréne a mestských oblastiach. Rovnice difúznej vlny (DWE) zjednodušujú rovnicu hybnosti tým, že zanedbávajú konvekčnú akceleráciu, čo vedie k rýchlejšim výpočtom, ale potenciálne menej presným výsledkom v určitých situáciách [1, 2, 3, 4].

SWE vo všeobecnosti poskytujú presnejšie výsledky pre hĺbku a rýchlosť prúdenia, pričom zachytávajú detailné fyzikálne javy, ako je turbulencia a víry [2, 3, 4]. DWE majú tendenciu podhodnocovať hĺbku vody a rýchlosť prúdenia [2, 3], ale sú výpočtovo menej náročné, čo výrazne skracuje čas simulácií v porovnaní so SWE [2, 3, 4]. Oba typy rovníc sa používajú na mapovanie záplav, ale SWE sa uprednostňujú pre podrobné hodnotenia rizík a v oblastiach s komplexnou topografiou [1, 3, 4]. Voľba medzi SWE a DWE závisí od konkrétnych požiadaviek štúdie. Pre potreby vysokej presnosti a zložitého terénu sa odporúča SWE. Pre rýchlejšie a menej podrobné simulácie je vhodné použiť DWE [2, 3, 4].

Modelovanie prúdenia v prírode blízkom rybovode, využitím modelu HEC-RAS, bolo uskutočnené pomocou oboch typov rovníc, aby sa preukázal vplyv na dosiahnuté výsledky. Následná analýza výsledkov simulácií bola robená na základe porovnania so skutočne nameranými hodnotami.

¹Alexandra Vidová, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra hydrotechniky, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava, alexandra.vidova@stuba.sk

2. Riešenie problematiky

2.1 Lokalita a charakteristika rybovodu

Rybovod sa nachádza na vodnom toku Myjava v rkm 26,500, v povodí rieky Morava. Dlhodobý ročný prietok v profile rybovodu je $Q_a = 2,11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [5]. Pôvodne bol v toku vybudovaný pevný stupeň (Fig. 1), ktorý slúžil na zmiernenie sklonu a stabilizáciu dna koryta. V rámci renaturalizácie a spriechodnenia toku pre ryby bola v mieste stupňa navrhnutá úprava - vybudovanie prírode blízkeho typu rybovodu (Fig. 1). V strede vybudovaného sklzu je prehĺbenina, ktorá umožňuje prechod ichtyofauny aj pri menších prietokoch a v dne sklzu sú šachovnicovo usporiadané ojedinelé kamene. Sklz je umiestnený v celej šírke koryta rieky. Vsadené solitérne balvany v samotnom sklze, aj na jeho krídlach pomáhajú znižovať rýchlosti prúdenia, zvyšujú hĺbku vody a vytvárajú prúdové tieňe a bazény, aby bola umožnená obojsmerná migrácia rýb pri rôznych hydrologických situáciách v toku.



Figure 1: Location of the rock ramp fish pass and original fixed weir [5]

Podľa Metodiky [6] Výskumného ústavu vodného hospodárstva (VÚVH) sa modelovaný sklz klasifikuje ako celokorytový bezprepážkový bystrinný sklz, pričom lokalita patrí do mrenového rybieho pásma. Metodika [6] určuje odporúčané návrhové parametre pre tento typ sklzu a rybie pásmo, ktoré zahŕňajú najvyššiu prierezovú rýchlosť vody $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximálny pozdĺžny sklon 1:100 (1 %), minimálnu hĺbku vody v bystrine 0,40 m a minimálnu zavodnenú šírku vody v hladine 2,0 m. Reálne parametre rybovodu uvedené v projektovej dokumentácii [5] sú nasledovné: celková dĺžka rybovodu je 19,4 m, prekonávaná výška (spád) dosahuje 0,81 m a sklon rybovodu je 4,17 %, čo presahuje odporúčaný sklon 1 %. Stredná časť rybovodu má tvar trojuholníka so základňou širokou 5,6 m. V ôsmich profiloch, vzdialených 2,0 m od seba, sú balvany usporiadané v šachovnicovom vzore s rozstupom 0,93 m. Na dne sú kamene veľké 20 až 40 cm a vertikálne odpočinkové balvany v profiloch majú priečnu šírku 30 až 40 cm.

2.2 Matematický model HEC-RAS

Pre analýzu existujúceho rybovodu bol použitý softvér HEC-RAS, verzia 6.3.1., dvojrozmerné prúdenie vody pri ustálenom režime prúdenia.

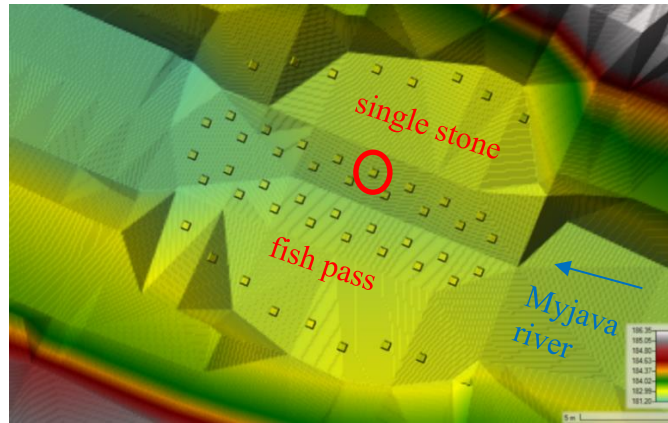


Figure 2: Connected surface of the fish pass with Myjava river bed and added perturbation boulders

Povrch rybovodu bol vytvorený spojením projektovej dokumentácie a digitálneho modelu terénu (DMT) [9]. Ďalej boli podľa situácie do terénu vložené solitérne balvany (Fig. 2). Výpočtová sieť mala hustotu 1,50 m v oblasti nad a pod sklzom a hustejšia sieť – 0,10 m bola použitá v samotnom sklze pre dosiahnutie presnosti v oblasti komplikovaného prúdenia okolo ojedinelých balvanov. Manningov koeficient drsnosti bol zadaný $n = 0,059$ podľa projektu [5], čo zodpovedá drsnosti pre malé toky, pri nižších vodných stavoch a väčších nepravidelnostiach profilu s občasnými tónami, plytčinami a kameňmi [10]. Okrajové podmienky boli nastavené nasledovne, pre prítok prietokový hydrogram na 24 hodín s jednotným prietokom (pre potreby overenia parametrov rybovodu sa uvažuje s konštantným dotačným prietokom), na hranici odtoku bola špecifikovaná podmienka ako normálna hĺbka.

2.3 Výpočtové rovnice v HEC-RASe

Na simuláciu 2D prúdenia ponúka HEC-RAS dve hlavné sady rovníc: rovnicu difúznej vlny (DWE) a rovnice plytkej vody (SWE) [8]. Tieto rovnice umožňujú detailné modelovanie hydrodynamických procesov a prúdenia vody.

Difúzna vlna je zjednodušenie plnej dynamickej rovnice. Predpokladá sa, že zotrvačné sily sú malé, a preto sa zanedbávajú. Tento prístup sa často používa, keď nie je potrebné riešiť dynamické javy, resp. zmeny sú pozvoľné (napr. pre malé gradienty) [8]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$q = -Kh^m \frac{\partial h}{\partial x}$$

kde: q – prietok,
 K – koeficient priepustnosti (funkcia geometrie kanála a drsnosti),
 h – výška hladiny,
 m – empirický exponent, často závislý na profile koryta.

Rovnice plytkej vody sú odvodené z Navier-Stokesových rovníc a popisujú prúdenie vody v otvorených kanáloch. Zahŕňajú zachovanie hmoty a hybnosti. Tieto rovnice sa využívajú pri simuláciách neustáleného prúdenia, kde je dôležité zachytiť dynamické zmeny (napr. simulácie komplikovaných povodňových situácií, kde je dôležitý časový vývoj prúdenia) [8]:

- Zákon zachovania hmoty (kontinuita):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

- Zákon zachovania hybnosti (momentum):

V smere osi x:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_0 - S_f) - \tau_b \quad (3)$$

V smere osi y:

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = gh(S_0 - S_f) - \tau_b \quad (4)$$

kde: h – hĺbka vody,
u, v – zložky rýchlosti v osiach x a y,
g – gravitačné zrýchlenie,
S₀ – sklon dna,
S_f – sklon spôsobený trením,
τ_b – tangenciálne napätie na dne.

Modelovanie turbulencie je dôležitou súčasťou simulácií prúdenia, najmä v oblastiach s vysokými rýchlosťami a zložitými geometriami. Softvér HEC-RAS umožňuje dve možnosti modelovania turbulencie:

- **S modelovaním turbulencie:** táto metóda umožňuje začleniť efekty turbulencie na zachytenie zložitejšieho správania prúdenia (zohľadňuje rozptyl energie a efekty miešania), zvyšuje presnosť výsledkov simulácie, ale vyžaduje viac času.
- **Bez modelu turbulencie:** zvyčajne funguje za predpokladu laminárneho prúdenia, čo umožňuje rýchlejšie výpočty, ale zväčša na úkor presnosti v scenároch, kde turbulencia zohráva významnú úlohu v dynamike prúdenia.

Výber medzi SWE a DWE, ako aj rozhodovanie o použití modelovania turbulencie, závisí od konkrétnych podmienok v simulovanej oblasti a požadovanej presnosti výsledkov. Pre ďalšie informácie o výbere vhodnej sady rovníc pre konkrétne modelovanie je možné sa odvolať na používateľskú príručku HEC-RAS.

Okrem výberu výpočtových rovníc je pri modelovaní prúdenia vody dôležité zvoliť vhodný časový krok pre výpočtovú sieť. Voľba tohto časového kroku závisí od veľkosti buniek a rýchlosti prúdenia vody v týchto bunkách. Aby bola zaručená stabilita a presnosť numerických simulácií, musí byť časový krok vybraný tak, aby vyhovoval Courantovému kritériu [8].

- Pre rovnicu difúznej vlny platí [8]:

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 2,0 \quad (C_{max} = 5,0) \quad (5)$$

- Pre rovnicu plytkej vody musí spĺňať Courantovo kritérium nasledujúcu podmienku [8]:

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 1,0 \quad (C_{max} = 3,0) \quad (6)$$

kde: C – Courantovo číslo,
V – rýchlosť prúdenia vody ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
 ΔT – výpočtový časový krok (s),
 ΔX – priemerná veľkosť bunky (m).

Pre model rybovodu bol zvolený výpočtový časový krok 0,10 s, čo je najmenší možný časový krok v modeli HEC-RAS. Na vyhodnotenie Courantovho kritéria podľa rovníc (5) a (6) platí:

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} = \frac{2 \cdot 0,1}{0,1} = 2 \quad (7)$$

kde: C = 2 (Courantovo číslo), pričom $C_{max} = 5,0$, resp. 3,0,
V = $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (rýchlosť prúdenia vody) (maximálna predpokladaná rýchlosť v rybovode podľa meraní),
 $\Delta T = 0,1$ s (výpočtový časový krok) (najmenší časový krok a zároveň najvhodnejší, aby bola splnená podmienka Courantovho kritéria),
 $\Delta X = 0,1$ m (priemerná veľkosť bunky) (veľkosť podrobnej bunky v oblasti rybovodu).

3. Výsledky

Po vytvorení geometrie rybovodu, nastavení okrajových podmienok, boli vytvorené tri výpočtové plány, v ktorých boli zmenené výpočtové rovnice, aby bol model stabilný. Simulované boli kritické podmienky nízkeho vodného stavu, $0,451 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ktorý približne zodpovedá prietoku Q_{330} , aby sa preverili hydraulické parametre potrebné pre migráciu rýb počas suchých období [7]. Výsledky in-situ meraní Výskumného ústavu vodného hospodárstva (VÚVH) boli použité na kalibráciu vytvoreného matematického modelu. Merania sa uskutočnili v ôsmich profiloch (Fig. 3) medzi balvanmi, pričom každé meranie obsahovalo päť zvislíc (Fig. 3) [7]. Pre každý profil bol vyhodnotený priebeh nameraných rýchlostí prúdenia, ktorý bol porovnaný s výsledkami modelu (Fig. 4, 5, 6 a 7).

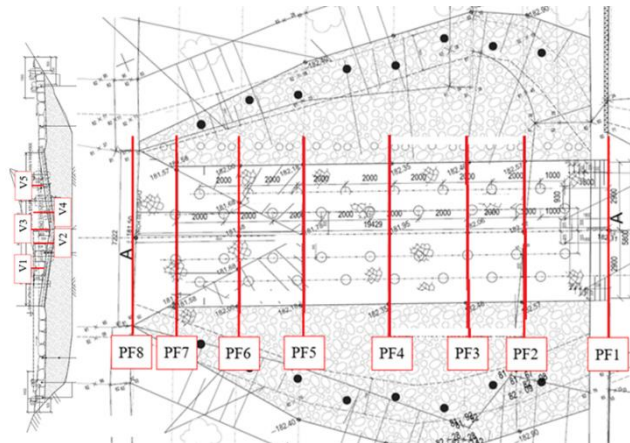


Figure 3: The situation and cross sections with marked profiles and verticals from the measurement

3.1 Simulácie prúdenia

V prvej simulácii bolo potrebné overiť stabilitu modelu a priebeh výpočtu. V 2D nastaveniach prúdenia bola zvolená rovnica difúznej vlny, ktorá je stabilnejšia. Po vykonaní výpočtu sa porovnali profily prietokových rýchlostí s meraniami (Fig. 4). V tejto simulácii boli vypočítané rýchlosti vyššie ako namerané (Fig. 7). Môžeme konštatovať, že tendencia zvislicových rýchlostí má približne rovnaký tvar, ale nie je identická s meraním. Zavodnená šírka hladiny vody bola menšia ako nameraná hodnota podľa simulácie.

Pri druhej simulácii bola zvolená rovnica plytkej vody bez turbulencie, aby sa zistilo, či je výpočet tiež stabilný pre zložitejšiu rovnicu. Po výpočte sa vo výsledkoch objavili prúdové tieňe (Fig. 5), ktoré vznikajú za balvanmi. Táto simulácia bola bližšia skutočnému stavu. Profil zvislicových rýchlostí bol menší ako v prvej simulácii, ale stále nezodpovedal meraniam (Fig. 7). Zavodnená šírka sa zväčšila, ale nebola totožná s meraniami.

Keďže sa predpokladalo turbulentné prúdenie v rybovode, do tretej simulácie bola zadaná rovnica plytkej vody s turbulenciou. Tvar zvislicových rýchlostí bol ovplyvnený minimálne (Fig. 6), ale rýchlosti v strede rybovodu klesli (Fig. 7).

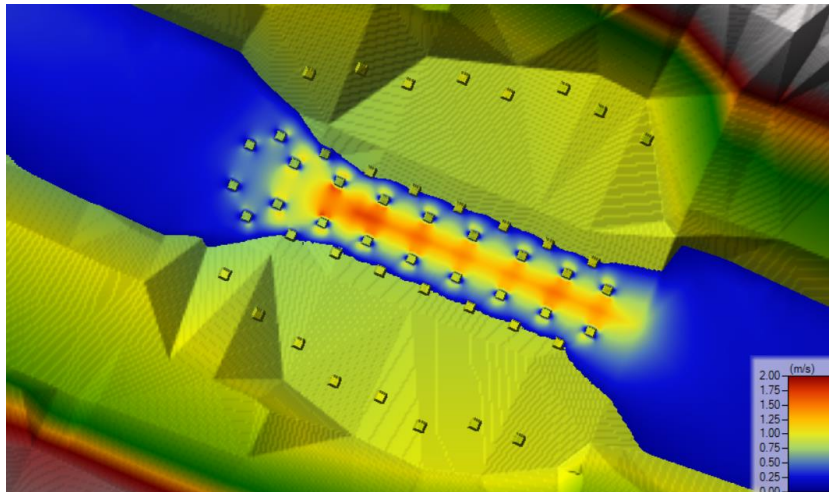


Figure 4: Velocity field for the simulation with DWE

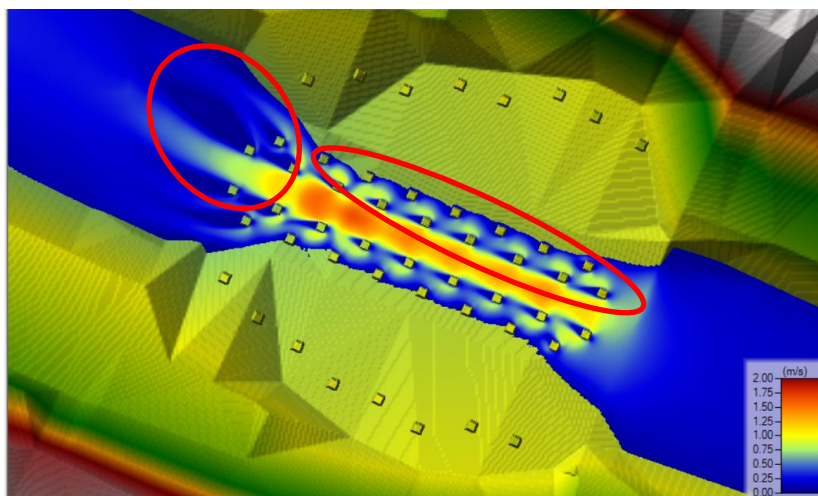


Figure 5: Velocity field for the simulation with SWE without turbulence

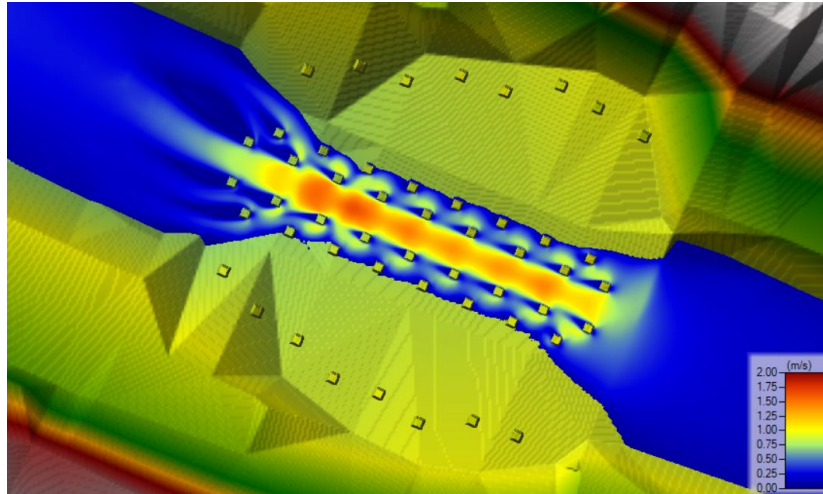


Figure 6: Velocity field for the simulation with SWE with turbulence

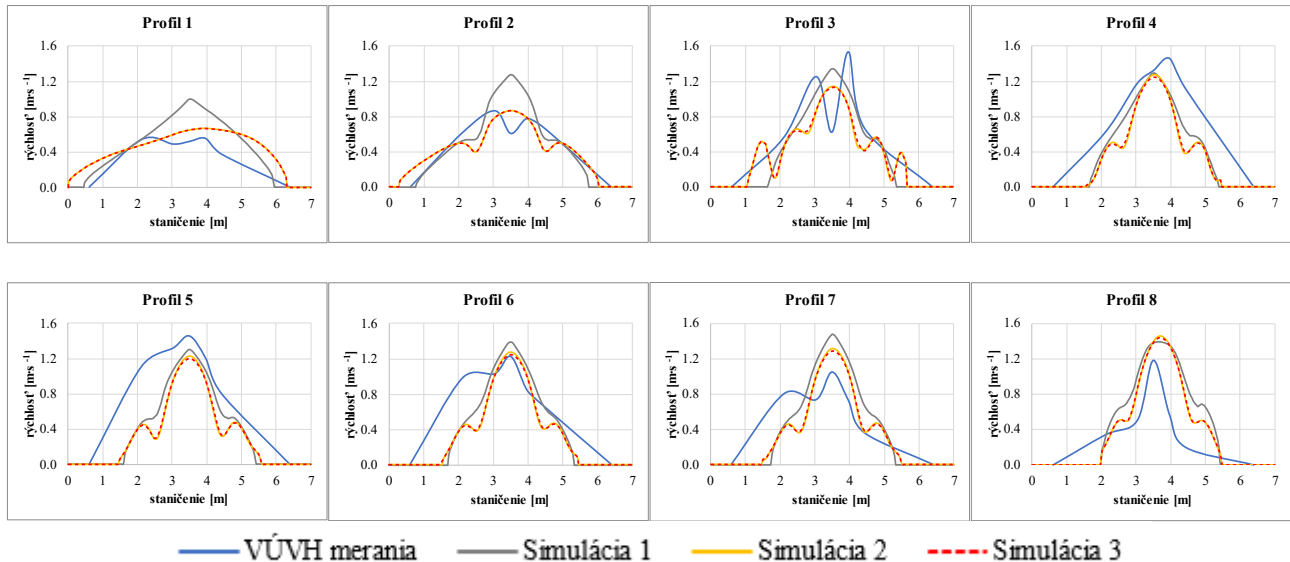


Figure 7: Results comparison of WRI (VÚVH) measurements and simulations for 8 profiles

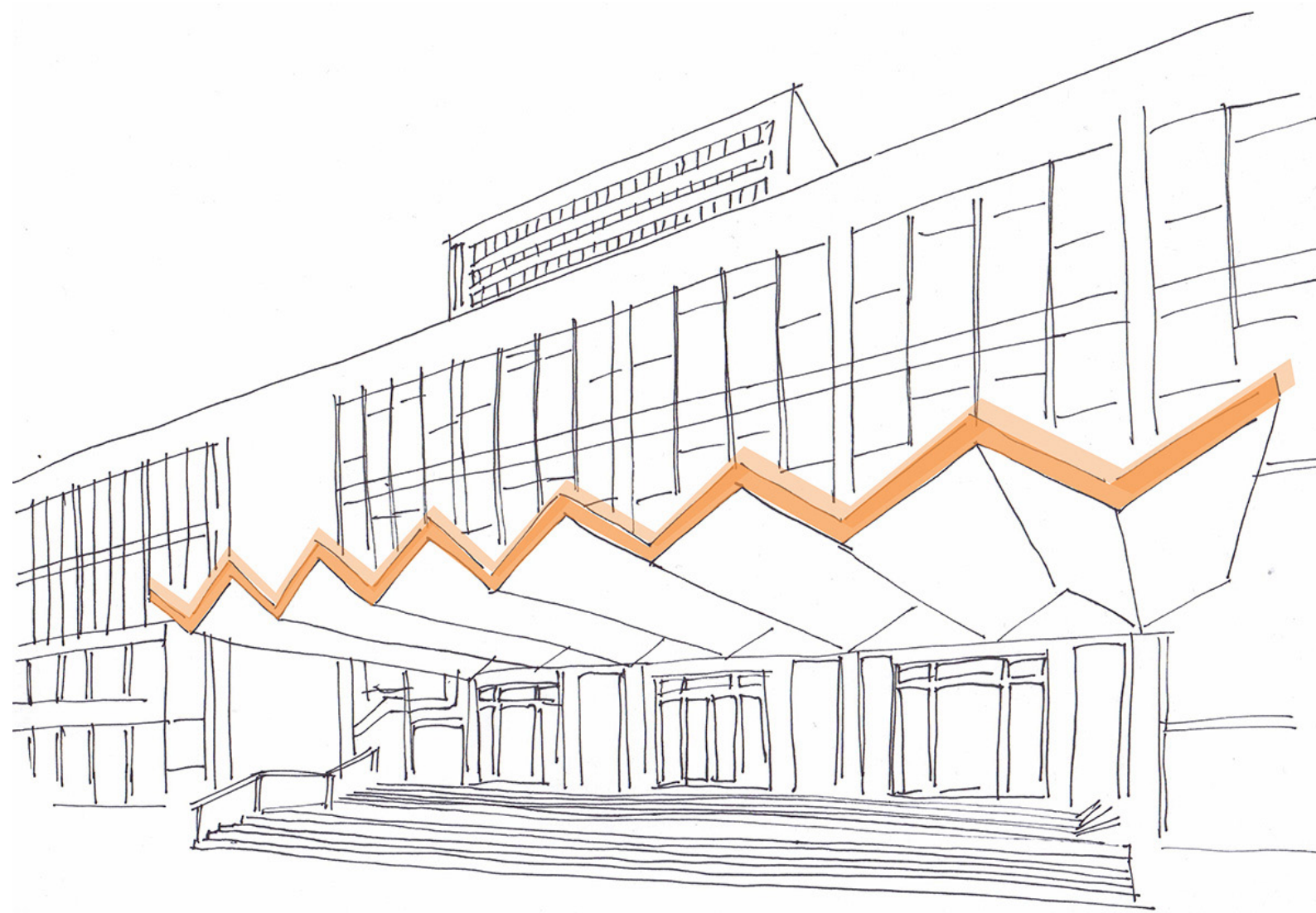
4. Záver

2D matematický model je cenný nástroj na simuláciu a vizualizáciu prúdenia vody v rôznych podmienkach. Pre vytvorenie hodnoverného modelu je potrebné získať relevantné technické a hydrologické údaje a mať znalosti o používanom softvéri. Analýza doterajších výsledkov naznačuje potrebu dôkladného výberu výpočtovej rovnice, modelu turbulencie a voľby časového kroku. V prípade modelovania prúdenia v prírode blízkom rybovodu sa ukázala potreba voľby najmenšieho časového kroku 0,10 s (pre výpočtovú sieť o priemernej veľkosti bunky 0,10 m), čo je blízko limitom HEC-RASu pre výpočty v relatívne malej, no vysoko detailnej oblasti. Ďalším krokom v riešení bude kalibrácia modelu, ktorá si vyžaduje úpravy Manningovho koeficientu drsnosti. Simulácie s rôznymi radiaciami rovnicami ukázali, že DWE vedie k vyšším maximálnym rýchlostiam, ale s menšou zaplavenou šírkou, zatiaľ čo SWE zabezpečuje nižšie zvislicové rýchlosti a väčšiu zaplavenú šírku.

Na záver možno konštatovať, že pri modelovaní rybovodu sa potvrdilo, že SWE s modelovaním turbulencie sa najviac približuje skutočnému stavu.

Literatúra:

- [1] COSTABILE, P. – COSTANZO, C. – FERRARO, D. – PETACCIA, G.: Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the-art model. Switzerland: Water, 2020.
- [2] MITSOPOULOS, G. – PANAGIOTATOU, E. – SANT, V. – STAMOU, A.: Optimizing the performance of coupled 1D/2D hydrodynamic models for early warning of flash floods. Switzerland: Water, 2022.
- [3] YILMAZ, K. – DARAMA, Y. – ORUC, Y. – MELEK, A. B.: Assessment of flood hazards due to overtopping and piping in Dalaman Akköprü Dam, employing both shallow water flow and diffusive wave equations. Natural Hazards, Vol. 117, 2023.
- [4] PANDEY, B. R. – KNOBLAUCH, H. – ZENZ, G.: Potential dam breach flood assessment with the 2D diffusion and full dynamic wave equations using a Hydrologic Engineering Center-River Analysis System. Switzerland: Water, 2024.
- [5] SIROTA, E.: Opatrenia na odstraňovanie migračných bariér na vodnom toku Myjava – stupeň v rkm 26,500 - Technická správa, Bratislava: Hycoprojekt, a.s. Bratislava, 2019.
- [6] POLÁK, V. – MUŽÍK, V. – DRUGA, V. – ABAFFY, D. – REBENDA, F. – MATOK, P. – MRAVCOVÁ, K. – HRÁNKOVÁ, R. – ČOMAJ, M. – JOŠTIAKOVÁ, D.: Určenie vhodných typov rybovodov podľa typológie vodných tokov: Metodické Usmernenie Ministerstva životného prostredia SR; Výskumný ústav vodného hospodárstva Bratislava, Slovensko, 2015.
- [7] POLÁK, V.: Hydraulické merania na novopostavených rybovodoch, Výsledky merania rýchlostí prúdenia vody v rybovode na rieke Myjava, v rkm. 26,500, Bratislava: Výskumný ústav vodného hospodárstva, 2019.
- [8] HEC-RAS Documentation, [online]. [cit. 30.9.2024].
Dostupné na: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs>
- [9] Mapový klient ZBGIS [online]. [cit. 30.9.2024].
Dostupné na: <https://zbgis.skgeodesy.sk/mapka/sk/kataster?pos=48.800000,19.530000,8>
- [10] MAŇÁK, P.: Seminární práce z předmětu Morfologie a říční inženýrství. Manningův drsnostní součinitel. Praha: České vysoké učení technické v Praze, p. 13, 2017.



ISBN 978-80-227-5461-3

www.svf.stuba.sk