



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Veronika Knapcová

Autoreferát dizertačnej práce:

**Vplyv použitia recyklovaného kameniva do betónu na odolnosť
betónových stĺpov**

na získanie akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe:	teória a konštrukcie inžinierskych stavieb
v študijnom odbore:	stavebníctvo
forma štúdia:	denná

Miesto a dátum:

Bratislava, máj 2024



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedra betónových konštrukcií a mostov, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Veronika Knapcová

Katedra betónových konštrukcií a mostov

Stavebná fakulta, STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Róbert Sonnenschein, PhD.

Katedra betónových konštrukcií a mostov

Stavebná fakulta, STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 31.05. 2024

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa oh na Katedre betónových konštrukcií a mostov (SvF, STU v BA), Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan fakulty

Abstrakt

Práca sa zaoberá vplyvom použitia recyklovaného kameniva na výrobu betónu a jeho následným použitím na výrobu stĺpov. Betón s recyklovaným kamenivom prispieva k zníženiu množstva odpadu končiaceho na skládkach a zároveň pomáha znížiť potrebu ťažby nových surovín. Prítomnosť recyklovaného kameniva v betóne má vplyv na jeho vlastnosti v čerstvom aj zatvrdnutom stave. Vo všeobecnosti sa dá povedať, že so zväčšujúcim sa podielom recyklovaného kameniva v betóne sa znižujú hodnoty jeho mechanických vlastností, zhoršuje sa spracovateľnosť a trvanlivosť.

Experiment bol prevedený na 11 stĺpoch vystavených excentrickému zaťaženiu. Stĺpy obsahovali rôzny podiel tehlového recyklovaného kameniva – 0, 25 %, 50 %, 75 % a 100 %. Experimentom namerané odolnosti stĺpov boli porovnané odolnosťou vypočítanou výpočtovými postupmi uvedenými v Eurokóde 2 a numerickou analýzou v programe Atena 3D. Najpresnejšie výsledky boli dosiahnuté pomocou programu Atena 3D a metódou nominálnej krivosti. Viaceré stĺpy však dosiahli mieru spoľahlivosti menšiu ako 1. Bezpečnejšie hodnoty výpočtu boli dosiahnuté metódou nominálnej krivosti s uvážením redukčného súčiniteľa $k_r=1$, pričom túto hodnotu odporúča Eurokód 2 pre prvú iteráciu výpočtu; a metódou nominálnej tuhosti. Vzhľadom na stupeň vystuženia (väčší ako 1%) je v prípade skúmaného experimentu možné zanedbať účinok výstuže pre výpočet tuhosti. Takto však boli dosiahnuté veľmi konzervatívne výsledky. Presnejšie hodnoty sa získali pri výpočte s uvážením účinkov výstuže.

Na základe už prevedených výskumov bola zostavená databáza stĺpov namáhaných kontinuálnym centrickým tlakom obsahujúcich betónové recyklované kamenivo. Na jej základe bola potom vypočítaná modelová neistota pre tento druh namáhania. Pomocou nej bol následne navrhnutý dodatočný parciálny súčiniteľ pre návrh centricky zaťažených stĺpov z betónu s betónovým recyklovaným kamenivom. Ukázalo sa, že jeho hodnota bola zanedbateľná, čo môže byť spôsobené malou veľkosťou databázy a tiež tým, že boli analyzované stĺpy z betónu s najkvalitnejším typom recyklovaného kameniva - betónovým. **Kľúčové slová:** betón s recyklovaným kamenivom, tehlové recyklované kamenivo, modelová neistota, stĺpy, centrický tlak, excentricita

1. Úvod

Betón s recyklovaným kamenivom (recycled aggregates concrete - RAC) je typ betónu, v ktorom je všetko kamenivo alebo jeho časť nahradená recyklovaným kamenivom (recycled aggregates - RA). Toto kamenivo sa najčastejšie získava zo stavebného a demolačného odpadu (construction and demolition waste - CDW). Najpoužívanejšie je recyklované kamenivo z betónu, tehál alebo mix týchto materiálov. Predmetom predloženej práce je recyklované kamenivo betónové a tehlové.

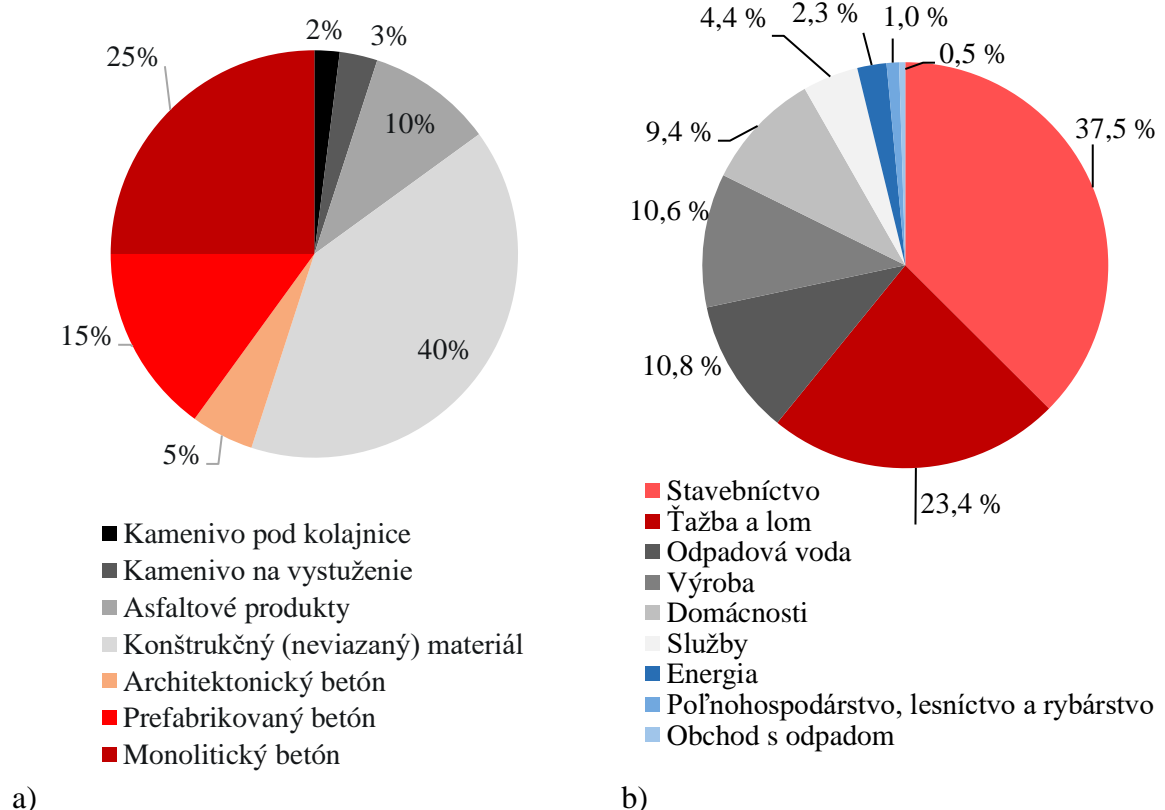
Stĺpy môžu byť značne ovplyvnené použitím recyklovaného kameniva nakoľko ich odolnosť do veľkej miery závisí od pevnosti betónu. Vo väčšine publikovaných experimentov zaoberajúcich sa odolnosťou stĺpov z RAC sa konštatuje, že ich únosnosť je

vyššia ako únosnosť vypočítaná normovými vzťahmi. To však nezaručuje, že stĺpy vyrobené z RAC spĺňajú tiež požadovanú pravdepodobnosť zlyhania. Na základe už publikovaných experimentov bola zostavená databáza, pomocou ktorej bola vypočítaná modelová neistota centricky namáhaných stĺpov vyrobených z betónu s recyklovaným kamenivom s použitím betónového RA. Na jej základe bol potom navrhnutý parciálny súčiniteľ zohľadňujúci použitie tohto typu RAC na odolnosť betónových stĺpov.

Vykonaný experimentálny program prezentovaný v tejto práci sa teda zaoberal excentricky zaťaženými stĺpmi vyrobenými z RAC s rôznym podielom tehlového recyklovaného kameniva – 0 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 %. Podrobne je popísaný v kapitole **Error! Reference source not found.** Naň nadväzuje kapitola 6, v ktorej sú uvedené rôzne spôsoby výpočtu odolnosti stĺpov a ich následné porovnanie s experimentálne nameranými hodnotami.

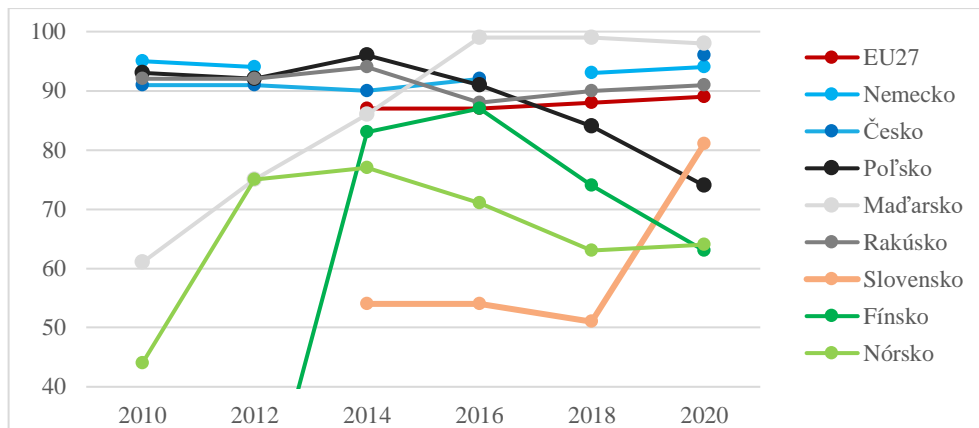
2. Súčasný stav riešenej problematiky

Množstvo výskumu sa v súčasnej dobe venuje ekologickejšim verziám betónu. Hlavným prínosom recyklovaného kameniva je zníženie množstva odpadu (produkcia odpadu štátmi Európskej únie je na Obr. 2.1 a)), a teda nižšia potreba skládkovania. Druhým prínosom je redukcia ťažby primárnych surovín (štrk, piesok) potrebných na výrobu betónu (produkcia odpadu v EÚ je na Obr. 2.1b)).



Obr. 2.1 a) Využitie konštrukčného kameniva v krajinách monitorovaných UEPF (Európska asociácia pre kamenivo) [1]; b) Generovanie odpadu ekonomickými aktivitami a domácnosťami Európskej únie za rok 2020 (% z celkového odpadu) [2]

V smernici európskeho parlamentu a rady (Waste Framework Directive 2008/98/ES) [3] z roku 2008 je stavebný a demolačný odpad riešený v článku 11.2. Od roku 2020 malo byť váhovo 70 % odpadov z konštrukcie a demolácii pripravených na recykláciu. Do týchto 70 % sa započítava aj odpad použitý na spätné zasypávanie [3]. Dosiahnuté výsledky Európskych krajín sú uvedené na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Miera obnovy (recovery rate - RR) stavebného a demolačného odpadu vybraných krajín za časové obdobie 2010 až 2020. Dáta z Eurostatu (2022) [4]

RR a spomínaný dataset boli kritizované vo viacerých článkoch, keďže napriek usmerneniam platiacim v celej EÚ a povinnosti jednotlivých národov predkladať správy o nakladaní s CDW, RR dáta publikované Eurostatom podliehali stále rôznym obmedzeniam, ktoré komplikovali transparentnosť a spoľahlivé porovnávanie RR v rámci celej EÚ [5]. Medzi konkrétne problémy patria neharmonizovaná metóda zhromažďovania údajov [6], existencia rôznych klasifikačných systémov odpadu (národné klasifikačné systémy) alebo nedostatočná definícia aktivít spojených so spätným zasypávaním [5,7]. Zverejnené RR boli teda ovplyvnené nielen skutočným technologickým a legislatívnym stavom CDW manažmentu v tej-ktorej krajine, ale tiež vyššie spomenutými metodologickými obmedzeniami. Podľa novelizovanej smernice o odpadoch WFD má Európska komisia do konca roka 2024 zvážiť nové ciele pre CDW a má byť zverejnené harmonizované usmernenie týkajúce sa definície odpadu a spätného zasypávania [5].

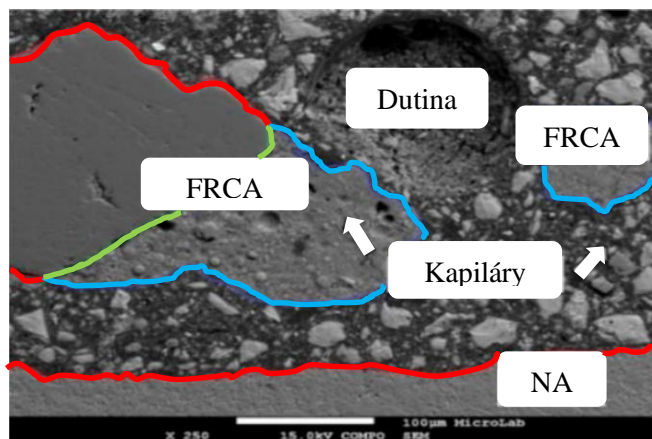
2.1. Recyklované kamenivo a betón s recyklovaným kamenivom

Kamenivo tvorí 70 až 80 % objemu betónu a výrazne ovplyvňuje jeho vlastnosti [8]. Kvalita recyklovaného kameniva závisí od kvality a pevnostnej triedy pôvodného betónu, z ktorého bolo kamenivo získané; schopnosti absorpcie vody a množstva zostatkového cementového kameňa (adhered mortar) z pôvodného betónu.

RA môže rozdeliť podľa viacerých hľadísk: Podľa zdrojového materiálu (na kamenivo z recyklovaného betónu (RCA – recycled concrete aggregates), kamenivo z recyklovaného tehlového odpadu (RMA – recycled masonry aggregates), zmiešané kamenivo (MRA – mixed recycled aggregates), iné recyklované materiály (guma z pneumatík, sklo...). Podľa veľkosti zrn kameniva alebo zrnitosti (na jemné RA a hrubé RA).

Vlastnosti RA:

- Vo všeobecnosti, čím menšie sú zrná RA, tým väčší je podiel zostatkového cementového kameňa na jeho povrchu. Keďže množstvo zostatkového cementového kameňa má nežiadúci vplyv na vlastnosti kameniva, vo väčšine výskumov sa ako jemné kamenivo používa prírodné kamenivo.
- Tvar RA kameniva je obyčajne pretiahnutejší ako tvar NA kameniva, z čoho vyplýva vyšší tvarový index.
- Zostatkový cementový kameň znižuje objemovú tiaž RA a je pórovitejší ako NA. Podiel zostatkového cementového kameňa vplyva nepriamo úmerne na objemovú hmotnosť. RA má o 5% - 10% nižšiu objemovú tiaž ako prírodné kamenivo. Recyklované hrubé kamenivo má špecifickú (relatívnu) hmotnosť (pomer hmotnosti kameniva a hmotnosti vody rovnakého objemu) 2,2 až 2,5 v SSD stave (saturated surface dry – nasýtené kamenivo so suchým povrchom). Pričom NA rovnakej frakcie má hodnotu 2,4 až 2,9 [9]. Recyklované jemné kamenivo má relatívnu objemovú hmotnosť 2,0 až 2,3 v SSD stave [9].
- Pórovitý zostatkový cementový kameň vedie k zvýšenej vodnej absorpcii. Vysoká vodná absorpcia ovplyvňuje spracovateľnosť betónovej zmesi a teda aj vodný súčiniteľ.
- Dodatočné medzifázové prechodové zóny (ITZ - interfacial transition zone) majú nežiadúci vplyv na správanie RAC. ITZ medzi prírodným kamenivom a cementovým tmelom nového betónu je prítomná v oboch – NAC aj RAC (červená čiara na Obr. 2.3). ITZ medzi prírodným kamenivom v RA a zostatkovým cementovým kameňom (zelená čiara) a medzi zostatkovým cementovým kameňom a novým cementovým tmelom (modrá čiara) existuje iba v RCA [10].



Obr. 2.3 Snímka z elektrónového mikroskopu zobrazujúca rôzne typy ITZ prírodného a recyklovaného kameniva [11]

Vlastnosti zatvrdnutého betónu:

- Pevnosť v tlaku sa často používa ako indikátor kvality, keďže väčšina mechanických vlastností a tiež trvanlivosť betónu sa bežne zlepšuje pri zvyšujúcej sa pevnostnej triede betónu. Vo všeobecnosti, zvyšovaním podielu RA v RAC klesá pevnosť

betónu v tlaku. Rozsah poklesu závisí do veľkej miery od typu RA, jeho kvality a pôvodu [12].

- Horšie mechanické vlastnosti recyklovaného kameniva sa výrazne prejavujú v zníženej hodnote modulu pružnosti RAC, ktorý je silne závislý od kvality hrubého kameniva.
- Typický tvar vzostupnej vetvy pracovného diagramu RAC je veľmi podobný tvaru konvenčného betónu bez ohľadu na podiel RA. Tvar je lineárny až po 0,4-násobok pevnosti v tlaku, potom sa stáva parabolickým [13]. Z dôvodu väčšiemu počtu prechodových zón v RAC, rastie pomerné pretvorenie v tomto type betónu rýchlejšie. Ako už bolo spomínané, modul pružnosti dosahuje menšie hodnoty, čo sa prejavuje na menšom sklone pracovného diagramu RAC [13].

3. Ciele a tézy dizertačnej práce

Témou práce je posúdenie vplyvu použitia recyklovaného kameniva do betónu na odolnosť stĺpov vyrobených z tohto betónu. Čiastočné alebo úplné nahradenie prírodného kameniva recyklovaným ovplyvňuje vlastnosti čerstvej betónovej zmesi aj zatvrdnutého betónu, preto je dôležité detailne preskúmať ich vplyv a určiť spoľahlivý spôsob, ako zohľadniť použitie recyklovaného kameniva do betónu. Výskumov zaoberajúcich sa odolnosťou stĺpov z betónu s recyklovaným kamenivom je pomerne málo a sú zamerané prevažne na použitie betónového recyklovaného kameniva, čo je najkvalitnejší typ recyklovaného kameniva.

Hlavné ciele dizertačnej práce môžeme formulovať nasledovne:

- Overenie vplyvu množstva recyklovaného tehlového kameniva v betóne na odolnosť stĺpov.
- Vytvorenie a analýza databázy doteraz uskutočnených experimentov zaoberajúcich sa odolnosťou stĺpov z betónu s recyklovaným betónovým kamenivom.
- Stanovenie modelovej neistoty modelu odolnosti na základe vytvorenej databázy pre stĺpy z betónu so 100 % podielom recyklovaného kameniva a stĺpy z betónu s prírodným kamenivom.
- Stanovenie parciálneho súčiniteľa pre návrh centricky tlačených prvkov z betónu s recyklovaným betónovým kamenivom.

4. Metodika práce a metódy skúmania

Postup práce zahŕňa riešenia úloh, ktoré viedli k dosiahnutiu hlavných cieľov dizertačnej práce. Je možné ich zhrnúť do hlavných bodov:

- Teoretická časť výskumu – sa zameriava na štúdium literatúry zaoberajúcej sa použitím recyklovaného kameniva do betónu a jeho vplyvu na vlastnosti betónu tak v čerstvom ako aj zatvrdnutom stave. Osobitá pozornosť bola následne venovaná doterajším výskumom zaoberajúcim sa stĺpmi vyrobenými z betónu recyklovaným kamenivom. Cieľ teoretickej časti spočíva v štúdiu experimentálnych programov vo svete zameraných na problematiku stĺpov z betónu s recyklovaným kamenivom,

ktoré slúžili ako základ návrhu vlastného experimentálneho programu. Jedným z výsledkov tejto rešerše bolo vytvorenie databázy experimentov realizovaných na stĺpoch z betónu s betónovým recyklovaným kamenivom.

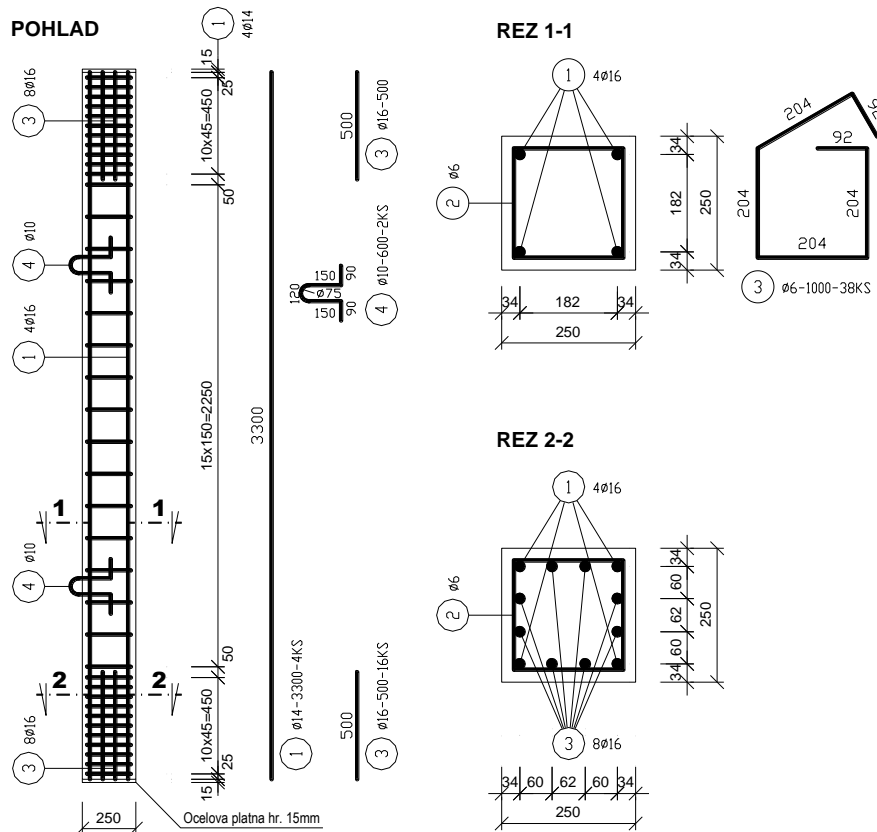
Pomocou databázy stĺpov z RAC vytvorenej v rámci teoretickej analýzy sa vykonal výpočet modelovej neistoty modelu odolnosti pre stĺpy z RAC a referenčných vzoriek. Pomocou vypočítanej modelovej neistoty sa potom určil parciálny súčiniteľ pre návrh tlačných prvkov z RAC.

- Experimentálna časť výskumu – zahŕňa návrh, výrobu a vykonanie experimentu pozostávajúceho z jedenástich stĺpov s rôznym percentom náhrady prírodného kameniva recyklovaným. Stĺpy boli zaťažované silou pôsobiacou na základnej excentricite 20 mm a 40 mm. Podrobne opísaný návrh experimentálneho programu spolu s výsledkami je popísaný v kapitole **Error! Reference source not found.**

5. Experimentálny program

Experimentálny výskum bol navrhnutý ako krátkodobé zaťažovacie skúšky jedenástich železobetónových stĺpov. Betón použitý na výrobu stĺpov obsahoval rôzny podiel recyklovaného kameniva. Ako recyklované kamenivo bolo použité kamenivo z tehlového CDW frakcie 0 až 22 mm.

Priečný rez stĺpa bol 250 mm x 250 mm. Výška 3,3 m. Stĺpy boli vystužené štyrmi prútmi pozdĺžnej výstuže priemeru 16 mm. Strmene mali priemer 6 mm a boli vo vzájomnej vzdialenosti 150 mm so zahustením na koncoch. Krytie strmeňov bolo 20 mm. Podrobná schéma vystuženia je zobrazená na **Error! Reference source not found.**



Obr. 5.1 Schéma vystuženia stĺpov

Stĺpy boli navrhnuté s pevnostnou triedou betónu C25/30. Podiel recyklovaného kameniva vo vzorkách bol 0 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 %. Celkový počet vzoriek bol 11 – po dve vzorky z referenčného betónu (0 %), 25 %, 50 % a 75 %, tri vzorky z betónu s úplnou náhradou prírodného kameniva recyklovaným kamenivom (100 %). Na oboch koncoch stĺpa sa nachádzali oceľové roznašacie platne hrúbky 15 mm, na ktoré bola privarená betonárska výstuž. Konštrukčné oceľové platne boli triedy S235, pozdĺžna výstuž a strmene boli triedy B 500B.

Počas betonáže boli odobraté vzorky použitých betónov. V spoločnosti Skanska Transbeton, s.r.o. boli odskúšané vzorky (kocky o rozmere 150 x 150 x 150 mm) v čase 7 dní a 28 dní po betonáži. Z dodaných vzoriek (kocky, valce) bola určená pevnosť v tlaku v čase skúšania stĺpov (cca 100 dní od betonáže) pre betóny s podielom recyklovaného kameniva 50 %, 75 % a 100 %. Pevnosť betónu v tlaku a modul pružnosti E pre betóny s podielom recyklovaného kameniva 0 % a 25 % boli stanovené pomocou odvrto. Všeobecný prehľad charakteristík betónu v čase je uvedený v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Prehľad charakteristík betónu v čase

Typ betónu	Pevnosť betónu v tlaku [MPa]						Modul pružnosti [GPa]	
	7 dní	28 dní	V čase skúšania stĺpov				Hranoly	Odvrtý
	Kocky	Kocky	Kocky	Valce	Hranoly	Valcová pevn. vyp. z odvrto		
0%	27,3	36,4	-	-	-	35,1	-	34,64
25%	24,9	37,2	-	-	-	30,88	-	26,79
50%	22,2	31,5	40,58	25,66	31,86	-	21,67	-
75%	23,5	33	43,86	28,83	32,51	-	19,07	-
100%	18,6	28,25	37,79	23,24	29,72	-	16,27	-

Vzorky prevedeného experimentu vykazujú nízku hodnotu konverzného súčiniteľa medzi kockovou a valcovou pevnosťou. Pevnosť v tlaku betónu na kockách aj valcoch skúšali aj v [14]. V tomto výskume bolo použité tehlové RA. Výsledky z tohto výskumu v porovnaní s experimentom sú uvedené v Tab. 5.2 **Error! Reference source not found.** Vo výskumoch, kde vznikne potreba prepočítať kockovú pevnosť na valcovú používajú konverzný súčiniteľ 0,8 (napr. [15]) príp. 0,83 (napr. [16]).

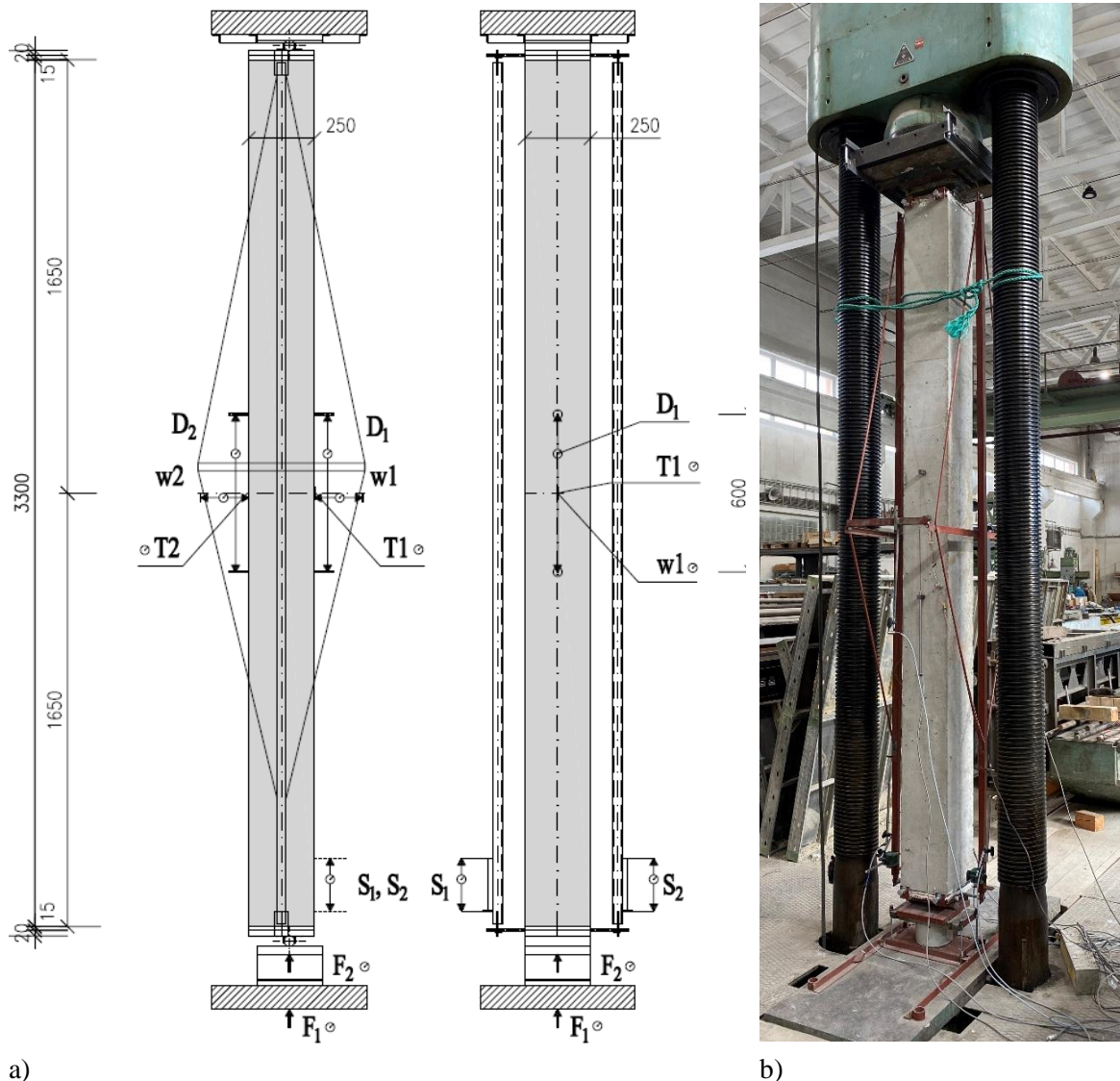
Tab. 5.2 Porovnanie konverzného súčiniteľa K

Zdroj	Kamenivo	Percentuálny podiel RA	Pevnosť betónu v tlaku [MPa]		K
			Kocky	Valce	
Gonzalez-Corominas et al. (2014) [14]	NAC	0%	102,09	90,7	0,89
	Jemné RA	15%	109,7	97,01	0,88
		30%	109,06	97,41	0,89
	Hrubé RA	20%	101,6	79,61	0,78
		50%	87,02	66,4	0,76
		100%	72,28	53,03	0,73
Experiment	Hrubé aj jemné RA	50%	40,58	25,66	0,63
		75%	43,86	28,83	0,66
		100%	37,79	23,24	0,61

5.1. Skúšobná zostava

Stĺpy boli označené v tvare $Sr-e$, pričom r predstavuje podiel recyklovaného kameniva (0, 25, 50, 75, 100 %) a e základnú excentricitu (20 mm alebo 40 mm), na ktorej pôsobilo zaťaženie. Vzorka s označením S100-40 bude v analýze experimentu vyhodnocovaná iba informačne nakoľko k betónu, z ktorého bola vybetónovaná neboli spravené žiadne materiálové skúšky. V analýzach sa predpokladá, že materiálové vlastnosti danej vzorky sú zhodné so stĺpmi S100-20 a S100-40_2. Tie však boli betónované iný deň (9.12.2022, kým S100-40 bola vyrobená 14.12.2022).

Skúšobná zostava každého stĺpa pozostávala zo samotnej vzorky stĺpa, pomocnej oceľovej konštrukcie, tzv. meracieho rámu a meracích zariadení (pozri Obr. 5.2). Merací rám bol pripevnený k hlave a päte stĺpa na čelách roznašacích oceľových platní. Na tomto ráme boli umiestnené zariadenia na meranie prihybov stĺpa a stlačení celej zostavy. Týmto spôsobom zaznamenávali meracie zariadenia umiestnené na meracom ráme stĺpa hodnoty bez rizika chýb, ktoré by mohli vzniknúť, ak by boli meracie zariadenia umiestnené na externých držiakoch.



Obr. 5.2 a) schéma meracej zostavy; b) skúšobná zostava

Meracie zariadenia pomerných pretvorení pozostávali z dvoch tenzometrov (na ťahanej T2 a tlačenej strane T1 na Obr. 5.2) a dvoch deformometrov na základni 600 mm (D1, D2). Priehyb bol meraný v strede výšky stĺpa v smere hlavného ohybového namáhania vynúteného základnou excentricitou v podperách stĺpa. Priehyb zaznamenávali LVDT snímače na tlačenej (w1) a ťahanej strane stĺpa (w2). Stlačenie zostavy bolo merané na pomocnom meracom ráme stĺpa v mieste klzného spoja, ktorý umožňoval zvislý posun (S1, S2). Zaťažovacia sila bola elektronicky zaznamenávaná zo silomeru HBM C6A Hottinger 2 MN do zbernice dát a následne do počítača (F2). Počas skúšok bola zaznamenávaná sila vizuálne kontrolovaná s analógovým ukazovateľom aktuálnej sily na ovládacom paneli hydraulického lisu (F1). Zaťažovacie skúšky prebiehali v jednotlivých zaťažovacích stupňoch, pričom jeden zaťažovací stupeň predstavoval navýšenie približne o silu 150 kN.

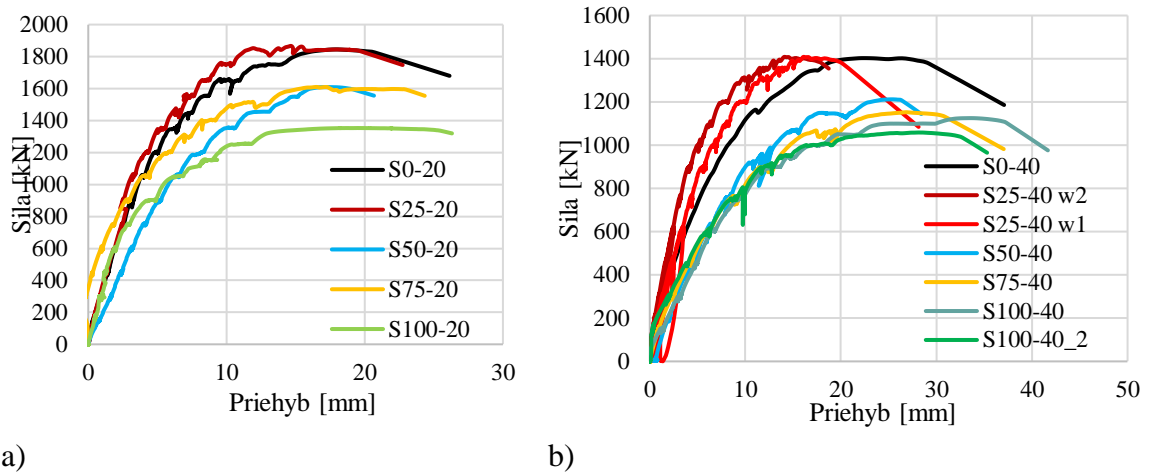
5.2. Merania a výsledky

Porušenie nastalo tak ako bolo predpokladané – v strednej časti stĺpov. Po dosiahnutí maximálnej osovej sily prišiel nekontrolovaný nárast deformácie v strede stĺpov pri miernom poklese sily, až došlo k porušeniu v kritickom priereze. Porušenia stĺpov boli sprevádzané vyčerpaním kapacity betónu pri pomernom pretvorení v priemere 6 ‰ v tlačenej zóne betónového prierezu pre základnú excentricitu 20 mm a 4,5 ‰ pre základnú excentricitu 4 mm. Maximálna osová sila bola považovaná za odolnosť stĺpa. Pomerné pretvorenia pri porušení stĺpov sú uvedené v Tab. 5.3.

Tab. 5.3 Pomerné pretvorenia stĺpov z experimentu pri porušení

Označenie stĺpa	Tlačená strana			Ťahaná strana		
	ε_{D1}	ε_{T1}	Rozdiel	ε_{D2}	ε_{T2}	Rozdiel
	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	[%]	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	[%]
S0-20	-5282	-5014	5,1	1079	530	50,8
S25-20	-5126	-5488	7,1	727	787	8,2
S50-20	-4329	-5857	35,3	809	1168	44,3
S75-20	-5257	-6039	14,9	764	388	49,3
S100-20	-6073	-7767	27,9	1022	725	29,0
S0-40	-	-5852	-	1763	2983	69,2
S25-40	-4756	-2353	50,5	2119	3054	44,1
S50-40	-5038	-4115	18,3	1943	-	-
S75-40	-5252	-3627	30,9	2464	1457	40,9
S100-40	-5995	-6771	12,9	3195	-213	106,7
S100-40_2	-	-3941	-	2939	725	75,3

Na Obr. 5.3 a) je graf znázorňujúci závislosť sily a priehybu stĺpov zaťažovaných silou pôsobiacou na excentricite 20 mm. Na Obr. 5.3 b) je obdobný graf pre základnú excentricitu 40 mm. Na tomto grafe sú znázornené dve krivky pre stĺp S25-40. Pre tento stĺp vykazovali merania priehybu najväčšie rozdiely medzi meraniami na tlačenej (w1) a ťahanej (w2) strane. Preto sú v grafe uvedené obe merania.



Obr. 5.3 Deformácie stĺpov s excentricitou a) 20 mm; b) 40 mm

Celková excentricita e pri porušení prierezu je definovaná súčtom základnej excentricity osovej sily e_1 (20 mm resp. 40 mm) a excentricity od nameraného priehybu pri porušení stĺpa e_2 . Tá bola určená ako aritmetický priemer hodnôt nameraných na tlačenej a ťahanej strane stĺpa, jedinou výnimkou bola excentricita stĺpu S50-40, kde snímač na tlačenej strane nefungoval správne. Ohybový moment M_{Ru} pri osovej sile N_{Ru} bol určený ako súčin $M_{Ru} = N_{Ru} \cdot e$. V Tab. 5.4 sú znázornené porovnania medzi hodnotami stĺpov z RAC a z NAC pre veličiny maximálna osová sila, celková excentricita a ohybový moment pri porušení prierezu.

Tab. 5.4 Porovnanie maximálnej sily, celkovej excentricity a momentu pri porušení stĺpa prierezu medzi stĺpmi z RAC a referenčnými stĺpmi.

Označ. stĺpa	Max. sila	Percentuálny pokles oproti ref. stĺpu	Celková excentricita	Percentuálny pokles oproti ref. stĺpu	Ohybový moment pri porušení prierezu	Percentuálny pokles oproti ref. stĺpu
	N_{Ru} [kN]		e [mm]		M_{Ru} [kNm]	
S0-20	1845	0,0%	40,620	0,0%	74,96	0,0%
S25-20	1867	-1,2%	39,571	2,6%	73,88	1,4%
S50-20	1610	12,8%	40,442	0,4%	65,10	13,2%
S75-20	1610	12,7%	43,200	-6,4%	69,57	7,2%
S100-20	1353	26,7%	44,893	-10,5%	60,76	18,9%
S0-40	1403	0,0%	64,030	0,0%	89,82	0,0%
S25-40	1409	-0,4%	58,967	7,9%	83,05	7,5%
S50-40	1212	13,6%	66,364	-3,6%	80,44	10,4%
S75-40	1153	17,8%	70,524	-10,1%	81,28	9,5%
S100-40	1125	19,8%	67,186	-4,9%	75,60	15,8%
S100-40_2	1059	24,5%	71,360	-11,4%	75,55	15,9%

Porovnanie maximálnej sily, ktoré je uvedené v Tab. 5.4 je do veľkej miery ovplyvnené pevnosťou betónu v tlaku, ktorá sa medzi jednotlivými betónovými zmesami výrazne líši. Toto je možné vyriešiť normalizovaním maximálnej normálovej sily pevnosťou v tlaku (Tab. 5.5). Ako pevnosť bola uvažovaná 28-dňová kocková pevnosť v tlaku, keďže medzi prevedením skúšok na určenie tejto pevnosti sú najmenšie rozdiely, nakoľko boli všetky vzorky skúšané v jednom zariadení – spoločnosť Skanska, na rovnakom type vzorky (kocky), v rovnakom čase (28 dní po betonáži). V poslednom stĺpci tabuľky sú vypočítané hodnoty normalizovaných normálových síl ešte podelené hodnotou $N_{nom,NAC}$ pre jednotlivé excentricity kvôli ľahšiemu porovnávaniu.

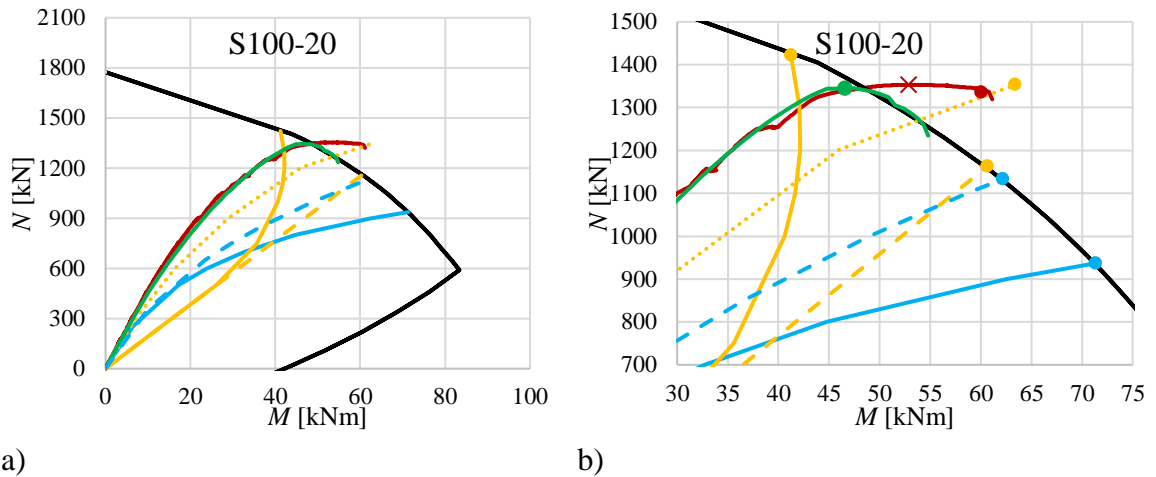
Pri stĺpoch zaťažovaných na excentricite 40 mm sú pozorované väčšie odchýlky nakoľko do tejto odolnosti vstupoval vo výraznejšej miere vplyv excentricity a rozdielneho modulu pružnosti. Normalizácia len cez pevnosť v tlaku nie je pri stĺpoch výrazne excentricky namáhaných dostatočne výpovedná. Modul pružnosti je v tabuľke uvedený z informatívnych dôvodov. Veľkú odchýlku môžeme pozorovať pre stĺp S100-40, nakoľko jeho materiálové charakteristiky nie sú známe a sú teda uvažované rovnakými hodnotami ako S100-20 a S100-40_2.

Tab. 5.5 Porovnanie sily normalizovanej pevnosťou betónu v tlaku medzi stĺpmi z RAC a referenčného betónu

Označenie stĺpa	28-dňová kocková pevnosť v tlaku	Modul pružnosti	Maximálna sila	Normalizovaná maximálna sila	$N_{normRAC}/N_{normNAC}$
	f_c [MPa]	E [GPa]	N_{Ru} [kN]	N_{nom} [kN/MPa]	
S0-20	36,4	34,64	1845	50,7	1,00
S25-20	37,2	26,79	1867	50,2	0,99
S50-20	31,5	21,67	1610	51,1	1,01
S75-20	33	19,07	1610	48,8	0,96
S100-20	28,25	16,27	1353	47,9	0,95
S0-40	36,4	34,64	1403	38,5	1,00
S25-40	37,2	26,79	1409	37,9	0,98
S50-40	31,5	21,67	1212	38,5	1,00
S75-40	33	19,07	1153	34,9	0,91
(S100-40)	(28,25)	(16,27)	(1125)	(39,8)	(1,03)
S100-40_2	28,25	16,27	1059	37,5	0,97

6. Výpočet odolnosti stĺpov experimentu

Na výpočet odolnosti skúšaných stĺpov boli použité tieto vypočtové modely: Metóda nominálnej tuhosti (s uvážením účinku výstuže $K_s=1$ a bez neho $K_s=0$), metóda nominálnej krivosti (s uvážením redukčného súčiniteľa $k_r=1$ a s k_r vypočítaným podľa presnejšieho vzťahu z normy), odolnosť určená programom Atena 3D. Výsledky odolnosti jednotlivých metód sú uvedené v Tab. 6.1. Výsledky jednotlivých metód pre stĺp S100-20 zobrazené spolu s interakčným diagramom sú zobrazené na Obr. 6.1.



Obr. 6.1 Porovnanie odolností získaných rôznymi výpočtovými postupmi pre stĺp S100-20: a) celé diagram; b) detail.

Tab. 6.1 Porovnanie odolností získaných výpočtovými metódami a experimentom

Označenie stĺpa	Expe- rim. N [kN]	Atena 3D		Met. nom. tuhosti		Met. nom. tuhosti $K_s=1$		Met. nom. krivosti		Met. nom. krivosti $k_r=1$	
		N [kN]	$N_{exp}/$ N_{vyp}	N [kN]	$N_{exp}/$ N_{vyp}	N [kN]	$N_{exp}/$ N_{vyp}	N [kN]	$N_{exp}/$ N_{vyp}	N [kN]	$N_{exp}/$ N_{vyp}
S0-20	1845	1889	0,98	1606	1,15	1763	1,05	1908	0,97	1582	1,17
S25-20	1867	1695	1,10	1353	1,38	1536	1,22	1735	1,08	1435	1,30
S50-20	1610	1464	1,10	1175	1,37	1417	1,14	1528	1,05	1247	1,29
S75-20	1610	1582	1,02	1096	1,47	1340	1,20	1660	0,97	1357	1,19
S100-20	1353	1346	1,01	937	1,44	1133	1,19	1422	0,95	1165	1,16
S0-40	1403	1502	0,93	1243	1,13	1314	1,07	1446	0,97	1305	1,07
S25-40	1409	1359	1,04	1059	1,33	1120	1,26	1323	1,06	1185	1,19
S50-40	1212	1179	1,03	898	1,35	950	1,28	1170	1,04	1038	1,17
S75-40	1153	1266	0,91	880	1,31	993	1,16	1262	0,91	1128	1,02
S100-40	1125	1085	1,04	757	1,49	858	1,31	1098	1,02	964	1,17
S100-40_2	1059	1085	0,98	757	1,40	858	1,23	1098	0,96	964	1,10

Zhodnotenie výsledkov z hľadiska bezpečnosti:

- Metóda nominálnej tuhosti
 - Poskytuje veľmi konzervatívne výsledky a to hlavne pre stĺpy z RAC.
 - Priemerná hodnota spoľahlivosti pre všetky stĺpy je 1,35, pre referenčné stĺpy je to 1,14 a pre stĺpy z RAC 1,39.
 - Pri uvážení príspevku výstuže je úroveň spoľahlivosti nasledovná: 1,19 pre všetky stĺpy dokopy, 1,06 pre referenčné stĺpy, 1,22 pre stĺpy z RAC.
- Metóda nominálnej krivosti:
 - Pri uvážení redukčného súčiniteľa závislého od osovej sily k_r podľa vzťahu: $k_r = \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \leq 1$, vyjde väčšina stĺpov na strane nebezpečnej (pomer vypočítanej a experimentálnej odolnosti vyjde pod 1).

- Priemerná spoľahlivosť pre všetky stĺpy je 1,0, pre stĺpy z NAC 0,97 a pre stĺpy z RAC 1,01.
- Pri použití súčiniteľa $k_r = 1$ je priemerná hodnota spoľahlivosti na úrovni 1,17, pričom pre stĺpy z NAC je to 1,12 a pre stĺpy z RAC 1,18.
- Program Atena 3D:
 - Priemerná spoľahlivosť pre všetky stĺpy je 1,01, pre stĺpy z NAC 0,96 a pre stĺpy z RAC 1,02.

Z prezentovaného analýzy vyplýva, že pre bezpečný návrh stĺpov z experimentu je najlepšie použiť zjednodušenú metódu na základe nominálnej krivosti s hodnotou redukčného súčiniteľa $k_r = 1$ alebo metódu nominálnej tuhosti s uvážením príspevku výstuže.

7. Teoretická analýza – určenie modelovej neistoty

Databáza, na základe ktorej bola modelová neistota určená, bola zostavená z recenzovaných publikácií. Po výpočte θ_R boli pre každý typ betónových zmesí definované pravdepodobnostné rozdelenia a štatistické parametre (priemer, štandardná odchýlka a koeficient variácie) pre modelovú neistotu. Následne bola modelová neistota overená voči parametrom, ktoré ovplyvňujú odolnosť, prostredníctvom koeficientu korelácie a bodových diagramov, ktoré porovnávajú θ_R s každým parametrom. Potom bola vhodnosť normálnych a lognormálnych pravdepodobnostných rozdelení overená analýzou pomocou kvalitatívnych testov zhody (normal paper plots). Ďalej sa vykonal výpočet návrhovej hodnoty modelovej neistoty θ_{Rd} s uvážením lognormálnej distribúcie θ_R a odhad parciálneho súčiniteľa γ_{RdI} . Tento odhad kvantifikuje vplyv θ_R na návrh. Navrhovaný parciálny súčiniteľ pre odolnosť stĺpov vyrobených z RAC γ_{RAC} bol vypočítaný ako pomer parciálnych súčiniteľov γ_{RdI} pre RAC a NAC.

Databáza pozostáva z 51 stĺpov zo siedmych publikácií [17–23]. Všetky uvažované vzorky z týchto publikácií sa týkajú stĺpov zaťažených monotónnym centrickým tlakom. Všetky vzorky boli vyrobené v laboratórnych podmienkach a testované bez pôsobenia akýchkoľvek dlhodobých účinkov.

Boli analyzované tri datasey:

- NAC - stĺpy obsahujúce iba prírodné zrno (NA);
- RAC100 - stĺpy s plnou náhradou RA;
- RACinter - stĺpy s podielom RA medzi 15 % a 80 %.

Keďže RACinter dataset bol zhromaždený len zo 4 publikácií [17,20,22,23] s veľkým rozpätím podielu RA (15 až 80 %), konečná analýza tento dataset vynecháva.

Tab. 7.1 Štatistické údaje modelovej neistoty

Dataset	Eurokód 2 (2004) bez ovinutia			Eurokód 2 (2004) s ovinutím			Eurokód 2 (2023) s ovinutím		
	Priemer	St.dev	CoV	Priemer	St.dev	CoV	Priemer	St.dev	CoV
NAC	0,93	0,11	12%	0,91	0,09	10%	0,93	0,10	11%
RACinter	1,02	0,11	11%	0,99	0,10	10%	1,01	0,11	11%
RAC100	0,88	0,08	9%	0,87	0,07	8%	0,88	0,07	8%

Štatistické údaje modelu neistoty θ_R každého datasetu sú uvedené v Tab. 7.1. Vyplývajú z nich nasledovné:

- Pre dataset NAC je najpresnejší a najspoľahlivejší model (priemer blízko hodnoty 1,0 a menší koeficient variácie CoV) nová generácia Eurokódu 2 (2023) [24];
- Hodnoty priemeru datasetov NAC a RAC100 sú v súlade s očakávaniami – priemer θ_R je bližšie k 1,0 pre návrh s NAC a znižuje sa pri použití RA;
- Koeficient variácie CoV a štandardná odchýlka (St.dev.) ukazujú opačný trend - keď sa používa RA, dataset je menej variabilný, čo je v rozpore s očakávaniami.

Očakávalo sa, že dataset RA bude variabilnejší, pretože častice RA sú čiastočne zložené zo zostatkovej malty, nie len z kameňa. To zvyšuje celkovú variabilitu zrn, pretože:

- Samotná malta je variabilnejšia ako kameň;
- Rôzne obsahy zostatkovej malty na kamenive zvyšujú celkovú variabilitu.

Neočakávané zistenie, že koeficient variácie RAC100 je menší než koeficient variácie datasetu NAC, môže byť spôsobené niekoľkými dôvodmi, ako sú:

- malá veľkosť databázy;
- skutočnosť, že RA zahrnuté do modelu sa vyrába z čistého betónového odpadu s dobre kontrolovanou kvalitou;
- vo všeobecnosti, trhliny od zmrašťovania môžu redukovať pevnosť v dôsledku mikrotrhlín v ITZ [25], toto by ovplyvnilo priemer aj koeficient variácie θ_R , pretože to vytvára slabé oblasti v stĺpoch; vnútorné vytvrdzovanie (internal curing) RA [26,27] môže zmierňovať tento efekt a prispievať k vyššej hodnote priemeru a nižšej hodnote koeficientu variácie θ_R stĺpov z RAC;
- kvalita NA sa líši od oblasti k oblasti a datasety zahŕňajú sedem publikácií pokrývajúcich rôzne krajiny a regióny.

V Tab. 7.1 sú tiež prezentované štatistické hodnoty pre dataset RACinter. Tie však nie sú analyzované kvôli príčinám uvedených v predchádzajúcich statiach (malý počet stĺpov, ktorý zahŕňa veľké stĺpy so širokým rozpätím obsahu RA (15 % až 80 %) pochádzajúci len zo štyroch publikácií).

Parciálny súčiniteľ pre návrh tlačných RAC prvkov γ_{RAC} bol definovaný tak, aby návrh RAC prvkov bol možný podľa rovnice (7.1).

$$N_{Rd} = \frac{A_C \cdot f_{ck} / \gamma_C + A_S \cdot f_{yk} / \gamma_S}{\gamma_{RAC}} \quad (7.1)$$

Kde:

- γ_C je parciálny súčiniteľ, ktorý zohľadňuje neistoty betónovej odolnosti, zahŕňajúci materiálové vlastnosti a ďalšie materiálové efekty, a tiež geometrické nepresnosti a neistoty spôsobené nepresnosťou modelu odolnosti;
- γ_S je analogický parciálny súčiniteľ platný pre oceľovú výstuž;
- γ_{RAC} je parciálny súčiniteľ navrhnutý v tejto práci, ktorý závisí od podielu RA a zohľadňuje relatívny efekt modelov neistoty pre návrh RAC prvkov v porovnaní s modelom neistoty pre návrhom NAC prvkov. Tento parciálny súčiniteľ je podiel medzi parciálnym súčiniteľom pre neistotu modelu odolnosti (γ_{Rd1}) vypočítaným pre RAC k γ_{Rd1} vypočítanému pre NAC (rovnica (7.2)).

$$\gamma_{RAC} = \frac{\gamma_{Rd1,RAC}}{\gamma_{Rd1,NAC}} \quad (7.2)$$

Tento formát odolnosti nie je konvenčný, pretože pridáva nový parciálny súčiniteľ namiesto nahradenia γ_C . Formát bol definovaný týmto spôsobom, pretože:

- umožňuje, aby sa návrh NAC vykonával bez akýchkoľvek zmien v porovnaní s konvenčným návrhom železobetónu ($\gamma_{RAC} = 1,0$ pre NAC);
- návrh prvkov z RAC je zjednodušený: tento formát možno použiť pre rôzne modely odolnosti;
- zjednodušuje okamžité pochopenie vplyvu RA na odolnosť. Týmto spôsobom môže byť návrh vykonávaný ako obvykle (napríklad pomocou normových vzťahov z Eurokódu) a jedna tabuľka môže poskytnúť parciálny súčiniteľ pre RAC pre rôzne modely odolnosti a podiely RA.

Výpočet γ_{Rd1} nasledoval usmernenia Eurokódu [28] pre nevedúce premenné odolnosti:

- charakteristická hodnota θ_{Rk} je 1,0;
- γ_{Rd1} pre RAC100 a NAC sú vypočítané podľa rovnice (7.3).

$$\gamma_{Rd1} = \theta_{Rk} / \theta_{Rd} = 1 / \theta_{Rd} \quad (7.3)$$

Kde:

- θ_{Rd} je návrhová hodnota modelu neistoty θ_R (pre NAC aj RAC100)

Hodnoty γ_{Rd1} pre NAC a RAC100 dataset sú uvedené v Tab. 7.2. Ako z tabuľky vidieť, praktický vplyv γ_{RAC} na návrh je minimálny. Napriek tomu, že priemer θ_R klesol pri datasete RAC100, tento pokles je vykompenzovaný poklesom CoV. Treba mať tiež na pamäti, že toto sú výsledky pre recyklované kamenivo pochádzajúce z betónového odpadu. Pre iný typ RA sa výsledky môžu líšiť. Sú potrebné ďalšie experimenty, keďže výskum zaoberajúci sa inými typmi kameniva je zatiaľ nedostatočný.

Tab. 7.2 Výsledky vypočítaných parciálnych súčiniteľov

Dataset	Norma	θ_R			$\theta_{R,d}$	γ_{Rd1}	γ_{RAC}
		Priemer	St.dev	CoV			
NAC	Eurokód 2 (2004) bez ovinutia	0,93	0,11	12%	0,80	1,25	1,00
	Eurokód 2 (2004) s ovinutím	0,91	0,09	10%	0,80	1,25	1,00
	Eurokód 2 (2023) s ovinutím	0,93	0,10	11%	0,80	1,24	1,00
RAC100	Eurokód 2 (2004) bez ovinutia	0,88	0,08	9%	0,79	1,26	1,01
	Eurokód 2 (2004) s ovinutím	0,87	0,07	8%	0,79	1,27	1,01
	Eurokód 2 (2023) s ovinutím	0,88	0,07	8%	0,79	1,26	1,02

8. Závery

8.1. Prínos pre rozvoj vedného odboru

- Parciálny súčiniteľ pre odolnosť stĺpov vyrobených z betónu s recyklovaným betónovým kamenivom vyšiel blízky hodnote 1,0, takže pre tento typ kameniva a spôsob zaťaženia ho môžeme zanedbať.

- Betón s jemnou frakciou recyklovaného kameniva môže vykazovať pomalší nárast pevnosti v porovnaní s betónom s prírodným kamenivom (nárast pevnosti betónov s rôznym podielom jemnej a hrubej frakcie tehlového recyklovaného kameniva v prevedenom experimente bol v rozmedzí od 29 do 34 % pri porovnaní 28-dňovej pevnosti so 100 dňovou).
- V porovnaní s pevnosťami ostatných RAC bola pevnosť betónu s 25% podielom RA najvyššia. Odolnosť stĺpov z betónu s 25 % podielom RA preukázala najmenší pokles v porovnaní s referenčnými stĺpmi (1,4 a 7,5 %).
- Najväčší pokles odolnosti bol zaznamenaný pre stĺpy so 100 % podielom recyklovaného kameniva (15,8 až 18,9 %). Dosiadnutá pevnosť betónov s RA však nebola rovnaká, čo spôsobuje skreslenie výsledku.
- Z analýzy experimentálnych výsledkov modulu pružnosti vyšlo, že korekčný súčiniteľ zohľadňujúci typ kameniva k_E nachádzajúci sa v novej generácii Eurokódu 2, môže byť pre tehlové recyklované kamenivo rovný hodnote 7500, čo potvrdzuje hodnotu 7100 odporúčanú v [29].
- Pri výpočte odolnosti stĺpa dáva metóda tuhosti konzervatívny návrh so spoľahlivosťou 1,35. S uvažovaním príspevku výstuže do odolnosti je to 1,19.
- Metódou krivosti vyšli výsledky šiestich stĺpov (z 11) na strane nebezpečnej. Použitím hodnoty redukčného súčiniteľa k_r rovnú 1 sa dosiahla spoľahlivosť 1,17.

8.2. Odporúčania pre prax a ďalší výskum

Odporúčania pre prax

- Pri výpočte modulu pružnosti betónu s tehlovým recyklovaným kamenivom na základe novej generácie Eurokódu 2 [24] je možné použiť korekčný súčiniteľ zohľadňujúci typ kameniva k_E rovný hodnote 7500, prípadne rovný 7100 pre výsledky s väčšou rezervou na strane bezpečnosti.
- Betón s recyklovaným kamenivom dosahuje nižšie hodnoty modulu pružnosti s porovnaním s NAC. Preto je jeho používanie v štíhlych prvkoch nutné zvážiť. Výskumov zaoberajúcich sa problematikou štíhlych stĺpov z betónu s tehlovým recyklovaným kamenivom je v súčasnosti málo, preto by bolo lepšie zatiaľ tento materiál používať na menej namáhané časti konštrukcie.

Odporúčania pre ďalší výskum

- Ďalšie experimenty týkajúce sa odolnosti stĺpov z betónu s recyklovaným kamenivom, následná aktualizácia databázy, výpočet modelovej neistoty a overenie parciálneho súčiniteľa pre odolnosť stĺpov z tohto materiálu.
- Uskutočniť väčší počet experimentov zameraných na použitie iných typov recyklovaného kameniva ako pochádzajúceho z betónového odpadu, napríklad tehlové alebo zmiešané recyklované kamenivo.
- Overiť hodnotu konverzného súčiniteľa pre prevod kockovej pevnosti na valcovú pre betóny s tehlovým a zmiešaným recyklovaným kamenivom.
- Preveriť vplyv použitia tehlového recyklovaného kameniva na modul pružnosti betónu.

9. Zoznam použitej literatúry

1. ANNUAL REVIEW European Aggregates Association A SUSTAINABLE INDUSTRY FOR A SUSTAINABLE EUROPE. 2020.
2. Waste statistics - Total Waste Generation, 2020. 2023.
3. E. Union, Editor. SMERNICA EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY 2008/98/ES, EU-DIRECTIVE-2008/98/EC, DIRECTIVE 2008/98/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union: European Union. 2008;
4. Eurostat, Recovery rate of construction and demolition waste . cei_wm040. Údaje získané 20/04/2022. Unavailable since 16/08/2023. <https://data.europa.eu/data/datasets/uczdo4z1o5qc1lbdtkbhq?locale=en>.
5. Moschen-Schimek J, Kasper T, Huber-Humer M. Critical review of the recovery rates of construction and demolition waste in the European Union – An analysis of influencing factors in selected EU countries. Waste Management. 2023 Jul 15;167:150–64.
6. Arm M, Wik O, Engelsen CJ, Erlandsson M, Hjelmar O, Wahlström M. How Does the European Recovery Target for Construction & Demolition Waste Affect Resource Management? Waste Biomass Valorization. 2017 Jul 1;8(5):1491–504.
7. Villoria Sáez P, Osmani M. A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. J Clean Prod. 2019 Dec 20;241.
8. Bilčík J, Fillo Ľ, Benko V, Halvoník J. Betónové konštrukcie. 2008.
9. Committee E- A. ACI Education Bulletin E3-13 Cementitious Materials for Concrete [Internet]. 2016. Available from: <http://concrete.org/Publications/>
10. Evangelista L, Guedes M. Microstructural studies on recycled aggregate concrete. In: New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete. Elsevier; 2018. p. 425–51.
11. Evangelista L. Concrete with fine concrete recycled aggregates - Comportamento de betões com agregados finos reciclados de betão [Dissertation thesis]. [Lisbon]: Universidade de Lisboa; 2014.
12. Silva R V., de Brito J, Dhir RK. The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2015 Aug 9;19(7):825–49.
13. González-Fonteboa B, Seara-Paz S, De Brito J, González-Taboada I, Martínez-Abella F, Vasco-Silva R. Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis. Vol. 68, Materiales de Construcción. CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas; 2018.
14. Gonzalez-Corominas A, Etxeberria M. Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. Constr Build Mater. 2014 Oct 15;68:618–26.
15. Wang Y, Huang H, Zeng J, Hu W, Cheng Y. Axial compressive behavior of recycled ceramic coarse aggregate concrete-filled steel tubular columns. J Constr Steel Res. 2023 Nov 1;210.
16. Nepomuceno MCS, Isidoro RAS, Catarino JPG. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. Constr Build Mater. 2018 Mar 20;165:284–94.

17. Gao D, Li W, Pang Y, Huang Y. Behavior analysis and strength prediction of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete column under axial compression. *Constr Build Mater.* 2021 Jul 5;290.
18. Zhang Q, Xiao J, Zhang P, Zhang K. Mechanical behaviour of seawater sea-sand recycled coarse aggregate concrete columns under axial compressive loading. *Constr Build Mater.* 2019 Dec 30;229.
19. Sunayana S, Barai S V. Performance of fly ash incorporated recycled aggregates concrete column under axial compression: Experimental and numerical study. *Eng Struct.* 2019 Oct 1;196.
20. Quang NT, Cuong TV, Tan NN, Tan NH, Kawamoto K, Giang NH. Experimental studies on behaviors of reinforced concrete column structures made of recycled aggregates under concentric loads. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE.* 2022 Apr 9;
21. Pradhan S, Nayak TK, Kumar S, Barai S V. Experimental and numerical study of recycled aggregate concrete column. *Structural Concrete, Volume 24.* 2023;
22. Shatarat N, Alhaq AA, Katkhuda H, Jaber MA. Investigation of axial compressive behavior of reinforced concrete columns using Recycled Coarse Aggregate and Recycled Asphalt Pavement aggregate. *Constr Build Mater.* 2019 Aug 30;217:384–93.
23. Choi WC, Yun H Do. Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading. *Eng Struct.* 2012 Aug;41:285–93.
24. Next generation Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. 2023, Comité Européen de Normalisation (CEN): Brussels, Belgium.
25. fib, Bulletin 72: Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010. 2014: Lausanne, Switzerland.
26. Sun X, Zhang B, Dai Q, Yu X. Investigation of internal curing effects on microstructure and permeability of interface transition zones in cement mortar with SEM imaging, transport simulation and hydration modeling techniques. *Constr Build Mater.* 2015 Feb 1;76:366–79.
27. Yildirim ST, Meyer C, Herfellner S. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater.* 2015 May 28;91:288–96.
28. British Standards Institution. Eurocode : basis of structural design. BSI; 2006. 114 p.
29. Tošić N, Torrenti JM, Sedran T, Ignjatović I. Toward a codified design of recycled aggregate concrete structures: Background for the new fib Model Code 2020 and Eurocode 2. *Structural Concrete.* 2021 Oct 1;22(5):2916–38.