



Výskum a inovácie pre dekarbonizáciu stavebnej činnosti prostredníctvom nízkoemisných stavebných procesov a materiálov v cirkulárnej ekonomike (DEKAST)

Kód projektu: 09I04-03-V02-00051

Financované Európskou úniou
z prostriedkov Plánu obnovy
a odolnosti SR



Financovaný
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD PODPRESEDU VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY
PRE PLÁN OBNOVY
A ZNALOSTNÚ EKONOMIKU



VÝSKUMNÁ
AGENTÚRA

Výstup 2. Inovatívne nízkouhlíkové stavebné materiály

k projektu s názvom „Výskum a inovácie pre dekarbonizáciu stavebnej činnosti prostredníctvom nízkoemisných stavebných procesov a materiálov v cirkulárnej ekonomike“

v rámci pracovného balíka KPB1 s názvom Stavebné materiály

INOVATÍVNE NÍZKOUHLÍKOVÉ STAVEBNÉ MATERIÁLY

december 2025

Technická univerzita v Košiciach
Zväz stavebného priemyslu Slovenska

www.tuke.sk/dekast



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPÓRTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Obsah

1 Inovatívne nízkouhlíkové stavebné materiály	4
1.1 Ľahké stavebné hmoty na báze recyklovaných surovín	4
1.1.1 Charakteristika ľahkých stavebných hmôt	4
1.1.2 Návrh a testovanie ľahkých stavebných hmôt na báze recyklovaných surovín	8
1.1.3 Metodika riešenia	8
1.1.4 Závery testovania fyzikálno-mechanických vlastností.....	16
1.1.5 Analýza environmentálnych dopadov vybraných zmesí.....	17
1.2 Dnové sedimenty ako environmentálna výzva a perspektívny zdroj pre nízkouhlíkové stavebníctvo	21
1.2.1 Sedimenty ako náhrada kameniva: riešenie pieskovej krízy a prínos ku dekarbonizácii	22
1.2.2 Sedimenty ako náhrada kameniva v betóne	22
1.2.3 Sedimenty ako náhrada cementu	28
1.2.4 Analýza environmentálnych dopadov kompozitov	35
2 Koncept vývoja a zavádzania inovatívnych nízkouhlíkových stavebných materiálov.....	42
2.1 Východiská z riešených príkladov	42
2.2 Hierarchia využitia druhotných surovín	44
2.3 Cieľový proces vývoja materiálu	44
2.4 Rozhodovacie brány.....	46
2.5 Hodnotiaci rámec a ukazovatele	47
2.6 Aplikácia konceptu na riešené príklady	48
2.7 Roly a zodpovednosti	49
2.8 Implementačný plán	50
2.9 Riziká zavedenia a opatrenia.....	51
2.10 Odporúčanie a záver	52

1 Inovatívne nízkouhlíkové stavebné materiály

Za účelom výskumu a vývoja inovatívnych stavebných materiálov podporujúcich princípy cirkulárnej ekonomiky a znižovanie environmentálnych dopadov bol vybraný súbor perspektívnych materiálov na základe výsledkov dlhodobého výskumu a odborných štúdií riešiteľského kolektívu. Výber materiálov bol zameraný najmä na využitie druhotných surovín a odpadových materiálov ako náhrady primárnych prírodných zdrojov pri výrobe betónov a ďalších stavebných materiálov. V tejto kapitole sú analyzované rôzne varianty zloženia týchto inovatívnych materiálov z hľadiska použitých surovín, ich vzájomných kombinácií a pomerov zastúpenia. Hodnotené sú ich funkčné vlastnosti vo väzbe na ich použitie a environmentálne aspekty vrátane uhlíkovej stopy. Je potrebné zdôrazniť, že hodnotenie navrhovaných materiálových riešení nie je založené výlučne na minimalizácii uhlíkovej stopy jednotlivých vstupov, ale zohľadňuje aj širšie princípy cirkulárnej ekonomiky. Prioritou je efektívne zhodnocovanie vhodných vedľajších produktov a odpadových materiálov ako sekundárnych surovín, čím sa podporuje uzatváranie materiálových tokov, znižuje závislosť od primárnych prírodných zdrojov a prispieva k celkovej environmentálnej udržateľnosti stavebnej výroby. Takýto prístup zároveň vedie k efektívnejšiemu využívaniu dostupných zdrojov, obmedzeniu tvorby odpadu a podpore udržateľnej transformácie stavebného sektora smerom k nízkouhlíkovému a obehovému hospodárstvu.

1.1 Ľahké stavebné hmoty na báze recyklovaných surovín

Stavebníctvo patrí medzi najvýznamnejších spotrebiteľov prírodných zdrojov a zároveň produkuje značné množstvo stavebného a demolačného odpadu. V kontexte princípov obehového hospodárstva a požiadaviek na znižovanie uhlíkovej stopy stavebníctva sa preto zvyšuje záujem o vývoj stavebných materiálov využívajúcich druhotné suroviny. Osobitnú skupinu predstavujú ľahké stavebné hmoty na báze recyklovaných materiálov, ktoré spájajú environmentálne prínosy recyklácie s výhodnými technickými vlastnosťami, najmä nízkou objemovou hmotnosťou a zlepšenými tepelnoizolačnými parametrami.

1.1.1 Charakteristika ľahkých stavebných hmôt

Ľahké stavebné hmoty sú požadované stavebnou praxou na výrobu ľahkých izolačných stavebných prvkov. Sú špecifickým druhom pre aplikácie spojené s požiadavkami na nízku objemovú hmotnosť pri dostatočnej pevnosti, tepelnoizolačné vlastnosti, akustické, prípadne iné špecifické vlastnosti, ako napr. priepustnosť voči vode. Môžu to byť hmoty určené nielen pre oblasť pozemných stavieb (ľahké poterové hmoty, vyrovnávacie hmoty, omietky, hmoty na ľahké-výplňové tvarovky, izolačné vrstvy plochých striech ...), ale aj inžinierskych (priepustné vrstvy spevnených plôch, protihlukové bariéry ...). Ľahké izolačné stavebné prvky sú tiež žiadané aj z dôvodu aplikácie pre návrh energeticky úsporných (zelených) budov. Ide o materiály, ktorých objemová hmotnosť je výrazne nižšia ako pri klasických hutných stavebných materiáloch. Napríklad pre hutný betón je typická objemová hmotnosť približne 2200 až 2500 kg/m³, kým do kategórie ľahkých betónov sa zaraďujú ti s objemovou hmotnosťou menej ako 2000 kg/m³.

Hlavné výhody pre stavebníctvo:

1. Nízka hmotnosť

- menšie zaťaženie konštrukcie,
- jednoduchšia manipulácia a montáž,
- nižšie náklady na dopravu,
- vhodnosť pre rekonštrukcie a nadstavby.

2. Tepelnoizolačné vlastnosti

- znižovanie energetických strát budov,
- nižšie náklady na vykurovanie a chladenie,
- zlepšenie energetickej hospodárnosti stavieb,
- jednoduchšie dosiahnutie nízkoenergetických a pasívnych štandardov.

3. Zvukovoizolačné vlastnosti

- znižovanie kročajového hluku,
- lepší akustický komfort interiéru.

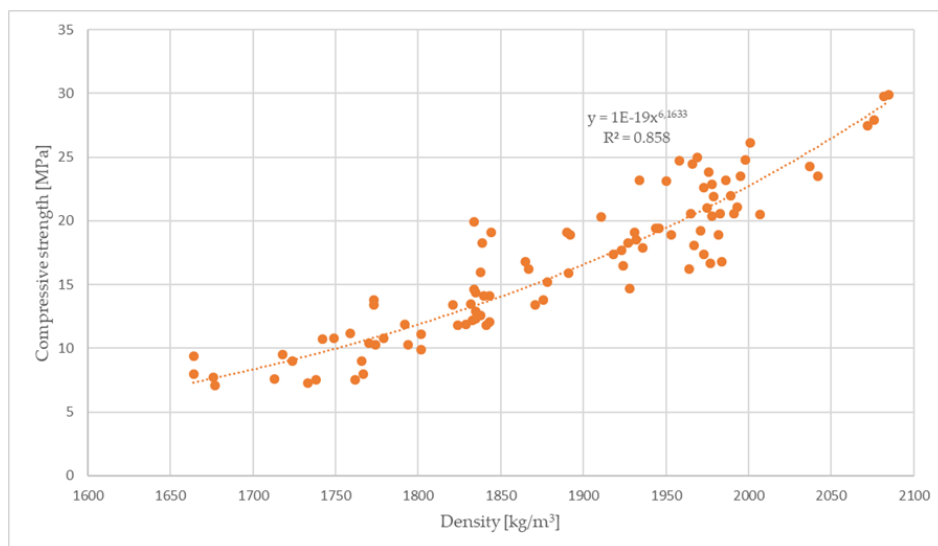
4. Jednoduchá opracovateľnosť

Ľahké stavebné výrobky sa ľahšie: režu, vŕtajú, frézujú, montujú. To urýchľuje výstavbu a znižuje pracovné náklady.

Nevýhody a obmedzenia:

- nižšia pevnosť oproti hutným materiálom, obmedzené použitie pri vysoko namáhaných nosných konštrukciách,
- sorpčné vlastnosti: vyššia nasiakavosť pri niektorých typoch, vzĺnavosť, navíhavosť a vysychavosť,
- potreba ochrany proti vlhkosti,
- nižšia trvanlivosť,
- vyššia technologická náročnosť výroby stavebnej zmesi.

Potreba stavať budovy a konštrukcie s nižšou hmotnosťou, ktorá môže súvisieť s výstavbou viacpodlažných budov, s rôznorodými technicko-geologickými podmienkami, s veľkými rozpätiami konštrukcií a pod., kladie zároveň vysoké nároky na pevnosť stavebných materiálov. Tieto dve funkčné vlastnosti sú však nepriamo úmerné, ako je vidieť napr. na obrázku 1 znázorňujúcom závislosť pevnosti v tlaku a objemovej hmotnosti medzerovitých betónov. Preto pri návrhu zmesí na stavebné výrobky je potrebné hľadať optimálny prienik týchto vlastností, v závislosti od konkrétneho účelu použitia.



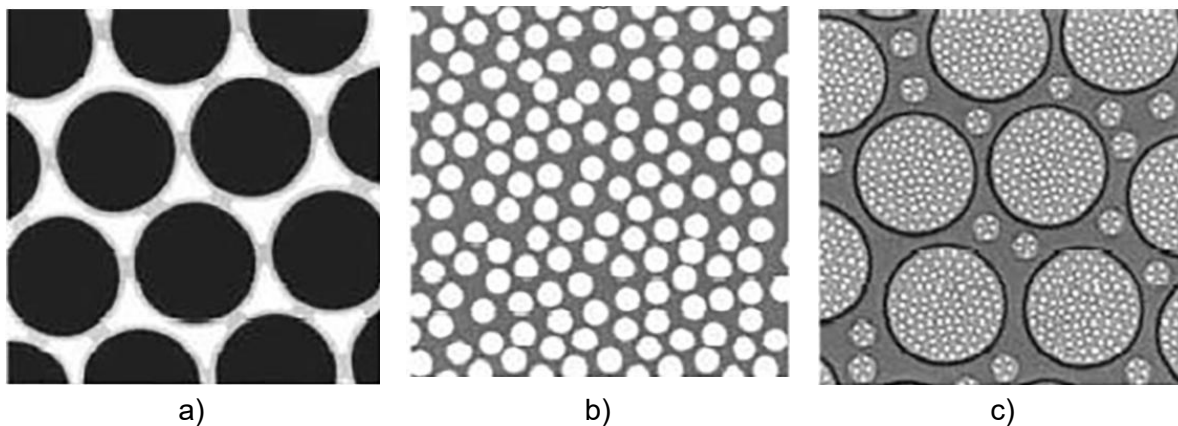
Obrázok 1 Závislosť pevnosti v tlaku a objemovej hmotnosti medzerovitých betónov [1]

Znížená hmotnosť ľahkých stavebných hmôt sa v princípe dosahuje 3 prístupmi:

- vytváraním vzduchových medzier v stavebných zmesiach optimalizáciou zrnitosti kameniva a objemu spojivového tmelu – obrázok 2a)

- vytvorením pórovitej štruktúry priamo v hmote materiálu, ako sú napr. pórobetóny – obrázok 2b)
- použitím ľahkých plnív v stavebných zmesiach – obrázok 2c)

Výsledkom každého prípadu je iná štruktúra materiálu, ako je znázornené na obrázku 2. Praktické príklady sú uvedené na obrázku 3.



Obrázok 2 Štruktúry ľahkých betónov [2]

Príklady štruktúr ľahkých stavebných hmôt s alternatívnymi plnivami	
Pórovité plnivo-hutná štruktúra	Pórovité plnivo-medzerovitá štruktúra



Obrázok 3 Príklady štruktúr ľahkých stavebných hmôt s alternatívnymi plnivami

Z uvedených prístupov sa projekt zameriaval na vylahčenie stavebnej zmesi prostredníctvom ľahkého pórovitého plniva. Všeobecná klasifikácia plnív pre výrobu stavebných zmesí je nasledovná:

1. Prírodné:

- kamenivo ťažené: ťažením z prírodných ložísk,
- kamenivo drvené: drvením hornín.

2. Umelé:

- vyrobené z druhotných surovín (popolček, troska),
- vyrobené z prírodných surovín (z hĺn a ílov),
- recyklované kamenivá: kamenivá získané zo spracovania materiálov už skôr použitých v konštrukciách (betónový recyklát, tehlový recyklát, asfaltový recyklát...),
- kamenivá z vedľajších produktov priemyselných procesov (hlavne z hutníctva: umelé hutné troskové kamenivo, trosková pemza ...).

Pre ľahké stavebné zmesi majú potenciál ľahké plnivá s objemovou hmotnosťou $\rho_v < 2\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Z vyššie uvedených kategórií sú to nasledovné:

- prírodné: tufy, tufity, pemza, spongility, kremelina, expandovaný perlit, expandovaný vermikulit,
- umelé z druhotných surovín: popolčkové pelety, Agloporit, penové sklo,
- umelé z prírodných zdrojov: na báze keramiky - Keramzit, Liapor,
- umelé recyklované: tehlový recyklát, pórobetónový recyklát,
- umelé z vedľajších priemyselných produktov: trosková pemza.

Veľký potenciál ako ľahké plnivo stavebnej zmesi majú recyklované materiály. Recyklácia SDO je podľa Akčného plánu pre obehové hospodárstvo jednou z prioritných oblastí v Európe. SDO je najväčším prispievateľom do tokov odpadov aj v Európskom meradle a predstavuje viac ako 350 miliónov ton ročne. Potenciál recyklácie SDO sa považuje za stále nedostatočne využívaný. Je vysoko žiadané, aby sa znížila miera skládkovania a zasypávania demolačných odpadov, a zvýšila miera ich aplikácie do hodnotných stavebných výrobkov.

Najväčšie materiálové podiely SDO tvoria betón a keramika (tehly), ktorých potenciál spočíva predovšetkým v úprave do zrnitej formy a použitia ako plnivo (umelé kamenivo) do stavebných zmesí. Hoci sa tieto recykláty vyznačujú nepriaznivým vplyvom predovšetkým na mechanické vlastnosti stavebných hmôt, vo výskume je možné opierať sa o tie charakteristiky, ktoré môžu

byť pre nové stavebné výrobky priaznivé, ako sú vyššia pórovitosť a nižšia objemová hmotnosť. Tento potenciál je možné smerovať do tvorby ľahkých stavebných hmôt, pričom je možné prirodzený ľahký charakter odpadových surovín dopĺňať ďalšími formami vyláhčenia hmoty, napr. medzerovitosťou.

1.1.2 Návrh a testovanie ľahkých stavebných hmôt na báze recyklovaných surovín

Pre tento projekt boli analyzované výsledky testovania viacerých variant cementových stavebných zmesí. Pri ich návrhu bol braný ohľad na plnenie požiadavky udržateľnosti nasledovne:

- obsahujú vyšší podiel **recyklovaných** surovín (**plnivá**, ako aj **prímesí**),
- obsahujú **environmentálne priaznivé spojivá**,
- vstupné suroviny majú **lokálny charakter**,
- sú zamerané na **dosiahnutie funkčných vlastností** so zameraním na nízku objemovú hmotnosť (s príspevkom k tepelnoizolačným parametrom a energetickej úspore budov), nízku nasiakavosť a dostatočnú pevnosť.

Rámcová metodika riešenia v rámci projektu DEKAST:

- Posudzovali sa alternatívne zloženia **cementových stavebných zmesí typu betón**, resp. **malta**,
- recyklované suroviny boli aplikované vo forme **plniva** - kameniva. Demolačné odpady (tehlový, betónový, keramický, pórobetónový recyklát), ktoré v rámci krokov pri demolácii budú výsledkom procesov v súlade s aktuálnymi odporúčaniami, t.j. boli získané selektívnou demoláciou a aspoň určitou mierou triedenia, resp. úpravy zrnitosti a pod.,
- **optimalizácia zloženia zmesí** prebiehala v rovine kvalitatívnych parametrov surovín (druhy odpadov a ich vlastnosti, druhy prísad, prímesí...) a v rovine kvantitatívnej (vzájomný pomer zložiek, pomer spojivo/plnivo, vodný súčiniteľ, dávkovanie prímesí...),
- Experimentálne práce pozostávali z testovania vstupných parametrov recyklovaných plnív z hľadiska ich kvality (objemová hmotnosť, sypná hmotnosť, medzerovitosť, nasiakavosť...), laboratórnej prípravy zámesí a výroby skúšobných telies, testovania vybraných vlastností zmesí (objemová hmotnosť, pevnosť, nasiakavosť) a analýzy výsledkov,
- LCA hodnotenie a porovnanie zmesí.

1.1.3 Metodika riešenia

Riešené materiály spĺňajú požiadavky udržateľnosti nasledovne:

- budú obsahovať vyšší podiel recyklovaných surovín (plnivá, ako aj prímesi),
- budú obsahovať environmentálne priaznivé spojivá,
- vstupné suroviny budú mať lokálny charakter,
- budú zamerané na dosiahnutie primeranej miery tepelnoizolačných parametrov, pre prípravu funkčných stavebných prvkov s príspevkom k energetickej úspore budov.

Rámcová metodika a postup výskumu:

- znalostná analýza dostupných zdrojov a doterajších vlastných poznatkov a skúseností,

- zostavenie požiadaviek na vlastnosti zmesí, v závislosti od potenciálnych aplikácií, ako sú nízka objemová hmotnosť (pod 2000 kg.m⁻³), dostatočná pevnosť, tepelnoizolačné charakteristiky, priepustnosť voči vode a pod.,
- návrh rôznych alternatív receptúr s potenciálom dosiahnutia vyžadovaných parametrov pre experimentálny výskum,
- vlastný materiálový experimentálny výskum,
- LCA hodnotenie a porovnanie zmesí.

Vlastný materiálový experimentálny výskum:

- Navrhnuté sú cementové stavebné zmesi, prevažne s environmentálne vhodnejšími zmesovými cementami typu CEM II/B-S, CEM II/A-M, CEM II/B-M, CEM II/B-M, CEM III.
- recyklované suroviny sa uvažujú vo forme plniva - hrubého kameniva. Demolačné odpady (tehlový, keramický, pórobetónový recyklát), ktoré v rámci krokov pri demolácii budú výsledkom procesov v súlade s aktuálnymi odporúčaniami, t.j. boli získané selektívnou demoláciou a aspoň určitou mierou triedenia, resp. úpravy zrnitosti a pod..
- uvažuje sa s využitím potenciálu jemných - práškových foriem recyklátov pre úpravu vlastností zmesí a zvýšenie environmentálnej hodnoty.
- optimalizácia zloženia zmesí bude prebiehať v rovine kvalitatívnych parametrov surovín (druhy odpadov a ich vlastnosti, druhy prísad, prímiesí...) a v rovine kvantitatívnej (vzájomný pomer zložiek, pomer spojivo/plnivo, vodný súčiniteľ, dávkovanie prímiesí...).
- Experimentálne práce sa budú realizovať v dvoch základných krokoch:
 - testovanie vstupných parametrov recyklovaných plnív z hľadiska kvality (objemová hmotnosť, sypná hmotnosť, medzerovitosť, nasiakavosť...),
 - testovanie parametrov navrhnutých zmesí (objemová hmotnosť, pevnosť, nasiakavosť, súčiniteľ tepelnej vodivosti...).

Požiadavky na funkčné vlastnosti zmesí

Pre rámcové zistenie vplyvu alternatívnych plnív na vlastnosti stavebných zmesí a zistenie potenciálu pre dosiahnutie kategórie ľahkých hmôt a s tým súvisiacich tepelnoizolačných parametrov boli zosumarizované doterajšie výskumné výsledky nasledovných vlastností:

- objemová hmotnosť,
- pevnosť v ťahu pri ohybe,
- pevnosť v tlaku,
- nasiakavosť.

Tieto sú sledované z pohľadu vybraných ukazovateľov zloženia zmesí, a to:

- použitý typ alternatívneho plniva,
- zrnitosť, D_{max} , podiel PK a alternatívneho plniva,
- pomer spojivového tmelu a plniva v zmesi.

Pre presnejšie zadefinovanie dosiahnutých vlastností boli použité nasledovné klasifikácie betónu a malty:

Klasifikácia betónov podľa objemovej hmotnosti

- ľahký: ($\rho_v < 2\,000\text{ kg.m}^{-3}$)
- obyčajný: ($\rho_v = 2\,000 - 2\,800\text{ kg.m}^{-3}$)
- ťažký: ($\rho_v > 2\,800\text{ kg.m}^{-3}$)

Tabuľka 1 Klasifikácia ľahkých betónov podľa objemovej hmotnosti (STN EN 206+A2: Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda).

Trieda objemovej hmotnosti	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Rozsah objemovej hmotnosti kg/m ³	≥ 800 a ≤ 1 000	> 1 000 a ≤ 1 200	> 1 200 a ≤ 1 400	> 1 400 a ≤ 1 600	> 1 600 a ≤ 1 800	> 1 800 a ≤ 2 000

Tabuľka 2 Pevnostné triedy ľahkého betónu v tlaku (STN EN 206+A2: Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda).

Pevnostná trieda v tlaku	Minimálna charakteristická valcová pevnosť $f_{ch/cyl}$ N/mm ²	Minimálna charakteristická kocková pevnosť $f_{ch/cube}$ N/mm ²
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Tabuľka 3 Pevnostné triedy malty v tlaku podľa STN EN 998-2

Trieda	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Pevnosť v tlaku N/mm ²	1	2,5	5	10	15	20	d
d je výrobcom deklarovaná pevnosť v tlaku vyššia ako 20 N/mm ² vyjadrená ako násobok 5.							

Použité recyklované plnivé a ich vlastnosti

Pre potreby experimentálneho výskumu a návrhu receptúr zmesí boli testované vstupné parametre plnív. Bolo realizovaných viacero testov, v tabuľke 6.4 sú uvedené priemerné hodnoty pre jednotlivé druhy, a to:

- prírodné kamenivá (PK): používané boli prevažne ťažené kamenivá z lokalít východného Slovenska (Geča),

- tehlový recyklát (TR): plnivo pripravované z triedeného demolačného odpadu (DO) drvením a triedením,
- betónový recyklát (BR): plnivo pripravované z triedeného DO drvením a triedením,
- pórobetónový recyklát (PBR): plnivo pripravované z DO, získané selektívnou demoláciou, následne drvením a triedením. V tejto fáze testovania sa použila čistá drvina získaná priamo od výrobcu pórobetónu,
- plastový granulát (PG): produkt zo spracovania plastových odpadov u výrobcu (fólie a pod) do formy granulátu,
- plastová drvina (PD): produkt drvenia odpadových plastov z elektrospotrebičov (tlačiarne, monitory, klávesnice a pod.).

Tabuľka 4 Fyzikálne vlastnosti vybraných kamenív

Vlastnosť	Objemová hmotnosť ρ [kg/m ³]	Sypná hmotnosť stras. kam. ρ_{str} [kg/m ³]	Medzerovitost' str. kam. [%]	Nasiakavost' [%]
PK 0/4	2590-2650	1850-1870	28-30	1,2-5,3
PK 4/8	2550-2650	1670-1850	30-34,5	1
TR 0/4	1550			10
TR 4/8	1560-2050	950-1180	39-42	9,6-25,3
BR 0/4	2100			7
BR 4/8	2200	1520	31	6,8
PBR 1/2	600			75
PG 3/7	800			11,8
PD 1/8	609	610	36,5	2,0

Zloženie a dosiahnuté vlastnosti zmesí

i) *Zmesi s tehlovým a betónovým recyklátom*

- D_{max} 16 mm
- Pomer frakcií kameniva:
 - PK 0/4: 50%;
 - TR, resp. BR plnivo tvorí 50% objemu kameniva (4/8: 15% a 8/16: 35%),
- objem tmelu (V_T) 35% + objem plniva (V_P) 65%.

Receptúry zmesí s tehlovým a betónovým recyklátom sú uvedené v tabuľke 5 a vlastnosti zmesi (28 dní) v tabuľke 6.

Tabuľka 5 Receptúry zmesí s tehlovým a betónovým recyklátom

	PK	TR	BR
--	----	----	----

CEM I 42.5 R		336	323	310
Popolček		47	56	67
PK	0/4	896	898	898
	4/8	269	-	-
	8/16	627	-	-
TR, BR	4/8	-	224	208
	8/16	-	545	510
Plastifikátor		2,7	2,6	2,5
Voda celková		211	238,9	243,6
w/c		0,5	0,5	0,5

Tabuľka 6 Vlastnosti zmesi s tehlovým a betónovým recyklátom (28 dní)

	Objemová hmotnosť (kg/m ³)	Pevnosť v tlaku (MPa)	Nasiakavosť (%)
PK	2330	37,7	6,3
TR	2200	34,0	9,2
BR	2270	34,4	8,4

Čiastkový záver: S týmito receptúrami boli vďaka vysokej pevnostnej triede cementu dosiahnuté vysoké pevnosti, ale **objemová hmotnosť o niečo presahuje 2000 kg/m³**. K dosiahnutiu vyžadovanej objemovej hmotnosti by bolo vhodné upraviť pomer tmelu a plniva (menej tmelu), a dať väčší podiel TR (upraviť krivku zrnitosti kameniva - viac frakcie 4/8) pri podobnom pomere tmelu a kameniva ako v predchádzajúcom prípade, a vyššom podiele hrubého kameniva (50% a až 8/16 frakcia), betón s TR nedosahuje kategóriu ľahkého betónu. Receptúra s BR má ešte vyššiu hodnotu.

ii) **Zmesi s tehlovým a pórobetónovým recyklátom**

- $D_{\max}$ 2 mm
- Pomer frakcií kameniva:
 - PK: 50% a TR, resp. PBR 50%
 - PK: 0% a TR, resp. PBR 100%
- $V_T = 0,534 \text{ m}^3$ a objem kameniva $V_K = 0,466 \text{ m}^3$

Receptúry zmesí s tehlovým a pórobetónovým recyklátom sú uvedené v tabuľke 7 a vlastnosti zmesi (28 dní) v tabuľke 8.

Tabuľka 7 Receptúry zmesí s tehlovým a pórobetónovým recyklátom

Zložky betónu kg/m ³	Receptúry				
	REF	TR100	TR50	PBR100	PBR50
CEM I 52,5 R	574	574	574	574	574
Vysokopečná troska	191	191	191	191	191
Prírodné kamenivo 0/2 mm	1216	-	608,1	-	608,1

Tehlový recyklát 0/2 mm	-	908,7	454,4	-	-
Pórobetónový recyklát 0/2 mm	-	-	-	280,0	140,0
Voda	261	398,4	334	388,7	313,8
w	0,40	0,61	0,51	0,60	0,48
Plastifikátor	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
Kvapalný urýchľovač tuhnutia	5,74	5,74	5,74	5,74	5,74

Tabuľka 8 Vlastnosti zmesi s tehlovým a pórobetónovým recyklátom (28 dní)

	Objemová hmotnosť	Pevnosť v ťahu pri ohybe	Pevnosť v tlaku
REF	2250	10,2	74,9
TR100	2080	8,4	44,2
TR50	2200	10,6	46,8
PBR100	1860	5,7	31,2
PBR50	2140	7,6	50,1

Čiastkový záver: Tieto zmesi majú väčší podiel tmelu ku kamenivu, a iba drobné kamenivo frakcie 0/2, čím majú charakter malty. Napriek tejto zrnitosti boli s týmito receptúrami vďaka vysokej pevnostnej triede cementu dosiahnuté pevnosti v kategórii mált M5 a M10, s reálnou použiteľnosťou. Objemová hmotnosť receptúry s 50% TR je rovnaká ako v predchádzajúcom prípade, a všetky ostatné receptúry ju majú nižšiu. Hodnotu **pod 2000 kg.m⁻³ dosahuje len receptúra so 100% podielom PBR**, čo je logické vzhľadom na charakter tohto recyklátu. Pre dosiahnutie vyžadovanej objemovej hmotnosti by bolo vhodné upraviť pomer tmelu a plniva, prípadne kombinovať BR a PBR recyklát.

iii) **Zmesi s TR, BR, PBR + PG plastovým granulátom**

- D_{max}. 4 mm,
- náhrada PK: kombinácie 20%, 20+60%, a 80%,
- Skupina I.: Objem tmelu (V_T) **0,345m³**, objem plniva (V_P) **0,645 m³**.
- Skupina II.: Objem tmelu (V_T) **0,45m³**, objem plniva (V_P) **0,55 m³**.

Tabuľka 9 Receptúry zmesí s kombináciou recyklátov a plastového granulátu: Objem tmelu (V_T) **0,345m³**, objem plniva (V_P) **0,645 m³**

Cementová zmes	Cement CEM I 52,5 R (kg/m ³)	Voda (kg/ m ³)	PK 0/4 (kg/m ³)	PG 3/7 (kg/m ³)	PBR 1/2 (kg/m ³)	TR 0/4 (kg/m ³)	BR 0/4 (kg/m ³)	PP %
RZ₁	450	225	1710	-	-	-	-	-
PG20	450	225	1368	103,2	-	-	-	-

PG80₁	450	202	342	412,8	-	-	-	-
PG20-PBR60₁	450	257	342	103,2	232	-	-	0,6
PG20-TR60	450	257	342	103,2	-	600	-	0,6
PG20-BR60	450	225	342	103,2	-	-	813	0,6

Tabuľka 10 Receptúry zmesí s kombináciou recyklátov a plastového granulátu: Objem tmelu (V_T) **0,45m³**, objem plniva (V_P) **0,55 m³**.

Cementová zmes	Cement CEM I 52,5 R (kg/m ³)	Voda (kg/ m ³)	PK 0/4 (kg/m ³)	PG 3/7 (kg/m ³)	PBR 1/2 (kg/m ³)	PP %	W
RZ₂	585	263	1458	-	-	-	0,45
PG80₂	585	263	291,5	352	-	-	0,45
PG20-PBR60₂	585	263	291,5	88	198	0,6	0,5

Tabuľka 11 Vlastnosti zmesí s kombináciou recyklátov a plastového granulátu (28 dní)

	Zmes	Objemová hmotnosť	Pevnosť v ťahu pri ohybe	Pevnosť v tlaku	Nasiakavosť
Skupina I.	RZ ₁	2189	7,5	44,6	4,1
	PG20	1993	4,9	35,5	5,3
	PG80 ₁	1221	3,5	9,8	10,9
	PG20-PBR60 ₁	1508	4,5	12,9	10,0
	PG20-TR60	1655	4,4	13,0	7,1
	PG20- BR60	1884	7,6	34,1	5,6
Skupina II.	RZ ₂	2284	7,8	45,2	3,4
	PG80 ₂	1473	4,7	16,6	7,3
	PG20-PBR60 ₂	1740	5,3	27,8	5,1

Čiastkový záver: S prídavkom PG do zmesí z demolačnými recyklátmi sa dostávajú objemové hmotnosti pod 2000 kg/m³ vo všetkých testovaných prípadoch. Zvýšenie objemu tmelu voči objemu kameniva: táto alternatíva prináša zvýšenie objemovej hmotnosti (tmel ťažší ako plnivo), ale stále je pod 2000 kg/m³, pričom dochádza k zvýšeniu pevnosti a zníženiu nasiakavosti.

iv) **Zmesi s PD - plastovou drvinou z elektrospotrebičov + popolček**

- D_{max}. 4 mm
- Pomer frakcií kameniva:
 - PD 90%, PK 10%,
 - PD 70%, PK 30%

- PD 50%, PK 50%
- Objem tmelu (V_T) **0,35 m³**, objem plniva (V_P) **0,65 m³**.

Tabuľka 12 Receptúry zmesí s plastovou drvinou a popolčekom

Vzorka	Pomer (%)	Kamenivo 0/4 (g)	Plastové drvína (kg)	Cement I 42,5 (kg)	Voda (l)	Popolček (kg)
A1	90/10	186	549	469	235	–
B1	70/30	558	427	463	231	–
C1	50/50	930	305	456	228	–
A2	90/10	186	549	425	235	44
B2	70/30	558	427	331	231	132
C2	50/50	930	305	236	228	220

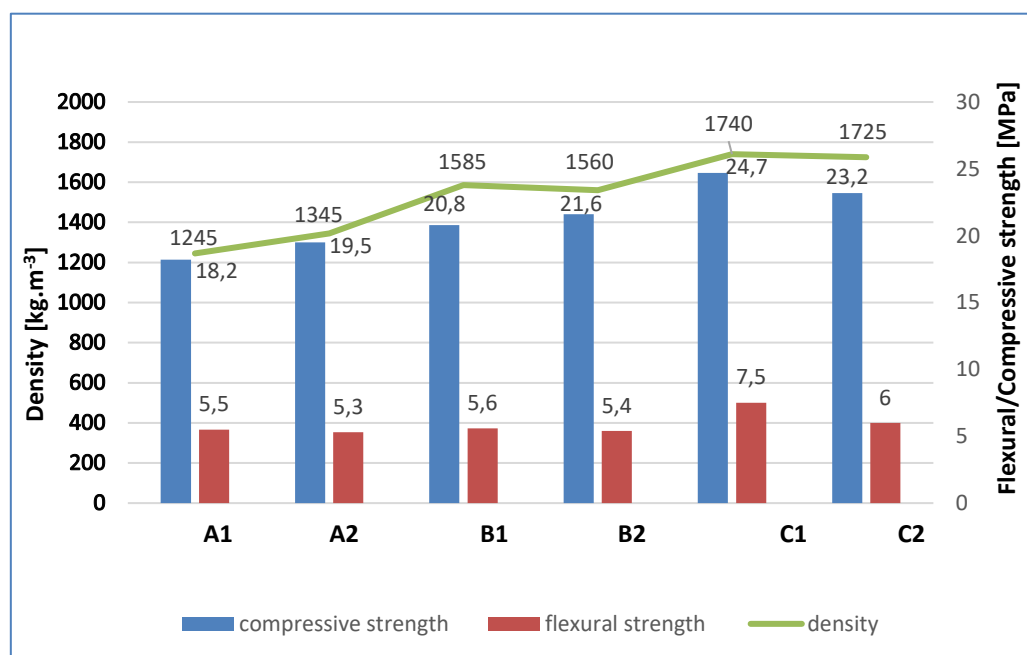
Tabuľka 13 Vlastnosti zmesí s plastovou drvinou a popolčekom (28 dní)

Pomer	Objemová hmotnosť ρ_v (kg/m ³)	Pevnosť v ťahu pri ohybe		Pevnosť v tlaku	
		F (kN)	f_{ct} (MPa)	F (kN)	f_c (MPa)
90/10 A1	1244	1,50	5,52	29,42	18,20
90/10+P A2	1345	1,53	5,31	31,63	19,45
70/30 B1	1585	1,46	5,55	32,77	20,77
70/30+P B2	1559	1,57	5,40	35,48	21,64
50/50 C1	1743	1,99	7,46	39,58	24,74
50/50+P C2	1724	1,71	5,98	38,03	23,21

Čiastkový záver: Pomer tmel / kamenivo je rovnaký ako v prípade i), ale je tu drobné kamenivo. Všetky receptúry majú objemovú hmotnosť pod 2000 kg.m-3. Pevnosti v tlaku sú na úrovni betónov. Prídavok popolčeka mierne znižuje alebo zvyšuje hodnoty objemovej hmotnosti a pevnosti v závislosti od miery zastúpenia PD, ale u všetkých zmesí zlepšuje ich štruktúru (Obrázok 4)



Obrázok 4 Porovnanie štruktúry vzoriek bez popolčeka a s popolčekom



Obrázok 5 Porovnanie výsledkov vzoriek s plastovou drvinou

1.1.4 Závery testovania fyzikálno-mechanických vlastností

Uvedený sumár výsledkov rôznych realizovaných experimentálnych prác poskytuje solídny základ, ktorý dopĺňa teoretické poznatky a rešeršné informácie v tejto oblasti výskumu o praktické výsledky s regionálnymi surovinami. Budú použité pri optimalizácii receptúr pre ďalšiu etapu výskumu. Najvýznamnejšie poznatky možno rámcovo zhrnúť nasledovne:

- Testované zloženie zmesí umožňuje získať spoľahlivo použiteľné pevnostné charakteristiky.

- Pre nižšie objemové hmotnosti majú z alternatívnych plnív dobrý potenciál tehlový recyklát, pórobetónový recyklát a plastová drvina.
- Odpady na báze plastov môžu byť užitočnými plnivami buď samostatne, alebo v kombinácii s inými recyklátmi (tehlový, betónový), ktorým môžu napomôcť dosiahnuť vyžadované hodnoty objemovej hmotnosti.
- Zvýšenie objemu tmelu voči ľahkému plnivu zvyšuje objemovú hmotnosť, ale aj pevnosť v tlaku. Optimalizácia pomeru tmelu a plniva v stavebných zmesiach môže byť vhodným prístupom k dosiahnutiu návrhových hodnôt objemovej hmotnosti a pevnosti (vlastnosti v nepriamej úmere).

1.1.5 Analýza environmentálnych dopadov vybraných zmesí

Cieľom tejto štúdie je stanoviť emisie skleníkových plynov vyjadrených ako GWP-GHG pre vybrané zmesi s plastovou drvinou (Tabuľka 14) a s tehlovým a pórobetónovým recyklátom (Tabuľka 15) podľa EN 15804 v systémovej hranici „Od kolísky pro bránu“, t.j. A1-A3 a zahŕňa dopady výroby surovín, ich prepravu do výrobného závodu a výrobný proces. Deklarovanou jednotkou štúdie je 1 m³ zmesi. Hmotnosť produktu na deklarovanej jednotku je rôzna. Na analýzu bol použitý software One Click LCA, verzia 26.06.1 a databáza 7.6. Zdrojom LCA údajov je Ecoinvent 3.11 (2024), BAFU (2025) a špecifické údaje o produkte. Analýza bola vykonaná v súlade s normami EN 15804:2011+A2:2019/AC:2021, ISO 14040:2006 a ISO 14044:2006. Tabuľka 16 uvádza zahrnuté fázy v LCA a tabuľka 17 informácie o uvažovanej elektrine.

Tabuľka 14 Zloženie zmesí s plastovou drvinou

Vzorka	Pomer (%)	Kamenivo 0/4 (kg)	Plastové drvina (kg)	Cement (kg)	Voda (l)
A1	90/10	186	549	460	230
A2	50/50	930	305	460	230

Tabuľka 15 Zloženie zmesí s tehlovým a pórobetónovým recyklátom

	B1 REF	B2 TR100	B3 PBR100
CEM I 52,5 R	574	574	574
Vysokopečná troska	191	191	191
Prírodné kamenivo 0/2 mm	1216	-	-
Tehlový recyklát 0/2 mm	-	908,7	-
Pórobetónový recyklát 0/2 mm	-	-	280,0
Voda	261	398,4	388,7

Tabuľka 16 Zahrnuté fázy a informačné moduly životného cyklu

Fáza produktu	A1	Zásobovanie surovinami
	A2	Doprava
	A3	Výroba

Tabuľka 17 Informácie o energii

Parameter scenára	Hodnota	Zdroj údajov
Zdroj a kvalita údajov o elektrine	Elektrina, nízke napätie, v sieti, 2025	BAFU
Elektrina kg CO _{2eq.} / kWh	0,26 kg CO _{2eq.} / kWh	

Tabuľky 18 a 19 prezentujú výsledky pre hodnotené indikátory potenciálu globálneho otepľovania pre vyššie uvedené zmesi.

Tabuľka 18 GWP pre zmesi s plastovou drvinou

Zmes	Modul	GWP-fosílny [kg CO _{2eq.} /m ³]	GWP – biogénny [kg CO _{2eq.} /m ³]	GWP-LULUC [kg CO _{2eq.} /m ³]	GWP-celkový [kg CO _{2eq.} /m ³]	GWP-GHG [kg CO _{2eq.} /m ³]
A1	A1	588,69	0,00	2,92	591,62	591,62
	A2	3,05	0,00	0,00108	3,05	3,05
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	592,475	0,00	2,921554	595,406	595,406
A2	A1	473,23	0,00	1,63	474,86	474,86
	A2	4,54	0,00	0,00178	4,54	4,54
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	478,505	0,00	1,632254	480,136	480,136

Na základe uvedených výsledkov možno konštatovať, že zloženie kameniva významne ovplyvnilo hodnoty potenciálu globálneho otepľovania (GWP) vo fáze výroby (A1–A3). Zmes A1, ktorá obsahuje vyšší podiel plastovej drviny a nižší podiel prírodného kameniva, dosiahla celkový GWP 595,406 kg CO_{2eq.}/m³, zatiaľ čo zmes A2, s nižším obsahom plastovej drviny a vyšším podielom prírodného kameniva, vykázala hodnotu 480,136 kg CO_{2eq.}/m³. To predstavuje zníženie emisií o 115,27 kg CO_{2eq.}/m³, teda o 19,4%. Rozdiel medzi zmesami vzniká v module A1, ktorý zahŕňa ťažbu a výrobu vstupných materiálov. Práve tento modul tvorí dominantnú časť celkového GWP. Moduly A2 (doprava) a A3 (výrobný proces) sa na celkových emisiách podieľajú len minimálne a rozdiely medzi zmesami sú zanedbateľné.

Vyššie emisie zmesi A1 naznačujú, že výroba použitej plastovej drviny je z pohľadu emisií skleníkových plynov náročnejšia ako použitie prírodného kameniva. Environmentálny prínos plastovej drviny preto nemožno posudzovať iba na základe využitia odpadového materiálu, ale je potrebné zohľadniť celý životný cyklus vrátane procesov zberu, triedenia, úpravy a spracovania plastového odpadu. V tomto prípade sa tieto procesy prejavili vyššou uhlíkovou stopou výrobnej fázy. Zároveň je potrebné zdôrazniť, že hodnotenie sa týka iba indikátora GWP. Ak je cieľom využitie recyklovaných materiálov a znižovanie spotreby prírodných zdrojov, plastová drvina môže prinášať výhody v iných environmentálnych kategóriách (napr. zníženie spotreby primárnych surovín alebo množstva odpadu), ktoré samotný ukazovateľ

GWP nezohľadňuje. Preto je vhodné výsledky interpretovať v kontexte celého hodnotenia životného cyklu (LCA), nielen z pohľadu emisií CO₂ ekvivalentu.

Tabuľka 19 GWP pre zmesi s tehlovým recyklátom a pórobetónovým recyklátom

Zmes	Modul	GWP-fosilný [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP – biogénny [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-LULUC [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-celkový [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-GHG [kg CO _{2eq} /m ³]
B1	A1	425,33	0,000000	0,0118	425,34	425,34
	A2	6,13	0,000000	0,00239	6,13	6,13
	A3	0,735	0,000000	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	432,195	0,000000	0,014664	432,206	432,206
B2	A1	421,87	0,000000	0,00954	421,88	421,88
	A2	5,85	0,000642	0,00223	5,85	5,85
	A3	5,9	0,000000	0,00381	5,91	5,91
	A1-A3	433,62	0,000642	0,01558	433,64	433,64
B3	A1	421,87	0,000000	0,00954	421,88	421,88
	A2	4,36	0,000198	0,00155	4,36	4,36
	A3	2,33	0,000000	0,0015	2,33	2,33
	A1-A3	428,56	0,000198	0,01259	428,57	428,57

Na základe uvedených výsledkov možno konštatovať, že nahradenie prírodného kameniva stavebnými recyklátmi malo len mierny vplyv na hodnoty potenciálu globálneho otepľovania (GWP) vo fáze výroby (A1–A3). Referenčná zmes B1 dosiahla celkový GWP 432,21 kg CO_{2eq}/m³, zmes B2 s tehlovým recyklátom vykázala mierne vyššiu hodnotu 433,64 kg CO_{2eq}/m³, zatiaľ čo zmes B3 s pórobetónovým recyklátom dosiahla najnižšiu hodnotu 428,57 kg CO_{2eq}/m³. V porovnaní s referenčnou zmesou predstavuje zmes B3 zníženie emisií o 3,64 kg CO_{2eq}/m³, čo zodpovedá 0,84 %, zatiaľ čo zmes B2 vykázala mierny nárast o 1,43 kg CO_{2eq}/m³, teda o 0,33 %. Podobne ako pri ostatných analyzovaných zmesiach, rozhodujúci podiel na celkovom GWP predstavuje modul A1, ktorého hodnota dosahuje 425,34 kg CO_{2eq}/m³ pri referenčnej zmesi B1 a 421,88 kg CO_{2eq}/m³ pri oboch zmesiach s recyklovaným kamenivom (B2 a B3), čo poukazuje na priaznivý vplyv nahradenia časti primárnych surovín recyklátmi. Rozdiely v celkovom GWP medzi zmesami preto nevznikajú v module A1, ale sú spôsobené predovšetkým rozdielnym príspevkom modulov A2 (doprava) a A3 (výrobný proces). Najvyššie hodnoty v moduloch A2 a A3 boli zaznamenané pri zmesi B2 s tehlovým recyklátom, kde GWP dosiahlo 5,85 kg CO_{2eq}/m³ v module A2 a 5,91 kg CO_{2eq}/m³ v module A3. Vyššie emisie možno pripísať náročnejšiemu spracovaniu tehlového recyklátu, prípadne väčším dopravným vzdialenostiam alebo energetickým požiadavkám jeho úpravy. Naopak, zmes B3 s pórobetónovým recyklátom vykázala najnižšie hodnoty v moduloch A2 (4,36 kg CO_{2eq}/m³) aj A3 (2,33 kg CO_{2eq}/m³), čo sa prejavilo aj najnižším celkovým GWP zo všetkých hodnotených zmesí. Výsledky poukazujú na to, že samotné využitie recyklovaného kameniva nemusí viesť k zníženiu uhlíkovej stopy. Významnú úlohu zohráva druh recyklátu, spôsob jeho spracovania a logistické podmienky. V prípade tehlového recyklátu boli pozitívne efekty nižších emisií pri výrobe vstupných materiálov kompenzované vyššími emisiami spojenými s výrobným procesom. Naopak, pórobetónový recyklát sa z hľadiska hodnoteného indikátora ukázal ako environmentálne priaznivejšia alternatíva.

Je však potrebné zdôrazniť, že uvedené hodnotenie sa vzťahuje iba na indikátor potenciálu globálneho otepľovania (GWP). Celkový environmentálny prínos využitia stavebných recyklátov je potrebné posudzovať na základe komplexného hodnotenia životného cyklu (LCA), ktoré zahŕňa aj ďalšie kategórie environmentálnych vplyvov, ako sú spotreba primárnych surovín, tvorba odpadu, acidifikácia alebo eutrofizácia. Z tohto pohľadu môže byť využitie tehlového aj pórobetónového recyklátu prínosné napriek tomu, že rozdiely v hodnotách GWP sú relatívne malé.

Literatúra

1. SIČÁKOVÁ, Alena (80%) - KOVÁČ, Marek: Relationships between Functional Properties of Pervious Concrete. In: Sustainability. - Bazilej (Švajčiarsko) Multidisciplinary Digital Publishing Institute Roč. 12, č. 16 (2020)
2. Muhammad Faisal Junaid, Zia ur Rehman, Michal Kuruc, Igor Medved', Darius Bacinskas, Jakub Čurpek, Miroslav Čekon, Nauman Ijaz, Wajahat Sammer Ansari: Lightweight concrete from a perspective of sustainable reuse of waste byproducts. Construction and Building Materials 319 (2022).
3. Oznámenie Komisie: Kruh sa uzatvára – Akčný plán EÚ pre obehové hospodárstvo. COM (2015) 614 final, Brusel. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=EN>
4. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/ENV_WASGEN
5. V. Malk, Xamk, E. K. Lauritzen, CRD: CityLoops Guide for Pre-demolition Audit. Capital Region Denmark (CRD), 2023
6. A. M. Grabiec et al: Some Remarks towards a Better Understanding of the Use of Concrete Recycled Aggregate: A Review: In: Sustainability 2021, 13, 13336.
7. Y. A. Villagrán-Zaccardi et al: Complete re-utilization of waste concretes–Valorisation pathways and research needs. In: Resources, Conservation & Recycling 177 (2022) 105955
8. F. K. Alqahtani, M. A. Sherif , A. M. Ghanem: Green lightweight concrete utilizing sustainable processed recycled plastic aggregates: Technical, economic and environmental assessment. Construction and Building Materials, Volume 393, 2023,
9. E. Ozcelikci, M. Sahmaran: Characterization and value-added application of low-quality concrete waste based recycled aggregates. Materials today, article in press.
10. STN EN 206+A2:2021/NA (732403): Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda.
11. STN EN 998-2: 2019 (72 2430), Špecifikácia mált na murivo Časť 2 Malta na murovanie.

1.2 Dnové sedimenty ako environmentálna výzva a perspektívny zdroj pre nízkouhlíkové stavebníctvo

Dnové sedimenty predstavujú prirodzený produkt erózných a transportných procesov v povodiach, avšak ich nadmerná akumulácia vo vodných tokoch a nádržiach spôsobuje závažné ekologické a technické problémy. Nadmerné zanášanie znižuje retenčnú kapacitu vodných nádrží, obmedzuje ich protipovodňovú funkciu, skracuje životnosť hydraulických konštrukcií a vedie k destabilizácii morfológických pomerov vodných tokov. Okrem toho urýchľuje eutrofizáciu a negatívne ovplyvňuje kvalitu povrchových vôd.

Jednou z nedoriešených problematík v oblasti manažmentu sedimentov na miestnej, národnej a Európskej úrovni je legislatíva, ktorá je nesúdržná a nie je z nej jednoznačne jasné, do ktorého sektora sediment spadá. Problematika manažmentu sedimentov je riešená v rámci viacerých legislatívnych oblastí, a to predovšetkým smernicami EÚ, ktoré sa týkajú pôdy, vody a odpadu/kontaminantov (návrh smernice pre ochranu pôdy 2006/0086/COD, rámcová smernica 2000/60/ES o vodách, smernica 2008/98/ES o odpadoch, smernica 91/689/EHS o nebezpečných odpadoch, smernica 1999/31/ES o skládkach odpadov a iné), kde sedimentu prislúchajú rôzne definície, postavenia a hodnoty.

V návrhu smernice pre ochranu pôdy sa uvádza, že sedimenty zo zrýchlenej erózie môžu zanášať priehrady a poškodzovať dolné úseky vodných tokov. Rámcová smernica o vodách (2000/60/ES) nešpecifikuje ani sedimenty, ani vyťažený materiál, hoci sedimenty sú prirodzenou a nevyhnutnou súčasťou vodného prostredia a ich manažment musí zohrávať dôležitú úlohu vo vodnej legislatíve. Otázku sedimentov rieši článok 2, ktorý pojednáva o koncentrácii kontaminantov v sedimentoch, ktoré nesmú prekročiť "normy kvality životného prostredia" z dôvodu ochrany ľudského zdravia a životného prostredia. Sedimenty vodných tokov a nádrží ako také nie sú zaradené ani v európskom katalógu odpadov (2000/532/EC). Je tam zaradený kontaminovaný vyťažený materiál z vodného prostredia, podobne ako v smernici o nebezpečných odpadoch (91/689/EEC), ktorý sa kategorizuje ako odpad, čo vytvára všeobecne negatívny obraz o sedimentoch.

V SR je legislatívna podpora v oblasti manažmentu so sedimentami nasledovná. Ako v európskom, ani v slovenskom katalógu odpadov (Vyhláška MŽP SR č. 365/2015 Z. z.) nie sú sedimenty exaktne špecifikované. Podľa zákona NR SR č. 79/2015 Z.z. o odpadoch sú sedimenty hodnotené ako odpad a je nutné s nimi podľa ich zloženia aj náležite nakladať v tom prípade, že obsahujú nebezpečné látky a vykazujú nebezpečné vlastnosti podľa Nariadenia Komisie EÚ č. 1357/2014. Ak sedimenty z vodných tokov a nádrží obsahujú nebezpečné látky, možno ich zaradiť do skupiny 17 – Zemina, kamenivo a materiál z bagrovísk, pod kód 17 05 03 – zemina a kamenivo obsahujúce nebezpečné látky. V prípade, že sedimenty nebezpečné látky neobsahujú, podľa zákona o odpadoch ich zaradujeme pod kód 17 05 04 – zemina a kamenivo iné ako uvedené v 17 05 03 a podľa Zákona NR SR č. 188/2003 Z. z. je možné uvažovať s ich aplikáciou do poľnohospodárskej pôdy a lesnej pôdy. Informácia o obsahu kontaminantov v sedimentoch je zásadná, pretože určuje, či možno sediment považovať za potenciálne využiteľný materiál, alebo či je spracovateľný len v režime nakladania s (nebezpečným) odpadom.

Z väčšiny legislatívnych predpisov je zrejmé, že slovo sediment sa často spája s významom kontaminovaný sediment, a teda problémom sú chemické látky, pokiaľ sa do sedimentov dostanú a kontaminujú ich. Aj v praxi prevažuje vnímanie sedimentov ako problematického materiálu, ktorý je nutné vyťažiť a zneškodniť, čo vedie k vysokým nákladom na ich transport a ukladanie na skládky. Tento tradičný lineárny prístup (vyťažiť – odviezť – uložiť) je environmentálne aj ekonomicky neudržateľný. V kontexte cirkulárnej ekonomiky sa preto čoraz viac zvažujú alternatívne spôsoby valorizácie sedimentov. Nekontaminované sedimenty predstavujú významný, dosiaľ málo využívaný prírodný materiálový zdroj, ktorý možno po primeranej úprave využiť v stavebníctve – napríklad ako náhradu prírodného kameniva (najmä

piesku) alebo ako jemný minerálny komponent, alebo dokonca ako prímes v betóne. Toto „dvojité využitie“ sedimentov prináša významné environmentálne prínosy – znižuje uhlíkovú stopu betónu, znižuje tlak na ťažbu prírodných surovín a podporuje moderné, nízkouhlíkové stavebníctvo. Pre akékoľvek materiálové využitie sedimentov je však nevyhnutná chemická, fyzikálna a environmentálna analýza (vrátane testov vylúhovateľnosti), ktorá určí ich zaradenie, možnosti opätovného použitia a bezpečné podmienky aplikácie v stavebných materiáloch.

1.2.1 Sedimenty ako náhrada kameniva: riešenie pieskovej krízy a prínos ku dekarbonizácii

Svetový dopyt po piesku a štrku, základných zložkách betónu a stavebných materiálov, dosiahol alarmujúce hodnoty. Podľa posledných odhadov sa celosvetovo každoročne spotrebuje približne 50 miliárd ton piesku [1], čím sa piesok a štrk radia medzi najviac ťažené prírodné zdroje na planéte, hneď po vode. Z dôvodu rastu populácie ľudstva a s tým spojeným nárastom výstavby sa predpokladá každoročný nárast ťažby štrkopieskov o 6% [2]. Niektoré krajiny (napríklad aj susediace Rakúsko, Maďarsko a Česko) avizujú komplikácie s celkovými kapacitami štrkopieskových ložísk [1,3]. Predovšetkým prognózy zo susediacej Českej republiky poukazujú na rapídne zhoršenie situácie, keď z ročnej produkcie v rozmedzí 2,5 až 3 miliónov m³ štrkopieskov sa predpokladá masívny pokles až o 1,3 milióna m³ predovšetkým hrubozrnnnej frakcie využívanéj v stavebnom priemysle do betónových konštrukcií. V ČR tiež predpokladajú, že z aktívnych 32 ťažísk štrkopieskov bude do roku 2031 až 28 úplne vyťažených a s ukončenou prevádzkou [4]. Problém nastáva aj v otváraní nových ťažobných baní, kde je potrebných veľa výskumov a povolení, pretože to narúša prostredie a okolitý biotop [5]. V mnohých krajinách (napr. Vietnam, India, Indonézia, Mexiko, Keňa, atď.) sa navyše rozšíril nelegálny obchod s pieskom, čo podčiarkuje jeho strategickú hodnotu pre stavebníctvo [6]. Dopyt po tejto surovine naďalej výrazne rastie, čo vedie k tzv. globálnej pieskovej kríze [7]. Vzhľadom na pokračujúce vyčerpávanie zásob piesku je nevyhnutné zaviesť účinné mechanizmy jeho globálneho manažmentu. Odborná verejnosť a environmentálne organizácie vyzývajú k naliehavému presunu od nekontrolovanej ťažby prírodného piesku k trvalo udržateľnému manažmentu zdrojov kameniva - vrátane regulácie ťažby, zavedenia alternatívnych materiálov (recyklované kamenivo, umelé agregáty, materiály z odpadov), a zmeny v stavebnej praxi smerom k cirkulárnej ekonomike. Takýto prístup je kľúčový nielen na ochranu zdrojov, ale aj na zmiernenie výrazných environmentálnych, ekologických a spoločenských dôsledkov spojených s neudržateľnou ťažbou piesku [8-10]. Je preto nevyhnutné uvažovať nad využívaním alternatívnych zdrojov a materiálov ako čiastočnej náhrady, čím sa spomalí spotreba prírodných kamenív do betónov [11].

Jedným z možných riešení tohto problému môže byť využitie dnových sedimentov z vodných tokov a nádrží, ktoré obsahujú vysoký podiel piesčitých a ílovitých frakcií [11-13]. Zároveň sa tým môže čiastočne riešiť problém so zanášaním nádrží, ich odbahňovaním a následným nakladaním so sedimentami.

1.2.2 Sedimenty ako náhrada kameniva v betóne

Využitie sedimentov ako náhrady prírodného kameniva predstavuje významný dekarbonizačný príspevok, ktorý sa realizuje v dvoch komplementárnych oblastiach. Prvou je redukcia emisií CO₂ asociovaných s produkciou primárneho kameniva. Ťažba piesku a štrku zahŕňa energeticky intenzívne procesy, ktoré tvoria dominantnú časť uhlíkovej stopy primárnych surovín. Substitúcia časti prírodného kameniva sedimentom, ktorý je dostupný in situ vo vodnom toku alebo vodnej nádrži, umožňuje výraznú redukciu emisií spojených s ťažbou aj transportom, pričom najvyšší environmentálny prínos sa dosahuje pri lokálnom alebo regionálnom využití sedimentu. Druhou oblasťou je synergický dekarbonizačný efekt vyplývajúci z údržby vodných nádrží. Odstraňovanie sedimentov je nevyhnutné na

zabezpečenie akumulácie kapacity, hydraulickej účinnosti a dlhodobej funkčnosti vodných stavieb. Materiálové zhodnotenie sedimentu tak predstavuje environmentálne optimálne riešenie, keďže eliminuje potrebu jeho skládkovania, znižuje emisie CO₂ spojené s jeho transportom na skládku a zároveň minimalizuje emisie viazané na anaeróbny rozklad organickej zložky sedimentu na skládke. Týmto spôsobom sedimenty vystupujú ako sekundárne, neťažené kamenivo s výrazne priaznivejšou materiálovo-energetickou a uhlíkovou bilanciou v porovnaní s konvenčným prírodným pieskom a štrkom.

Výskum v oblasti využitia inovatívneho materiálu v stavebníctve bol zameraný na posúdenie možnosti využitia sedimentov vyťažených z vodnej nádrže Ružín ako čiastočnej / úplnej náhrady plniva pri príprave trvalo udržateľných stavebných zmesí. Hlavným cieľom štúdie je vyhodnotiť vplyv použitia sedimentov na vývoj pevnostných charakteristík vytvorených kompozitov.

Vodná nádrž Ružín je vybudovaná na rieke Hornád nad mestom Košice na východnom Slovensku, v severovýchodnej časti Slovenského rudohoria. Jej hlavným účelom je zabezpečenie vody pre priemysel v oblasti Košíc, riedenie odpadových vôd, výroba elektriny a čiastočná protipovodňová ochrana územia pod priehradou. Nádrž slúži aj na rekreačné účely. Nádrž čelí dlhodobému problému zanášania sedimentmi, ktoré ovplyvňujú jej environmentálne a vodohospodárske funkcie. Nadmerné usadzovanie sedimentov znižuje retenčnú kapacitu nádrže, zhoršuje kvalitu vody a negatívne ovplyvňuje vodný ekosystém. Jedným z perspektívnych a inovatívnych riešení nakladania s nahromadenými sedimentmi riešení a zároveň prispievania k udržateľnému stavebníctvu je využitie sedimentov ako čiastočnej náhrady kameniva pri výrobe betónu.

Na tento účel boli dnové sedimenty z vodnej nádrže Ružín odobraté z oblasti situovanej v blízkosti telesa hrádze (GPS: 48.860364; 21.088918) v jesenných mesiacoch. Odobraté vzorky boli pri laboratórnej teplote vysušené a presitované na 2 požadované frakcie - 0/4mm a 4/8mm (Obrázok 6). Zastúpenie frakcie 0/4 mm predstavovalo z pôvodne odobratej vzorky až 75%. Sedimenty použité v experimentálnych zmesiach boli podrobené analýze základných fyzikálno-chemických parametrov (zrornosť, objemová hmotnosť, nasiakavosť a chemické zloženie). Podobne tieto analýzy boli realizované aj pre prírodné kamenivo, ktoré bolo v zmesiach nahrádzané sedimentami.



Obrázok 6 Vyťažené sedimenty z Ružína (vľavo) a prírodné ťažené kamenivo (vpravo) fr. 0/4 a 4/8 mm

Sedimenty boli použité ako čiastočná náhrada kameniva frakcie 0/4 mm (20, 40, 60, 80, 100 %) alebo frakcie 4/8mm (20, 60, 100%) do betónu.

Vstupné materiály (prírodné kamenivo a dnový sediment) boli podrobené analýze základných fyzikálnych parametrov (zrornosť, nasiakavosť, objemová hmotnosť). Následne boli pripravené kompozity na báze sedimentov ako čiastočnej náhrady plniva do betónu podľa Tabuľky 6.20. Na prípravu kompozitov bol použitý portlandský cement (CEM I 42,5 R), prírodné kamenivo frakcií 0/4 mm a 4/8 mm (Geča, Slovensko), ktoré spĺňajú požiadavky normy STN EN 12620 (2008) a zámesová voda. Pri návrhu receptúry boli zohľadnené kritériá STN EN 206 (2017). Pre lepšiu spracovateľnosť sa do zmesí s vysokým podielom (80%, 100%) náhrady kameniva

sedimentom (SRMK4, SRMK5) pridával superplastifikátor (polykarboxylát) Berament HT 29 v množstve zodpovedajúcom 0,7 % celkovej hmotnosti cementu. Receptúra prepočítaná na 1 m³ zmesi pri dodržaní vodného súčiniteľa 0,55 bola nasledovná: CEM I 42,5 R = 350 kg; kamenivo frakcie 0/4 mm = 1123 kg; kamenivo frakcie 4/8 mm = 717 kg. Kontrolná / porovnávacia vzorka betónu bola zložená z cementu (CEM I 42,5 R), prírodného kameniva frakcií 0/4 mm a 4/8 mm a vody, označená ako SM0. Trámce s rozmermi 40 mm × 40 mm × 160 mm boli pripravené z každej zmesi, po 48 hodinách boli odformované a následne uložené do vodného kúpeľa s udržiavanou teplotou 20 °C. Na zatvrdnutých kompozitoch boli vykonané skúšky pevnosti v tlaku pomocou prístroja ELE ADR 2000 (ELE International Ltd, Veľká Británia) po 28 a 90 dňoch tvrdnutia.

Boli stanovené aj ďalšie parametre, ktoré ovplyvňujú fyzikálne vlastnosti stavebných materiálov - celková nasiakavosť ako dôležitý ukazovateľ trvanlivosti betónu a objemová hmotnosť zatvrdnutých kompozitov.

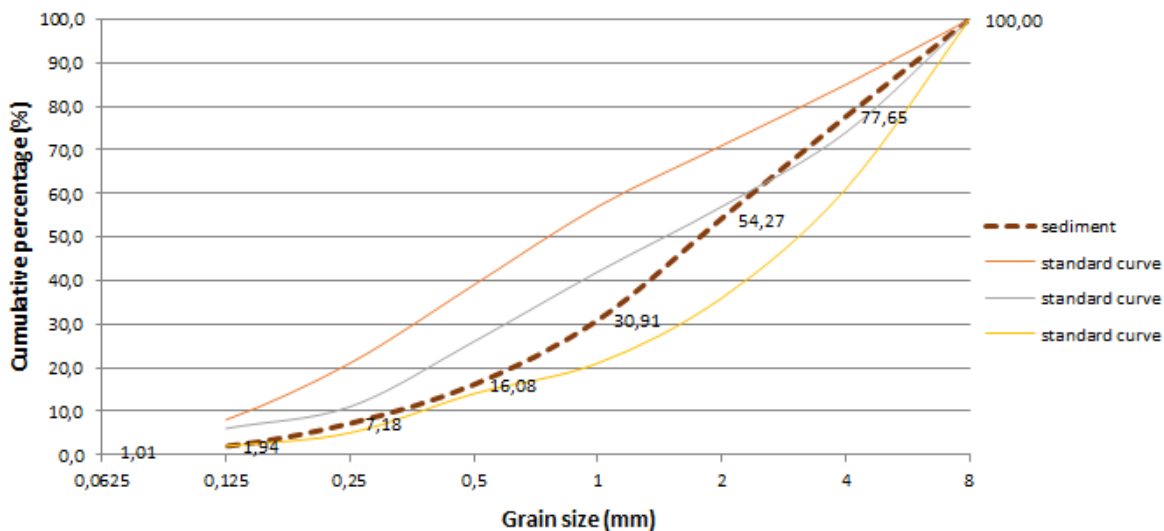
Tabuľka 20 Zloženie testovaných zmesí pripravených na báze sedimentu ako plniva v betóne

Kompozit			Spojivo	Kamenivo fr. 0/4 mm		Kamenivo fr. 4/8 mm		Voda	Prísada
			CEM I	prírodné kamenivo	sediment Ružín	prírodné kamenivo	sediment Ružín	%	%
			%	%	%	%	%		
SM0 – kontrolná vz.			100	100	0	100	0	100	-
Sediment ako náhrada plniva	náhrada fr. 0/4 mm	SRM K1	100	80	20	100	0	100	-
		SRM K2	100	60	40	100	0	100	-
		SRM K3	100	40	60	100	0	100	-
		SRM K4	100	20	80	100	0	100	0,7 hmotnosti cementu
		SRM K5	100	0	100	100	0	100	0,7 hmotnosti cementu
	náhrada fr. 4/8 mm	SRM K6	100	100	0	80	20	100	-
		SRM K7	100	100	0	40	60	100	-
		SRM K8	100	100	0	0	100	100	-

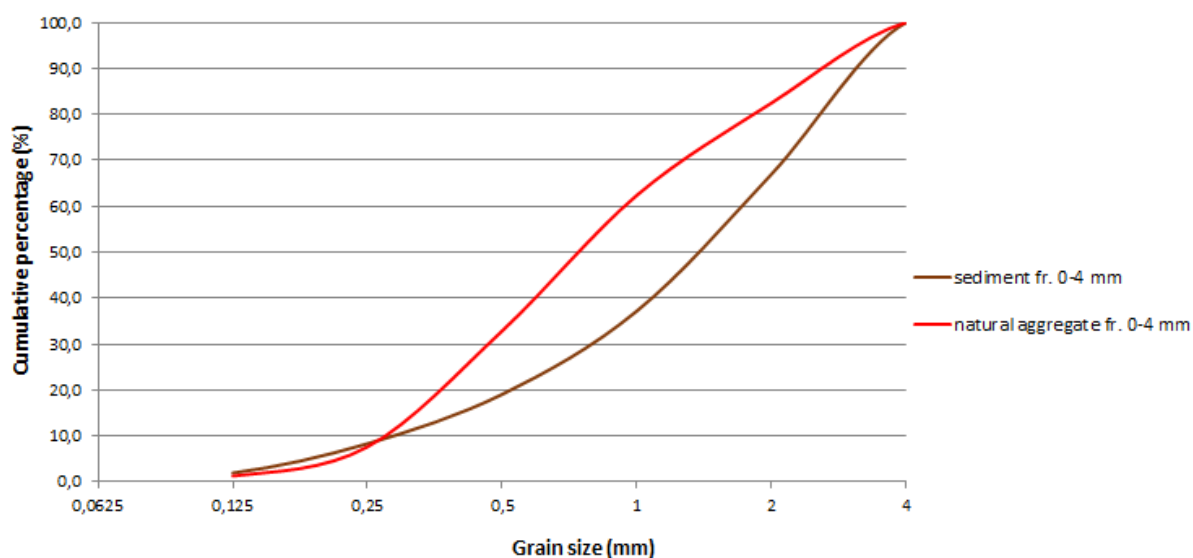
Výsledky analýzy fyzikálnych parametrov sedimentov a prírodného kameniva sú uvedené na obrázku 7, 8 a v tabuľke 21. Vhodnosť použitia sedimentov ako náhrady prírodného kameniva v betóne bola posúdená porovnaním krivky veľkosti zŕn sedimentu so štandardnými krivkami veľkosti zŕn pre kamenivo s maximálnou veľkosťou zŕn 8 mm podľa normy EN 12620 (Obrázok 7). Výsledky analýzy veľkosti zŕn ukázali, že sediment má vhodnú veľkosť zŕn na použitie ako náhrada kameniva v betóne. V porovnaní s prírodným kamenivom má jemnejšiu veľkosť zŕn v jemných frakciách (0/0,25 mm) (Obrázok 8), ale vo všeobecnosti prevláda podiel hrubších zŕn. Táto skutočnosť spolu s vyššou nasiakavosťou (Tabuľka 23) sedimentov (5,4 %) v porovnaní s prírodným kamenivom (2,5 %) ovplyvnila spôsob prípravy kompozitov (Tabuľka 20), kde bol

do zmesi pridany superplastifikator so 100 % nahradenim frakcie kameniva 0/4 mm sedimentom.

Vstupne materialy boli podrobené aj chemickej analyze (Tabulka 22).



Obrázok 7 Krivka zrnitosti sedimentu porovnaná so štandardnými krivkami zrnitosti podľa STN EN 12620



Obrázok 8 Krivka zrnitosti sedimentu a prírodného kameniva, frakcia 0/4 mm

Tabuľka 21 Fyzikálne charakteristiky vstupného materiálu

Materiál / fyzikálna vlastnosť		Objemová hmotnosť ρ_b (kg.m ⁻³)	Nasiakavosť (%)
Prírodné kamenivo	Frakcia 0/4 mm	2610	2,5
	Frakcia 4/8 mm	2630	1,2
Sedimenty VS Ružín	Frakcia 0/4 mm	2580	5,4

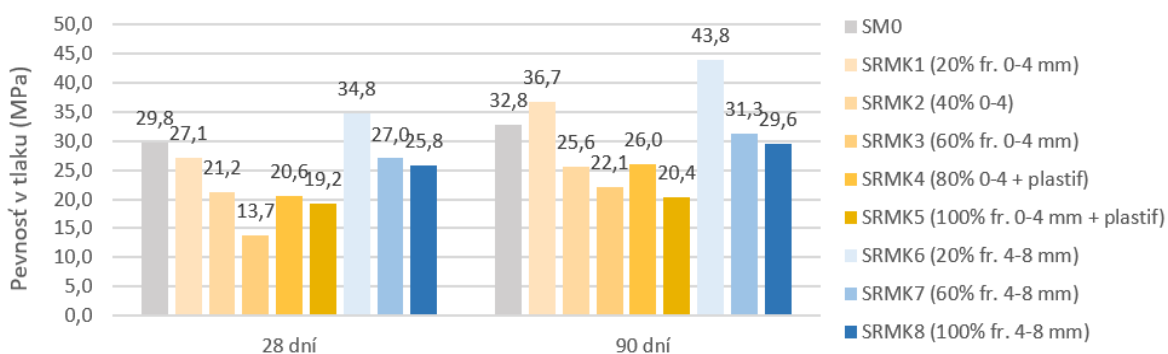
	Frakcia 4/8 mm	2500	4,6
--	----------------	------	-----

Tabuľka 22 Chemické zloženie východiskových materiálov

Materiál / chemická vlastnosť		Obsah (%)								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
Prírodné kamenivo	Frakcia 0/4 mm	84,72	7,30	1,43	0,44	0,76	1,25	0,001	0,21	0,09
	Frakcia 4/8 mm	71,02	7,73	2,69	6,24	3,58	1,66	0,01	0,24	0,10
Sedimenty VS Ružín	Frakcia 0/4 mm	62,29	18,03	5,15	0,95	1,86	2,85	0,17	0,72	0,24
	Frakcia 4/8 mm	64,05	22,23	6,39	0,34	1,17	3,79	0,11	0,79	0,24

Chemická analýza preukázala, že hlavnými zložkami sedimentov podobne ako aj prírodného kameniva sú SiO₂ a Al₂O₃. Sedimenty majú v porovnaní s prírodným kamenivom nižší obsah SiO₂ a zároveň vyšší obsah Al₂O₃, čo naznačuje prítomnosť väčšieho množstva ílovitých minerálov. To môže mať vplyv na puzolánovú aktivitu a tvorbu C-S-H gélov, mechanické a chemické vlastnosti betónových zmesí, najmä pokiaľ ide o trvanlivosť a odolnosť voči chemickým vplyvom. Nižší obsah CaO a MgO v sedimentoch znamená, že sedimenty majú nižšiu hustotu ako prírodné kamenivo, výsledkom čoho je mierne nižšia objemová hmotnosť betónu (Tabuľka 23).

Obrázok 6.9 znázorňuje výsledky pevnosti v tlaku pripravených kompozitov na báze sedimentu ako plniva po 28 a 90 dňoch tvrdnutia. Výsledné pevnosti sú priemerné hodnoty z dvoch sérií pripravených kompozitov, pričom priemer pevnosti v tlaku je vypočítaný zo šiestich meraní. Výsledky meraní, ktoré sa líšili o viac ako ±10 %, boli vylúčené.



Obrázok 9 Pevnosť v tlaku pripravených kompozitov na báze sedimentu ako plniva po 28 a 90 dňoch tvrdnutia

Na základe výsledkov pevnosti v tlaku možno všeobecne konštatovať, že pevnosť v tlaku kompozitov klesá so zvyšujúcim sa obsahom sedimentu. Hodnoty dosiahnutých pevností sa výrazne líšili (Obrázok 9) pri nahradení frakcií 0/4 mm (odtíene žltej farby) a 4/8 mm (odtíene modrej farby).

V prípade náhrady prírodného kameniva frakcie 0/4 mm sedimentom, vysoký podiel sedimentu v kompozitoch (60 a 100 %) spôsobil zníženie pevností v tlaku približne o 35 %. Zhoršenie pevnosti betónu je spôsobené tým, že jemné sedimenty (0/4 mm) majú väčší špecifický povrch, vyššiu nasiakavosť, zvyšujú pórovitosť a môžu obsahovať viac ílových častíc, čo negatívne ovplyvňuje hydratáciu cementu a zhoršujú mechanické vlastnosti kompozitov [14]. Anomália v

dosiahnutých pevnostiach nastala u kompozitov so 60 a 100 %-nou náhradou, kde kompozit s vyššou náhradou mal po 28 dňoch vytvrdzovania vyššiu pevnosť v tlaku ako ten druhý o približne 40 %. Tento výsledok ovplyvnilo použitie superplastifikátora pri 100% náhrade kameniva, ktorý bol použitý z dôvodu vysokej nasiakavosti sedimentu. Superplastifikátor pomohol eliminovať negatívne účinky nasiakavosti sedimentu, zlepšil spracovateľnosť betónovej zmesi [15,16], čo umožnilo lepšie obalenie častíc sedimentu cementovou pastou, a tým zároveň prispel k dosiahnutiu vyššej pevnosti betónu. Po 90 dňoch sa hodnoty pevností pri vysokých náhradách ustálili na približne rovnakej hodnote, s poklesom pevností v tlaku oproti porovnávacej vzorke približne o 35 %. Pri nízkych percentuálnych náhradách (20%) prírodného kameniva sedimentom, boli výsledné pevnosti v tlaku na úrovni porovnávajúcej vzorky, po dlhšom zretí dokonca aj vyššie, na čo mohlo mať mierne pozitívny vplyv chemické zloženie. Najmä prítomnosť jemných ílových minerálov zo skupiny hlinítokremičitanov (muskovit, ilit, kaolinit) mohla pozitívne ovplyvniť pevnosti v tlaku tým, že buď vyplnili póry v betónovej matici a znížili pórovitosť, alebo čiastočne zlepšili hydratačné reakcie a tvorbu C-S-H gélov [17,18].

Pri náhrade prírodného kameniva frakcie 4/8 mm sedimentom boli dosiahnuté najvyššie pevnosti, dokonca pri najnižšej percentuálnej náhrade (20 %) vyššie ako pevnosti referenčnej vzorky. Pri 100% nej náhrade boli pevnosti kompozitov len o cca 15% nižšie ako pevnosti referenčnej vzorky. Hrubšie frakcie použitých sedimentov, vrátane ich predĺženého hranatého tvaru a nižšej nasiakavosti, pravdepodobne poskytli lepšiu súdržnosť a vytvorili stabilnejšiu štruktúru [19].

Tabuľka 23 zobrazuje objemovú hmotnosť a nasiakavosť kompozitov s rôznymi podielmi sedimentov ako náhrady kameniva vo frakciách 0/4 mm a 4/8 mm po 28 dňoch tvrdnutia.

Tabuľka 23 Objemová hmotnosť a nasiakavosť kompozitov po 28 dňoch tvrdnutia

Kompozit			Objemová hmotnosť ρ_b (kg.m ⁻³)	Nasiakavosť (%)
SM0 – kontrolná vz.			2260	5,3
Sediment ako náhrada plniva	náhrada fr. 0/4 mm	SRM K1 (20%)	2250	6,2
		SRM K2 (40%)	2240	6,6
		SRM K3 (60%)	2220	7,1
		SRM K4 (80%)	2200	6,9
		SRM K5 (100%)	2180	7,2
	náhrada fr. 4/8 mm	SRM K6 (20%)	2270	5,6
		SRM K7 (60%)	2260	5,8
		SRM K8 (100%)	2260	6,3

Ako sa predpokladalo, pri náhrade frakcie 0/4 mm sa objemová hmotnosť znižuje so zvyšujúcim sa podielom sedimentov, pretože táto frakcia obsahuje viac pórovitých a ílovitých častíc, čo vedie k znižovaniu objemovej hmotnosti a zároveň zvyšovaniu nasiakavosti betónu. Pri náhrade frakciou 4/8 mm sa objemová hmotnosť takmer nemení a zostáva blízko referenčnej hodnoty, pretože obsahuje menej pórovitých zŕn, a preto sa aj nasiakavosť zvyšuje len minimálne. Zvyšujúci sa obsah vlhkosti ovplyvňuje aj ďalšie fyzikálne vlastnosti stavebných materiálov, ako napr. tepelnú vodivosť kompozitného materiálu na báze cementu [20,21]. Vo všeobecnosti zvýšenie vlhkosti o 1 % vedie k zvýšeniu tepelnej vodivosti cementových materiálov až o 6 % [21]. Vhodnosť použitia sedimentárneho betónu však závisí od účelu jeho použitia.

S prihliadnutím na tieto čiastkové výsledky výskumu možno konštatovať, že využitie sedimentov ako čiastočnej náhrady prírodného kameniva v kompozitoch má svoje opodstatnenie a to predovšetkým pri nižších hmotnostných náhradách na úrovni 20 %, kedy dosiahnuté pevnosti v tlaku kompozitov na báze sedimentu ako plniva sú približne len o 10 % nižšie ako pevnosť porovnávacej vzorky. Hoci sú pevnostné vlastnosti kompozitov nevyhnutné pre ich posúdenie, budúci výskum by sa mal zamerať aj na aspekty dlhodobej trvanlivosti, ako je odolnosť voči síranom, odolnosť proti mrazu a rozmrazovaniu a pod., ktoré sú ovplyvnené chemickým a mineralogickým zložením sedimentov. Následne je potrebné navrhnuť optimálnu percentuálnu náhradu nielen z technologického hľadiska, ale aj z hľadiska environmentálnej, ekonomickej a vodohospodárskej perspektívy.

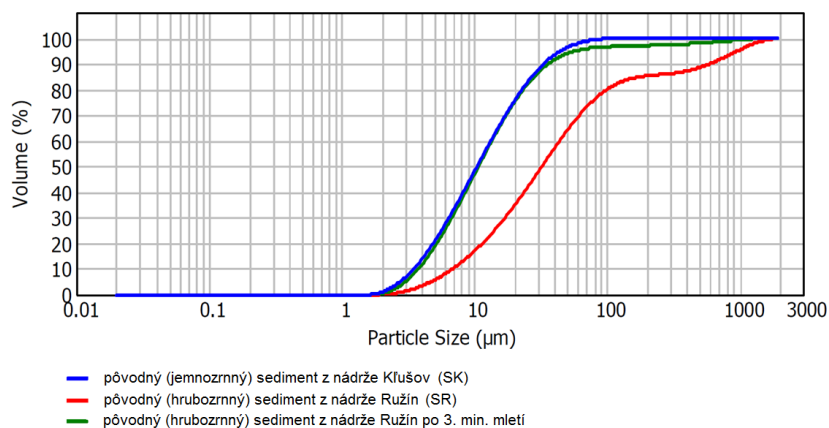
1.2.3 Sedimenty ako náhrada cementu

Možnosť využitia sedimentov ako náhrady prírodného kameniva je len jednou z aplikácií. Jemné frakcie sedimentov, najmä tie s vysokým obsahom ílovitých minerálov, predstavujú významný potenciál ako alternatívna surovina k cementu, čomu sa venuje minimálna pozornosť. V závislosti od ich zloženia, jemnosti a požadovanej miery dekarbonizácie ich možno využiť ako inertné minerálne mikroplnivo alebo ako aktívny SCM materiál (doplňkový cementový materiál). Ak sa využijú ako minerálne mikroplnivo, možno nimi nahradiť cca 5–10 % cementu, čím sa zvýši kompaktnosť cementovej matrice a zníženie potreby cementu bez zásadného poklesu pevnosti. Niektoré sedimenty (najmä ílovité) možno chemicky aktivovať mechano-chemickým mletím, termickou kalcináciou alebo alkalickou aktiváciou. Takto upravené sedimenty môžu fungovať ako SCM (Supplementary Cementitious Materials) podobne ako metakaolín alebo popolček.

Na posúdenie potenciálu dnových sedimentov ako inovatívneho SCM materiálu pre čiastočnú substitúciu spojiva v stavebných zmesiach boli použité dnové sedimenty z malej vodnej nádrže Kľušov a vodnej nádrže Ružín (Košice-okolie). Voľba 20 a 40%-nej náhrady spojiva vyplynula z literárnych poznatkov. Pontikes a Snellings [22] uvádzajú, že materiály s nízkym obsahom CaO, použité ako náhrada spojiva, môžu byť primiešané do cementov len do 30 až 40% ich celkovej hmotnosti bez toho, aby došlo k významným poklesom pevnosti kompozitov. Náhrada spojiva druhotnými surovinami predstavuje najúčinnější spôsob zníženia vplyvu na životné prostredie a emisií CO₂ z výroby cementu a betónu. Vyššie percento náhrady tiež rieši problém s nakladaním so sedimentami, čo prispieva k zníženiu množstva odpadu ukladaného na skládky.

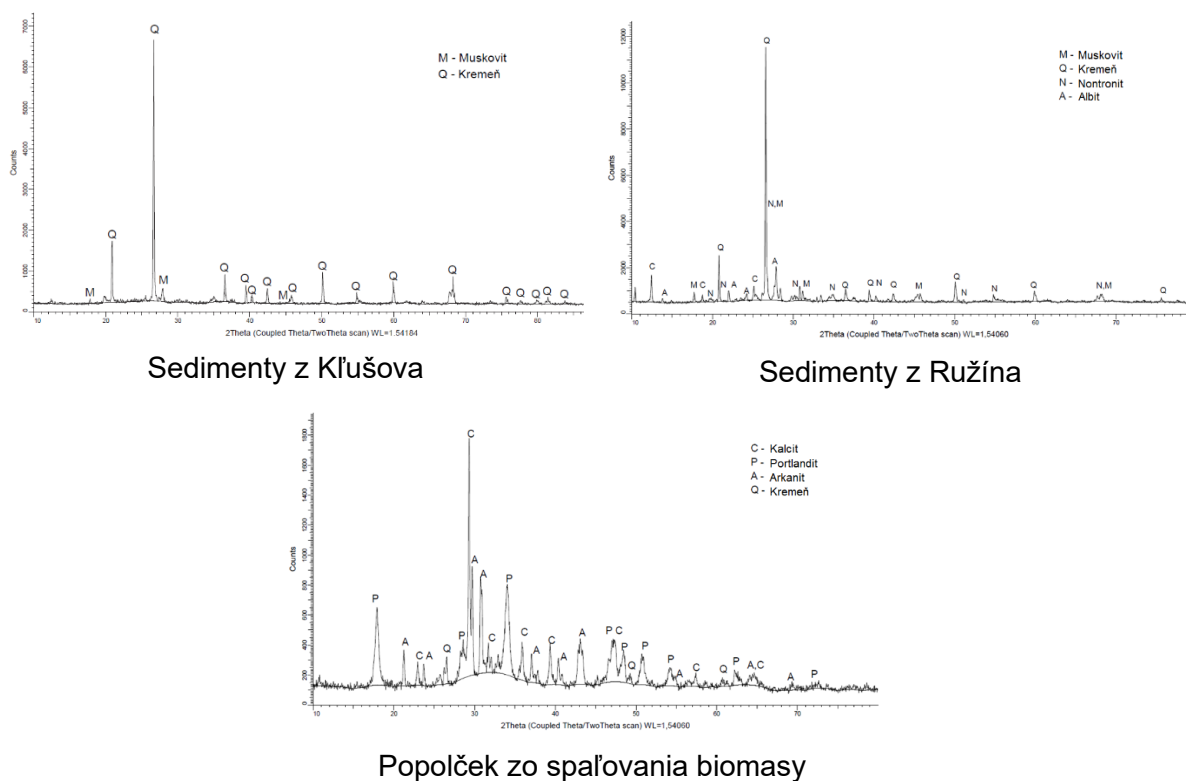
Za účelom posúdenia vhodnosti použitia dnových sedimentov z vodných nádrží ako druhotnej suroviny pri výrobe betónu boli sedimenty podrobené analýze základných fyzikálno-chemických parametrov (zrnitostné, mineralogické a chemické zloženie). Pri experimentoch bol analyzovaný aj popolček zo spaľovania biomasy z miestneho zdroja, ktorý bol použitý pri príprave kompozitov s cieľom zvýšenia obsahu CaO v zmesi.

Výsledky analýzy základných fyzikálno-chemických parametrov študovaných sedimentov sú uvedené na obrázku 6.11 a 6.12 a v Tabuľke 24. Zrnitostná analýza sedimentov naznačuje, že sedimenty odobraté z Kľušova obsahujú viac ako 95% častíc s veľkosťou pod 50 µm, u sedimentov z Ružína bol zaznamenaný podiel tejto frakcie len na úrovni 56%. Jemnozrnná textúra sedimentov podobná zrnitosti cementu bola dosiahnutá ich mletím po dobu 3 minút, pričom sa týmto podiel častíc menších ako 50 µm zvýšil na 94%, ako je možné vidieť na obrázku 10.



Obrázok 10 Zrnitostné zloženie pôvodných (odobratých) a mletých sedimentov

Merania RTG boli realizované pre pôvodné sedimenty vyťažené z oboch nádrží a pre popolček (Obrázok 11). Difrakčný záznam z RTG analýzy sedimentov indikuje ako dominantné a jednoznačne viditeľné píky kremeňa v oboch vzorkách sedimentov, doplnené o píky muskovitu, nontronitu, prípadne albitu u sedimentov z Ružína, čo potvrdzuje prítomnosť kremičitanov. Mineralogické zloženie popolčeka zo spaľovania biomasy ukazuje, že popolček obsahuje uhličitaný (kalcit), hydroxidy (portlandit) a sírany (arkanit).



Obrázok 11 Difrakčné záznamy z RTG analýzy sedimentov a popolčeka

Údaje o chemickom zložení vyťažených sedimentov a popolčeka, porovnané s chemickým zložením portlandského cementu, vyjadrené vo forme hlavných oxidov v percentách, sú uvedené v Tabuľke 24. Výsledky XRF analýzy ukazujú, že hlavnými zložkami sedimentov sú SiO_2 a Al_2O_3 . Tiež je zaznamenaná vo významnejšej miere aj prítomnosť Fe_2O_3 . Obsah SiO_2 v sedimentoch súvisí s prítomnosťou kremeňa a kremičitanov, oxidy Al a Fe sú spojené so štruktúrou muskovitov a nontronitov nachádzajúcich sa v sedimentoch, čo je potvrdené aj RTG

meraniami. V popolčeku je hlavnou zložkou CaO a v portlandskom cemente kremičitany vápnika. Prítomnosť oxidov SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃ je nevyhnutná pri výrobe portlandského cementu z dôvodu vytvárania vo vode nerozpustných pevných štruktúr. Silikátový modul, ako parameter charakterizujúci zastúpenie týchto oxidov v slinku štandardne pohybujúci sa v rozmedzí 2-3, predstavoval pre sedimenty z Kľušova hodnotu 2,9 a pre sedimenty z Ružína 2,5.

Tabuľka 24 Chemické zloženie východiskových materiálov

Materiál / chemická vlastnosť	Obsah (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	LOI
Sediment Kľušov	68,56	18,1	5,15	1,1	2,4	2,95	0,11	0,034	5,1
Sediment Ružín	63,09	16,76	7,95	2,59	5,49	2,37	0,06	0,016	5,8
Popolček z biomasy	4,71	1,22	0,86	43,04	5,58	11,49	6,58	0,92	1,55
Portlandský cement	19,5	4,7	3,2	64,2	1,3	0,78	3,2	0,047	0,9

Na základe výsledkov fyzikálno-chemických analýz boli jemnozrnné dnové sedimenty z vodných nádrží Kľušov a Ružín (frakcia < 0,063 mm) použité ako čiastočná náhrada cementu nasledovne.

Jemnozrnné sedimenty odobraté z vodnej nádrže Kľušov v oblasti hrádze boli bez akýchkoľvek úprav použité ako 20 a 40%-ná náhrada cementu pri výrobe betónu.

Sedimenty z vodnej nádrže Ružín (frakcia < 0,063 mm) boli modifikované pomocou mechanickej, mechano-chemickej a termickej aktivácie a použité ako 40%-ná náhrada cementu. Mechanická aktivácia sedimentu jeho mletím za sucha bola realizovaná v laboratórnom vibračnom mlyne (typ VM4) po dobu 3 minút vzhľadom na hrubozrnnú textúru pôvodných (odobratých) sedimentov z Ružína. Cieľom ďalších experimentov bolo optimalizovať zloženie pripravenej zmesi za účelom zvýšenia pevnostných charakteristík pripravených kompozitov na báze sedimentu ako spojiva. Preto okrem mletia bol sediment z Ružína aktivovaný ďalšími spôsobmi. Z dôvodu nízkeho obsahu CaO vo vzorke sedimentu bol do procesu suchého mletia pridaný popolček (FA) z miestnej spaľovne na biomasu v pomere 1:1 (sediment:popolček). Množstvo pridaného popolčeka bolo zvolené tak, aby chemické zloženie zmesi sedimentu a popolčeka ako náhrady cementu bolo vyhovujúce, tzn. aby bol dodržaný silikátový, aluminátový a hydraulický modul, ktorý charakterizuje zastúpenie oxidov SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ a CaO v slinku. Mechano-chemická aktivácia sedimentu spočívala v pridaní NaOH do zmesi sedimentu, resp. sedimentu a popolčeka ako chemického aktivátora puzolánových vlastností. Aktivátor NaOH bol zvolený na základe literárnych poznatkov napr. [23,24]. Viaceré vedecké štúdie [25-27] uvádzajú, že prídavok alkalického aktivátora NaOH do geopolymérnej matrice zvyšuje pevnosť v tlaku zatvrdnutého geopolymérneho betónu a v prípade prekursorov s nízkym obsahom vápnika a vysokými obsahmi SiO₂ a Al₂O₃ (ako je študovaný sediment) je vhodné východiskový materiál upraviť alkalickou aktiváciou. Tuhý hydroxid sodný bol pridaný do procesu suchého mletia v pomere hmotnosti 2,6:1 (sediment:NaOH), resp. v pomere hmotnosti približne 1:1:0,8 (sediment:popolček:NaOH) tak, aby bol po pridaní zámesovej vody do zmesi získaný 5M roztok NaOH. Aktivátor NaOH bol použitý aj v podobe vopred pripraveného 5M roztoku a to tak, že ním bol zaliaty sediment pomletý samostatne, resp. pomletý s popolčekom. Termická aktivácia sedimentu pri teplote 700°C po dobu 2 hodín bola realizovaná za účelom odstránenia organickej hmoty zo sedimentu a eventuálne s cieľom modifikácie kremeňa z kryštalickej štruktúry na amorfnú (neštruktúrovanú), čím sa stáva reaktívnym [28,29].

Na prípravu kompozitov bol v experimentoch použitý ako východiskový materiál portlandský cement (CEM I 42,5) a prírodné kamenivo frakcií 0/4 mm a 4/8 mm (Geča). Pri návrhu receptúry boli zohľadnené kritéria normy STN EN 206 (2017) a receptúra bola totožná ako v prípade využitia sedimentu ako náhrady kameniva (uvedená v kapitole 1.2). Zloženie testovaných zmesí pripravených na báze sedimentu ako spojiva v betóne je uvedené v Tabuľke 6.25. Pripravená bola aj porovnávajúca betónová vzorka zložená z cementu (CEM I 42,5), prírodného kameniva frakcií 0/4 mm a 4/8 mm a vody, označená ako SM0. Pri hodnote vodného súčiniteľa 0,55 a bez prídavku plastifikačnej prísady boli pripravené dve nezávislé série kompozitov. Z každej zmesi boli pripravené trámčeky s rozmermi 40 mm x 40 mm x 160 mm, ktoré boli po 48 hodinách odformované a uložené do vodného kúpeľa pri teplote vody 20°C. Po uplynutí 28 a 365 dní boli vzorky podrobené skúške pevnosti v tlaku a skúške pevnosti ťahu pri ohybe podľa STN EN 12390-3 (2010) a STN EN 12390-5 (2011). Skúšky pevností boli realizované na prístroji ELE ADR 2000 (ELE International Ltd, Veľká Británia).

Tabuľka 25 Zloženie testovaných zmesí pripravených na báze sedimentu ako spojiva v betóne

Kompozit*		Spojivo (%)		Prírodné kamenivo fr. 0/4 mm (%)	Prírodné kamenivo fr. 4/8 mm (%)	Voda
		CEM I	jemnozrnný sediment	kamenivo	prírodné kamenivo	(%)
SM0 – kontrolná vz.		100	-	100	100	100
Sediment ako náhrada spojiva	SKM1	60	40 (<0,063 mm)	100	100	100
	SKM4	80	20 (<0,063 mm)	100	100	100
	SRM1	60	40 (mletý 3 min.)	100	100	100
	SRM2	60	40 (mletý s NaOH)	100	100	100
	SRM3	60	40 (mletý s FA)	100	100	100
	SRM4	60	40 (mletý s FA a NaOH)	100	100	100
	SRM5	60	40 (mletý a zaliaty 5M NaOH)	100	100	100
	SRM6	60	40 (mletý s FA a zaliaty 5M NaOH)	100	100	100
	SRM7	60	40 (<0,063mm)	100	100	100
	SRM8	60	40 (<0,063 mm vypálený pri 700°C)	100	100	100

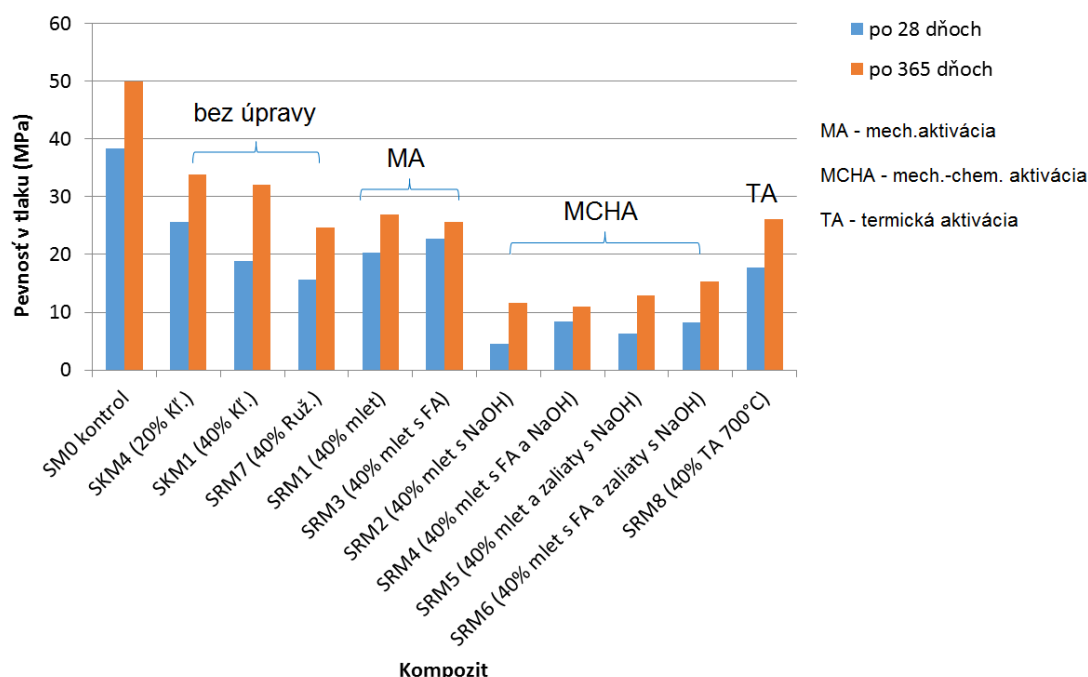
Pozn.: * SKM/SRM – kompozity pripravené zo sedimentov z nádrže Kľušov/Ružín; FA – popolček zo spaľovania biomasy

Výsledky pevnostných charakteristík pripravených kompozitov po 28 a 365 dňoch tuhnutia a tvrdnutia sú uvedené na obrázku 6.12.

Kompozity, pripravené so 40%-nou náhradou cementu sedimentom z Kľušova (SKM1) a Ružína (SRM1) s podobným zrnitostným, chemickým a mineralogickým zložením, vykazujú analogický vývoj pevností v tlaku. Pevnosť v tlaku sa pri týchto kompozitoch priemerne pohybovala na úrovni okolo 19-20 MPa po 28 dňoch tvrdnutia; po 365 dňoch bola pevnosť vzorky SRM1 nižšia o cca 16% oproti vzorke SKM1. Nábeh pevností bol pri kompozite SRM1 pomalší. Po 28 dňoch tvrdnutia dosiahli tieto vzorky (SKM1 a SRM1) polovičné hodnoty

pevností kontrolnej vzorky. Mechanická aktivácia sedimentu mletím (kompozit SRM 1) prispela k zvýšeniu pevností v tlaku po 28 dňoch v porovnaní s kompozitom SRM 7 o 30%. Zjemnenie produktu mletia sedimentu sa po 365 dňoch tvrdnutia kompozitov významnejšie neprejavilo na pevnosti v tlaku kompozitov. Kompozity s mletým sedimentom mali pevnosti o 10% vyššie ako kompozity na báze sedimentov bez úpravy (len presitovaná frakcia pod 0,063 mm).

Použitie 20%-nej náhrady cementu sedimentom prispelo k zvýšeniu pevností kompozitov (SKM4) po 28 dňoch tvrdnutia o viac ako 35% oproti použitiu vyššej (40%) hmotnostnej náhrady cementu sedimentom (SKM1). Po 365 dňoch bola pevnosť v tlaku kompozitov s menšou hmotnostnou náhradou vyššia iba o 6% a ustálila sa na hodnote cca 34 MPa. Experimenty dokázali priaznivý vplyv mletia sedimentu na vývoj pevností, čo súvisí s vytvorením hutnejšej štruktúry betónu.



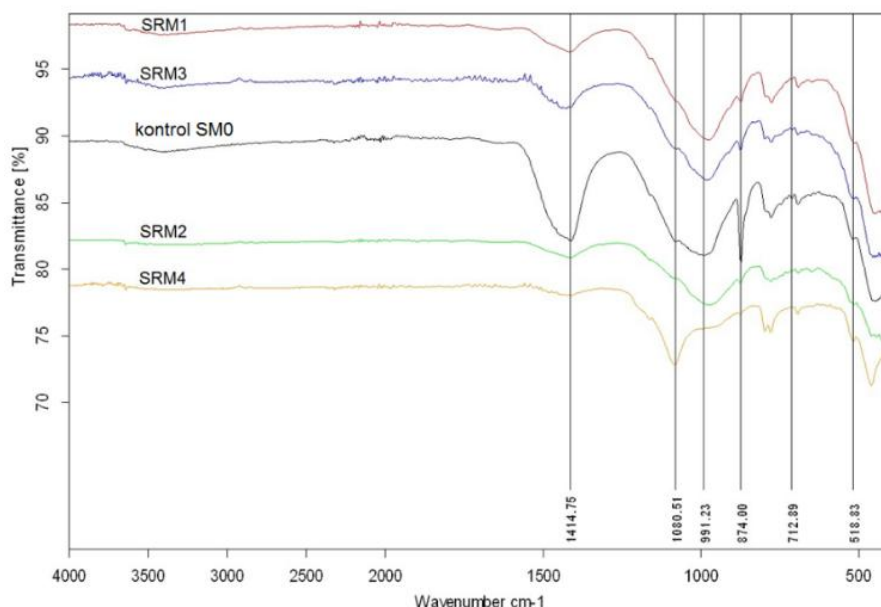
Obrázok 12 Vývoj pevností v tlaku kompozitov na báze sedimentu ako spojiva

Mechanická aktivácia sedimentu mletím s popolčekom, za účelom prídavku CaO do zmesi, zvyšuje pevností v tlaku kompozitov po 28 dňoch tvrdnutia o viac ako 10% s tým, že dosahované hodnoty pevností sú na úrovni 23 MPa. Prídavok popolčeka však nemal vplyv na vývoj pevností z dlhodobého hľadiska, keďže pevnosť kompozitov po 365 dňoch tvrdnutia bola s prídavkom (SRM3), resp. bez prídavku popolčeka (SRM1) na približne rovnakej úrovni (cca 26 MPa). Očakávané zvýšenie pevnosti v tlaku v dôsledku pridania popolčeka do zmesi nebolo preukázané. Dôvodom môže byť nízky obsah zložiek SiO₂ a Al₂O₃ v popolčeku, ktoré sú nevyhnutné pre tvorbu C-S-H / C-A-H gélov dôležitých pri vývoji pevností.

Ďalšia skupina kompozitov bola pripravená zo sedimentov z Ružína, ktoré boli aktivované mechano-chemicky mletím za prítomnosti aktivátora NaOH v tuhej forme, resp. vo forme 5M roztoku. Tieto kompozity dosiahli najnižšie hodnoty pevností v tlaku spomedzi všetkých študovaných zmesí (viď Obrázok 6.9). Vyššie počiatkové pevnosti v tlaku dosiahli zmesi s prídavkom popolčeka (SRM4 a SRM6). Po 365 dňoch boli vo vzorkách, s použitím tuhého NaOH pridaného do procesu mletia, dosiahnuté hodnoty pevností v tlaku na úrovni 11 MPa, pričom pri vzorkách SRM5 a SRM6, kde boli východiskové materiály zaliaty 5M roztokom NaOH, boli zaznamenané vyššie hodnoty pevností v tlaku (na úrovni 13-15 MPa). Z toho vyplýva, že aj spôsob aplikácie aktivátora môže mať vplyv na vývoj pevností v tlaku. Avšak výrazne nižšie hodnoty pevností v tlaku zmesí SRM2, SRM4-SRM6 v porovnaní s ostatnými indikujú, že stupeň konverzie na C-S-H gély v kompozite je pravdepodobne príliš nízky kvôli

vysokej koncentrácii hydroxylových iónov v systéme, ktorá spôsobuje posun rovnováhy v procese hydratácie C3S a C2S [17,18]. Uvádza sa [30], že C-S-H gély sa môžu vytvoriť z vyzrážaného $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pri pH okolo 12,4. Nameraná hodnota pH čerstvej zmesi bola 13,8 a v dôsledku toho proces hydratácie zmesi prebiehal len čiastočne [31], nakoľko s narastajúcou alkalitou hydratačného roztoku sa znižuje stupeň hydratácie bezvodých kremičitanov a tým sa tiež znižuje pevnosť v tlaku [18]. Porovnanie vývoja pevnosti v tlaku kompozitov s a bez prídavku NaOH (SRM2, SRM5 vs SRM1 a SRM4, SRM6 vs SRM3) potvrdzuje túto skutočnosť.

Vývoj štruktúry kompozitov počas tvrdnutia je možné preukázať aj pomocou infračervených spektier (IČ) vzoriek z kompozitov SRM1-SRM4 v porovnaní s kontrolnou vzorkou betónu (Obrázok 13). Na IČ spektrách kompozitov SRM1-SRM4 a kontrolnej vzorky SM0 sú pozorované absorpčné pásy uhličitanu vápenatého, prislúchajúce vibráciám uhličitanov (1415 cm^{-1} , 874 cm^{-1} a 712 cm^{-1}). Prítomnosť CaCO_3 vo vzorkách je pripisovaná atmosférickému CO_2 absorbovanému počas hydratácie. Avšak píky pozorované na IČ spektrách kompozitov SRM2 a SRM4 (pripravených s NaOH) v oblasti okolo 1415 cm^{-1} a 712 cm^{-1} sú málo intenzívne a naznačujú nižší stupeň karbonatácie, čo spôsobuje aj nižšiu pevnosť v tlaku týchto zmesí. Taktiež boli pozorované pásy v oblasti 1080 , 991 and 518 cm^{-1} , ktoré zodpovedajú vibráciám Si-O väzieb prítomných v kremičitanoch.

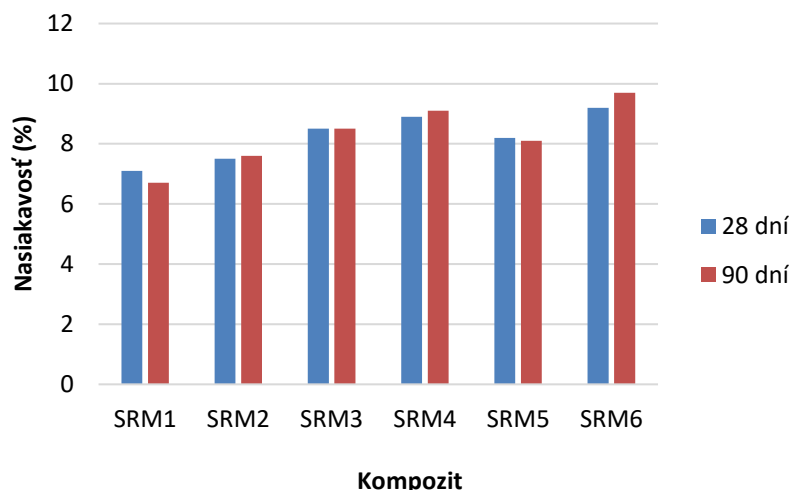


Obrázok 13 IČ spektrá kontrolnej vzorky betónu a kompozitov pripravených na báze sedimentu ako spojiva

Pevností v tlaku kompozitov (SRM8) pripravených s prídavkom termicky aktivovaného sedimentu pri teplote 700°C sú po 28 dňoch tvrdnutia na úrovni pevností kompozitov pripravených s jemnozrnným neupraveným sedimentom, resp. sedimentom mechanicky upraveným mletím. Odstránenie organickej hmoty v sedimente z Ružína (približne 5–6%) neprispelo k výrazne vyšším hodnotám pevností v tlaku (oproti vzorke SRM7). Taktiež predpokladaný vplyv modifikácie kremeňa v teplotnej oblasti do 700°C nemal vplyv na zvýšenie pevností pripravených kompozitov.

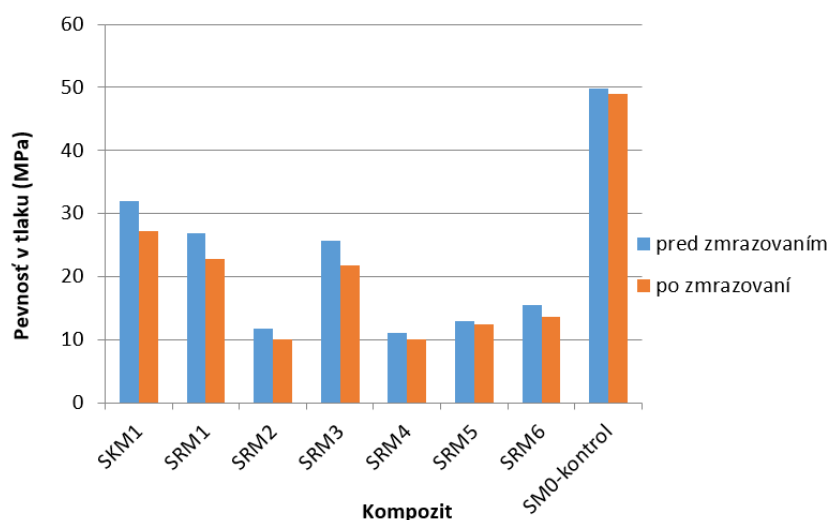
Na vybraných kompozitoch boli sledované aj ďalšie vlastnosti ako nasiakavosť (Obrázok 14) a mrazuvzdornosť (Obrázok 15 a 16). Prídaním popolčeka do zmesi sa nasiakavosť zatvrdnutých kompozitov zvyšuje. Príkladom sú vzorky SRM1 a SRM3, kde prídavkom popolčeka do zmesi sa zvýšila nasiakavosť zatvrdnutej vzorky o viac ako 20%. Výsledky nasiakavosti pripravených kompozitov na báze sedimentu s prídavkom popolčeka a NaOH

ako aktivátora zároveň ukázali, že aj prítomnosť NaOH v zmesi má vplyv na výslednú nasiakavosť a tiež forma jeho aplikácie. Zaliatie zmesi 5M roztokom NaOH mierne zvyšuje nasiakavosť zatvrdnutých kompozitov oproti zmesi pripravenej s použitím granulovaného NaOH pridaného do procesu mletia.

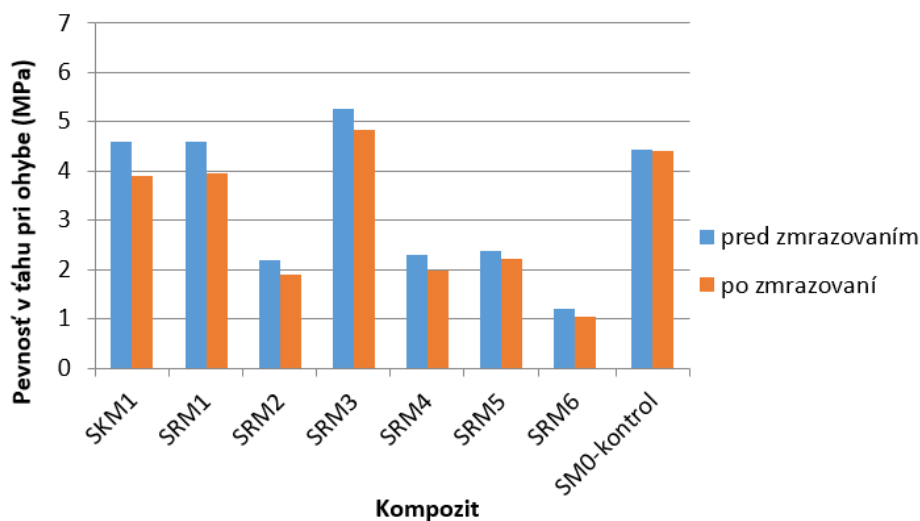


Obrázok 14 Nasiakavosť vybraných zatvrdnutých kompozitov

Sledovanie odolnosti zatvrdnutých kompozitov voči mrazu bolo realizované použitím mrazuvzdornej stanice pre skúšku odolnosti ich povrchu proti pôsobeniu vody CDF/CIF (Schleibinger Geräte, Nemecko). Zatvrdnuté kompozity boli za sucha vystavené 50 cyklom zmrazovania pri teplote do -20°C a následného rozmrazovania pri teplote $+20^{\circ}\text{C}$, pričom jeden cyklus trval 12 hodín. Vývoj pevností v tlaku a v ťahu pri ohybe pripravených kompozitov pri pôsobení mrazu po 50 cykloch zmrazovania a rozmrazovania sú uvedené na obrázku 15 a obrázku 16. Koeficient mrazuvzdornosti, určený ako podiel pevnosti v ťahu pri ohybe po prevedení cyklického klimatického zaťaženia kompozitu ku pevnosti pred zmrazovaním, sa pohybuje u všetkých vzoriek v rozmedzí od 0,85 do 0,93, čo naznačuje, že pevnosť po zmrazovaní sa maximálne znížila o 15%. Zaznamenaná strata hmotnosti vybraných kompozitov po 50 cykloch zmrazovania a rozmrazovania je na úrovni od 1,33 do 2,5%. Zo zhodnotenia vyplýva, že kompozity s takto navrhnutou receptúrou sú odolné voči vyššie uvedenému pôsobeniu cyklického klimatického zaťaženia.



Obrázok 15 Pevnosť v tlaku vytvrdnutých kompozitov pred a po pôsobení mrazu



Obrázok 16 Pevnosť v ťahu pri ohybe vytvrdnutých kompozitov pred a po pôsobení mrazu

Výsledky testovania pevnostných parametrov kompozitov na báze parciálnej náhrady spojiva aktivovanými druhotnými surovinami ukázali, že aj keď použitie neupraveného jemnozrnného sedimentu ako čiastočnej náhrady spojiva v betóne spôsobuje zníženie pevností v tlaku takto pripravených zmesí, z environmentálneho a ekonomického hľadiska je vhodné využitie vyšších hmotnostných náhrad cementu sedimentom z vodných nádrží pri výrobe betónu. Úprava sedimentu krátkodobým (3-minútovým) mletím, resp. mletím s popolčekom za účelom prídavku CaO do zmesi, sa z dlhodobého vývoja pevností nejaví sa ako efektívna metóda použitia úpravy sedimentu za účelom zvýšenia pevností v tlaku kompozitov na báze sedimentu ako spojiva. Táto metóda sa javí ako optimálna v prípade požiadavky na využitie vznikajúcich veľkých objemov sedimentu a popolčeka súčasne. Pre zlepšenie pevnostných charakteristík kompozitov je potenciálom v tomto smere predĺženie času mletia sedimentov. Pevnosti kompozitov pripravených prídavkom termicky aktivovaného sedimentu sú na úrovni pevností kompozitov pripravených s jemnozrnným neupraveným sedimentom prípadne sedimentom mletým, resp. mletým s popolčekom. Prídanie NaOH ako aktivátora puzolánových vlastností do procesu mletia sedimentu má negatívny vplyv na vývoj pevností v tlaku kompozitov na báze sedimentu ako spojiva v betóne.

1.2.4 Analýza environmentálnych dopadov kompozitov

Cieľom tejto štúdie je stanoviť emisie skleníkových plynov vyjadrených ako GWP-GHG pre kompozity podľa EN 15804 v systémovej hranici „Od kolísky pro bránu“, t.j. A1-A3 a zahŕňa dopady výroby surovín, ich prepravu do výrobného závodu a výrobný proces. Deklarovanou jednotkou štúdie je 1 m³ zmesi. Hmotnosť produktu na deklarovajúcu jednotku je rôzna. Na analýzu bol použitý software One Click LCA, verzia 26.06.1 a databáza 7.6. Zdrojom LCA údajov je Ecoinvent 3.11 (2024), BAFU (2025) a špecifické údaje o produkte. Analýza bola vykonaná v súlade s normami EN 15804:2011+A2:2019/AC:2021, ISO 14040:2006 a ISO 14044:2006. Tabuľka 26 uvádza zahrnuté fázy v LCA a tabuľka 6.27 informácie o uvažovanej elektrine.

Tabuľka 26 Zahrnuté fázy a informačné moduly životného cyklu

Fáza produktu	A1	Zásobovanie surovinami
	A2	Doprava
	A3	Výroba

Tabuľka 27 Informácie o energii

Parameter scenára	Hodnota	Zdroj údajov
Zdroj a kvalita údajov o elektrine	Elektrina, nízke napätie, v sieti, 2025	BAFU
Elektrina kg CO _{2e} / kWh	0,26 kg CO _{2e} / kWh	

Tabuľky 28 a 29 a z prezentujú výsledky pre hodnotené indikátory potenciálu globálneho otepľovania pre kompozity s náhradou sedimentu ako cementu a ako kameniva.

Tabuľka 28 GWP pre kompozity s náhradou sedimentu ako cementu fázu produktu

Zmes	Modul	GWP-fosílny [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP – biogénny [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-LULUC [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-celkový [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-GHG [kg CO _{2eq} /m ³]
SM0	A1	251,48	0,00	0,00818	251,49	251,49
	A2	5,89	0,00	0,00228	5,89	5,89
	A3	0,735	0,00	0,000047	0,736	0,736
	A1-A3	258,105	0,00	0,010934	258,116	258,116
SKM4	A1	202,46	0,00	0,0074	202,46	202,46
	A2	6,37	0,00	0,00256	6,38	6,38
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	209,565	0,00	0,010434	209,576	209,576
SKM1	A1	153,44	0,00	0,00662	153,45	153,45
	A2	6,86	0,00	0,00284	6,86	6,86
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	161,035	0,00	0,009934	161,046	161,046
SRM7	A1	153,43	0,00	0,00662	153,44	153,44
	A2	5,83	0,00	0,00236	5,83	5,83
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	159,995	0,00	0,009454	160,006	160,006

Z výsledkov je zrejmé, že referenčná zmes SM0 dosahuje najvyššiu hodnotu GWP-GHG (258,12 kg CO_{2eq}/m³). Nahradením časti cementu alternatívnymi materiálmi dochádza k výraznému poklesu emisií. Najnižšie emisie vykazuje SRM7 (160,01 kg CO_{2eq}/m³), ktorá dosahuje približne o 38 % nižšie emisie ako referenčná zmes SM0. Najväčší podiel emisií

prislúcha modulu A1 (zásobovanie surovinami), ktorý predstavuje 95,3% (SKM1) - 97,4% (SM0). Rozdiely medzi zmesami sú preto takmer výlučne spôsobené zmenami množstva surovín, predovšetkým znížením obsahu cementu. Emisie z dopravy (modul A2) sa pohybujú v rozmedzí 5,83 - 6,86 kg CO_{2eq}/m³, čo predstavuje približne 2,3% - 4,3% celkových emisií. Najnižšie hodnoty dosahuje SRM7 (5,83 kg CO_{2eq}/m³), zatiaľ čo najvyššie SKM1 (6,86 kg CO_{2eq}/m³). Vplyv dopravy je však v porovnaní s výrobou surovín relatívne malý. Vo všetkých prípadoch sú emisie z výrobného procesu (modul A3) prakticky rovnaké (0,736 kg CO_{2eq}/m³) a predstavujú menej ako 0,5% celkového GWP-GHG. Ich vplyv na rozdiely medzi zmesami je zanedbateľný. GWP-biogénny je vo všetkých prípadoch nulový, čo znamená, že použité materiály neprispievajú k viazaniu ani uvoľňovaniu biogénneho uhlíka. GWP-LULUC dosahuje veľmi nízke hodnoty (0,009 - 0,011 kg CO_{2eq}/m³) a predstavuje menej než 0,01% GWP-GHG, takže jeho vplyv je prakticky zanedbateľný.

Z výsledkov vyplýva, že environmentálny profil zmesí je rozhodujúcim spôsobom ovplyvnený emisiami vznikajúcimi pri výrobe vstupných surovín (modul A1). Náhrada cementu alternatívnymi materiálmi vedie k významnému zníženiu potenciálu globálneho otepľovania. Najlepšie výsledky dosahuje zmes SRM7, ktorej celkový GWP je 160,01 kg CO_{2eq}/m³, nasledovaná zmesou SKM1 (161,05 kg CO_{2eq}/m³). Obe zmesi znižujú uhlíkovú stopu približne o 38 % v porovnaní s referenčnou zmesou SM0. Zmes SKM4 predstavuje stredný variant so znížením emisií o 18,8%. Tieto výsledky potvrdzujú, že optimalizácia zloženia spojiva je najúčinnnejším opatrením na zníženie uhlíkovej stopy skúmaných materiálov.

Referenčná zmes SM0 dosahuje GWP-GHG 258,12 kg CO_{2eq}/m³. Zo skúmaných variantov je jej environmentálny profil najpriaznivejší. Najvyššie emisie vykazuje zmes SRM K5 (264,83 kg CO_{2eq}/m³), ktorá prevyšuje referenčnú zmes približne o 2,6%. Ostatné zmesi sa od referenčnej líšia len minimálne, pričom nárast emisií nepresahuje 1%. Modul A1 (zásobovanie surovinami) predstavuje dominantný zdroj emisií, t.j. tvorí 96,1% - 97,4%. Vyššia hodnota pri zmesi SRM K5 naznačuje mierne vyššiu uhlíkovú náročnosť použitých vstupných materiálov. Modul A2 (doprava) poukazuje na najväčšie rozdiely medzi zmesami. Emisie z dopravy sa pohybujú od 5,89 do 9,65 kg CO_{2eq}/m³, čo predstavuje približne 2% - 4% celkového GWP. Vyššie hodnoty pri zmesiach SRM K5 a SRM K8 súvisia s dlhšími dopravnými vzdialenosťami alebo vyššou hmotnosťou prepravovaných vstupných materiálov. Emisie výrobného procesu (modul A3) sú vo všetkých prípadoch prakticky identické (0,736 kg CO_{2eq}/m³) a ich podiel na celkovom GWP je zanedbateľný (približne 0,3%). Vo všetkých zmesiach je GWP-biogénny nulový, čo znamená, že použité materiály neprispievajú k viazaniu ani uvoľňovaniu biogénneho uhlíka. Hodnoty GWP-LULUC sú veľmi nízke (0,011–0,015 kg CO_{2eq}/m³) a ich podiel na GWP-GHG je zanedbateľný.

Tabuľka 29 GWP pre kompozity s náhradou sedimentu ako kameniva pre fázu produktu

Zmes	Modul	GWP-fosílny [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP – biogénny [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-LULUC [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-celkový [kg CO _{2eq} /m ³]	GWP-GHG [kg CO _{2eq} /m ³]
SM0	A1	251,48	0,00	0,00818	251,49	251,49
	A2	5,89	0,00	0,00228	5,89	5,89
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	258,105	0,00	0,010934	258,116	258,116
SRM K1	A1	251,48	0,00	0,00818	251,49	251,49
	A2	6,64	0,00	0,00264	6,64	6,64
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736

	A1-A3	258,855	0,00	0,011294	258,866	258,866
SRM K5	A1	254,43	0,00	0,0102	254,44	254,44
	A2	9,64	0,00	0,00404	9,65	9,65
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	264,805	0,00	0,014714	264,826	264,826
SRM K6	A1	251,48	0,00	0,00818	251,49	251,49
	A2	6,34	0,00	0,00254	6,34	6,34
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	258,555	0,00	0,011194	258,566	258,566
SRM K8	A1	251,48	0,00	0,00818	251,49	251,49
	A2	8,12	0,00	0,00354	8,12	8,12
	A3	0,735	0,00	0,000474	0,736	0,736
	A1-A3	260,335	0,00	0,012194	260,346	260,346

Výsledky ukazujú, že všetky hodnotené zmesi dosahujú veľmi podobné hodnoty potenciálu globálneho otepľovania. Rozdiely medzi nimi sú spôsobené najmä emisiami z dopravy (modul A2), zatiaľ čo proces výroby (A3) zostáva nezmenený a zásobovanie surovinami (A1) je vo väčšine prípadov identická. Referenčná zmes SM0 vykazuje najnižší celkový GWP (258,12 kg CO_{2eq}/m³), zatiaľ čo zmes SRM K5 dosahuje najvyššie emisie (264,83 kg CO_{2eq}/m³) v dôsledku kombinácie surovín a najvyššej dopravnej záťaže. Zmesi SRM K1, SRM K6 a SRM K8 sa od referenčnej zmesi odlišujú len minimálne (o 0,2% - 0,9%), čo naznačuje, že z pohľadu potenciálu globálneho otepľovania majú porovnateľný environmentálny profil.

Pri porovnaní oboch súborov výsledkov je zrejmé, že spôsob využitia sedimentu má zásadný vplyv na environmentálnu bilanciu skúmaných zmesí. V prvej sérii bol sediment použitý ako čiastočná náhrada cementu, zatiaľ čo v druhej sérii slúžil ako náhrada prírodného kameniva. Pri použití sedimentu ako náhrady cementu došlo k výraznému poklesu potenciálu globálneho otepľovania, pričom celkové emisie sa znížili o 19 až 38 % v porovnaní s referenčnou zmesou SM0. Najlepšie výsledky dosiahli zmesi SRM7 a SKM1, ktorých GWP bolo približne 160 kg CO_{2eq}/m³, teda takmer o dve pätiny nižšie ako pri referenčnej zmesi. Tento výsledok je zřejmý, pretože výroba cementu patrí medzi najvýznamnejšie zdroje emisií CO₂ v stavebníctve. Cement významne prispieva k emisiám jednak procesnou dekarbonatáciou vápenca, jednak vysokou energetickou náročnosťou výpalu slinku. Každé zníženie jeho množstva sa preto priamo prejaví výrazným poklesom emisií v module A1, ktorý predstavuje viac ako 95% celkového GWP. Naopak, pri použití sedimentu ako náhrady prírodného kameniva sa celkové emisie prakticky nezmenili. Všetky hodnotené zmesi dosahovali hodnoty veľmi blízke referenčnej zmesi, pričom rozdiely sa pohybovali od +0,2 % do +2,6 %. V prípade zmesi SRM K5 boli emisie dokonca vyššie ako pri referenčnej zmesi. Dôvodom je skutočnosť, že prírodné kamenivo má veľmi nízku uhlíkovú stopu. Jeho nahradenie sedimentom preto neprináša významné úspory emisií vo fáze surovín. Naopak, sediment si často vyžaduje dodatočné technologické operácie (napr. sušenie, úpravu alebo transport), čo sa prejavilo zvýšenými emisiami najmä v module A2 (doprava), prípadne miernym nárastom emisií v module A1. Z environmentálneho hľadiska preto výsledky jednoznačne ukazujú, že využitie sedimentu ako

náhrady cementu predstavuje podstatne efektívnejšie riešenie znižovania uhlíkovej stopy betónov než jeho použitie ako náhrady kameniva.

Aj keď výsledky LCA ukázali, že využitie sedimentu ako náhrady kameniva neprináša významné zníženie potenciálu globálneho otepľovania, z hľadiska udržateľného hospodárenia so zdrojmi a princípov cirkulárnej ekonomiky predstavuje takéto riešenie významný environmentálny prínos. V posledných rokoch sa v mnohých krajinách Európy čoraz výraznejšie prejavuje nedostatok prírodného kameniva, spôsobený rastúcim dopytom stavebného sektora, vyčerpávaním dostupných ložísk, sprísňovaním povolovacích procesov na otváranie nových lomov a rastúcimi požiadavkami na ochranu životného prostredia. Ťažba kameniva je navyše spojená so záberom krajiny, narušením ekosystémov, zvýšenou prašnosťou, hlukom a významnými dopravnými nárokmi. Každá čiastočná náhrada prírodného kameniva alternatívnym materiálom preto prispieva k znižovaniu spotreby primárnych nerastných surovín a k ochrane prírodných zdrojov. Sedimenty z vodných nádrží predstavujú sekundárnu surovinu, ktorá je pri pravidelnom odbahňovaní vodných diel produkovaná. Pokiaľ nenájdu materiálové využitie, stávajú sa odpadom, ktorého skladovanie alebo zneškodnenie predstavuje ekonomickú aj environmentálnu záťaž. Ich využitie ako náhrady kameniva umožňuje transformovať odpadový materiál na hodnotnú stavebnú surovinu, čím sa predlžuje životný cyklus materiálov a znižuje potreba ich skládkovania. Takýto prístup zodpovedá princípom cirkulárnej ekonomiky, ktorej cieľom je udržiavať materiály čo najdlhšie v obeh, minimalizovať tvorbu odpadov a obmedzovať využívanie primárnych prírodných zdrojov. Materiálové zhodnotenie sedimentov podporuje uzatváranie materiálových tokov, zvyšuje efektívnosť využívania zdrojov a prispieva k napĺňaniu cieľov Európskej zelenej dohody (European Green Deal) a Akčného plánu EÚ pre obehové hospodárstvo (Circular Economy Action Plan). Z environmentálneho hľadiska preto možno konštatovať, že náhrada kameniva sedimentom neprináša významný prínos z pohľadu znižovania emisií skleníkových plynov, avšak prináša významné prínosy v kategóriách súvisiacich so zachovaním prírodných zdrojov, znižovaním spotreby primárnych surovín, obmedzením ťažby kameniva, znižovaním množstva odpadu a podporou cirkulárneho využívania materiálov. Z tohto dôvodu by sa environmentálna vhodnosť takéhoto riešenia mala posudzovať komplexne, nielen prostredníctvom ukazovateľa GWP, ale aj pomocou indikátorov spotreby zdrojov, tvorby odpadu a materiálovej efektívnosti. V kontexte tejto štúdie možno konštatovať, že využitie sedimentu ako náhrady cementu predstavuje efektívnejší nástroj na znižovanie uhlíkovej stopy betónu, zatiaľ čo využitie sedimentu ako náhrady kameniva predstavuje predovšetkým stratégiu ochrany prírodných zdrojov a implementácie princípov cirkulárnej ekonomiky, ktorá môže mať významný dlhodobý prínos pre udržateľnosť stavebníctva.

Záver

Aj keď sú dnové sedimenty v súčasnosti vnímané najmä ako problém – zanášajú vodné nádrže, znižujú retenčnú kapacitu a predstavujú legislatívnu aj logistickú záťaž, pri správnom prístupe však môžu byť transformované na cenný alternatívny produkt so zásadným environmentálnym prínosom. Ich využitie ponúka dve strategické línie dekarbonizácie betónovej výroby a to ako náhrady prírodného kameniva (čím sa znižuje tlak na ťažbu piesku, sa pomáha riešiť globálna piesková kríza, znižujú sa emisie spojené s ťažbou a transportom kameniva, podporuje sa cirkulárna ekonomika a znižujú environmentálne náklady údržby nádrží), alebo ako náhrady cementu (prináša najväčšiu redukciu uhlíkovej stopy betónu, umožňuje výrobu nízkouhlíkových materiálov, otvára sa priestor pre vývoj SCM na báze aktivovaných sedimentov).

Tieto prístupy predstavujú synergickú, vedecky opodstatnenú cestu k udržateľnému a klimaticky zodpovednému stavebníctvu. Transformácia sedimentov z odpadu na zdroj je jeden z kľúčových krokov pri modernizácii vodného hospodárstva a súčasne pri napĺňaní klimatických cieľov EÚ v oblasti dekarbonizácie stavebných materiálov.

Literatúra

1. UNEP, 2019. Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources, GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
2. UNEP, 2022. Sand and Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
3. Zhong, X., Deetman, S., Tukker, A., and Behrens, P., 2022. Increasing material efficiencies of buildings to address the global sand crisis. *Nat. Sustain.* 5, 389–392. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00857-0>.
4. Cada, K., 2020. Every Grain of Sand: A Discursive Geography of a Policy Conflict. ECPR Joint Sessions Virtual Event. Available at: <https://ecpr.eu/Events/Event/PaperDetails/48870>.
5. Bendixen, M., Best, J., Hackney, C., Iversen, L.L., 2019. Time is running out for sand. *Nature* 571, 29–31. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02042-4>.
6. Finite sand resource needs better governance. *Nat. Geosci.* 17, 817 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01544-9>
7. Torres, A., Liu, J., Brandt, J., & Lear, K. (2017). The world is facing a global sand crisis. *The conversation*.
8. Poonia K, Kansara P, Choudhary P (2024) Environmental impacts of sand mining: A comprehensive review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 11(3).
9. Fořt J, Afolayan A, Kočí V, Scheinherrová L, Jan J, Borovec J, Černý R (2024) Potential of water sediments in construction materials: Current approaches and critical consideration of future challenges. *Heliyon*.
10. Achour R, Zentar R, Abriak N E, Rivard P, Gregoire P (2019) Durability study of concrete incorporating dredged sediments. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00244.
11. Beddaa H, Fraj A B, Ducléroi S (2021) Experimental study on river sediment incorporation in concrete as a full aggregate replacement: Technical feasibility and economic viability. *Construction and Building Materials*, 313, 125425.
12. Oh H, Lee J, Banthia N, Talukdar S (2011) An experimental study of the physicochemical properties of a cement matrix containing dredged materials. *Materials Sciences and Applications*, 2(7), 847-857.
13. Beddaa H, Ouazi I, Fraj A B, Lavergne F, Torrenti J M (2020) Reuse potential of dredged river sediments in concrete: Effect of sediment variability. *Journal of cleaner production*, 265, 121665.
14. Achour R, Zentar R, Abriak N E, Rivard P, Gregoire P (2019) Durability study of concrete incorporating dredged sediments. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00244.
15. Hayek M, Soleimani T, Salgues M, Souche J-C (2024) Utilizing Fine Marine Sediment as a Partial Substitute for Sand in Self-Compacting Concrete Specially Designed for Application in Marine Environments. *Sustainability*, 16(6):2538.
16. Garzón-Agudelo, P. A., Palacios-Alvarado, W., Medina-Delgado, B., 2021. Impact of plasticizers on the physical and structural properties of concrete used in constructions. *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 2046, 012069. doi:10.1088/1742-6596/2046/1/012069.
17. Abdullah A, Jaafar M S, Taufiq-Yap Y H, Alhozaimy A, Al-Negheimish A, Noorzaei J (2012) The effect of various chemical activators on pozzolanic reactivity: A review. *Scientific Research and Essays*, 7(7), 719-729.
18. Martinez-Ramirez S, Palomo A (2001) Microstructure studies on Portland cement pastes

- obtained in highly alkaline environments. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1581-1585.
19. Beddaa H, Lavergne F, Fraj A B, Barthélémy J F, Torrenti J M (2022) Experimental investigation and micromechanical modeling of mechanical and durability properties of concrete based on shells from sediments. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104684.
 20. Mňahončáková E, Jiříčková M, Pavlík Z, Fiala L, Rovnaníková P, Bayer P, Černý R (2006) Effect of moisture on the thermal conductivity of a cementitious composite. *International Journal of Thermophysics*, 27, 1228-1240.
 21. Khushefati W H, Demirboğa R, Farhan K Z (2022) Assessment of factors impacting thermal conductivity of cementitious composites-A review. *Cleaner Materials*, 5, 100127.
 22. Pontikes, Y., Snellings, R.: Cementitious Binders Incorporating Residues. In: Worrell, E., Reuter, M., (Eds.) *Handbook of Recycling*. Elsevier: Atlanta, GA, USA, 2014, pp. 219–230.
 23. Patankar, S.V., Ghugal, Y.M., Jamkar, S.S.: Effect of Concentration of Sodium Hydroxide and Degree of Heat Curing on Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. In: *Indian J. Mater. Sci.* vol., 2014, 2014,
 24. Part, W.K., Ramli, M., Cheah, C.B.: An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial byproducts. In: Nazari, A., Sanjayan, J.G. (Eds) *Handbook of Low Carbon Concrete*. Elsevier: UK, 2017, pp. 263-334
 25. Granizo, M.L., Blanc-Varela, M.T., Puertas, F., Palomo, A.: Alkaline activation of metakaolin: Influence of synthesis parameters. In: *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Gothemburg, Göteborg, Sweden, 1997.
 26. Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T.: Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. In: *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, 1999, 1323–1329.
 27. Mangat, P., Lambert P.: Sustainability of alkali-activated cementitious materials and geopolymers. In: Khatib, J. (Ed) *Sustainability of Construction Materials*. Elsevier, 2016, pp. 459-476.
 28. Ringdalen, E.: Changes in quartz during heating and the possible effects on Si production. In: *JOM*, vol. 67, 2015, pp. 484-492.
 29. Benzerzour, M., Amar, M., Abriak, N.E.: New Experimental Approach Of The Reuse Of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment In: *Construction and Building Materials*, vol. 140, 2017, p. 432-444 ISSN: 0950-0618
 30. Luna, M., Acros, D., Duro, L.: Effects of grouting, shotcreting and concrete leachates on backfill geochemistry. SKB R-06-107. *Svensk Kärnbränslehantering AB*, 2006.
 31. Zayed, A.M.: Role of Alkalis and Sulfates of Portland Cement on Durability of Florida Structures. Final report, Florida, USA, 2008.
 32. Trezza, M.A.: Hydration study of ordinary portland cement in the presence of zinc ions. In: *Mat. Res.*, vol. 10(4), 2007, 331–334.

2 Koncept vývoja a zavádzania inovatívnych nízkouhlíkových stavebných materiálov

Koncepčná kapitola vychádza z dvoch riešených línií výskumu – ľahkých stavebných hmôt na báze recyklovaných surovín a kompozitov s využitím dnových sedimentov – a zovšeobecňuje ich do opakovateľného postupu. Jej účelom je navrhnuť rámec, podľa ktorého možno akúkoľvek vhodnú druhotnú surovinu systematicky preveriť, navrhnuť z nej stavebný materiál, overiť jeho technické a environmentálne vlastnosti a pripraviť ho na použitie v stavebnej praxi.

Oba príklady ukázali, že environmentálny prínos inovatívneho materiálu nevzniká automaticky tým, že obsahuje recyklovanú alebo druhotnú zložku. Rozhoduje, ktorú zložku zmesí druhotná surovina nahrádza, akú technickú funkciu má výsledný materiál plniť a za akých podmienok sa surovina získava, upravuje a prepravuje. Koncept preto spája hodnotenie funkčných vlastností, trvanlivosti, uhlíkovej stopy a princípov cirkulárnej ekonomiky do jedného rozhodovacieho procesu.

Cieľom konceptu je:

- vytvoriť jednotný postup od identifikácie druhotnej suroviny po pilotné použitie materiálu,
- uprednostniť také spôsoby využitia druhotných surovín, ktoré prinášajú najvyšší environmentálny prínos,
- posudzovať recyklovaný obsah vždy spolu s požadovanou technickou funkciou a trvanlivosťou,
- hodnotiť materiál viacerými kritériami – uhlíkovou stopou, úsporou primárnych surovín, množstvom odpadu, dopravou a nákladmi,
- zaviesť rozhodovacie brány, ktoré zabránia postupu do ďalšej fázy bez preukázaných výsledkov,
- pripraviť údaje potrebné pre produktovú kartu, environmentálne vyhlásenie o produkte (EPD) a návrh stavby.

2.1 Východiská z riešených príkladov

Nasledujúca tabuľka zhŕňa hlavné zistenia z oboch línií výskumu a ich dôsledky pre všeobecný postup. Každé zistenie je prepojené s konkrétnou požiadavkou konceptu.

Tabuľka 29 Zistenia z riešených príkladov a ich premietnutie do konceptu

Zistenie z výskumu	Dôsledok pre vývoj materiálu	Odpoveď konceptu
Náhrada kameniva recyklátom zmenila GWP zmesi len o –0,84 až +0,33 %	Prínos náhrady plniva spočíva najmä v úspore primárnych surovín, nie v znížení uhlíkovej stopy	Viackriteriálne hodnotenie: GWP spolu s úsporou surovín a odpadu
Náhrada cementu aktivovaným sedimentom znížila GWP o 19 až 38 %	Najväčšiu páku má náhrada spojiva, najmä slinku	Hierarchia využitia druhotných surovín s prioritou náhrady spojiva
Modul A1 tvorí viac ako 95 % GWP zmesi	Uhlíkovú stopu určuje predovšetkým zloženie zmesi	Predbežná LCA už pri návrhu receptúry
Rozdiely GWP medzi zmesami so sedimentom spôsobila najmä doprava (A2)	Vzdialenosť zdroja suroviny môže znehodnotiť jej prínos	Posúdenie lokálnosti a logistiky suroviny v prvej fáze
Objemová hmotnosť a pevnosť sú v nepriamej úmere; rozhoduje pomer tmelu a plniva	Vlastnosti treba optimalizovať pre konkrétnu aplikáciu	Stanovenie cieľových parametrov pred návrhom receptúr
Pri 20 % náhrade kameniva sedimentom bola pevnosť približne o 10 % nižšia, pri frakcii 4/8 mm dokonca vyššia ako referencia	Miera náhrady a frakcia suroviny zásadne ovplyvňujú výsledok	Postupné testovanie viacerých stupňov náhrady
Koeficient mrazuvzdornosti 0,85 – 0,93 po 50 cykloch; odolnosť voči síranom zatiaľ neoverená	Krátkodobé pevnosti nestačia na preukázanie použiteľnosti	Samostatná brána trvanlivosti pred výberom variantu
Sedimenty sú v legislatíve SR vedené ako odpad (17 05 03, 17 05 04)	Využitie závisí od chemického zloženia a legislatívneho statusu suroviny	Charakterizácia suroviny a overenie statusu na začiatku procesu

Návrhové princípy konceptu

1. **Funkcia pred obsahom recyklátu** – materiál sa navrhuje pre konkrétnu aplikáciu a požadované parametre; podiel druhotnej suroviny je prostriedkom, nie cieľom.
2. **Priorita náhrady spojiva** – najvyšší prínos pre uhlíkovú stopu prináša znižovanie podielu cementu a slinku, náhrada plniva prináša najmä úsporu primárnych surovín.
3. **Lokálnosť zdroja** – druhotná surovina má pochádzať z primeranej vzdialenosti, aby emisie dopravy neprevážili jej prínos.
4. **Poznanie suroviny** – chemické a mineralogické zloženie, zrnitosť, obsah organických látok a kontaminantov a variabilita suroviny sa určia pred návrhom receptúr.
5. **Preukázaná trvanlivosť** – materiál postupuje do ďalšej fázy až po overení správania pri dlhodobom a cyklickom namáhaní.
6. **Viackriteriálne hodnotenie** – technické vlastnosti, GWP, ďalšie kategórie vplyvov, úspora surovín a náklady sa posudzujú spoločne.
7. **Transparentné údaje** – výsledky sa zaznamenávajú tak, aby mohli byť podkladom pre technickú kartu, EPD a výpočet uhlíkovej stopy budovy.

2.2 Hierarchia využitia druhotných surovín

Z porovnania oboch príkladov vyplýva, že rovnaká druhotná surovina môže mať pri rôznom spôsobe využitia úplne odlišný environmentálny prínos. Sediment použitý ako náhrada cementu znížil uhlíkovú stopu betónu takmer o dve pätiny, ten istý sediment ako náhrada kameniva ju prakticky nezmenil. Koncept preto zavádza hierarchiu, podľa ktorej sa pre každú surovinu najprv preverí spôsob využitia s najvyšším prínosom.

Tabuľka 30 Hierarchia spôsobov využitia druhotných surovín v stavebných materiáloch

Poradie	Spôsob využitia	Hlavný prínos	Príklad z výskumu
1	náhrada spojiva (cementu, slinku)	výrazné zníženie GWP, úspora energeticky náročnej výroby	mechanicky, chemicky alebo termicky aktivovaný sediment
2	funkčné plnivo so špecifickou vlastnosťou	nižšia objemová hmotnosť, lepšie tepelnoizolačné vlastnosti	pórobetónový a tehlový recyklát, plastová drvina
3	náhrada prírodného kameniva	úspora primárnych surovín, riešenie nedostatku piesku	sediment frakcie 0/4 a 4/8 mm, betónový recyklát
4	nekonštrukčné využitie (zásypy, podkladové vrstvy)	zhodnotenie väčších objemov bez vysokých nárokov na vlastnosti	upravené sedimenty a recykláty nižšej kvality
5	zneškodnenie	len pre nevyužiteľný alebo kontaminovaný zvyšok	–

Hierarchia neznamena, že každá surovina musí byť použitá ako spojivo. Ak surovina nemá potrebnú reaktivitu alebo je jej úprava energeticky príliš náročná, prechádza sa na nižšiu úroveň. Rozhodujúce je, aby sa vyšší stupeň preveril ako prvý a jeho vylúčenie bolo odôvodnené.

2.3 Cieľový proces vývoja materiálu

Proces je rozdelený do ôsmich krokov, ktoré na seba nadväzujú. Medzi krokmi sú rozhodovacie brány (G0 – G7), v ktorých sa overí, či sú k dispozícii minimálne dôkazy na pokračovanie. Výsledky pilotného overenia sa spätne využívajú pri úprave receptúry.



Spätná väzba z pilotného overenia sa vracia do kroku 2 (úprava receptúry)

Hodnotiace kritériá v každej bráne
 technická funkcia · trvanlivosť · GWP · úspora primárnych surovín · doprava · legislatívny status · náklady

G0 – G7: rozhodovacie brány; postup pokračuje až po splnení minimálnych dôkazov

Obrázok 17 Zovšeobecnený proces vývoja inovatívneho nízkouhlíkového stavebného materiálu

Tabuľka 31 Kroky zovšeobecneného procesu vývoja materiálu

Krok	Fáza	Hlavná činnosť	Povinný výstup
0	Druhotná surovina	identifikácia zdroja, odber vzoriek, chemické a mineralogické zloženie, zrnitosť, organické látky, kontaminanty, variabilita, dostupný objem, legislatívny status	charakterizačný list suroviny
1	Aplikácia	určenie účelu použitia, cieľovej triedy pevnosti, objemovej hmotnosti, nasiakavosti a ďalších požiadaviek podľa príslušných noriem (napr. STN EN 206, STN EN 998-2)	zadanie cieľových parametrov a referenčného materiálu
2	Receptúra	návrh úpravy suroviny (mletie, termická alebo chemická aktivácia, triedenie), návrh série receptúr s rôznym stupňom náhrady a predbežná LCA	súbor receptúr pripravených na skúšky
3	Laboratórne skúšky	objemová hmotnosť, pevnosť v tlaku a v ťahu pri ohybe, nasiakavosť; sledovanie vývoja pevností v čase (28, 90, 365 dní)	protokol fyzikálno-mechanických vlastností
4	Trvanlivosť	mrazuvzdornosť, odolnosť voči síranom a chemickému prostrediu, vylúhovateľnosť škodlivín, vplyv vlhkosti na tepelnú vodivosť	protokol trvanlivosti a environmentálnej nezávadnosti
5	LCA a cirkularita	hodnotenie GWP a ďalších kategórií vplyvov v moduloch A1 – A3, úspora primárnych surovín, zhodnotený odpad, dopravná záťaž	environmentálny profil variantov
6	Výber variantu	multikriteriálne porovnanie technických, environmentálnych a ekonomických ukazovateľov s referenčným materiálom	odporúčaný variant s odôvodnením
7	Pilot a trh	poloprevádzková výroba, pilotná aplikácia, kontrola kvality, technická karta, príprava EPD, spätná väzba	produktová karta a vyhodnotenie pilotu

2.4 Rozhodovacie brány

Rozhodovacia brána je formálne overenie, že materiál môže postúpiť do ďalšej fázy. Zabraňuje tomu, aby sa vývoj sústredil na variant, ktorý síce dosahuje nízku uhlíkovú stopu, ale nespĺňa technické požiadavky, alebo naopak na technicky vhodný variant bez environmentálneho prínosu.

Tabuľka 32 Rozhodovacie brány procesu vývoja materiálu

Brána	Rozhodnutie	Minimálne dôkazy	Zodpovedný
G0	schválenie zámeru	dostupnosť suroviny, odhad objemu, predpokladaná aplikácia	riešiteľský tím a partner z praxe
G1	prijatie suroviny	charakterizačný list, obsah kontaminantov, legislatívny status, variabilita vzoriek	výskumný tím, správca suroviny
G2	potvrdenie aplikácie	cieľové parametre, referenčný materiál, príslušné normy	výskumný tím, projektant
G3	uvoľnenie receptúr na skúšky	návrh úpravy suroviny, séria receptúr, predbežný odhad GWP	výskumný tím
G4	postup do skúšok trvanlivosti	splnenie cieľovej pevnosti a objemovej hmotnosti po 28 dňoch	skúšobné laboratórium
G5	postup do environmentálneho hodnotenia	vyhovujúca mrazuvzdornosť, chemická odolnosť a vylúhovateľnosť	skúšobné laboratórium
G6	výber variantu	LCA, ukazovatele cirkularity, porovnanie s referenciou, odhad nákladov	výskumný tím, výrobca
G7	uvoľnenie na pilot	technická karta, plán výroby a kontroly kvality, plán pilotnej aplikácie	výrobca, zhotoviteľ, investor

Pravidlo nesplnenej brány

Ak materiál v bráne nevyhoví, nepostupuje ďalej, ale vracia sa do kroku, v ktorom možno príčinu odstrániť – najčastejšie do úpravy suroviny alebo receptúry. Opakované nesplnenie brány pri rovnakej surovine vedie k presunu na nižšiu úroveň hierarchie využitia. Aj neúspešný výsledok sa zaznamená, pretože zabráni opakovaniu rovnakého postupu pri podobnej surovine.

2.5 Hodnotiaci rámec a ukazovatele

Ukazovatele sú rozdelené na technické, environmentálne a cirkulárne. Odporúčané cieľové hodnoty vychádzajú z výsledkov riešených príkladov a majú orientačný charakter; pre konkrétnu aplikáciu sa spresnia podľa príslušných noriem a požiadaviek projektu.

Tabuľka 33 Ukazovatele hodnotenia inovatívneho materiálu

Ukazovateľ	Jednotka	Odporúčany cieľ	Východisko z výskumu
Pevnosť v tlaku	MPa	splnenie požadovanej triedy pre danú aplikáciu	spoľahlivo použiteľné pevnosti pri ľahkých hmotách
Objemová hmotnosť	kg/m ³	pod 2 000 kg/m ³ pri ľahkých hmotách	dosiahnuté pri recyklátoch a plastovej drvine
Koeficient mrazuvzdornosti	–	najmenej 0,85 po 50 cykloch	0,85 – 0,93 pri kompozitoch so sedimentom
Strata hmotnosti po zmrazovaní	%	najviac 2,5 %	1,33 – 2,5 %
GWP pri náhrade spojiva	kg CO ₂ e/m ³	zníženie najmenej o 20 % oproti referencii	zníženie o 19 – 38 %
GWP pri náhrade plniva	kg CO ₂ e/m ³	bez významného nárastu oproti referencii	–0,84 až +2,6 %
Podiel druhotných surovín	% hmotnosti	najmenej 20 % pri zachovaní funkcie	20 – 100 % náhrady kameniva
Úspora primárnych surovín	kg/m ³	vykazovať pri každom variante	náhrada piesku a kameniva
Podiel dopravy na GWP	%	sledovať; doprava nesmie prevážiť prínos náhrady	rozdiely medzi zmesami spôsobené modulom A2
Vylúhovateľnosť škodlivín	mg/kg	splnenie limitov pre dané použitie	nutné overiť pri sedimentoch

Pri vyhodnotení sa vždy uvádza referenčná zmes, deklarovaná jednotka (spravidla 1 m³), hranice systému (A1 – A3), zdroj údajov a verzia databázy. Výsledok GWP bez technickej ekvivalencie porovnávaných zmesí nie je dostatočným podkladom na výber materiálu.

2.6 Aplikácia konceptu na riešené príklady

Tabuľka ukazuje, ako riešené línie výskumu zapadajú do zovšeobecneného postupu a aké kroky ešte zostávajú na ich uplatnenie v praxi.

Tabuľka 34 Zaradenie riešených materiálov do konceptu

Kritérium	Ľahké hmoty z recyklátov	Sediment ako náhrada kameniva	Sediment ako náhrada cementu
Úroveň hierarchie	2 – funkčné plnivo	3 – náhrada kameniva	1 – náhrada spojiva
Úprava suroviny	drvenie, triedenie	sušenie, triedenie na frakcie	mletie, aktivácia NaOH, termická úprava
Typická aplikácia	ľahké potery, výplňové tvarovky, izolačné vrstvy	betóny nižších tried, podkladové vrstvy	nízkouhlíkové betóny a malty
Technický výsledok	objemová hmotnosť pod 2 000 kg/m ³	pri 20 % náhrade pevnosť približne o 10 % nižšia	nižšie pevnosti, dobrá mrazuvzdornosť
Vplyv na GWP	–0,84 až +0,33 %	prakticky bez zmeny	–19 až –38 %
Hlavný prínos	zhodnotenie stavebného odpadu, nižšia hmotnosť	úspora prírodného piesku, riešenie zanášania nádrží	výrazné zníženie uhlíkovej stopy
Dosiahnutý krok	3 – laboratórne skúšky, 5 – LCA	4 – čiastočne trvanlivosť, 5 – LCA	4 – mrazuvzdornosť, 5 – LCA
Ďalší krok	trvanlivosť, výber variantu, pilot	odolnosť voči síranom, vylúhovanie, status suroviny	zvýšenie pevností (dlhšie mletie), pilot

2.7 Roly a zodpovednosti

Úspešné zavedenie nového materiálu závisí od spolupráce aktérov, ktorí zvyčajne nie sú v priamom kontakte: správcu druhotnej suroviny, výskumu, výrobcu, projektanta, zhotoviteľa a investora. Koncept preto priradzuje každej role jasný výstup.

Tabuľka 35 Roly v procese vývoja a zavádzania nového stavebného materiálu

Rola	Hlavná zodpovednosť	Kľúčový výstup
Správca suroviny	zabezpečuje prístup k surovine, údaje o objeme, pôvode a pravidelnosti vzniku	vzorky a údaje o zdroji
Výskumné pracovisko	charakterizácia, návrh receptúr, skúšky, LCA a vyhodnotenie	protokoly a odporúčaný variant
Skúšobné laboratórium	overenie vlastností a trvanlivosti podľa noriem	akreditované protokoly skúšok
Výrobca	poloprevádzková výroba, kontrola kvality, technická karta a EPD	produkt s deklarovanými vlastnosťami
Projektant	posúdenie vhodnosti pre konštrukciu, začlenenie do návrhu a výpočtu uhlíkovej stopy	technické zadanie a špecifikácia
Zhotoviteľ	overenie spracovateľnosti a podmienok zabudovania	záznam z pilotnej aplikácie
Investor	rozhodnutie o pilotnom použití a akceptácii rizika	schválenie pilotu
Orgány štátnej správy	posúdenie statusu druhotnej suroviny a podmienok jej využitia	stanovisko k využitiu suroviny

2.8 Implementačný plán

Zavedenie konceptu sa odporúča postupne, od laboratórneho overenia k pilotnej aplikácii. Časové rozpätia sú orientačné a závisia od dostupnosti suroviny a dĺžky skúšok trvanlivosti.

Tabuľka 36 Etapy zavádzania inovatívneho materiálu

Etapa	Obsah	Výstup
Príprava (1 – 3 mesiace)	výber suroviny a aplikácie, charakterizácia, zadanie cieľových parametrov (kroky 0 – 1)	schválené brány G0 – G2
Laboratórny vývoj (3 – 12 mesiacov)	návrh receptúr, fyzikálno-mechanické skúšky vrátane dlhodobého vývoja pevností (kroky 2 – 3)	overené receptúry, brána G4
Overenie trvanlivosti a LCA (6 – 12 mesiacov)	skúšky trvanlivosti, vylúhovanie, environmentálne hodnotenie (kroky 4 – 5)	environmentálny profil, brány G5 – G6
Pilot (6 – 12 mesiacov)	poloprevádzková výroba, pilotná aplikácia, monitoring (krok 7)	vyhodnotenie pilotu, technická karta
Uvedenie na trh	posúdenie zhody, EPD, zaradenie do ponuky výrobcu	produkt pripravený na použitie v stavbách

2.9 Riziká zavedenia a opatrenia

Tabuľka 37 Riziká a preventívne opatrenia

Riziko	Včasný signál	Preventívne opatrenie
Variabilita zloženia suroviny	rozdielne výsledky skúšok pri rovnakej receptúre	pravidelný odber a charakterizácia vzoriek, homogenizácia, vstupná kontrola
Kontaminácia suroviny	zvýšený obsah ťažkých kovov alebo organických látok	chemická analýza pred prijatím suroviny, skúšky vylúhovateľnosti
Nejasný legislatívny status	surovina vedená ako odpad bez možnosti zhodnotenia	včasná konzultácia so štátnou správou, dokumentácia vlastností
Nedostatočná trvanlivosť	pokles pevnosti po cyklickom namáhaní, vysoká nasiakavosť	samostatná brána trvanlivosti, úprava receptúry, obmedzenie aplikácie
Energeticky náročná úprava	aktivácia suroviny zvyšuje GWP viac, ako šetrí náhrada cementu	LCA už pri návrhu úpravy, porovnanie alternatívnych postupov
Vysoká dopravná záťaž	rastúci podiel modulu A2 na GWP	využívanie lokálnych zdrojov, posúdenie logistiky v kroku 0
Nízka akceptácia trhu	nedôvera projektantov a investorov k novému materiálu	transparentné údaje, pilotné aplikácie, technická karta a EPD

2.10 Odporúčanie a záver

Na základe výsledkov riešených príkladov sa odporúča zavádzať inovatívne nízkouhlíkové stavebné materiály podľa jednotného postupu, ktorý začína dôkladnou charakterizáciou druhotnej suroviny a končí pilotným overením v reálnej stavbe. Rozhodujúcim krokom je voľba spôsobu využitia suroviny: najväčší prínos pre uhlíkovú stopu prináša náhrada spojiva, zatiaľ čo náhrada plniva prispieva najmä k úspore primárnych surovín a k zhodnoteniu odpadu.

Koncept prepája technické, environmentálne a cirkulárne hľadisko prostredníctvom rozhodovacích brán, jednotných ukazovateľov a jasne rozdelených rolí. Ľahké hmoty z recyklátov a kompozity s dnovými sedimentmi tak nepredstavujú izolované experimenty, ale prvé aplikácie postupu, ktorý možno opakovať pri ďalších druhotných surovinách – napríklad popolčekoch, troskách alebo iných priemyselných vedľajších produktoch. Ďalším krokom je dokončenie skúšok trvanlivosti, overenie legislatívneho statusu sedimentov a pilotná aplikácia vybraného variantu v spolupráci s výrobcom a zhotoviteľom.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY