

POROVNANIE KVALITY VYBRANÝCH DRUHOV RECYKLOVANÉHO A PRÍRODNÉHO KAMENIVA

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE QUALITY OF SELECTED TYPES OF RECYCLED AND NATURAL AGGREGATES

Tatiana Durmeková¹, Renáta Adamcová¹, Karin Bednáríková²

¹Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, SR,
e-mail: tatiana.durmekova@uniba.sk, renata.adamcova@uniba.sk

²Geotechnická spoločnosť – GES, spol. s r.o., Lamačská cesta 8, 811 04 Bratislava, SR,
e-mail: karinbednarikova3@gmail.com

Abstrakt: Autori v predložennom článku analyzujú a porovnávajú vybrané vlastnosti piatich typov kameniva, z toho dve vzorky prírodného materiálu (paleobazalt a granodiorit) a tri recykláty získané z demolačného odpadu (obkladový mramor, pálená tehla a keramická škridla). Výskum bol zameraný na posúdenie nasiakavosti, mrazuvzdornosti a odolnosti materiálov proti opotrebovaniu. Výsledky ukazujú významné rozdiely medzi vlastnosťami prírodného a recyklovaného kameniva, čo komplikuje ich priamu zámenu v stavebných konštrukciách. Kritickým parametrom je najmä vysoká nasiakavosť škridlového (16,3 %) a tehlového kameniva (25,8 %) v porovnaní s hodnotami < 1 % pri prírodnom kamenive, čo obmedzuje využitie týchto materiálov nielen v konštrukčných betónoch, ale aj na viaceré účely v cestnom staviteľstve. Prekvapivá je nízka pevnosť recyklovaného mramoru v jednoosovom tlaku, keďže má lepšie hodnoty otvorenej pórovitosti (0,66 %) a nasiakavosti (0,29 %) ako prírodné kamenivo. Nízka mechanická odolnosť recyklovaných kamenív vyjadrená ich nízkou pevnosťou v tlaku (škridla 19,6 MPa, tehla 38 MPa, mramor 12,6 MPa) bola potvrdená aj ich skúšaním v bubne mikro-Deval. Kamenivo z drvenej škridly obstálo v testovaní lepšie ako kamenivo z pálenej tehly a jeho použitie sa javí ako perspektívnejšie.

Abstract: In the presented article, authors analyze and compare selected properties of five types of aggregates; two natural materials (paleobasalt and granodiorite) and three recycled materials obtained from demolition waste (facing marble, burnt brick and ceramic tile). The research was aimed at assessing the water absorption, frost resistance and resistance to wear of the materials. The results show significant differences between the properties of natural and recycled aggregates, which makes their direct substitution in building constructions complicated. Especially, the high water absorption of the tile aggregate (16.3%) and brick aggregate (25.8%) compared to values <1% in natural aggregates is a critical parameter limiting not only the usage of these materials in the structural concrete, but some of other applications in road construction, too. The low uniaxial compressive strength of recycled marble is surprising, as it has better values of open porosity (0.66%) and water absorption (0.29%) than natural aggregates. The low mechanical resistance of recycled aggregates expressed by their low uniaxial compressive strength (tile 19.6 MPa, brick 38 MPa, marble 12.6 MPa) was also confirmed by testing them in a micro-Deval drum. The crushed-tile-aggregate came out better from the testing than the burnt-brick-aggregate, and its use seems to be more promising.

Kľúčové slová: stavebný a demolačný odpad, prírodné kamenivo, recyklované tehlové a škridlové kamenivo, skúšky kvality

Key words: construction and demolition waste, natural aggregate, recycled brick and tile aggregates, quality verification tests

1. Úvod

Zodpovedné odpadové hospodárstvo a s tým súvisiace znovupoužívanie materiálov je jednou zo strategických úloh každej zrelej spoločnosti. Podobne ako v iných oblastiach, aj v stavebníctve je trendom vrátiť stavebný odpad a odpad z demolácií ako surovinu späť do stavebného procesu. Šetrí to prírodné zdroje a znižuje záťaž na životné prostredie obmedzovaním ťažby i minimalizáciou tvorby skládok odpadu. V konečnom dôsledku je výsledkom nielen úspora financií pri neustále rastúcich poplatkoch za skládkovanie, ale najmä ochrana životného prostredia a nefalšovaný ohľad na budúce generácie. Je to aj požiadavka sformulovaná na medzinárodnej úrovni (Smernica EP a Rady 2008/98/ES o odpade; Protokol EÚ o nakladaní so stavebným odpadom a odpadom z demolácie, 2016), keďže stavebný a demolačný odpad (ďalej len SDO, anglicky „construction and demolition waste“, CDW) predstavuje cca 40 % z odpadu vytvoreného v Európskej únii (web portál JRC, 2024).

Recyklované kamenivo je na rozdiel od prírodných a vyrábaných kamenív výsledkom spracovania anorganických materiálov predtým použitých v stavebných konštrukciách, a môže byť vyrobené z rôznych zložiek. Heterogenita (variabilita) úžitkových vlastností a nižšia kvalita recyklovaných materiálov je pritom samozrejmosťou (Hela a Křížová, 2022; Najdená, 2023; Sojková, 2025). Preto je ich aplikácia spojená s potrebou priebežne overovať ich vlastnosti a nastavovať systém kontrolných skúšok, aby bol proces návratu materiálov do užívania dynamický a pružný. Recyklované kamenivo sa postupne stáva súčasťou stavebných procesov, zatiaľ však jeho výraznejšiemu použitiu na Slovensku zabráňuje skutočnosť, že v technických predpisoch nie sú téměř žiadne „úľavy“ pre takéto druhotné (recyklované) kamenivo pri jeho konkrétnom využívaní, napríklad ako zložky konštrukčných betónov alebo pri zabudovaní do vozoviek. Je to vcelku pochopiteľné, pretože kamenivo ako rozhodujúca zložka betónu alebo konštrukcie vozovky v podstatnej miere ovplyvňuje kvalitu výslednej stavby či konštrukcie (Najdená, 2022; Najdená, 2023).

V najväčšom objeme sú opätovne využívané predovšetkým betónové recykláty, ktorých sa pri búraní stavieb tvorí najviac a ktoré svojimi úžitkovými vlastnosťami najlepšie spĺňajú kritériá noriem (STN EN 12620 + A1: 2008). Práve tomuto typu stavebného odpadu sa venuje najväčšia pozornosť vo výskume (Exteberria et al., 2007; Nováková a Mikulica, 2018; Diotti et al., 2022; Guarav et al., 2023; Štefancová, 2024; Knapcová et al., 2024 a ďalší). V ostatných rokoch sa výskum orientuje aj na recyklované tehlové kamenivo. Ako prezentuje Joyklad (2024) vo svojom scientometrickom prehľadovom článku, od roku 2011 každým rokom pribúda počet vedeckých publikácií zaoberajúcich sa recyklovaným tehlovým kamenivom využívaným v betónoch. Najmä od roku 2020 výrazne narástol počet takýchto článkov vo vedeckých svetových databázach. Väčšinou sa sústreďujú na hodnotenie a zlepšovanie mechanických vlastností týchto materiálov (Joyklad, 2024).

V predloženom článku sú prezentované výsledky laboratórnych skúšok, ktorými boli stanovené kvalitatívne vlastnosti vybraných typov recyklovaného kameniva, a následne boli porovnané s vlastnosťami prírodného kameniva používaného bežne v stavebníctve. Z recyklovaných materiálov to bolo drvené kamenivo z pálenej tehly, keramickej škridly, ako aj z platní mramoru, ktoré boli viac ako 40 rokov umiestnené na fasáde budovy ako obklad. Cieľom bolo posúdiť základné fyzikálne vlastnosti recyklovaných kamenív a poukázať na ich výraznú odlišnosť od prírodného kameniva. To by mohlo iniciovať revíziu doteraz zaužívaných požiadaviek na kvalitu a hľadanie nových aplikácií, aby sa recyklované kamenivo dalo vo väčšej miere využívať v stavebnej praxi. Štúdia zároveň zdôrazňuje potrebu individuálneho posudzovania každého recyklovaného kameniva.

Procesy a postupy súvisiace s využívaním SDO sú komplikované a náročné (selektívna demolácia, zber, identifikácia, triedenie pri zdroji, preprava, stanovenie a overovanie vlastností, individuálne posudzovanie, získanie certifikátov kvality a i.), pričom sa hľadá využitie aj pre materiály nižšej kvality. Dôvodom nedostatočného materiálového zhodnocovania SDO u nás je zaiste aj skutočnosť, že na Slovensku je dostatok kvalitného ľahko dostupného kameniva, najmä štrkov a štrkopieskov. Jeho pomerne nízka cena v porovnaní s inými krajinami EÚ a zatiaľ nedostatočný manažment SDO na Slovensku, ako aj nízky počet a nerovnomerná distribúcia zariadení na spracovanie druhotných surovín nepodporujú využívanie SDO vo väčšej miere (Villoria Sáez a Osmani, 2019; Kollár, 2022). Ani štát nemotivuje stavebníkov finančnou podporou pri materiálovom zhodnocovaní tohto odpadu (Najdená, 2022). Potrebná je tiež úprava legislatívy a usmernení pre prax.

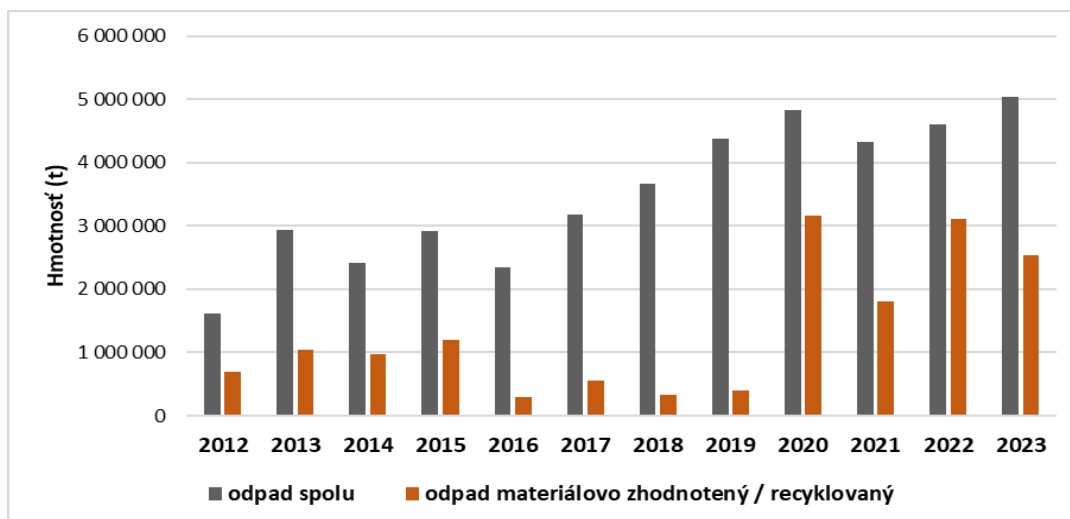
Situáciu so vznikom a materiálovým zhodnotením SDO na Slovensku za ostatné desaťročie ukazuje obr. 1. Informačný systém odpadového hospodárstva na Slovensku však stále nie je dokončený, preto čísla uvedené v grafe nemusia byť presné.

2. Materiál a metodika riešenia

Dva typy prírodného drveného kameniva, bežne používaného na stavebné účely, slúžili ako etalóny kvality (štandardy) na porovnanie s tromi typmi recyklovaného kameniva.

Prírodné kamenivo pochádzalo z lomov Sološnica a Devín. V Sološnici sa ťaží vulkanická výlevná hornina paleozoického veku – paleobazalt (starší názov melafýr). Táto hornina je vhodná na výrobu veľmi kvalitného kameniva, ktoré má podľa výrobcu všestranné použitie. Používa sa širokospektrálne v inžinierskom staviteľstve – na výstavbu ciest s vysokými nárokmi na únosnosť podlažia, do podkladových vrstiev i na povrchové vrstvy vozoviek s vysokými nárokmi na odolnosť proti šmyku, na koľajové podlažia a koľajové lôžka, do asfaltových a betónových zmesí, na betónové a kamenárske výrobky, drenáže, zásypy inžinierskych sietí, príp. ako dekorácia. Granit až biotický granodiorit z lomu Devín predstavuje hlbinnú magmatickú horninu vhodnú na viaceré účely v stavebníctve, napríklad ako lomový kameň upravený alebo neupravený, kameň na murivo alebo na výrobu drveného kameniva.

Recyklované kamenivo bolo vyrobené z demolačného odpadu, ktorý možno považovať za inertný odpad. To znamená, že nie je nebezpečný (neohrozuje životné prostredie ani zdravie ľudí, resp. neobsahuje nebezpečné látky) a za normálnych (bežných, zvyčajných) klimatických podmienok nepodlieha žiadnym významným fyzikálnym, chemickým alebo biologickým zmenám. Z recyklovaných materiálov boli skúmané tri rozdielne typy – pálená tehla, keramická škridla a mramorový obklad, ktorý bol stiahnutý z fasády budovy pri jej demolácii.



Obr. 1 Porovnanie opätovne využitého SDO s celkovým registrovaným množstvom SDO na Slovensku v rokoch 2012 – 2023 (Štatistický úrad SR, Odpady v Slovenskej republike za roky 2013 až 2023).

Fig. 1 Reused CDW compared to the total amount of the registered CDW in Slovakia in the years 2012 – 2023 (Statistical Office of the Slovak Republic, Waste in the Slovak Republic in relevant years).

Príprava vzoriek v laboratóriu pozostávala z drvenia väčších kusov prírodných kameňov a SDO na laboratórnom drviacom zariadení s možnou reguláciou veľkosti výstupného zrna a z následného sitovania na vhodných sitách s cieľom získania požadovaných veľkostných frakcií kameniva podľa požiadaviek skúšobných noriem na jednotlivé skúšky.

Pri všetkých piatich skúmaných materiáloch boli stanovené nasledujúce základné fyzikálne a technické vlastnosti podľa štandardných postupov uvedených v metodických príručkách alebo v technických normách pre kamenivo: objemová hmotnosť, nasiakavosť hrubých zŕn po 24 hodinách kontaktu s vodou i nasiakavosť do ustálenej hmotnosti (STN EN 1097-6), mrazuvzdornosť (STN EN 1367-1), odolnosť proti opotrebovaniu/obrusovaniu skúšaním v bubne mikro-Deval (STN EN 1097-1). Otvorená pórovitosť bola vypočítaná podľa STN EN 1936. Pevnosť jednotlivých materiálov bola zisťovaná skúškou pevnosti pri bodovom zaťažení (Point load test) na nepravidelných úlomkoch (Ulusay a Hudson (eds.), 2007). Z jej výsledkov bola určená pevnosť v jednoosovom tlaku (UCS) použitím prepočítavacieho koeficientu $K = 22$.

Na základe stanovených vlastností bolo kamenivo následne posudzované na dva účely použitia – ako plnivo do konštrukčných betónov (so zohľadnením agresivity prostredia) a na použitie do cementobetónových krytov vozoviek. Druhý uvedený účel si vyžaduje aj zohľadnenie triedy dovoleného dopravného zaťaženia (TDZ), podľa ktorej sa menia nároky na kamenivo. Charakteristika stupňov vplyvu prostredia betónu je uvedená v STN EN 206 + A2:2021.

Z množstva existujúcich kritérií na použitie kameniva na dané účely, ktoré sú uvádzané v technických predpisoch (normy, Katalógové listy kameniva (KLK) alebo Technicko-kvalitatívne podmienky (TKP) platné v cestnom staviteľstve), bolo kamenivo posúdené podľa troch vybraných technických vlastností:

- nasiakavosti po 24 hodinách (WA_{24});
- mrazuvzdornosti, špecifikovanej stratou hmotnosti (F) po cyklických skúškach zmrazovania a rozmrazovania;
- odolnosti proti opotrebovaniu/obrusovaniu vyjadrenej súčiniteľom mikro-Deval (M_{DE}).

3. Výsledky a diskusia

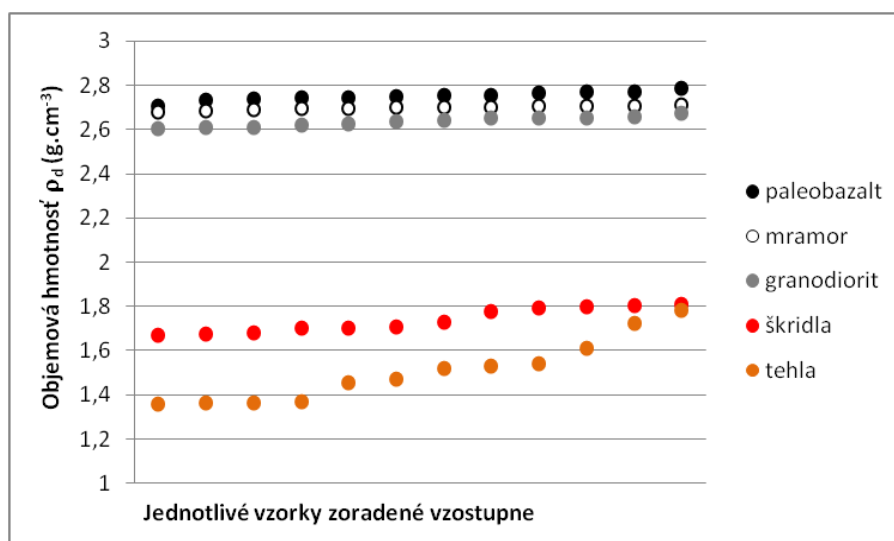
Zistené minimálne, maximálne a priemerné hodnoty skúmaných vlastností skúšaných materiálov sú prezentované v tab. 1.

3.1 Objemová hmotnosť a nasiakavosť

Objemová hmotnosť zväčša nie je uvádzaná v technických normách ako parameter ovplyvňujúci použitie kameniva do betónu. Je to však základná materiálová charakteristika, preto je jej poznanie dôležité. Vo všeobecnosti sa horninový materiál s vyššou objemovou hmotnosťou považuje za pevnejší a kvalitnejší, pretože indikuje nižšiu pórovitosť. Objemová hmotnosť tiež slúži na klasifikáciu kameniva. Podobnými materiálovými charakteristikami sú pórovitosť a pevnosť v tlaku. Ako je možné vidieť z tab. 1, schopnosť horniny (alebo kameniva) absorbovať vodu úzko súvisí s jej otvorenou pórovitosťou.

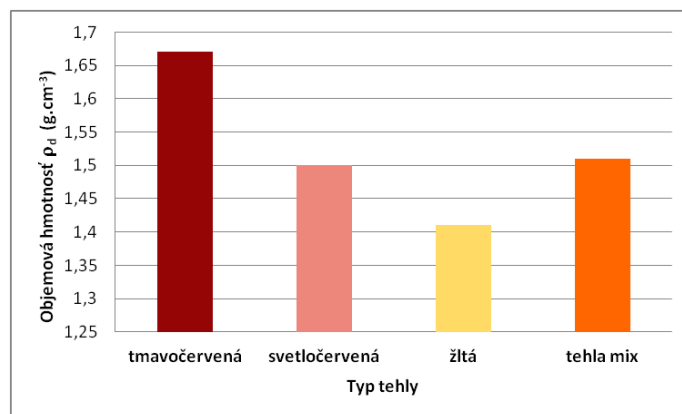
Tab. 1 Fyzikálne a technické vlastnosti posudzovaných prírodných a recyklovaných materiálov
Tab. 1 Physical and technical properties of evaluated natural and recycled materials

Vlastnosť		Paleobazalt	Granodiorit	Recyklovaný mramor	Pálená tehla	Keramická škridla
Objemová hmotnosť (g.cm ⁻³)	Priemer	2,751	2,635	2,700	1,506	1,736
	Max	2,788	2,672	2,710	1,780	1,808
	Min	2,706	2,604	2,686	1,360	1,670
Nasiakavosť do ustálenej hmotnosti (%)	Priemer	0,44	0,79	0,29	25,79	16,33
	Max	0,89	1,12	0,36	35,11	19,36
	Min	0,17	0,46	0,22	14,29	14,52
Nasiakavosť 24 h (%)	Priemer	0,36	0,72	0,24	23,50	14,95
	Max	0,83	1,05	0,32	32,25	17,56
	Min	0,14	0,41	0,18	12,92	13,49
Otvorená pórovitosť (%)	Priemer	0,86	1,69	0,66	37,54	28,97
	Max	1,84	2,54	0,80	47,34	32,90
	Min	0,38	0,87	0,49	25,45	24,53
UCS (MPa)	Priemer	166	106	12,6	38	19,6
	Max	189,4	123,2	17,8	60,5	23,9
	Min	118,8	46,4	7,4	21,6	13,9
Súčiniteľ mikro-Deval	Priemer	11,4	20,4	80,3	92,3	58,6
	Max	11,62	21,10	81,74	92,46	59,17
	Min	11,11	19,68	78,94	92,17	58,06
Mrázuvzdornosť Strata hmotnosti (%)	Priemer	0,41	0,55	1,10	2,33	1,16
	Max	0,412	0,594	1,141	2,344	1,156
	Min	0,406	0,499	1,059	2,308	1,155



Obr. 2 Objemová hmotnosť jednotlivých vzoriek každého skúmaného typu materiálu.
Fig. 2 Dry bulk density of individual specimens of each studied material type.

Z tab. 1 a obr. 2 je zrejmé, že variabilita objemovej hmotnosti prírodných kameňov z jedného zdroja je takmer zanedbateľná a nie je ani veľký rozdiel medzi paleobazaltom, granodioritom a už raz použitým mramorom. Všetky tri horniny sú veľmi hutné materiály, s nízkou až veľmi nízkou pórovitosťou. Objemová hmotnosť keramickej škridly i tehly je podstatne nižšia ako objemová hmotnosť prírodných kameňov. Rozdiel medzi minimálnou a maximálnou hodnotou je u nich tiež väčší. Najväčší rozsah hodnôt bol zistený v tehlách. Vysvetlenie je jednoduché. Zatiaľ čo bol testovaný jeden typ škridly, tehlové kamenivo bolo zložením heterogénne, skúšaná vzorka pozostávala z troch farebne odlišných druhov pálených tehál, čo sa prejavilo rozsahom hodnôt objemovej hmotnosti od 1,36 g.cm⁻³ do 1,78 g.cm⁻³ (obr. 3). Hodnoty v tab. 1 sú teda priemery výsledkov vlastností týchto troch druhov tehly.



Obr. 3 Premennivosť objemovej hmotnosti podľa typu tehly.

Fig. 3 Variability of the bulk density related to the brick type.

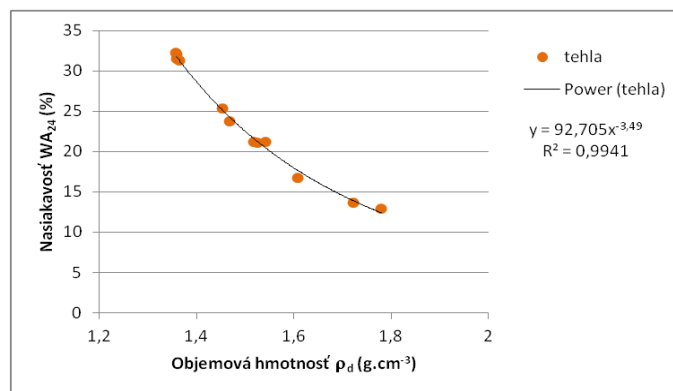
V porovnaní s objemovou hmotnosťou sa rozdielnosť skúmaných materiálov oveľa výraznejšie prejavuje v ich nasiakavosti. Kým prírodné kamene majú 24-hodinovú nasiakavosť i nasiakavosť do ustálenej hmotnosti veľmi nízku, t. j. pod 1 % (pričom najvyššiu má granodiorit), medzi najlepšou a najhoršou tehloou je rozdiel 20 % (tab. 1). Nasiakavosť tehly kolísala podľa typu tehly od 14,3 % do 34,7 %. Kvalita klesala v poradí tmavočervená > svetločervená > žltá.

Stredovú pozíciu medzi prírodnými materiálmi a pálenou tehloou má keramická škridla, jej nasiakavosť je podstatne vyššia ako prírodného kameňa, ale nižšia ako väčšiny vzoriek tehál. Variabilita meraných hodnôt je pri tomto type kameniva len 5 % (tab. 1).

Ako je vidieť na obr. 4, bol zistený veľmi silný vzťah medzi objemovou hmotnosťou suchej tehly a jej nasiakavosťou. Na základe merania 12 vzoriek, čo je v podstate minimálny štatistický súbor, možno uviesť nasledujúcu rovnicu:

$$WA = 92,705 \cdot \rho_d^{-3,49}$$

kde WA je 24-hodinová nasiakavosť (%) a ρ_d je objemová hmotnosť v suchom stave (g.cm⁻³).

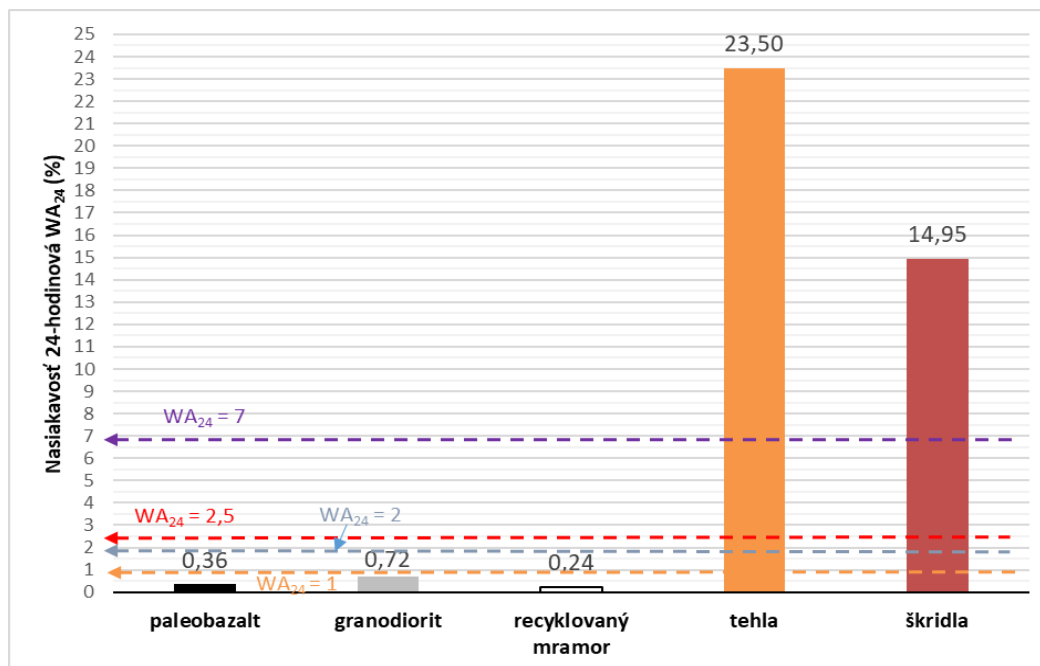


Obr. 4 Vzťah medzi objemovou hmotnosťou v suchom stave a nasiakavosťou tehlového kameniva.

Fig. 4 Relation between dry bulk density and water absorption of brick aggregates.

Tento pilotný výskum ukazuje, že objemová hmotnosť v suchom stave by mohla byť dobrým indikátorom kvality tehál pri nakladaní s odpadovým materiálom z výroby tehál alebo demolácie stavby. Je to však len začiatok a náznak pre ďalší výskum. Na získanie spoľahlivejšej korelácie je potrebné vykonať oveľa viac testov na rôznych typoch tehál. Samozrejme, hodnotenie kvality materiálov z demolácií je zložitejšie. V čistých tehách riadi absorpciu vody iba otvorená pórovitosť. Tehly z búrania však obsahujú veľa prachu a zvyšky malty, čo výrazne ovplyvní nasiakavosť. Čistenie takýchto tehál vyžaduje vodu a energiu, preto je environmentálny prínos ich recyklácie nejednoznačný. Keď sa však už tehly zo SDO dostanú na recykláciu ako kamenivo, ich kvalita sa musí neustále monitorovať. Rýchle ukazovatele kvality sú preto vítané.

Na využívanie kameniva ako plniva do konštrukčných betónov alebo na cementobetónové kryty vozoviek sú uvádzané limitné hodnoty 24-hodinovej nasiakavosti (WA_{24}) v hodnotách 1 %, 2 % alebo 2,5 % (KLK 1/2021; KLK KB 1/2021) v závislosti od ďalších faktorov, t.j. od agresivity prostredia alebo TDZ (obr. 5).



Obr. 5 Nasiakavosť kameniva a jej hraničné hodnoty pre konštrukčné betóny a cementobetónové kryty vozoviek.
Fig. 5 Water absorption of the aggregates. Limit values are marked for structural concrete and cement concrete pavements.

Aplikácia kameniva do cementobetónových krytov vozoviek s TDZ I. si vyžaduje triedu nasiakavosti $WA_{24,1}$, čo znamená, že hodnota nasiakavosti hrubého kameniva po 24 hodinách nesmie prekročiť 1 %. Tejto náročnej požiadavke vyhovuje paleobazaltové, granodioritové a mramorové kamenivo. Túto najprísnejšiu limitnú hodnotu musia spĺňať aj kamenivá určené do konštrukčných betónov v agresívnom prostredí XC4, XD3, XA1 až XA3, XF1 až XF4 (STN EN 206 + A2:2021).

Aplikácia kameniva do cementobetónových krytov vozoviek s TDZ II. a III. pripúšťa triedu nasiakavosti $WA_{24,2}$, čo podobne ako v predchádzajúcom prípade spĺňajú prírodné kamenivá i kamenivo z odpadového mramoru. Hodnota je požadovaná aj pri kamenivách do betónov v prostredí XO, XC1 až XC4, XD1 až XD3, XA1 až XA3, XF1 až XF4.

Najmenej prísna hodnota nasiakavosti 2,5 % (trieda $WA_{24,2,5}$) je uvedená pri použití kameniva do konštrukčných betónov v suchom prostredí bez nebezpečenstva korózie (XO). Kamenivá pripravené z pálenej tehly a keramickej škridly niekoľkonásobne prekračujú aj túto prípustnú hodnotu (obr. 5).

Na obr. 5 je vyznačená aj vyššia limitná hodnota $WA_{24,7}$, ktorá je dovolená pre recyklované kamenivo. Použitie recyklovaného kameniva sa uvádza v Dodatku č. 1/2023 ku KLK 1/2021. Pri výstavbe nestmelených a hydraulicky stmelených podkladových vrstiev vozoviek s použitím triedeného recyklovaného kameniva pochádzajúceho z demolácií je však predpísaný podiel betónu v kamenive najmenej 90 %. Táto podmienka pripúšťa teda maximálne 10 % pálenej tehly alebo keramickej krytiny v kamenive na uvedené účely. Na doplnenie, v pôvodných predpisoch TKP a KLK na dané účely sa o recyklovanom kamenive vôbec neuvažovalo.

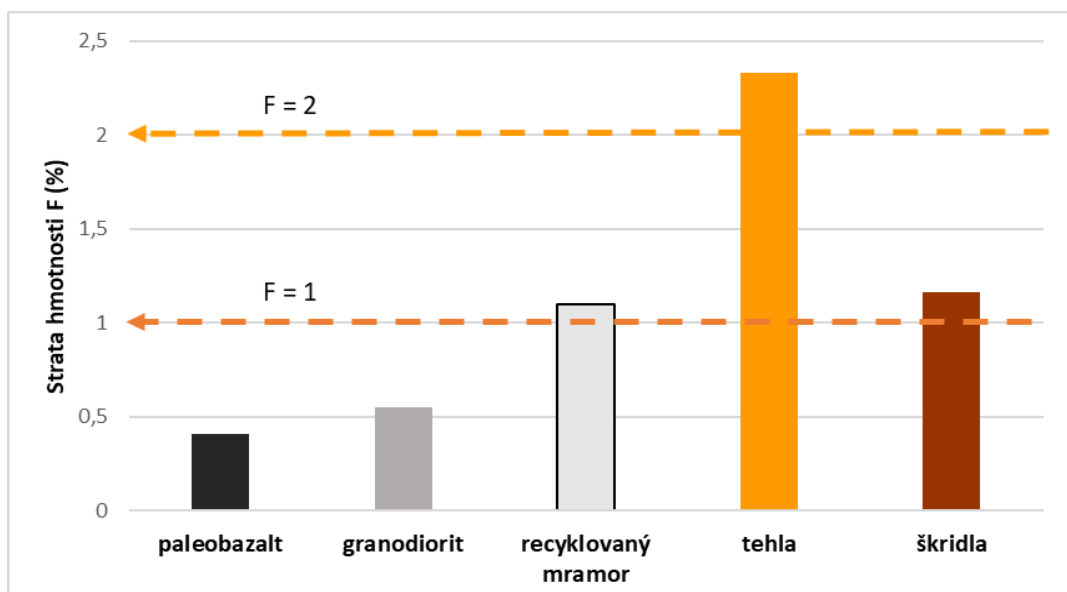
3.2 Mrazuvzdornosť

Mrazuvzdornosť kameniva je vyjadrená stratou hmotnosti F (%) po cyklickej skúške zmrazovania a rozmrazovania (obr. 6). V tom istom grafe sú vyznačené hraničné (prípustné) hodnoty danej vlastnosti na použitie kameniva v konštrukčných betónoch so zohľadnením vplyvu prostredia, prípadne pre cementobetónové kryty vozoviek (STN EN 206 + A2: 2021, KLK KB 1/2021).

Pre niektoré typy konštrukčných betónov (vodorovné betónové povrchy vystavené dažďu a mrazu) so stupňom vplyvu prostredia XF3 (prostredie značne nasýtené vodou bez rozmrazovacích prostriedkov) je maximálna prípustná hodnota $F = 1$ % (trieda F_1). Uvedenej požiadavke vyhovelo len paleobazaltové kamenivo (priemer 0,41 %) a granodioritové kamenivo (priemer 0,55 %).

Niektoré typy konštrukčných betónov (zvislé betónové povrchy vystavené dažďu a mrazu) so stupňom vplyvu prostredia XF1 (prostredie mierne nasýtené vodou bez rozmrazovacích prostriedkov) majú stanovenú

hraničnú hodnotu $F = 2 \%$ (trieda F_2). Výsledky ukázali, že tejto požiadavke vyhovujú všetky typy skúšaných kamenív, okrem kameniva z pálenej tehly, pri ktorom bola priemerná strata hmotnosti $F = 2,33 \%$.



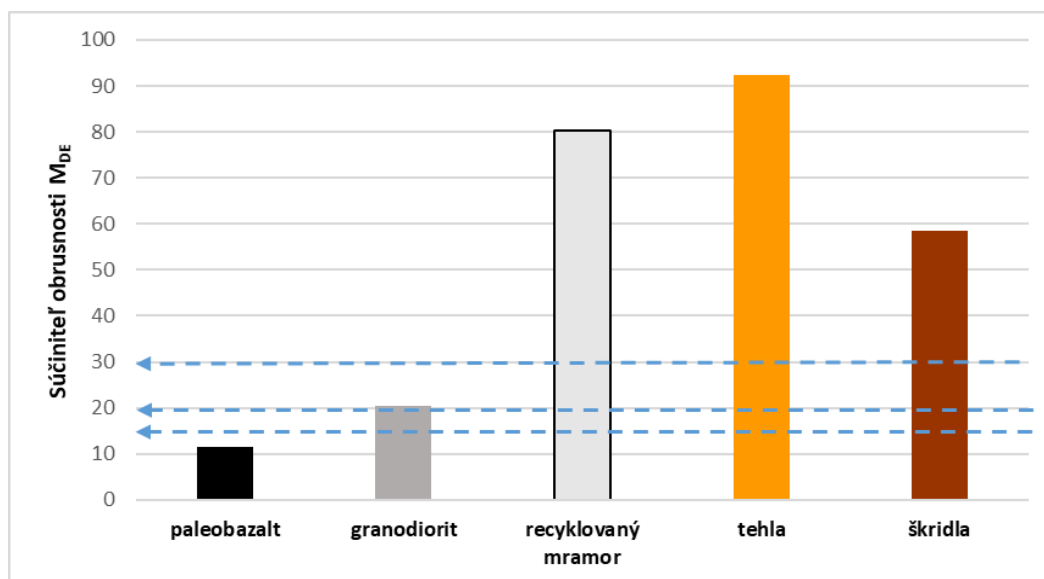
Obr.6 Mrazuvzdornosť kameniva a limitné hodnoty straty hmotnosti $F = 1\%$ a $F = 2\%$ podľa účelu použitia.
Fig. 6 Frost resistance of the aggregates and values of mass loss $F = 1\%$ and $F = 2\%$ limiting defined usage.

Cementobetónové kryty vozoviek s TDZ I., II. a III. si vyžadujú kamenivo, u ktorého $F \leq 1 \%$. Požiadavku spĺňa iba paleobazaltové a granodioritové kamenivo.

Dodatok č. 1/2023 ku KLK 1/2021, ktorý uvažuje o použití recyklovaného kameniva, uvádza aj ďalšiu kategóriu, triedu F_4 . Podobne, ako bolo uvedené vyššie pri analyzovaní nasiakavosti, 90% kameniva musí tvoriť betónová zložka.

3.3 Odolnosť proti opotrebovaniu/obrusnosti (súčiniteľ mikro-Deval)

Výsledky skúšky v bubne mikro-Deval sú graficky znázornené na obr. 7, spolu s limitnými hodnotami súčiniteľa obrusnosti M_{DE} uvádzanými na použitie kameniva ako plniva do konštrukčných betónov alebo na cementobetónové kryty vozoviek.



Obr. 7 Odolnosť kameniva proti opotrebovaniu a limitné hodnoty M_{DE} podľa účelu použitia.
Fig. 7 Resistance of the aggregates to wear and values of M_{DE} limiting defined usage.

Najprísnejšia trieda obrusnosti hrubého kameniva M_{DE15} je v KLK KB 1/2021 stanovená pre konštrukčné betóny, ktoré sú vystavené obrusovaniu prúdiacou vodou s abrazívnymi časticami a pre betóny pevnostnej triedy C50/60 a vysokopevnostné betóny. Tam musí byť hodnota $M_{DE} \leq 15$ %. Z odskúšaných kamenív túto požiadavku spĺňa len paleobazaltové kamenivo s hodnotou súčiniteľa obrusnosti $M_{DE} = 11,4$.

Pri použití kameniva do cementobetónových krytov sa hodnota súčiniteľa M_{DE} odvíja od dovolenej triedy dopravného zaťaženia (KLK 1/2021). Trieda povolenej obrusnosti kameniva M_{DE15} je daná aj pre cementobetónové kryty vozoviek s TDZ I. Zo skúšaných kamenív spĺňa uvedenú požiadavku iba kamenivo vyrobené z paleobazaltu. Pre cementobetónové kryty vozoviek TDZ II. je stanovená trieda obrusnosti M_{DE20} . Z testovaných kamenív vyhovelo tejto požiadavke len paleobazaltové kamenivo. Granodioritové kamenivo s priemerným súčiniteľom obrusnosti $M_{DE} = 20,4$ tesne nevyhovelo tejto požiadavke.

Hraničná hodnota súčiniteľa obrusnosti $M_{DE} \leq 30$ je určená pre hrubé kamenivo do cementobetónových krytov vozoviek s TDZ III. Požiadavke vyhovujú obe prírodné kameniva.

V Dodatku č. 2/2025 ku KLK 1/2021 je uvedená aj kategória M_{DE25} – s presnou špecifikáciou, do ktorej vrstvy vozovky, či už obrusnej, ložnej alebo podkladovej, možno drvené kamenivo použiť (v závislosti od TDZ). Kamenivá z recyklátov (pálenej tehly, keramickej škridly a odpadového mramoru) prekračovali všetky požiadavky na obrusnosť mikro-Deval niekoľkonásobne. Táto ich veľmi nízka odolnosť voči obrusovaniu znemožňuje využitie v akýchkoľvek cementobetónových krytoch vozoviek a tiež v konštrukčných betónoch. Použitie týchto kamenív sa obmedzuje iba na betóny, ktoré nepodliehajú mechanickému obrusovaniu.

3.4 Perspektívy recyklácie SDO

Národné technické predpisy od nepamäti vyžadovali na vyššie spomínané stavebné účely iba prírodné kamenivo (STN 736133). Vo svete je dnes situácia iná, použitie recyklovaných kamenív je prípustné. Európske normy dovoľujú použitie recyklovaného kameniva (STN EN 206+A2; STN EN 12620 + A1, STN EN 13 242 + A1, STN EN 13285). Najširšie využitie má pritom kamenivo vyrobené z betónového SDO. Postupne sa situácia mení aj na Slovensku. Príkladom je aktualizácia TKP v cestnom staviteľstve. Napríklad TKP 5 Podkladové vrstvy z nestmelených a hydraulicky stmelených zmesí majú od roku 2023 platný Dodatok č. 1/2023 a umožňujú na niektoré účely použiť aj recyklované kamenivo. Podmienkou je, aby bol podiel betónovej zložky najmenej 90 %, zároveň nesmie prekročiť limitné hodnoty definujúce inertný odpad, musí byť deklarované podľa STN EN 13242+A1 a musí vyhovovať aktuálne platným KLK. Použitie recyklovaného kameniva do nestmelených podkladových vrstiev pri výstavbe diaľnic a rýchlostných ciest nie je povolené.

Ako vyplýva z obr. 5, skúšané recyklované kamenivo z pálenej tehly a keramickej škridly zďaleka nespĺňa požiadavky na požadovanú nízku nasiakavosť (požadované sú triedy WA_{241} , WA_{242} alebo $WA_{242,5}$), čím je úplne vylúčené ich štandardné použitie v stavebníctve (cestné staviteľstvo a plnivo do konštrukčných betónov). Do úvahy tak prichádza iba využitie na špecifické účely, najčastejšie vo forme jemného kameniva, prípadne môže nahradiť istú malú časť prírodného kameniva (González et al., 2017). Všetky takéto aplikácie si vyžadujú výskum a overovanie prípustného množstva skúšaním finálnych produktov. Niektoré výskumy sú pritom veľmi optimistické. Napríklad Adamson et al. (2015) na základe získaných výsledkov uvádzajú, že prírodné hrubé kamenivo môže byť nahradené drvenými tehliami bez výraznej zmeny v trvanlivosti betónu, ak v ňom nie je prítomná oceľ. Kamenivo s tehliami podporovalo koróziu ocele. Autori tiež poukázali na lepšiu spracovateľnosť betónu s obsahom hrubého recyklovaného tehlového kameniva, čo je spôsobené vyššou pórovitosťou tehlového kameniva v porovnaní s prírodným kamenivom.

Vysoká nasiakavosť tehlových a škridlových recyklátov, ako aj ich nízka objemová hmotnosť, neumožňuje ani ich využitie ako inertného posypového materiálu pri zimnej údržbe ciest. Požiadavky na recyklované kamenivo na tieto účely sú uvedené v KLK 1/2021 a vyžadujú triedu nasiakavosti WA_{243} a objemovú hmotnosť $\rho_d \geq 2,0 \text{ g.cm}^{-3}$.

Prezentovaný výskum analyzoval možnosti použitia recyklovaného kameniva do betónu, na betonárske výrobky alebo na cementobetónové kryty vozoviek. Objavujú sa však aj ďalšie, netradičné možnosti jeho využitia. Napríklad spoločnosť Ecorec Slovensko, s. r. o., dcérska spoločnosť Danucemu Slovensko a. s., nahrádza pri výrobe cementu časť prírodného vápenca a ílu tehlovým práškom. Spoločnosť deklaruje, že takouto recykláciou dokáže znížiť ťažbu prírodných surovín pre cementáreň (<https://www.odpady-portal.sk>, 2024). Ďalším príkladom môžu byť nové typy betónov, ktoré sa objavujú v ponuke. Česká spoločnosť TBG METROSTAV s. r. o. využíva recyklované kamenivo na výrobu betónu označovaného R-CRETE®, v ktorom 50% až 100% prírodného kameniva nahrádzajú recyklovanou stavebnou suťou, čo je väčšie množstvo ako povoľuje norma ČSN EN 206+A2 (TBG Metrostav, 2024). Podľa výrobcu tento betón nachádza uplatnenie predovšetkým pri menej exponovaných a menej zaťažovaných konštrukciách, ako sú podkladové betóny, základové a dočasné konštrukcie, či výplňové a stenové konštrukcie v neagresívnom prostredí, nie je teda na nosné či konštrukčné účely.

Udržateľným ekologickým riešením sa ukazuje byť použitie recyklovaného kameniva na výrobu pórovitého vodopriepustného betónu (angl. pervious concrete), ktorý sa môže uplatniť pri hospodárení s podzemnou vodou a zadržiavaní vody v krajine (Široká, 2018). Využíva sa na menej namáhané spevnené plochy prepúšťajúce

dažďovú vodu alebo ako podkladová vrstva pod dlažby. Cieľom použitia je najmä ochladzovanie prostredia (mestských ulíc) v klimatických podmienkach bez poklesu teploty pod bod mrazu, teda nie u nás. Výskum v tejto oblasti stále prebieha (Wenzhan et al., 2018; Assaad a Khatib, 2024; Deleprani et al., 2025).

Príkladom využitia stavebného odpadu môže byť aj renovácia Námestia Slobody v Bratislave, pri ktorej architekti zúžitkovali pôvodnú rozbitú a poškodenú žulovú dlažbu, ako aj obrubníky z taveného čadiča na prípravu jedinečného liateho exteriérového terazza. Vznikla zaujímavá skladba s rozdrvenými kúskami pôvodnej dlažby. Terazzo použili na zrekonštruovanom námestí v okolí fontány. Týmto krokom sa ušetrilo približne 500 ton materiálu, ktorý by inak skončil na skládke a bolo by nutné vytážiť nový materiál (Marko, 2023).

4. Závěry

Skúškami v laboratóriu boli zistené výrazné rozdiely v základných fyzikálnych i fyzikálno-mechanických vlastnostiach jednotlivých skúmaných materiálov. V porovnaní s prírodným vykazuje recyklované kamenivo z tehly a škridly výrazne horšie kvalitatívne parametre, čím sa stáva problematickým jeho využívanie. Kvalitatívnymi požiadavkami podľa predpísaných technických špecifikácií v mnohých aplikáciách je nasiakavosť a mechanická odolnosť. V oboch ukazovateľoch recyklované kamenivo výrazne zaostáva, čo vylučuje jeho využitie v konštrukčných betónoch i cementobetónových krytoch vozoviek.

Recyklát z keramickej škridly obstál v skúšaní lepšie ako tehlový, a ukazuje sa ako perspektívnejší na výrobu betónov. Hoci nasiakavosť škridly je vysoká, jej úbytky hmotnosti po skúškach mrazuvzdornosti neprekročili limit 2 % (podobne ako ďalšie materiály prírodného pôvodu), čo umožňuje použitie drvenej keramickej škridly do betónov v neagresívnom prostredí. Skúšaný odpadový mramor sa vlastnosťami najviac blíži k prírodnému kamenivu, ale aj jeho použitie na sledované účely je obmedzené alebo nevhodné.

Náhrada prírodného kameniva recyklovanými materiálmi je síce žiadaná i nariadená smernicami EP a Rady EÚ, ale realizácia v praxi naráža na kvalitatívne požiadavky, ktoré tieto materiály nespĺňajú. Na zvýšenie celkového objemu recyklovaného kameniva použitého v stavebníctve je potrebné zmierniť požadované kvalitatívne parametre kameniva tam, kde to konkrétna aplikácia umožňuje bez ohrozenia bezpečnosti a trvácnosti stavby. Vzhľadom na vysokú pórovitosť a nízku objemovú hmotnosť je napríklad tehlový recyklát priam predurčený do ľahkých, termoizolačných betónov. Výskum a vývoj však musí pokračovať hľadaním nových spôsobov využitia recyklovaného kameniva a nových stavebných materiálov.

Predložené výsledky ukazujú, že recyklované kamenivo je veľmi heterogénny materiál, ktorého kvalitatívne parametre môžu byť v širokej škále hodnôt. Zjednodušenie procesu overovania kvality bude preto v budúcnosti nevyhnutné. Za zváženie stojí náhrada časovo náročnej mikro-Deval skúšky ľahšie vykonateľnou skúškou Slake durability test či využitie poznania objemovej hmotnosti ako indikátora nasiakavosti. V prípade drvenej tehly, kde boli rozdiely pórovitosti najväčšie, bola závislosť medzi objemovou hmotnosťou suchej tehly a nasiakavosťou potvrdená aj štatisticky.

PodĎakovanie: Príspevok bol pripravený čiastočne s podporou projektu VEGA 1/0182/23.

Zoznam literatúry

- Adamson M., Razmjoo A., Poursaei A., 2015: *Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate*. – Construction and Building Materials, 94, 426 – 432.
- Assaad J., Khatib J., 2024: *Recycled materials used for sustainable pervious concrete*. *Sustainable Concrete Materials and Structures* (eds.: Ashour A., Wang X. and Han B.). – Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2024, Pages 127 – 143.
- Deleprani F.B., Vilarim da Silva R., Araújo G.S., 2025: *Pervious concrete using construction and demolition waste (CDW) and recycled EPS*. – Matéria (Rio de Janeiro), 30, License CC BY 4.0.
- Diotti A., Cominoli L., Plizzari G., Sorlini S., 2022: *Experimental Evaluation of Recycled Aggregates, Washing Water and Cement Sludge Recovered from Returned Concrete*. – Applied Science, 13, 36.
- Exteberria M., Marí A.R., Vázquez E., 2007: *Recycled aggregate concrete as structural material*. – Materials and Structures, 40, 529 – 541.
- González J.S., Gayarre F.L., Pérez C.L.C., Ros P.S., López M.A.S., 2017: *Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams*. – Construction and Building Materials, 149, 507 – 514.
- Guarav G., Kotoky N., Jittin V., Bahurudeen A., 2023: *Performance assessment of recycled aggregate concrete and its variability*. – Structural Concrete, 24, 6239 – 6250.
- Hela R., Křížová K., 2022: *Možnosti využívání betonových a cihelných recyklátů jako náhrady přírodních kameniv*. – Zborník z odborného seminára Výroba betónu 2022, SAVT, Vysoké Tatry – Štrbské Pleso, 6 – 17.
- Joyklad P., 2024: *Evaluating research on the utilization of recycled brick aggregates in concrete*. Review. – Discover Applied Sciences, 6, 167.

KLK 1/2021: *Katalógové listy kameniva (KLK) 1/2021. + Dodatok č. 1/2023 ku KLK 1/2021 + Dodatok č. 2/2025 ku KLK 1/2021.* – Ministerstvo dopravy a výstavby SR, sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikácií.

KLK KB 1/2021: *Katalógové listy kameniva pre konštrukčné betóny.* – Ministerstvo dopravy a výstavby SR, sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikácií.

Knapcová V., Pacheco J., de Brito J., Sonnenschein R., 2024: *Eurocode 2 design of recycled aggregate concrete elements under compression: Evaluation through model uncertainties from tests on columns.* – *Structural Concrete*. 25(5):3050–64.

Kollár J., 2022: *Podkladová vrstva vozovky z recyklovaného kameniva.* – Zborník z odborného seminára Výroba betónu 2022, SAVT, Vysoké Tatry – Štrbské Pleso, 45 – 49.

Marko O., 2023: *Projekt Námestie Slobody.* – Dostupné online: <https://www.mib.sk/projekt/namestie-slobody> [cit. 2026-04-14].

Najdená I., 2022: *Použitie recyklovaného kameniva do betónu – teória a prax.* – SZVK, časopis pre odborníkov. XXIV. ročník, 2/2022, SZVK Košice, 14 – 18.

Najdená I., 2023: *Vhodnosť recyklovaného kameniva na výrobu betonárskych výrobkov z pohľadu výrobových noriem.* – SZVK, časopis pre odborníkov, XXV. ročník, 1/2023, SZVK Košice, 13 – 18.

Nováková I., Mikulica K., 2018: *Faktory ovlivňující kvalitu recyklovaného betonového kameniva.* – Portal TZB info. Dostupné online: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18061-faktory-ovlivnujuci-kvalitu-recyklovaneho-betonoveho-kameniva> [cit. 2026-04-14].

Protokol EÚ o nakladaní so stavebným odpadom a odpadom z demolácie, 2016. – Európska komisia.

Smernica EP a Rady 2008/98/ES z 19. novembra 2008 o odpade a o zrušení určitých smerníc. – Dostupné online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/%20LexUriServ.%20do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:SK:PDF>

Sojtková V., 2025: *Environmentální dopady využívání recyklátů ve stavebních výrobcích.* – In: Škopán M. (ed.): RECYCLING 2025 – Cirkulární ekonomika ve stavebnictví, recyklace a využívání druhotných stavebních materiálů, Vysoké učení technické v Brně, 153 s.

STN 736133 *Stavba ciest. Teleso pozemných komunikácií.*

STN (ČSN) EN 206 + A2, 2021 *Betón. Špecifikácia, vlastnosti a zhoda.*

STN EN 1097-1: 2011, *Skúšky na stanovenie mechanických a fyzikálnych vlastností kameniva. Časť 1: Stanovenie odolnosti proti obrusovaniu (mikro-Deval).*

STN EN 1097-6: 2023, *Skúšky na stanovenie mechanických a fyzikálnych vlastností kameniva. Časť 6: Stanovenie objemovej hmotnosti zrn a nasiakavosti.*

STN EN 1936: 2007, *Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie mernej hmotnosti, objemovej hmotnosti a celkovej a otvorenej pórovitosti.*

STN EN 1367-1: 2007, *Skúšky na stanovenie tepelných vlastností a odolnosti kameniva proti klimatickým účinkom. Časť 1: Stanovenie odolnosti proti zmrazovaniu a rozmrazovaniu.*

STN EN 12620 + A1: 2008, *Kamenivo do betónu.*

STN EN 13242 + A1 *Kamenivo do nestmelených a hydraulicky stmelených materiálov používaných v inžinierskom staviteľstve a pri výstavbe ciest (Konsolidovaný text).*

STN EN 13285 *Nestmelené zmesi. Špecifikácie (2020).*

Široká H., 2018: *Vodopriepustný betón (pervious concrete).* – Dostupné online: <https://www.istavebnictvo.sk/clanky/vodopriepustny-beton-pervious-concrete> [cit. 2026-04-14].

Štatistický úrad SR. *Ročenky Odpady z hospodárstva Slovenskej republiky za príslušný rok.* – Dostupné online: <https://slovak.statistics.sk/wps/portal/ext/home>. [cit. 2025-09-10]

Štefancová S., 2024: *Recyklovaný betón: trend či nevyhnutnosť?* – ASB, 2023, 11 – 12. Dostupné online: <https://www.asb.sk/zelena-obnova/recyklovany-beton-trend-ci-nevyhnutnost> [cit. 2024-05-22].

TBG Metrostav, 2024: *R-CRETE® jak využit recyklované kamenivo.* – Materiály pro stavbu, 30, 2, 20 – 21. Dostupné: <https://imaterialy.cz/rubriky/materialy/r-crete-jak-vyuzit-recyklovane-kamenivo/> [cit. 2024-05-02].

TKP 5 *Podkladové vrstvy z nestmelených a hydraulicky stmelených zmesí, 2020 + Dodatok č. 1 k TKP 5/2023.* – Ministerstvo dopravy SR, Sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikácií.

Ulusay, R., Hudson, J.A. (eds.), 2007: *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006.* – Kozan Ofset Matbaacılık San. ve Tic. Şti. Ankara, Turkey, 628 s.

Villoria Sáez P., Osmani M., 2019: *A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union.* – *Journal of Cleaner Production*, Volume 241, 118400.

Wenzhan J., Tao Z., Guoyou L., 2018: *Experimental Study on Recycled Aggregate Pervious Concrete.* – *International Journal of Architectural, Civil and Construction Sciences*, 12, 9.

web portál JRC, 2024: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/less-waste-more-value/construction-and-demolition-waste_en, [cit. 2025-03-15]

web portál Odpady-portal, 2024: <https://www.odpady-portal.sk/Dokument/108243/ecorec-bratislava-zber-stavebne-odpady.aspx>: Ecorec v Bratislave otvoril novú prevádzku na zber stavebných odpadov, [cit. 2026-04-9]