

Využití mletého betonového recyklátu jako částečné náhrady cementu nebo jako mikroplniva v cementových kompozitech

Ing. Ivana Chromková¹, Lubomír Zavřel¹

¹ **Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s.,**

e-mail: chromkova@vush.cz

Souhrn

Stavební a demoliční odpady tvoří více než 50 % z celkové produkce odpadů v ČR. Materiálové zdroje vhodné pro recyklaci – tedy zejména beton, cihly a jejich směsi – představují cca 25 % vzniklých SDO (konkrétně cca 4 až 6 milionů tun ročně) [1,2] S ohledem na výraznou spotřebu přírodních zdrojů je ve stavebnictví patrná nevyhnutelnost využívání recyklovaných stavebních a demoličních odpadů v co nejvyšší míře.

V současné době je stále více diskutováno znovu využívání betonového recyklátu jako náhrada přírodního kameniva. Dalším stupněm využití betonového recyklátu je jeho zpracování a úprava mletím. Jako efektivní se jeví využití betonového prachu jako příměs do betonu nebo částečná náhrada cementu v recepturách malt a betonů. Na základě ověřování je z pohledu dosažených pevnostních charakteristik vhodnější použití jako příměs do receptury betonů.

Klíčová slova: *betonový recyklát, jemnost mletí, náhrada cementu, příměs do betonu, mikroplnivo*

Jemně mletý betonový recyklát – úvod do problematiky

Beton je dle [3] tvořen z 65 – 70 % hrubým a jemným kamenivem, zbytek je tvořen cementovou pastou. Jemná frakce betonu vznikající při recyklaci betonu je tvořena z velké části právě cementovou pastou. Poměr cementové pasty a jemné frakce kameniva je ovlivněn především technologií recyklace.

Stará cementová pasta obsahuje množství zrn, která ještě nejsou zhydratovaná. Pomocí mletí nebo dalších úprav mohou být tato zrna odhalena a mohla by znovu reagovat. To vede k úvahám, že lze využít velmi jemnou frakci recyklovaného betonu jako částečnou náhradu běžného cementu. Dále může plnit funkci mikroplniva, které zlepšuje vlastnosti betonové směsi tím, že vytlačuje nadbytečnou vodu mezi zrny cementu a kameniva a tvoří hutnější strukturu. Proto by zrna mikroplniva měla být menší než zrna cementu a v ideálním případě by měla mít kulový tvar [4]. Částice takových parametrů mohou v betonové směsi zajistit dobrou zpracovatelnost, vyšší objemovou stabilitu a zvýšit jeho životnost [5].

Výsledky výzkumů různých autorů přinášejí zajímavá zjištění. Literatura [6,7] uvádí hodnocení vlivu různého původu odpadního betonového recyklátu při ověřování cementových past s 50% náhradou cementu jemně mletým betonovým prachem. U těchto past došlo k výraznému poklesu pevností v tlaku ve srovnání past s referenčním cementem, a to min o 25 MPa. Ačkoli byl přepokládán pozitivní vliv vysoké kvality původního betonu (betonové pražce, sloupy). Pevnost v tahu za ohybu všech vzorků s jemně mletým recyklátem byla naopak vyšší než u referenčního cementu. Autoři tento jev přisuzují snížení vývoje hydratačního tepla a s tím souvisejícím menším tepelným kontrakcím a menšímu vzniku mikrotrhlin.

Výsledky sledování vlivu rostoucího množství cementové náhrady na mechanické vlastnosti cementové pasty uvádí literatura [8]. Obdobně jako ostatní autoři zjistili zvýšení pórovitosti a spolu s tím také pokles pevnosti v tlaku. Pokles pevnosti v tlaku byl téměř lineární s rostoucím množstvím recyklované betonové moučky. Naopak pevnost vzorků v tahu za ohybu se vlivem obsahu recyklované betonové moučky zvětšila. Pevnost v tahu za ohybu vzorků s náhradou 20 hm. % cementu se oproti referenční směsi téměř zdvojnásobila. Z hlediska poklesu pevnosti v tlaku a malému obsahu nezhydratovaného slínku v moučce je patrné, že recyklovaná betonová moučka plní především roli

mikroplniva. Z hlediska minimalizace poklesu pevnosti v tlaku je autory doporučena náhrada cementu do 30 hm. %.

Také literatura [9] se zabývá využitím recyklované betonové moučky jako částečné náhrady pojiva v cementové maltě. Vzhledem ke znalosti závislosti poklesu pevnosti v tlaku a rostoucího obsahu moučky zkoumala směsi s maximální náhradou cementu do 15 hm. %. U všech směsí pozorovala zhoršení zpracovatelnosti a při 15% náhradě bylo zřejmé i drobné oddálení počátku tuhnutí. Při takto malé náhradě cementu byly pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu i modul pružnosti vyšší nebo srovnatelné s referenční směsí. Při 5% náhradě cementu recyklovanou betonovou moučkou došlo téměř k 20% nárůstu pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech. Modul pružnosti se zvětšil o cca 10 %. Mechanické vlastnosti mají stejný trend i z dlouhodobého hlediska (90 dní).

Velmi důležitým parametrem charakterizujícím chování betonových kompozitů s obsahem recyklátů je smrštění cementové pasty v závislosti na rostoucím množství mikromleté betonové moučky. Z výsledků práce [9] je zřejmé, že smrštění vzorků stoupá s rostoucím množstvím mikromleté betonové moučky. Smrštění cementových past by mohlo být omezeno použitím vhodného superplastifikátoru.

Vlastnosti cementové pasty a malty s částečnou náhradou cementu recyklovanou betonovou moučkou byly ověřovány v literatuře [10]. Byly použity dva typy recyklované betonové moučky ze stejného zdroje s rozdílnou zrnitostí. Z výzkumu vyplynulo, že recyklovaná betonová moučka má v porovnání s cementem vyšší množství SiO_2 a výrazně vyšší obsah CaO . Dále bylo pozorováno zhoršení zpracovatelnosti v závislosti na rostoucím množství recyklované moučky. Hydratace byla oddálena v závislosti na množství moučky až o 2 hodiny. Tuhnutí začalo později u pasty s hrubší moučkou. U malty došlo při náhradě 45 hm. % cementu k poklesu pevnosti v tlaku o 73 a 64 % (pro hrubší a jemnější moučku) a nasákavost se zvětšila o 70 %. Z výrazného poklesu pevnosti v tlaku autoři usoudili, že recyklovaná betonová moučka je inertní a navrhuji omezit použití náhrady cementu do 15 hm. %.

Zkoumána byla i možnost použití jemných odprašků vznikajících při drcení na recyklačních linkách. Odchytem prachových částí při drcení betonu nebo pomletím recyklované betonové moučky by mohlo dojít k získání vhodné suroviny, která by mohla doplnit stávající sortiment mikroplniv.

Jak je patrné z krátkého přehledu výsledků experimentálních prací různých autorů, závěry se do jisté míry shodují, a to v tom, že vyšší množství použitého jemně mletého betonového prachu v cementových tmelech či maltách nepřináší, oproti předpokladům, jednoznačně pozitivní efekt. Pozitivní vliv použité jemně mleté betonové moučky byl zaznamenán na výslednou pevnost v tahu za ohybu, pokud byla testována náhrada cementu max. 20 %. V případě pevnosti v tlaku u testovaných past nejsou výsledky uvedených experimentů jednoznačné. Obecně však platí, že na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti, zejména pevnostní charakteristiky, pórovitost a nasákavost, malt či cementových past má zásadní vliv zvolené množství náhrady cementu.

Laboratorní ověřování jemně mletého betonového recyklátu

Ve výše uvedeném přehledu dostupné literatury nebyly nalezeny informace o testování jemně mletého betonového recyklátu do receptur betonu, ani o jeho vlivu na trvanlivostní parametry malt či betonů. Snahou našeho experimentu proto bylo tuto problematiku rozvinout a posoudit vliv námi připraveného jemně mletého betonového recyklátu na vlastnosti cementových past, malt a vybrané receptury betonu.

V úvodu prací bylo nutno zajistit vhodný způsob mletí betonového recyklátu, tak aby bylo dosaženo výborných parametrů pro využití mletého betonového recyklátu jako příměsi do betonu či částečné náhrady cementu v recepturách betonu. U všech zkoušených receptur byly sledovány pevnostní charakteristiky v závislosti na čase a porovnávány se standardními recepturami.

K ověřování byly použity recykláty ze tří zdrojů. Jednalo se o recyklát z odpadního betonu získaný přímo z výroby betonových prefabrikátů (označeno jako **P**), komerčně dostupný betonový recyklát z výroby betonového zboží jiného výrobce (**B**) a beton z krytu dálnice D1 získaný při její modernizaci (**D**). Všechny vzorky betonů byly upraveny mletím ve velkém laboratorním kulovém mlýnu na jemnost vyšší, než jsou běžné hodnoty měrného povrchu cementu. Mleto bylo vždy 10 kg recyklátu. Doba mletí byla

volena tak, aby byl zajištěn propad sítem 0,09 mm 98 % a více. Doba mletí u betonu P a D byla 120 minut, u betonu B pak 180 minut. Parametry mletím upravených betonů ve srovnání s referenčním cementem jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Parametry mletím upravených betonů

Označení	Měrná hmotnost	Měrný povrch
	[g/cm ³]	[m ² /kg]
B	2,633	650,9
P	2,533	671,5
D	2,607	605,4
CEM I 42,5R	3,105	437,9

Jak je z tabulky patrné, bylo mletím dosaženo vysoké jemnosti betonového prachu, tj. vyšší jemnosti, než je běžně mlet cementářský slínek.

Sledování vlivu jemně mletého betonu v cementových pastách

Cementové pasty byly připraveny s použitím 20% náhrady cementu a porovnávány s parametry standardní cementové pasty dle požadavků ČSN EN 196-3. Sledován byl vliv obsahu jemně mletého betonu na konzistenci připravené pasty pomocí Vicatova přístroje, stanoven počátek a celková doba tuhnutí. Následně také stanovena objemová stálost dle Le Chateliera.

Tabulka 2: Parametry cementových past

Označení	Optimální voda pro normální konzistenci	Doba tuhnutí		Roztažnost
		Počátek	Celková	
	[%]	[hod:min]	[hod:min]	[mm]
B	29,5	3:30	4:20	0,0
P	32,0	4:20	6:00	0,0
D	30,5	3:10	4:10	0,5
CEM I 42,5R	28,5	3:00	4:20	0,0

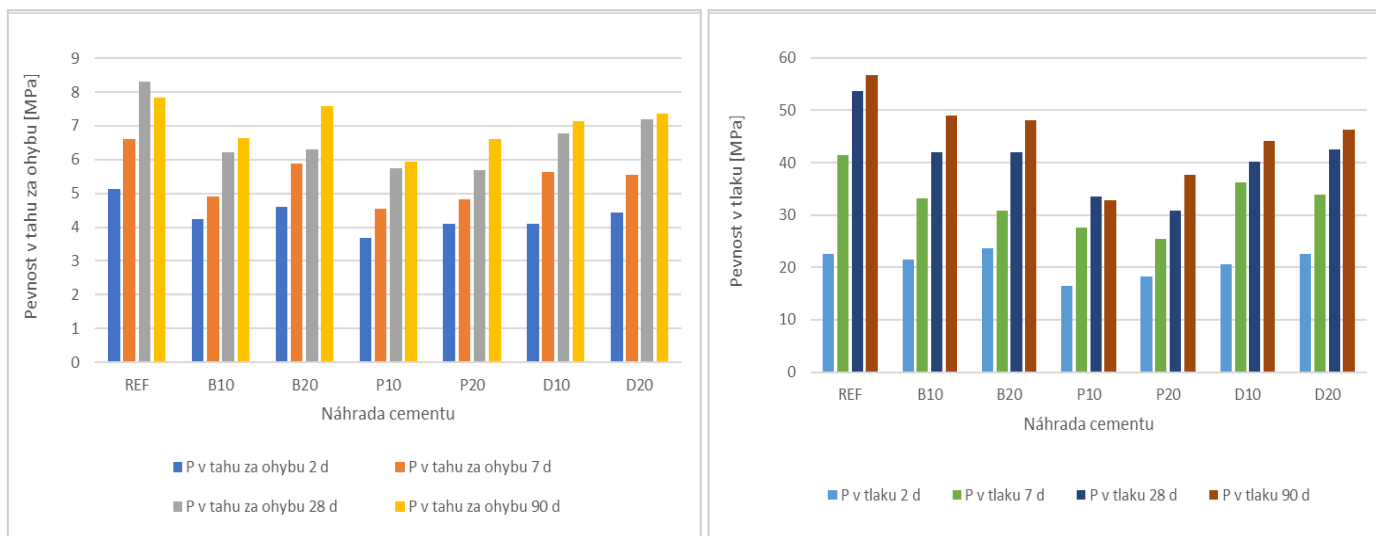
Výsledky testování cementových past s náhradou cementu jemně mletým betonem ukazují, že jemnost mletí betonů zapříčinila vyšší požadavky na optimální množství vody, v případě nejjemněji mletého betonu s označením P byl i patrný vliv na výrazné oddálení počátku a celkové doby tuhnutí připravené pasty. Srovnatelné s referenčním cementem byly doby tuhnutí cementových past s obsahem jemně mletého betonu B a D. Všechny cementové pasty splňovaly požadavky na objemovou stálost.

Ověření mletého betonového recyklátu v maltách – částečná náhrada cementu

V této fázi ověřování byly připraveny standardní normové malty dle ČSN 196-1. Sledován byl vliv částečné náhrady cementu mletými betonovými recykláty. Jednalo se o náhradu 10 a 20 %. Jako pojivo byl použit portlandský cement CEM I 42,5R Mokrý. Jako plnivo normový písek CEN I až CEN III.

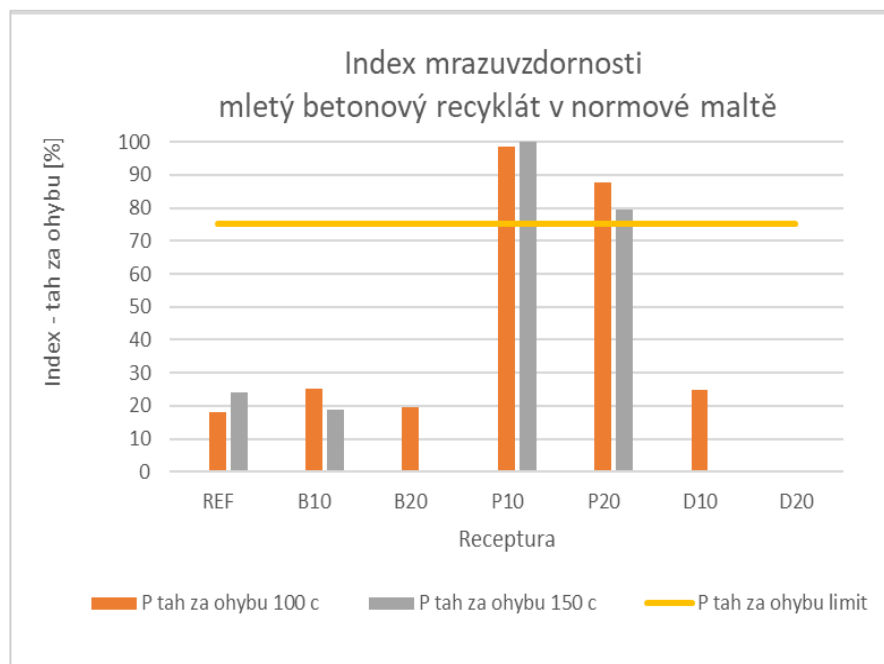
Po vyrobení byly vzorky o rozměrech 40×40×160 mm uloženy v normových podmínkách, tj. ve vodě o teplotě (20±1) °C. V časových intervalech 2, 7, 28, 90 dní byl sledován vývoj jejich fyzikálně-mechanických parametrů. Jak je patrné z grafů (Obr. 1), částečná náhrada cementu jemně mletým betonovým recyklátem nepřinesla zvýšení pevnostních charakteristik, a to ani v případě pevnosti v tahu za ohybu. U všech testovaných malt, s 10 i 20% náhradou cementu, byl patrný pomalejší nárůst

počátečních pevností i nižší hodnoty pevností po 28 a 90 dnech ve srovnání s referenčním cementem. Zaznamenány byly vyšší výsledné pevnosti malt s 20% náhradou cementu jemně mletým betonovým recyklátem, ve srovnání se vzorky s 10% náhradou.



Obr. 1: Pevnost v tahu za ohybu(vlevo) a pevnost v tlaku (vpravo) malt s 10 a 20% náhradou cementu mletým betonovým recyklátem

Na dalších sadách vzorků testovaných malt byly provedeny zkoušky mrazuvzdornosti. Malty, které obsahovaly mletý betonový recyklát s označením P, vykazaly výbornou mrazuvzdornost. Obě testované varianty náhrady cementu (tj. 10 a 20 %) odolaly 100 i 150 zmrazovacím cyklům. U malt s 20% náhradou cementu jemně mletým betonem B a D byl zaznamenán po překročení 100 cyklů zmrazování a rozmrazování rozpad zkušebních těles. Index mrazuvzdornosti a stav těles po 150 cyklech je uveden na Obr. 2 a 3.



Obr. 2: Index mrazuvzdornosti malt



Obr. 3 Stav zkušebních těles po 150 cyklech

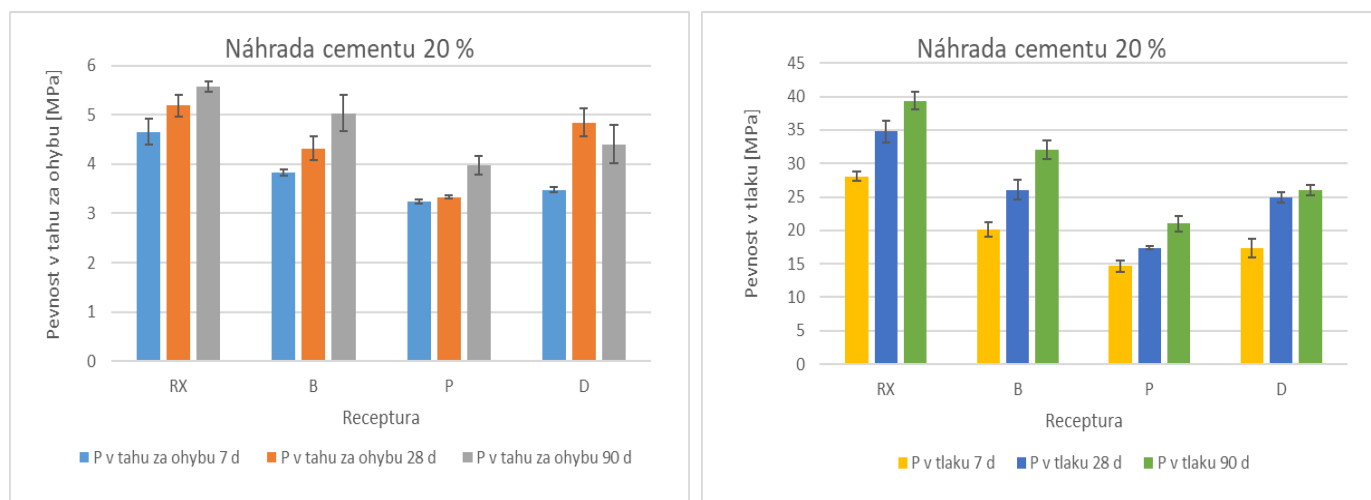
Ověření mletého betonového recyklátu v recepturách betonu

Na základě výsledků ověřování mletého betonového recyklátu na normových maltách byl testován mletý betonový recyklát jako částečná náhrada cementu anebo mikropřísada do receptur betonu používaných pro výrobu betonových překladů. Tento typ stavebních železobetonových prvků se vyrábí z betonu třídy C30/37. Standardní betonová směs pro laboratorní ověřování obsahovala cement v dávce $340 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a množství použité záměsové vody odpovídalo vodnímu součiniteli 0,52.

Použití mletého betonového recyklátu jako částečné náhrady cementu

Pro tento experiment byly připraveny betonové směsi s 20% náhradou cementu, vodní součinitel byl zachován na hodnotě 0,52. Ověřovány byly jemně mleté betony ze stejných zdrojů, jaké byly testovány v normových maltách.

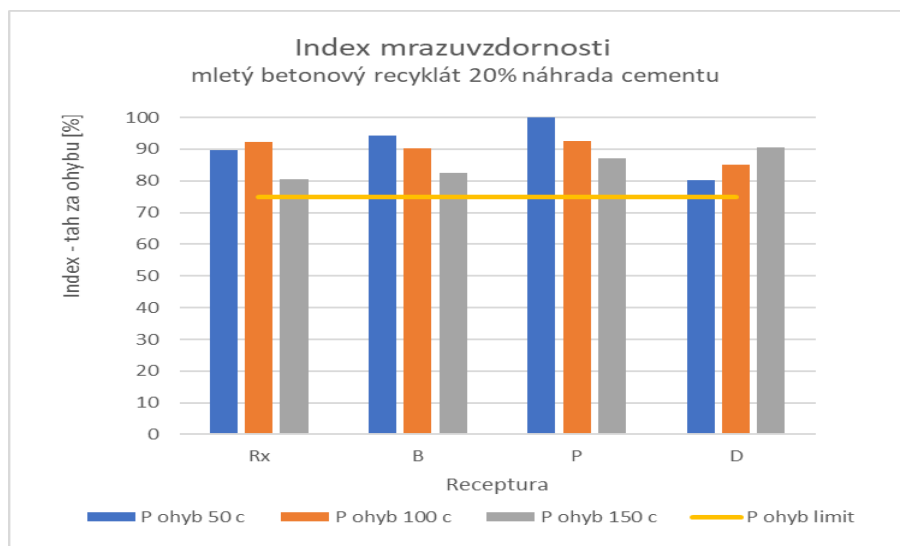
Z připravených betonových směsí byla vyrobena zkušební tělesa, která byla uložena do vlhkého prostředí. Na vzorcích těchto betonů byly sledovány pevnosti po 7, 28 a 90 dnech. Dále pak objemová hmotnost a nasákavost.



Obr. 4: Vývoj pevnosti v tahu za ohybu (vlevo) a tlaku betonů (vpravo) s náhradou cementu jemně mletým betonovým recyklátem

Z grafů (Obr. 4) je patrné, že 20% náhrada cementu jemně mletým betonovým recyklátem v námi testované receptuře betonu zapříčinila pokles výsledných pevnostních charakteristik betonů. Což je zcela v souladu s výsledky testování normových malt s náhradou 10 a 20 % cementu. Objemová hmotnost betonů s náhradou cementu byla cca o $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ nižší oproti referenčnímu betonu Rx. Nasákavost vzorků všech betonů byla srovnatelná.

Dále byl sledován vliv náhrady cementu v betonech na jejich odolnost vůči zmrazování. Ve zkušebním zařízení KD-20 bylo sledováno působení 50, 100 a 150 zmrazovacích cyklů. Z výsledků této zkoušky (Obr. 5) je patrné, že všechny betony odolaly zvoleným cyklům zmrazování a rozmrazování. Index mrazuvzdornosti u betonů s náhradou cementu jemně mletým betonovým recyklátem B a P byl dokonce vyšší, než tomu bylo u referenčního betonu.



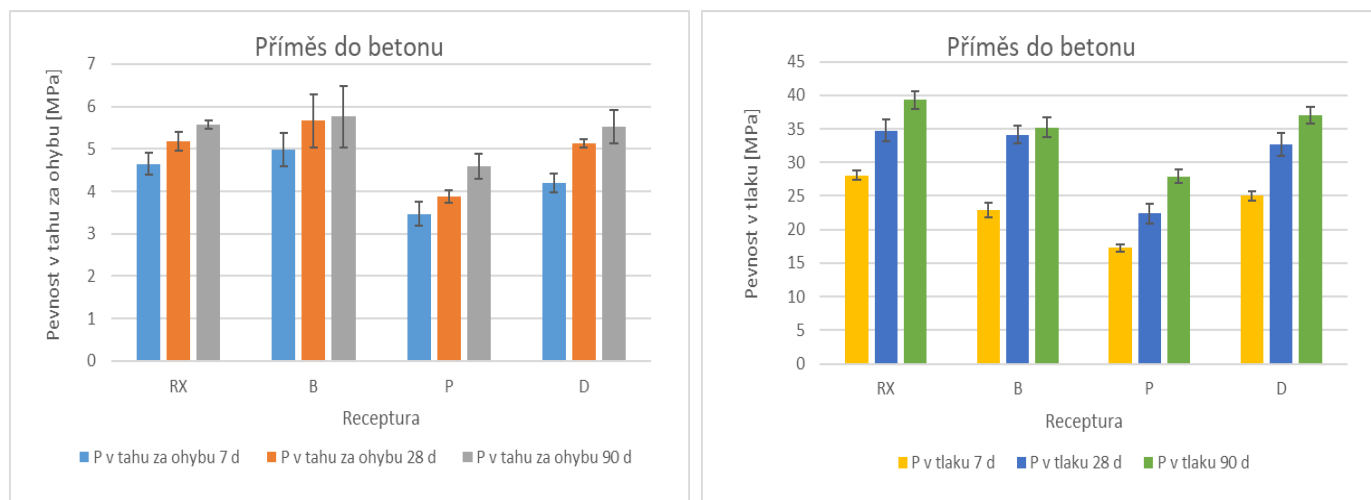
Obr. 5: Index mrazuvzdornosti betonů - jemně mletý betonový recyklát jako 20% náhrada cementu

Použití mletého betonového recyklátu jako mikroplniva

Mikroplnivem obecně rozumíme velmi jemný prášek (mikrosilika, jemně mletý vápenec), který se přidává do betonu pro zlepšení jeho vlastností. Jeho hlavním účelem je vyplnit mezery mezi většími částicemi cementu a kameniva, čímž vzniká hutnější struktura betonu. To vede ke zvýšení pevnosti, trvanlivosti, odolnosti proti chemickým látkám a snížení propustnosti pro vodu a agresivní látky. Dávkování mikroplniv do betonu se liší v závislosti na typu plniva a požadovaných vlastnostech betonu. Např. mikrosilika se dávkuje v množství 5–25 % hmotnosti cementu, u krystalizačních přísad pro zajištění hutnější struktury betonu je doporučeno množství 10–15 % hmotnosti cementu.

Pro náš experiment jsme použili dávkování jemně mletého betonového recyklátu v množství 20 % z hmotnosti cementu do receptury pro výrobu překladů. Pro přípravu betonové směsi byl použit opět vodní součinitel 0,52.

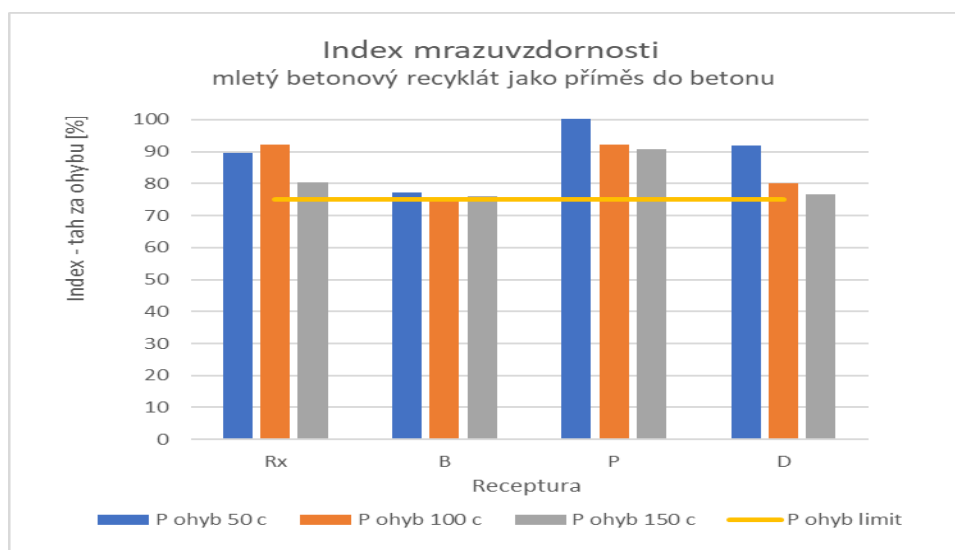
Vyrobená betonová tělesa byla uložena do vlhkého prostředí. V časových intervalech 7, 28 a 90 dní na nich byly sledovány základní fyzikálně-mechanické vlastnosti. Výsledky pevnostních charakteristik jsou uvedeny v grafu (Obr.6). Objemová hmotnost všech betonů byla srovnatelná s referenčním betonem.



Obr. 6: Vývoj pevnosti v tahu za ohybu (vlevo) a tlaku betonů (vpravo) s jemně mletým betonovým recyklátem použitým jako mikroplnivo

Z výsledků uvedených v grafech je patrné, že se opět jednotlivé typy jemně mletého recyklátu projevily rozdílně. U vzorků betonu s jemně mletým recyklátem B byly zjištěny vyšší pevnosti v tahu za ohybu, než jaké byly dosaženy u referenčního betonu. Pevnost v tlaku po 7 dnech byla vždy vyšší u referenčního betonu, avšak pevnosti v tlaku betonů s jemně mletým recyklátem B a D po 28 dnech zrání byly srovnatelné s betonem referenčním. Nejnižší pevnostní charakteristiky byly sledovány u betonů s jemně mletým recyklátem P.

Na sadě zkušebních těles byla provedena zkouška mrazuvzdornosti. Výsledky zkoušky byly opět v souladu s dřívějšími výsledky pozorovanými u betonů s 20% náhradou cementu. Tedy na základě stanoveného Indexu účinnosti je možno konstatovat, že všechny testované betony odolaly působení 150. zmrazovacích cyklů. Nejmenší odolnost byla patrná i při vizuálním posuzování u betonů s jemně mletým betonovým recyklátem B. Nejvyšší odolnost naopak prokázala tělesa označená jako P.



Obr. 7: Index mrazuvzdornosti betonů – jemně mletý betonový recyklát jako mikroplnivo

Závěr

Z výsledků ověřování mletého betonového recyklátu do betonových směsí vyplývá, že jsou recykláty použitelné jako příměs do betonu i jako částečná (20%) náhrada cementu. V případě využití jako příměs do betonu byly u ověřovaných betonů dosaženy vyšší pevnosti než při aplikaci jako částečná náhrada cementu. Avšak oproti předpokladům nepřispěl obsah betonového jemně mletého recyklátu jako příměsi do betonu ke zvýšení výsledných pevností vyztuženého betonu. V porovnání s referenční recepturou betonu byly dosažené pevnosti betonů s mletým recyklátem vždy nižší.

Z obou testovaných aplikací byl u betonů s jemně mletým betonovým recyklátem použitým jako mikroplnivo patrný rychlejší nárůst počátečních pevností, což je, zejména v závodech prefabrikované výroby, klíčový aspekt pro nejvyšší možnost opakovaného využití forem a manipulaci s prefabrikátem.

Využití jemně mletého betonového recyklátu (s kontrolovanými vstupními parametry) v recepturách vybraných betonů, resp. betonových výrobků v závodech prefabrikované výroby, tak může přispět k minimalizaci odpadu a napomoci k vytvoření cyklu, ve kterém se odpadní materiál z výroby vrací zpět do výrobního procesu.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen za finanční podpory MPO v rámci řešení projektu z programu Institucionální podpora VO.

Literatura

- [1] Škopán, M. Recyklace stavebních a demoličních odpadů ve světle nových právních předpisů. Portál Zi. 2022-01 [cit. 2025-09-10]. Dostupné na [Recyklace stavebních a demoličních odpadů ve světle nových právních předpisů | Z+i](#)
- [2] Škopán, M.. Jak se nová legislativa odrazila na recyklaci stavebních a demoličních odpadů v praxi. In Odpady 5/2021. s. 18–20. ISSN 1210-4922.
- [3] Poon, C. S., Shui, Z. H. & Lam, L., 2004. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. Construction and Building Materials.
- [4] Aйтсin, P.-C., 2005. Vysokohodnotný beton. Praha: Informační centrum ČKAIT.
- [5] Lidmila, M., Tesárek, P., Plachý, T., Rácová, Z., Padevěď, P., Nežerka, V., Zobal, O. Utilization of Recycled Fine-Ground Concrete from Railway Sleepers for Production of Cement-Based Binder. In: Petrenko, A. (eds.) Applied Mechanics and Materials. Durnten-Zurich: Trans Tech Publication Ltd., 2013, pp. 323 – 326.
- [6] Prošek, Z., Trejbal, J., Hrbek, V., Tesárek, P., 2019. Mechanická aktivace odpadního betonu: stanovení efektivity pro různé druhy odpadních betonů. TZB-info. [cit. 2025-09-10]. Dostupné na [Mechanická aktivace odpadního betonu: stanovení efektivity pro různé druhy odpadních betonů - TZB-info](#)
- [7] Prošek, Z. & kol. 2018. Srovnání vlivu mikromletého betonu a mramorové moučky na mechanické vlastnosti cementových past Waste Forum.
- [8] Šeps, K. & Broukalová, I., 2014. Properties of Cement Based Composite with Fine Ground Recycled Concrete. Advanced Materials Research, Issue 1000, pp. 110-113.
- [9] Topič, J., Prošek, Z., Trejbal, J., Karra'a, G., 2015. Shrinkage of the cement pastes with different amount of finely ground recycled concrete. International Journal of Advance Research in Science and Engineering, Issue 04(02), pp. 157-161.
- [10] Kim, Y. J. & Choi, Y. W., 2012. Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. Construction and Building Materials.