

Současné možnosti zvyšování využití stavebního a demoličního odpadu ve stavebnictví

Zdeněk PROŠEK^a, Tereza PAVLŮ^b, Milan RYDVAL^c, Jan VALENTIN^a, Martin LIDMILA^a, George KARRA´A^d, Jiří PODOLSKÝ^e, Jan FOLTÝN^f, Pavel TESÁREK^a

^a České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, e-mail: zdenek.prosek@fsv.cvut.cz

^b České vysoké učení technické v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, Třinecká 1024, 273 43 Buštěhrad

^c České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 160 00 Praha 6-Dejvice

^d Lavaris, s.r.o., Areál Šroubáren 43, 252 66 Libčice nad Vltavou

^e Moravostav Brno, a.s., Maříkova 1899/1, 621 00, Brno-Řečkovice

^f Tomáš STRAUB, s.r.o., Ostravská 1847, 748 01 Hlučín

Souhrn

Předložený článek je zaměřený na současné trendy ve stavebnictví, které jsou spojeny s využitím stavebního a demoličního odpadu, a to opětovně ve stavebnictví, jak v pozemním stavitelství, tak v dopravní infrastruktuře. V souladu s principy udržitelného rozvoje jsou hledány další moderní a perspektivní způsoby na efektivní využití stavebního a demoličního odpadu. Celosvětovou snahou je využít co největší množství odpadu a minimalizovat, v ideálním případě úplně zakázat skládkování. V článku jsou prezentovány nové možnosti s dalším potenciálem a jsou zde představeny příklady experimentálního výzkumu provedené na ČVUT v Praze v několika posledních letech. Konkrétně jsou představeny dílčí výsledky ze čtyř různých výzkumů.

Klíčová slova: stavební demoliční odpad, recyklace, pozemní stavby, dopravní infrastruktura.

Úvod

V současné době jsou hledány způsoby, jak efektivně využít recyklované materiály a druhotné suroviny jako náhrady přírodních materiálů. Velký potenciál má stavební demoliční odpad (SDO), a to ten, který nově vzniká, ale i ten doposud skládkovaný, který prozatím nenašel efektivní využití. Z pohledu dalšího využití je možné upravený stavební demoliční odpad aplikovat ve stavebnictví ve dvou základních oblastech, a to pozemním stavitelství a dopravní infrastruktuře. V obou případech je při nakládání s SDO komplikovaná legislativa a obecně převážně negativní zkušenosti s nesprávnou aplikací recyklátů v minulosti. Jestliže chceme v blízkém horizontu zvýšit množství opětovně využitého SDO, je nutné upravit současnou legislativu a představit nová řešení, která se budou na SDO dívat jiným pohledem. Ideálně tak, že již před demolicí budou provedeny kroky např. ve formě předdemoličního auditu, a na základě jeho výsledků budou hledány optimalizované postupy, jak SDO efektivně upravit nebo separovat a po následné úpravě opětovně využít v souladu s moderními trendy.

Pozemní stavitelství

Především v oblasti dalšího využití SDO ve stavebnictví je vhodné materiál rozdělit podle frakcí, resp. zrnitosti, a to na materiály frakce 0/4 a 4/16 mm.

Využití frakce 0/4 mm jako plniva a pojiva

Frakce 0/4, resp. 0/1 mm, je do jisté míry specifická z pohledu dalšího využití. V mnoha případech je chápána pouze jako odpad, který není možné dále použít při náhradě jemných frakcí kameniva v betonu. Hrubší frakce lze zpracovat ve formě recyklovaného kameniva, ale v případě jemné frakce recyklovaného SDO dosud neexistuje ideální řešení, které by umožnilo její využití v širším měřítku. Na druhou stranu se ukazuje v mnoha výzkumech, že se může jednat o materiál s vysokým potenciálem dalšího využití. Proces úpravy jemné frakce SDO, který by vedl k její implementaci, zcela závisí na konkrétní "úloze", jakou má materiál plnit, a může se značně měnit. Specifické je i to, že tato frakce vzniká i při úpravách stavebního demoličního odpadu, např. při úpravě a drcení recyklátu na kamenivo příslušné frakce pro použití v betonu.

Dle normy ČSN EN 206¹ je jemná frakce SDO brána jako inertní příměs, která se nepodílí na hydrataci cementu, a proto nekontaminované (hlínou nebo jinými materiály) materiály na bázi betonu nebo cihelného střeptu s maltou je možné primárně využít jako plnivo, resp. při úpravě zrnitosti pomocí vysokorychlostního mlýna na mikroplnivo². Jenže v případě recyklovaných materiálů na bázi betonu jej lze využít i ve formě pojiva (resp. částečné náhrady pojiva), protože stará cementová pasta obsahuje množství zrn, která ještě nejsou zhydratována³. Pomocí mletí nebo dalších úprav je možné v cementové pastě tato zrna odhalit a mohla by tudíž i znovu reagovat. Díky tomu by mohly být velmi jemné frakce recyklovaného betonu využity jako částečná náhrada běžného cementu. Navíc se ve staré cementové pastě nacházejí další sloučeniny, které je možné dále využít při hydratačních procesech v cementu díky specifickému chemickému a mineralogickému složení. Jedná se především o možnost vytvoření tzv. nukleačních center v průběhu hydratace portlandského cementu⁴.

Další výzkum ukázal, že proces hydratace v cementových kompozitech je možné ještě podpořit druhotnými surovinami, jako je například struska nebo popílek, kde dokonce nemusí být splněny podmínky normy ČSN EN 450-1⁵ pro použití popílku do betonu. Ve většině případů stačí úprava tvaru zrn a zrnitosti příměsí⁶. Další možností je využití "necementových" pojiv, např. při kombinaci strusky, popílku, sádrovce a vápna, případně i betonového recyklátu do tzv. geopolymérů, které jsou připravovány z hlinito-křemičitanových materiálů jejich geopolymérací v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku⁷. V posledních letech se množství běžně používaných substitucí za cement nezvyšuje, ale spíše stagnuje. V celosvětovém měřítku je v posledních letech využíváno jako pojivo v produkci betonu 7 hm. % vápence, 5 hm. % strusky, 4 hm. % popílku, 2 hm. % pucolánů a další materiály tvoří pouze do 1 hm. %⁸. Zbýlý materiál používaný jako pojivo je portlandský cement. Omezené množství využití náhrad za cement je způsobeno omezeným množstvím suplementů a jejich heterogenitou. Proto se hledají jiné možnosti náhrad, jako jsou kalcinované jíly nebo jemné frakce betonového recyklátu, u kterých nejsme limitováni množstvím materiálu. Jednou z možností je využití tzv. LC3. Jedná se o vápencový kalcinovaný hliněný cement, který je složen z 50 hm. % slínkem, 15 hm. % vápencem, 30 hm. % kalcinovaným jílem a 5 hm. % sádrovcem. Nevýhodou tohoto řešení je, že většina celosvětových zásob kalcinovaného jílu je v oblasti Číny, střední Afriky a jižní Ameriky, tzn. pro evropský trh nedostupná⁹.

Z uvedeného důvodu je pro evropský trh lepší možností využití jemné frakce betonového recyklátu, kde jsou známy možnosti náhrady až do 20 hm. % bez použití chemických přísad³ a v kombinaci s chemickými přísadami až do 50 hm. %¹⁰. Obecně je zásadní způsob úpravy recyklátu a jeho efektivní využití, resp. efektivně využít příslušný potenciál recyklátů (z hlediska jejich chemického a mineralogického složení). Mezi efektivní způsoby tzv. aktivace může patřit např. i vysokorychlostní mletí, které není energeticky náročné a lze jej tak použít pro efektivní zpracování betonového recyklátu, resp. jeho vybraných frakcí.

V rámci jednoho z experimentů byly zkoumány možné náhrady cementu dostupné na evropském trhu. Označení jednotlivých testovaných směsí je podle převládající složky náhrady portlandského cementu CEM I 42,5R Radotín v pojivu. Všechny testované suché směsi obsahovaly 13 hm. % pojiva (resp. cementu a náhrady cementu) a 87 hm. % plniva. Jako pojivo byla použita drcená vysokopecní struska z Kladna, vápenný hydrát Čertovy schody, fluidní popílek z Kladna a sto let starý recyklovaný beton z areálu Waltrovka upravený pomocí vysokorychlostního mletí. Jako lehčené kamenivo byla použita drcená vysokopecní struska frakce 0/4 a 4/8 mm v poměru 7:1 hm. dílů. Vodní součinitel pro všechny směsi byl 0,6 (voda/pojivo), složení je specifikováno v tabulce 1. Pro testování byly použity

vzorky krychlí o hraně 100 mm a vzorky 40×40×160 mm. Porovnání vybraných vlastností pro vzorky staré 28 dní je uvedeno v tabulce 2. Z ní je patrné, že při redukci, resp. přepočtu na "čistý" cement, je možné dosáhnout vhodných užitných vlastností cementových kompozitních materiálů. Při výzkumu nebyly záměrně použity chemické přísady a bylo použito vysoké množství náhrady, aby bylo možné ověřit potenciál náhražek cementu. Z pohledu dalších aplikací by mohly být uvedené směsi použité např. při výrobě vibrolisovaných prvků.

Tabulka 1: Složení pojiva v testovaných směsích [hm. %].

Složka / Označení	CEM	POP	STR	REC
CEM I 42,5R Radotín	13,0	6,0	6,0	5,2
Mikromletý betonový recyklát	0	2,0	2,0	6,5
Vysokopeční struska	0	1,7	3,5	1,0
Vápenný hydrát	0	0	0	0,3
Popílek	0	3,3	1,5	0

Tabulka 2: Porovnání vlastností pro vzorky staré 28 dní (včetně směrodatných odchylek).

Naměřené fyzikální vlastnosti / Označení	CEM	POP	STR	REC
Objemová hmotnost [kg/m ³] ČSN 73 1315	2114±13	2077±14	2042±10	1983±6
Pevnost v tlaku [MPa] EN 12390-3	22,6±0,6	19,9±1	14,3±0,7	14,8±0,3
Pevnost v tahu za ohybu [MPa] EN 1015-11	5,6±0,2	4,5±0,1	4,4±0,1	4,8±0,1
Dyn. modul pružnosti [GPa] ČSN 73 1372	24,1±0,1	20,2±0,5	19,2±0,5	15,9±0,2
Dyn. smykový modul [GPa] ČSN 73 1372	10,0±0,1	8,0±0,3	7,8±0,2	6,7±0,1

Využití frakce 4/16 mm jako plniva

Norma ČSN EN 206+A1¹ v současné době zavádí dva základní pojmy ohledně recyklovaného kameniva. Prvním druhem je kamenivo regenerované a druhým pak kamenivo recyklované. Regenerované kamenivo je získáváno vyplachováním jemných částic z čerstvého betonu. Takto získané kamenivo je ovšem možné použít pouze výrobcem nebo skupinou výrobců a nelze jej využít více než 5 % celkového množství kameniva. Při dávkách regenerovaného kameniva vyšších než 5 % je nutno toto kamenivo roztřídit na jemnou a hrubou frakci splňující požadavky ČSN EN 12620¹¹. Pro hrubé drcené recyklované kamenivo, v dávce vyšší než 5%, pak platí stejná pravidla, jako pro kamenivo recyklované. Norma ČSN EN 206¹ upravuje možnosti použití hrubého recyklovaného kameniva ($d > 4$ mm) v závislosti na expoziční třídě, druhu recyklovaného kameniva. Recyklované kamenivo druhu A musí být tvořeno z minimálně 90 % recyklovaného betonu, betonových výrobků, malty a betonových zdících prvků (kategorie Rc₉₀ dle ČSN EN 933-11¹²) nebo z 95 % recyklovaného betonu, nestmeleného kameniva a hydraulicky stmeleného kameniva (kategorie Rcu₉₅¹²) nebo méně než 10 % ostatních složek, jako jsou cihly, dlaždice, vápenopískové zdící prvky a neplovoucí provzdušněný beton (kategorie Rb₁₀¹²). Recyklované kamenivo typu B musí být tvořeno z minimálně 50 % recyklovaného betonu, betonových výrobků, malty a betonových zdících prvků (kategorie Rc₅₀¹²) nebo ze 70 % recyklovaného betonu, nestmeleného kameniva a hydraulicky stmeleného kameniva (kategorie Rcu₇₀¹²) nebo méně než 30 % ostatních složek, jako jsou cihly, dlaždice, vápenopískové zdící prvky a neplovoucí

provzdušněný beton (kategorie Rb₃₀¹²). Recyklované kamenivo druhu B se dle ČSN EN 206+A1¹ nesmí používat pro betony vyšších pevnostních tříd než C 30/37. Pro ostatní materiály, jako je asfalt, sklo, kovy, sádrová omítka aj., je u recyklovaného kameniva typu A i B stanoven obsah částic v řádech procent.

Maximální množství, které je možné použít pro betony do expoziční třídy X0, je 50 % hrubého recyklovaného kameniva druhu A i B. Do tříd XC1-C4, XF1, XA1 a XD1 je možné použít maximálně 30 % hrubého recyklovaného kameniva typu A a do tříd XC1 a XC2 je možné použít 20 % hrubého recyklovaného kameniva typu B. Z omezení této normy vyplývá, že z hlediska trvanlivosti je beton s recyklovaným kamenivem nejméně ohrožen karbonatací (třídy XC) a více pak působením mrazu (třídy XF) a dalších chemických látek (třídy XA). Z uvedených limitů vyplývá využití betonu s recyklovaným kamenivem pro základové konstrukce (třídy X0, XC1) a dále pro konstrukce v interiéru.

Norma ČSN EN 12620¹¹ dále ukládá postupy zkoušení recyklovaného kameniva, které je ve většině případů stejné jako pro přírodní kamenivo. Navíc se ověřuje složení recyklovaného kameniva, které je důležité pro zařazení do druhů kameniva¹². Mimo běžné zkoušky kameniva se dále ověřuje obsah vodou rozpustných síranů v recyklovaném kamenivu, posuzuje se vliv vodou rozpustných látek z recyklovaného kameniva na počáteční dobu tuhnutí cementové kaše a potenciál alkalicko-křemičité reakce. Norma dále stanovuje četnost ověřovacích zkoušek recyklovaného kameniva, které je četnější v porovnání s přírodním kamenivem. Norma ČSN EN 206¹ dále uvádí minimální objemové hmotnosti pro recyklované kamenivo do betonu, které je 2100 kg/m³ pro typ A a 1700 kg/m³ pro typ B. Objemová hmotnost recyklovaného betonového kameniva z českých recyklačních středisek výše uvedené limity většinou splňují. Maximální nasákavost kameniva není v této české verzi normy, na rozdíl od zahraničních, stanoven, avšak je třeba ji určit. V zahraničních normách se maximální povolená nasákavost pohybuje kolem 10 ± 2 %. Nasákavost betonového recyklovaného kameniva z českých recyklačních středisek se pro frakci 4/8 mm pohybuje mezi 6 a 12 % a pro 8/16 mm mezi 2 a 10 %¹³.

Recyklované betonové kamenivo je možné získat v různé kvalitě, která je většinou závislá na jeho složení. Za nejkvalitnější recyklované betonové kamenivo je považováno to, které vzniklo rozdrčením betonových fragmentů povětšinou z více-cyklové recyklace a obsahuje tak pouze přírodní kamenivo a cementový tmel. Složení a původ recyklovaného kameniva ovlivňuje jeho vlastnosti, jako jsou objemová hmotnost, nasákavost, mrazuvzdornost, odolnost proti otěru a drcení a další. V porovnání s přírodním kamenivem jsou vlastnosti recyklovaného kameniva horší, a to hlavně jeho nasákavost, která se podle složení pohybuje mezi 3 a 11 %¹⁴, některé zdroje uvádějí až 15% nasákavost recyklovaného kameniva¹⁵. Důvodem pro vyšší nasákavost je vyšší pórovitost kameniva způsobená především cementovým tmelem. Recyklované cihelné kamenivo má pak nižší objemovou hmotnost než recyklované betonové kamenivo, avšak většinou splňuje požadavek normy kameniva typu B. Nasákavost recyklovaného cihelného kameniva je pak ještě vyšší v porovnání s recyklovaným betonovým kamenivem, a to od 10 do 20 %¹⁶⁻¹⁹.

Zvýšená nasákavost betonu s recyklovaným kamenivem, která je ve srovnání s běžným betonem o 20 až 100 % vyšší²⁰, negativně ovlivňuje trvanlivost betonu, a to především mrazuvzdornost a odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL). Proto je výhodnější používat beton s recyklovaným kamenivem v konstrukcích, které nejsou příliš namáhány klimatickými vlivy, tj. v zemině a interiéru. Další výhodou pro použití betonu s recyklovaným kamenivem do základových konstrukcí je možnost použití betonů s nižší pevností, kde dochází k nižším poklesům mechanických a deformačních vlastností ve srovnání s běžným betonem²⁰.

V rámci jednoho z aktuálních výzkumů realizovaných na ČVUT v Praze byla optimalizována receptura s plnou náhradou hrubého přírodního kameniva (PK) kamenivem recyklovaným z betonového recyklátu (RBK) a s různým množstvím cementu a vodním součinitelem, do kterého byla započtena voda pro přednasáknutí kameniva. Celkem bylo navrženo sedm betonových směsí pevnostních tříd C16/20 a C25/30. Pro každou pevnostní třídu byla navržena referenční receptura bez použití recyklovaného kameniva. Pro třídu C16/20 pak byly navrženy tři receptury s náhradou 30, 50 a 100 % hrubého kameniva kamenivem recyklovaným a pro třídu C25/30 dvě receptury s náhradou 30 a 100 % přírodního kameniva betonovým recyklátem. Ve všech směsích byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R a pro

snadné porovnání měly všechny směsi stejný efektivní vodní součinitel a obsahovaly stejný přírodní písek. Navržené receptury jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Receptury betonů s částečnou nebo plnou náhradou přírodního kameniva (PK) hrubým recyklovaným betonovým kamenivem (RBK).

Složení/ vzorek	REF 16/20	REC 16/20 C30	REC 16/20 C50	REC 16/20 C100	REF 25/30	REC 25/30 C30	REC 25/30 C100
Cement	260	260	260	260	300	300	300
Voda	169	184	206	211	165	183	208
PK (0/4 mm)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
PK (4/16)	100 %	70 %	50 %	0 %	100 %	70 %	0 %
RBK (0/4 mm)	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
RBK (4/16 mm)	0 %	30 %	50 %	100 %	0 %	30 %	100 %
Vodní součinitel	0,65	0,71	0,79	0,81	0,55	0,65	0,69

Tabulka 4: Shrnutí fyzikálních a mechanických vlastností pro zkoušené materiály.

Směs	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Modul pružnosti v tlaku [GPa]	Třída betonu
REF 16	2262±9,95	31,43±0,54	4,41±0,38	25,7±0,21	C25/30
REC 16 C30	2193±10,96	32,36±0,57	5,63±0,33	28,9±1,88	C25/30
REC 16 C50	2208±7,28	33,50±0,31	4,98±0,16	25,4±0,50	C25/30
REC 16 C100	2057±13,27	22,25±0,84	3,28±0,41	18,0±0,24	C16/20
REF 25	2256±6,71	31,23±0,74	4,41±0,38	25,7±0,21	C25/30
REC 25 C30	2193±10,96	32,36±0,57	5,37±0,38	28,5±0,51	C25/30
REC 25 C100	2106±6,95	31,99±0,37	4,03±0,34	24,5±4,83	C25/30

Směsi s 30% a 50% náhradou hrubé frakce byly navrženy tak, aby odpovídaly požadavkům norem^{1, 11}. U ostatních směsí byl nahrazen vyšší poměr hrubého přírodního kameniva, a to až 100 %. Z výsledků pilotních mechanických zkoušek, jejichž průměrné výsledky jsou uvedené v tabulce 4, vyplývá, že při náhradě do 50 % recyklovaným kamenivem nedošlo u betonu třídy C16/20 k výraznějšímu poklesu mechanických parametrů. Při náhradě 100 % kameniva splňuje receptura REC 16 C100 pevnostní třídu betonu C16/20 i přes pokles v pevnosti v tlaku. Pro recepturu betonu třídy C25/30 nedošlo k zásadnímu zhoršení mechanických parametrů při náhradě přírodního hrubého kameniva kamenivem recyklovaným. Vyšší pokles je patrný zejména u modulu pružnosti. Z uvedených výsledků lze odvodit možnost využití vyšších náhrad recyklovaného kameniva (vyšších, než stanovuje ČSN EN 206+A1¹) zejména pro betony nižších pevnostních tříd, které jsou používány pro základové konstrukce, výplňové betony, konstrukce bez statické funkce aj. U betonu vyšších pevnostních tříd používaných pro konstrukce se statickou

funkcí je kromě pevnosti betonu v tlaku vždy vhodné stanovit i modul pružnosti betonu, který ovlivňuje deformační parametry a chování prvku.

Dopravní infrastruktura

Využití SDO v železničním stavitelství

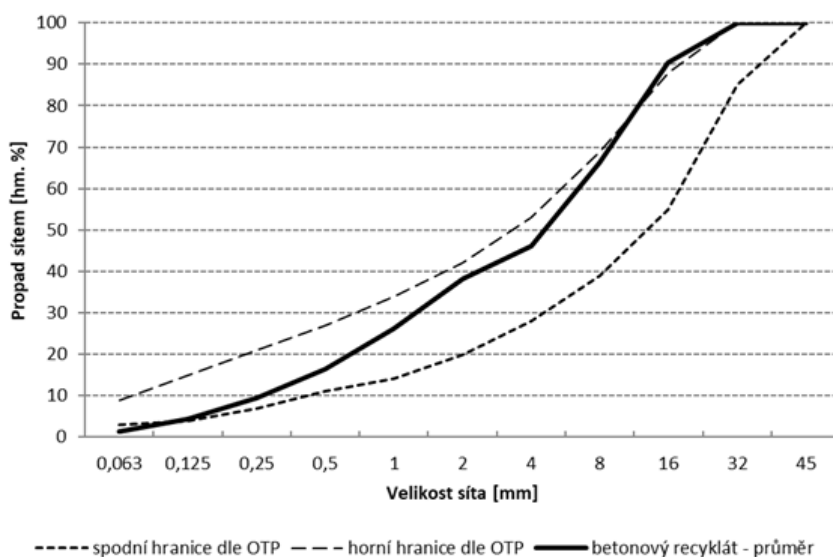
V oblasti železničního stavitelství jsou recyklované materiály používány ve velkých objemech již několik desítek let. Hlavní materiálem určeným k recyklaci je "staré" kolejové lože tvořené znečištěným drceným kamenivem frakce 32/63 mm. Pro recyklaci kolejového lože je zavedena základní předpisová základna, která podrobně specifikuje jak technické, tak ekologické požadavky. V obecné rovině se v praxi uplatňují dva postupy recyklace nazývané "výroba recyklovaného kameniva frakce 32/63 mm pro kolejové lože" a "výroba recyklované šterkodrti" frakce 0/32 mm pro použití v konstrukčních a podkladních vrstvách. Využití recyklátu ze "starého kolejového lože" do konstrukčních vrstev z pohledu legislativy je řešeno předpisem ČD S4 z roku 1998²¹. Obecně předpis S4, mimo výše uvedenou problematiku recyklace "starého" kolejového lože, umožňuje využití druhotných materiálů, tedy teoreticky i SDO, do zemního tělesa. Podrobněji předpis S4 definuje použití recyklovaného kameniva do zásypů odvodňovacích zařízení, výplní gabionů a minerálních směsí (jako dílčí složku)²².

Jednou z možností je SDO vzniklý z betonových pražců. Betonové pražce se na železničních tratích v Československu začaly používat v 50. letech 20. století. V současné době tvoří převážnou většinu pražců, které jsou uloženy v kolejích spravovaných Správou železnic, s.o. (SŽ). Jejich přibližný počet se pohybuje v rozmezí 15 až 20 milionů kusů. Již v současné době je třeba zabývat se otázkou, jak naložit s dále nepoužitelnými pražci. Jednou z možností je jejich drcení na betonový recyklát, který by mohl být použit jako náhrada přírodního kameniva (např. šterkodrti) v konstrukci pražcového podloží. Recyklát vzniklý drcením výhradně železničních pražců z vysokopevnostního betonu se vyznačuje oproti ostatním recyklátům typu SDO vysokou kvalitou a homogenitou. V současné době se vyřazené betonové pražce používají do kolejí nižších řádů nebo jako konstrukční prvky ochranných a záchytných zdí²³.

V rámci výzkumu na Katedře železničních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze byly provedeny analýzy pro určení vhodnosti použití betonového recyklátu z pražců v pražcovém podloží. Požadavky na vlastnosti betonového recyklátu byly ztotožněny s požadavky uvedenými v předpisu OTP pro frakce 0/32 mm²⁴. Z tohoto rozsáhlého předpisu byly pro porovnání vlastností betonového recyklátu a šterkodrtě vybrány tyto důležité vlastnosti: zrnitost dle ČSN EN 933-1²⁵, otlukovost LA dle ČSN EN 1097-2²⁶, mrazuvzdornost dle ČSN EN 1367-1²⁷ a objemová hmotnost dle ČSN EN 13286-2²⁸.

V rámci zkoušky zrnitosti byla stanovena průměrná křivka zrnitosti. Výsledky jsou graficky uvedeny na obrázku 1. Vyrobený betonový recyklát částečně nevyhověl požadavkům předpisu OTP. Zkouška otlukovosti LA byla provedena na třech vzorcích betonového recyklátu frakce 8/32 mm o hmotnosti 5000 g. Pro zkoušku byla použita sada 11 koulí a počet otáček bubnu byl 500 ot/min. Jednotlivé vzorky dosáhly součinitele LA = 22, 24 a 23. Vyrobený betonový recyklát tak vyhověl požadavkům předpisu OTP na otlukovost LA (max. 50). Zkouška mrazuvzdornosti byla provedena na betonovém recyklátu frakce 8/16 mm o hmotnosti 6000 g. Vzorek byl rozdělen na tři dílčí vzorky s hmotností 2000 g. Celkem bylo provedeno 10 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Nejnižší teplota při zmrazovacím cyklu byla minus 20 °C. Po provedení zmrazovacích cyklů byl stanoven průměrný úbytek hmotnosti dílčích vzorků na síť 4 mm. Průměrný úbytek hmotnosti dosáhl hodnoty 2,91 %. Vyrobený betonový recyklát tak vyhověl požadavkům předpisu OTP na mrazuvzdornost, který určuje limitní hodnotu 4 %. Objemová hmotnost betonového recyklátu frakce 0/32 mm byla stanovena metodou Proctorovy modifikované zkoušky. Byl použit hmoždíř typu B a pěch o hmotnosti 4,5 kg. Byla dosažena maximální suchá objemová hmotnost betonového recyklátu 1870 kg/m³ při optimální vlhkosti 8,5 hm. %.

Na laboratorní zkoušky navázalo experimentální měření v měřítku 1:1 se zaměřením na stanovení optimální vlhkosti konstrukční vrstvy z betonového recyklátu ve vztahu k únosnosti povrchu konstrukční vrstvy, vývoj nárůstu únosnosti v čase v důsledku sekundárního působení cementové složky recyklátu a chování konstrukce během cyklického zatěžování²⁹.



Obrázek 1: Průměrná křivka zrnitosti vyrobeného betonového recyklátu frakce 0/32.

Z provedeného experimentu bylo zjištěno, že po přimíchání záměsové vody do směsi betonového granulátu frakce 0/32 mm dochází ke spuštění sekundární reakce cementové složky recyklátu, která se projevuje zvyšováním únosnosti konstrukční vrstvy v čase, přičemž k nejvýraznějšímu nárůstu dochází během prvních 24 hodin a po 7 dnech je již únosnost takřka ustálená. Nejvyšší únosnosti konstrukční vrstvy z betonového recyklátu bylo dosaženo při vlhkosti směsi 8,4 %, což odpovídá optimální vlhkosti recyklátu pro dosažení jeho maximální objemové hmotnosti. U betonového granulátu s vlhkostí 8,4 % byl zjištěn nárůst statického modulu přetvárnosti povrchu konstrukční vrstvy během 7 dní o takřka 200 %, přičemž bylo dosaženo konečné hodnoty statického modulu přetvárnosti více než 100 MPa. Konstrukce s konstrukční vrstvou z pražcového recyklátu frakce 0/32 mm o tloušťce 15 cm v průběhu cyklického zatěžování v rozsahu 250 000 zatěžovacích cyklů prokázala velmi dobré schopnosti odolávat tomuto zatížení, povrch konstrukční vrstvy byl kompaktní bez zjevných trhlin či jiných závad. Na konstrukční vrstvě uložené na zemní pláni o únosnosti cca 13 MPa bylo po 10 dnech zrání a konsolidace dosaženo statického modulu deformace více než 40 MPa, což vyhovuje aktuálnímu požadavku předpisu SŽ S4 Železniční spodek pro koleje s rychlostí do 120 km/h a provozním zatížením do 2 mil. hrt/rok. Po provedení cyklického zatěžování v rozsahu 250 000 zatěžovacích cyklů byl zaznamenán trvalý pokles pražce 4,3 mm a pružný pokles pražce při zatížení od 0 do 42 kN 0,54 mm.

Využití SDO v silničním stavitelství

V silničním stavitelství využití SDO obecně upravují technické podmínky TP 210. Minerální odpad z demolic či dekonstrukcí staveb se obecně může využívat do zemního tělesa silniční stavby, podloží vozovek a konstrukčních vrstev pozemních komunikací, dopravních a manipulačních ploch. Pokud se jedná o využití jako zrnitého materiálu nebo náhrady přírodního kameniva v podobě recyklovaného kameniva, tak platí soubor několika norem, které musí SDO splnit. Jedná se o harmonizované normy ČSN EN 13 242+A1, ČSN EN 13 043 a ČSN EN 12 620, v případě, kdy SDO je využit jako náhrada zeminy v podloží silniční stavby nebo při výstavbě zemního tělesa, tak musí tento materiál splnit ČSN 73 6133. Obecně tedy z uvedeného plyne, že využití stavebně-demoličního odpadu je možné pouze tehdy, pokud dojde k přeměně tohoto materiálu na recyklát, v případě uplatnění do konstrukčních vrstev potom musí být odpad přeměněn na recyklované kamenivo a musí být splněny požadavky, které se pro recyklované kamenivo standardně předepisují. Použití či umístění SDO v podobě odpadu silniční stavební praxe v podstatě neakceptuje. Technické podmínky TP 210 v tomto ohledu slouží pro stanovení požadavků na využívání recyklovaného stavebního materiálu (RSM), což lze chápat jako předstupeň recyklovaného kameniva. RSM je přitom definovaný jako materiálový výstup ze zařízení k využívání a úpravě SDO, kategorie ostatní odpad, nebo odpadů podobných SDO, spočívající ve změně zrnitosti a jeho roztřídění na velikostní frakce v zařízeních k tomu určených. Zde se tedy jediným

požadavkem stává zrnitost materiálu. RSM se dle TP 210 rozlišuje na recyklát z betonu, recyklát ze zdiva, recyklát směsný, recyklát z vozovek, recyklát asfaltový a jako specifická kategorie pak slouží ještě R-materiál (tabulka 5). Ten má v podstatě požadavky nejvíce propracované. Pro R-materiál, který představuje upravený asfaltový recyklát, totiž mnoho let platí neharmonizovaná ČSN EN 13108-8, která stanovuje jednotná doporučující technická pravidla v rámci Evropy, jak s tímto materiálem pracovat.

V České republice s ohledem k rostoucí snaze posledních let R-materiál využívat ve zvýšené míře jako náhradu přírodního kameniva v asfaltových směsích a díky zavedení vyhlášky č. 130/2019 byla na přelomu let 2020/21 implementována nová technická norma ČSN 73 6141, která zpřesňuje požadavky, jak s R-materiálem nakládat a jak jej správně využívat v asfaltových směsích, aby bylo možné maximalizovat jeho využití a byly přitom garantovány výkonové požadavky vlastní asfaltové směsi. Tedy zjednodušeně řečeno, je-li to výrobovými normami pro asfaltové směsi umožněno, tak u výsledného výrobku je jedno, zda obsahuje jen přírodní kamenivo nebo 30 % hm. či 60 % hm. R-materiálu, vždy musí být splněny a garantovány stejné vlastnosti směsi a stejná kvalita. Environmentální parametry jsou přitom hlídány uvedenou vyhláškou, která stanoví, kdy může asfaltový recyklát (přesněji znovuzískaná asfaltová směs) být klasifikován jako vedlejší produkt, aniž by vstupoval do odpadového režimu, kdy lze u odpadu pro takový materiál docílit stavu konce odpadu a kdy naopak je nezbytné jej vést jako ostatní nebo dokonce nebezpečný odpad. Nicméně i v těchto případech existují možnosti jeho využití. Pokud u odpadu nejsou překročeny meze sumy sledovaných PAU, potom lze odpad zapracovat do asfaltové směsi a environmentální parametry je třeba ověřit u vyrobené směsi.

Druhou možností, kdy víme, že v konstrukci vozovky určené k rekonstrukci je nebezpečný materiál (ve smyslu koncentrace PAU), lze v souladu s technickými podmínkami TP 150 využít technologii recyklace za studena na místě, kdy se materiál recyklérem (upravená zemní fréza) smíchá s asfaltovou emulzí či zpěněným asfaltem a obalením zrn nebezpečného materiálu asfaltovým filmem dojde k pasivaci účinku PAU z hlediska jejich potenciálního uvolnění do životního prostředí. Technologie recyklace za studena se přitom v ČR využívá úspěšně od konce 90. let, protože v rámci silniční sítě zhruba ve 30 % všech vozovek byla v minulosti použita i dehtová pojiva. Dehet je podobnou látkou, která se na rozdíl od ropného asfaltu vyznačuje mnohanásobně vyššími koncentracemi sledovaných PAU. Pokud je v asfaltových vrstvách použit či se používá ropný asfalt, lze ve vzorku takového kompozitu jen stěží překročit hranici 25 mg/kg sušiny pro 16 sledovaných PAU.

V oblasti uplatňování asfaltového recyklátu (přesněji R-materiálu) je dnes snahou docílit postupného navýšení přípustného podílu tohoto materiálu v asfaltové směsi. Standardně výrobové normy jako ČSN 73 6121 připouštějí v závislosti na typu asfaltové směsi 15 – 50 % využití R-materiálu. Jsou samozřejmě některé typy směsí, kde to není umožněno, protože přetříděním a předrcením asfaltového recyklátu není možné docílit takové homogenity výsledného materiálu, který by splnil náročné požadavky směsi. To se týká například mastixových koberců nebo jemnozrnných asfaltových směsí. Cílem připravované revize uvedené normy je přitom tyto meze zvýšit na 30 – 70 % R-materiálu, přičemž tento materiál v asfaltové směsi potom nenahrazuje jen kamenivo, ale i asfaltové pojivo. To je jedna z předností tohoto typu stavebního recyklátu – umožňuje uplatnit tzv. upcycling, kdy se využívá nejen minerální složka, ale původní pojivo se opětovně reaktivuje jako pojivo.

Využití recyklátu z betonu je z hlediska uplatnění v cementobetonovém (CB) krytu vozovky omezeno pouze na zdroj, který pochází z demolic původní betonové vozovky. V souladu s ČSN 73 6123-1 v současnosti nelze použít betonový recyklát z jiného typu konstrukcí. Navíc musí recyklát s CB krytu splnit technické požadavky vymezené přílohou C normy, kde se kromě jiného stanoví klasifikace hrubých zrn (R_{c90}), maximální obsah jemných částic ($f_{1,5}$) a bezpečnost z hlediska alkalicko-křemičité reakce (recyklát nesmí obsahovat reaktivní kamenivo a musí být vyvážen obsah alkálií v nově vyráběném betonu). Pokud k využití recyklátu z betonu dochází, potom se uplatní ve spodních vrstvách CB krytu, a to zpravidla do množství 30 % hm. Pro horní vrstvu, která dle současné zavedené praxe je navrhována jako vymývaný (vymetáný) beton momentálně použití recyklovaného kameniva není možné. Reálné zkušenosti však ukazují, že míra využití betonového recyklátu je u realizovaných staveb menší. Při modernizaci dálnice D1 docházelo k uplatnění betonového recyklátu v značně omezeném rozsahu. Materiál vzniklý vybouráním původních betonových desek byl po předrcení využíván v rámci nestmelených vrstev nebo při rozšiřování zemního tělesa dálnice a jako recyklované kamenivo.

Tabulka 5: Doporučená užití RSM v silničních stavbách (dle TP 210).

Typ RSM	Použití v silniční stavbě									
	AV	CB	Nestmelené podkladní vrstvy				Stmelené podkladní vrstvy	Prolévané podkladní vrstvy		Podloží, zemní těleso ¹⁾
			MZK	ŠD _A	ŠD _B	MZ		kostra	výplň	
Recyklát z betonu	ano	p / ne	ano	ano	ano	p / ano	ano	p / ano		
Recyklát ze zdiva	ne	ne	ne	p / ne	ano	p / ano	ano	p / ne	p / ano	ano
Recyklát směsný	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne	ano	ano
Recyklát z vozovek	ano	p / ano	ano	ano	ano	p / ano	ano	p / ano		
Recyklát asfaltový	ano	ne	p / ano	ano	ano	p / ne	ano	p / ne		
Vysvětlivky: p: podmíněčně použitelný (omezené např. z technologických, ekonomických nebo environmentálních důvodů) AV: asfaltové vrstvy vozovek pozemních komunikací; CB: cementobetonové kryty vozovek pozemních komunikací. ¹⁾ Zrnitý materiál do podloží vozovek, vrstevnatých násypů (ztužující vrstva), případně nezpevněných krajnic vozovky pozemních komunikací										

Z hlediska podkladních vrstev vozovek je betonový recyklát efektivně využitelný ve směších stmelených hydraulickými pojivy a při vhodné zrnitosti bude dobře sloužit jako alternativa štěrkodrti. V těchto případech může docházet k velmi dobré náhradě přírodního kameniva. Náročnější bývá jeho uplatnění v technologii mechanicky zpevněného kameniva, kde jsou dané přísnější požadavky na zrnitost a současně by mělo být omezeno i drcení větších zrn. Betonový recyklát je uplatnitelný i pro některé typy asfaltových směsí. Pro tyto účely se ale fakticky nevyužívá, protože silniční stavitelství má značné přebytky asfaltového recyklátu a není zde proto silná poptávka po jiném typu recyklovaného kameniva.

Z pohledu silničního stavitelství specifickým typem jsou recykláty ze zdiva a směsné recykláty SDO, které vznikají jako vícesložkové. Pro klasické konstrukce pozemních komunikací (dálnice, silnice I. – III. třídy) se buď nevyužívají vůbec, nebo velmi sporadicky. Jedním z důvodů, především u konstrukčních vrstev, je jejich zhoršená odolnost proti namrzavosti, která je dána přítomností cihel nebo plynosilikátů. Konstrukce vozovky vždy bude vystavena účinkům vody a v zimním období potom kombinovanému účinku vody a mrazu. Tato skutečnost při přirozeně cyklickém působení, kterému nelze nijak efektivně zabránit, vede k postupnému rozpadu cihelných částic, což ohrožuje následně soudržnost celé konstrukční vrstvy. Při teoretickém využití v asfaltové směsi potom cihelné či plynosilikátové částice nemají dostatečné parametry odolnosti proti otluku a současně díky své struktuře nasákají více asfaltového pojiva. Z výše uvedených důvodů je tak možné tento materiál využít: (a) jako podkladní vrstvy z hlediska zatížení nevýznamných dopravních ploch, (b) jako materiál pro zemní tělesa, kde může tvořit například jádro násypů – zejména směsný recyklát je využitelný v aktivní zóně pozemní komunikace jako náhrada nevhodných zemin či jako materiál pro mechanickou úpravu méně vhodné zeminy, nebo (c) jako materiál, který bude vhodně uplatněn pro hydraulicky stmelené směsi, jež se využijí u vozovek nižších kategorií.

Závěry

V rámci projektu TA ČR program Prostředí pro život č. SS03010302 s názvem "Vývoj efektivních nástrojů pro minimalizaci vzniku stavebního a demoličního odpadu, jeho monitoring a opětovné využití" budou hledány vhodné nástroje, které umožní efektivní využití SDO. Z přehledu použitého v článku vyplývá, že je nutné a vhodné modifikovat a upravit současnou legislativu, aby byly vhodné nástroje efektivně využity a již před vlastním provedením demolice bylo možné efektivně rozhodnout o způsobu využití recyklátu, resp. recyklátů, které konkrétní objekt "může" vygenerovat. Zároveň je nutné následně efektivně využít současné technologie nebo najít další nové pro efektivní zpracování SDO a přeměnit ho na surovinu.

Na ČVUT v Praze jsou vyvíjeny nové metody a přístupy k opětovnému využití SDO ve stavebnictví, několik příkladů je součástí článku. Ve většině případů se jedná o řešení, která jsou dále zdokonalována s ohledem na efektivní využití upraveného recyklátu. Abychom mohli aplikovat laboratorně ověřené zkušenosti v praxi, musíme podrobně znát původ recyklovatelných zdrojů. Právě původ odpadu je parametr, který výrazně ztěžuje další postup recyklace a v případě výkupu SDO z různých zdrojů je využitelnost takového odpadu výrazně omezená. Abychom zefektivnili využití SDO, je nutné zavádět metodiku, která bude odpad vnímat jako zdroj.

Poděkování

Tento příspěvek byl připraven díky podpoře TA ČR program Prostředí pro život č. SS03010302 s názvem "Vývoj efektivních nástrojů pro minimalizaci vzniku stavebního a demoličního odpadu, jeho monitoring a opětovné využití". Podrobnější informace k projektu jsou dostupné na adrese <https://decompose.fsv.cvut.cz/>.

Literatura

1. ČSN EN 206+A1: *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda* (duben 2018).
2. Topič J., Prošek Z.: *Acta Polytech.* **57**, 49 (2017).
3. Prošek Z., Trejbal J., Nežerka V., Goliáš V., Faltus M., Tesárek P.: *Resour., Conserv. Recycl.* **155**, 104640 (2020)
4. Prošek Z., Nežerka V., Hlůžek R., Trejbal J., Tesárek P., Karra'a G.: *Constr. Build. Mater.* **201**, 702 (2019).
5. ČSN EN 480-1: *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 1: Referenční beton a referenční malta pro zkoušen* (duben 2015).
6. Sičáková A., Špak M.: *Materials* **12**, 3421 (2019).
7. Ma C. K., Awang A. Z., Omar W.: *Constr. Build. Mater.* **1486**, 90 (2018).
8. Juenger M. C., Snellings R., Bernal S. A.: *Cem. Concr. Res.* **122**, 257 (2019).
9. Dhandapani Y., Sakthivel T., Santhanam M., Gettu R., Pillai R. G.: *Cem. Concr. Res.* **107**, 136 (2018).
10. Dureje J., Prošek Z.: *Proceedings of NMM 2019 Nano & Macro Mechanics* (Padevět P.), str. 19. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, Praha 2020.
11. ČSN EN 12620+A1: *Kamenivo do betonu* (prosinec 2008).
12. ČSN EN 933-11: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva* (říjen 2009).
13. Pavlů T., Šefflová M.: *Proceedings of Recycling 2014* (Škopán M.), str. 11. VUT Brno, Brno 2014.
14. Katz A.: *Cem. Concr. Res.* **33**, 703 (2003).
15. Debieb F., Kenai S.: *Constr. Build. Mater.* **22**, 886 (2008).
16. Cachim P.B.: *Constr. Build. Mater.* **23**, 1292 (2009).
17. Yang J., Du Q., Bao Y.: *Constr. Build. Mater.* **25**, 1935 (2011).

18. Uddin M. T., Mahmood A. H., Kamal M. R. I., Yashin S. M., Zihan Z. U. A.: Constr. Build. Mater. **134**, 713 (2017).
19. Pavlů T., Šefflová M.: *Proceedings of 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis* (Polach P.), str. 411. Czech Society for Mechanics, Praha 2014.
20. Pavlů T.: *Disertační práce*. ČVUT v Praze, Praha 2015.
21. Předpis České dráhy S4 *Železniční spodek*. č.j. 60 941/97-S13 (červenec 1998).
22. Předpis Správa železnic S4 *Železniční spodek*. č.j. 76 496/2020-SŽ-GŘ-O13 (leden 2021).
23. Šablatura J.: *Bakalářská práce*. ČVUT v Praze, Praha 2010.
24. OTP 25 640/06- OP *Obecné technické podmínky pro štěrkopísek, štěrkodrt' a recyklovanou štěrkodrt' pro konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku* (2006).
25. ČSN EN 933-1: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor* (červenec 2012).
26. ČSN EN 1097-2: *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení* (duben 2021).
27. ČSN EN 1367-1: *Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování* (prosinec 2007).
28. ČSN EN 13286-2: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška* (duben 2011).
29. Šablatura J.: *Diplomová práce*. ČVUT v Praze, Praha 2012.

Current possibilities of increasing the use of construction and demolition waste in construction

Zdeněk PROŠEK^a, Tereza PAVLŮ^b, Milan RYDVAL^c, Jan VALENTIN^a, Martin LIDMILA^a, George KARRA´A^d, Jiří PODOLSKÝ^e, Jan FOLTÝN^f, Pavel TESÁREK^a

^a České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Czech Republic;

^b České vysoké učení technické v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, Třínečká 1024, 273 43 Buštěhrad, Czech Republic;

^c České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 160 00 Praha 6-Dejvice, Czech Republic;

^d Lavaris, s.r.o., Areál Šroubáren 43, 252 66 Libčice nad Vltavou, Czech Republic;

^e Moravostav Brno, a.s., Maříkova 1899/1, 621 00, Brno-Řečkovice, Czech Republic;

^f Tomáš STRAUB, s.r.o., Ostravská 1847, 748 01 Hlučín, Czech Republic

Summary

The presented article is focused on current trends in construction, which are associated with the use of construction and demolition waste, again in construction, both in building construction and in transport infrastructure. In accordance with the principles of sustainable development, other modern and promising ways are being sought for the efficient use of construction and demolition waste. The worldwide effort is to use as much waste as possible and to minimize, ideally ban landfilling altogether. The article presents new possibilities with further potential and presents examples of experimental research conducted at the Czech Technical University in Prague in the last few years. Specifically, partial results from four different studies are presented.

Keywords: construction demolition waste, recycling, building constructions, transport infrastructure.