

VÝROBA BETONU S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM V PRAXI

Zdeněk Hlavsa, *

Department of Concrete and Masonry Structures, Faculty of Civil Engineering,
Czech Technical University in Prague, Thakurova 7/2077, 166 29 Prague 6, Czech Republic.
zdenek.hlavsa@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek se zabývá výrobou betonu z recyklovaného kameniva v průmyslové výrobě. V první části článek uvádí data o produkci stavebního a demoličního odpadu v ČR, důvody pro jeho recyklaci a využití jako recyklovaného kameniva do betonu. Dále prezentuje praktické zkušenosti s výrobou směsného recyklovaného kameniva, upozorňuje na problematiku pasáže v procesu výroby a shrnuje podmínky pro použití recyklovaného kameniva v betonu podle platných norem. V druhé části článku jsou prezentovány vlastnosti betonu z recyklovaného kameniva, které jsou nejčastěji zpochybňovány investory a projektanty, uvádí výsledky zkoušek provedených během vývoje a následně každodenní výroby. V neposlední řadě analyzuje dopady těchto vlastností na praktické využití ve stavební výrobě. V závěru článek navrhuje možné úpravy předpisů pro širší uplatnění recyklovaného kameniva v betonu a směr dalšího vývoje pro lepší porozumění limitům tohoto materiálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

beton • recyklované kamenivo • stavební a demoliční odpad • recyklace • vlastnosti betonu

ABSTRACT

The paper deals with the topic of the production of recycled aggregate concrete in an industrial environment. The first part of the paper presents data about the production of construction and demolition waste in the Czech Republic, arguments for recycling and production of recycled aggregate for its use in the concrete industry. The paper also presents practical experience with the production of mixed recycled aggregate at the demolition site, points out problematic aspects in the production process and summarizes conditions for the use of recycled aggregate in the concrete according to valid standards. The second part of the paper presents results of tests conducted during the development and the results of a daily production. The properties which are most commonly questioned by developers and designers are discussed. The paper presents a discussion over the impact of those properties for practical use in the construction industry and a conclusion with the proposals of possible changes of the valid standards for the wider use of recycled aggregate in concrete and the direction of the next research for a better understanding of the limits of this material.

KEYWORDS

concrete • recycled aggregate • construction and demolition waste • recycling • properties of concrete

* Supervisor: prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc.

1. ÚVOD

Využití recyklovaného kameniva do betonu je v posledních letech velmi diskutované téma. Problematikou se zabývá mnoho vědeckých prací a v některých západních zemích je již beton s recyklovaným kamenivem v běžném sortimentu produktů betonáren. Nyní se tato technologie začíná dostávat i do průmyslové výroby betonu v Česku. Jedná se o další přirozený krok ve vývoji betonářského průmyslu, přičemž k tomuto vývoji přispívá několik aspektů. Hlavním motivem je vyčerpávání stávajících ložisek přírodního kamene, jejichž zásoby se rapidně snižují a v následujících letech by mohlo dojít k uzavření až poloviny kamenolomů a pískoven v ČR. Současně zde není ani pozitivní výhled do budoucna, jelikož povolovací proces pro otevření nového nebo rozšíření stávajícího ložiska může trvat i přes deset let. Dále je zde velké množství stavebního a demoličního odpadu (SDO), které je produkováno každý rok a zaujímá velké procento z celkového množství odpadu vyprodukovaného lidskou činností. Podmínky pro ukládání SDO na skládky se na základě nové legislativy zpřísnují a stavební firmy musí hledat nové způsoby, jak se tohoto odpadu efektivně zbavit. V neposlední řadě je zde zvyšující se důraz na udržitelnou výstavbu. Investoři stále častěji vyžadují výstavbu nových budov s co nejlepším hodnocením v certifikaci dokládající ekologickou výstavbu a využití recyklovaných materiálů je jeden ze způsobů, jak toto hodnocení zlepšit.

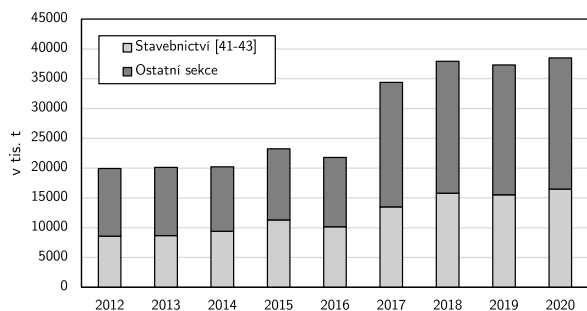
Pro úspěšné uplatnění recyklovaného kameniva v betonu v průmyslové výrobě je nutné vedle fungující technologie pro výrobu betonu zvládnout i technologii výroby samotného recyklovaného kameniva. K této problematice se pojí i otázky logistiky zásobování a s tím spojené procesy.

2. STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD, VÝROBA RECYKLOVANÉHO KAMENIVA DO BETONU

2.1. Stavební a demoliční odpad

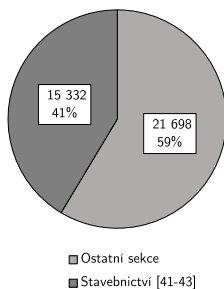
Každoročně se v České republice, a i jiných evropských státech, vyprodukuje velké množství odpadu. Obrázek 1 znázorňuje množství vyprodukovaného odpadu mezi lety 2012 až 2020 v ČR. Skokový nárůst mezi lety 2016 a 2017 je způsobený změnou metodiky Českého statistického úřadu ve sbírání dat, která je nyní přesnější. Lze předpokládat, že množství odpadu vyprodukovaného před rokem 2017 by bylo taktéž vyšší za předpokladu použití přesnějšího sberu dat.

V posledních několika letech bylo v České republice vyprodukováno přes 35 mil. tun odpadu z toho největším producentem je sekce stavebnictví do které spadá výstavba budov, inženýrské stavitelství a specializovaná stavební činnost (viz Obrázek 2). Největší podíl na celkovém množství vyprodukovaného odpadu má

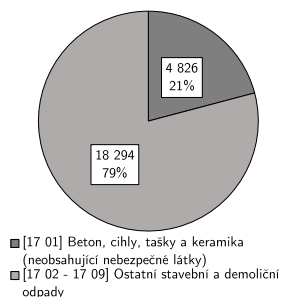


Obrázek 1: Celková produkce odpadu a produkce odpadu ze sektoru stavebnictví v ČR v letech 2012 - 2020.

SDO. V posledních letech bylo vyprodukováno SDO přes 23 mil. tun, což je více jak 60 % podíl na celkovém množství odpadu. Největší část SDO je ve formě zeminy a kamení (přes 50 %), dále se jedná o ocel a železo (okolo 10 %). Část SDO, která má potenciál k tomu být recyklována a využita výrobu betonu, jsou odpady betonu, cihel, tašek a keramiky, které v souhrnu zaujímají přibližně 20 % z celkového množství SDO (viz Obrázek 3). Spotřeba kameniva do betonu je okolo 6 mil. tun za rok. Nyní se beton vyrábí výhradně za použití přírodního kameniva, kterého v následujících letech hrozí silný nedostatek. SDO tak nabízí potenciál k nahrazení přírodního kameniva recyklovaným a ušetřit tak přírodní kamenivo na aplikace, kde je nezastupitelné.



Obrázek 2: Množství vyprodukovaného odpadu (v tisících tun) a procentuální podíl sektoru stavebnictví oproti ostatním sektorům podnikového odpadu v ČR (průměrná hodnota za období 2017 - 2020).



Obrázek 3: Množství (v tisících tun) a podíl recyklovatelných materiálů pro výrobu recyklovaného kameniva do betonu z celkového objemu SDO (průměrná hodnota za období 2017 - 2020).

2.2. Recyklované kamenivo do betonu

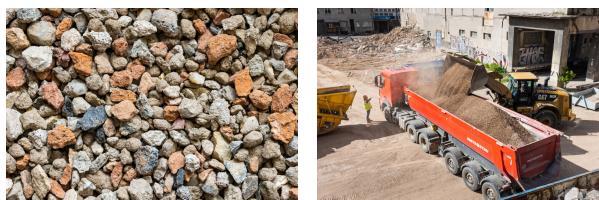
Stavební a demoliční suť vhodná pro výrobu recyklovaného kameniva do betonu vzniká z demolic betonových a cihelných objektů. Obrázek 4 znázorňuje proces výroby recyklovaného kameniva od demolic po expedici výsledného materiálu na betonárnu. Nejdůležitějším faktorem při výrobě recyklovaného kameniva je důsledné třídění nežádoucích materiálů. Třídění musí začít již před samotnou demolicí těžkou technikou, kdy by mělo být demontováno co nejvíce nekonstrukčních částí, jejichž výskyt je v kamenivu při výrobě betonu nežádoucí. Jedná se především o sklo, asphalt, plasty, dřevo, anebo materiály na bázi sádry. Materiály jako dřevo a plast významně snižují objemovou hmotnost kameniva a tudíž i betonu z něj vyrobeného, současně hrozí jejich vyplavání na povrch v průběhu ukládání betonu, což může v některých případech znehodnotit celou konstrukci. Materiály na bázi sádry pak mohou zpomalit proces hydratace cementu a opět způsobit problém při stavební výrobě. Při manipulaci s recyklátem na deponiích by se mělo dbát na to, aby do něj nebyla přimíchávána zemina a jiné prachové znečištění vyskytující se na stavbě. Vysoký podíl jemných částic v kamenivu může mít dopad na konzistenci betonu v průběhu času, ale třeba i na účinnost použitých přísad v betonu. Během drcení a následného třídění by měly být odstraněny větší kusy železných prutů, které by mohly poškodit strojní zařízení při výrobě nebo čerpání betonu. Ze zkušenosti nelze nežádoucí materiály z výsledného recyklátu bezzbytkově eliminovat. Proto je nutné materiál kontrolovat a neshodné dodávky vracet zpět do recyklačního střediska nebo odvážet na skládku.



(a) Probíhající práce na demolovaných objektech. (b) Neroztříděná stavební suť z demolic.



(c) Třídění stavební suti na různé frakce. (d) Skladování roztříděné stavební suti na deponii.



(e) Detail recyklovaného kameniva hrubé frakce. (f) Nakládka recyklovaného kameniva pro odvoz na betonárnu.

Obrázek 4: Proces výroby recyklovaného kameniva do betonu ze stavebního a demoličního odpadu.

Ačkoliv je výsledná kvalita recyklovaného kameniva velmi důležitá, logistika spojená se skladováním a zásobováním betonáren

hraje taktéž klíčovou roli ve výrobě betonu s recyklovaným kamenivem. Většina velkých demolic se uskutečňuje v centru měst. Nejvýhodnější variantou je případ, kdy se recyklované kamenivo vyrábí přímo na místě demolované stavby a odkud se expeduje na jednotlivé betonárny. Tato varianta výrazně snižuje náklady spojené s dopravou a případnými poplatky za skládkovné. Nicméně tato varianta není vždy možná a to z důvodu nedostatku místa pro skladování, drcení a třídění recyklátu na místě demolice nebo z důvodu chybějící technologie pro jeho výrobu. V takovém případě je možné recyklát vyrábět v recyklačním středisku, nicméně to má dopad na náklady spojené s dopravou, které rostou v závislosti na vzdálenosti recyklačního střediska od demolované stavby a betonárny. Tyto náklady mohou být tak vysoké, že cena za výsledný beton s recyklovaným kamenivem může být vyšší než cena za beton s běžným přírodním kamenivem. Horší vlastnosti betonu a k tomu ještě vyšší cena nemotivuje stavební firmy k používání betonu s recyklovaným kamenivem na stavbách a tudíž zde není po tomto materiálu poptávka. Tento přístup se však v budoucnu může změnit v závislosti na silnicích požadavcích na udržitelnou výstavbu, která bude muset být doložena řadou certifikací. Vyšší cena betonu pak v takovém případě nemusí hrát roli.

2.3. Současné podmínky použití recyklovaného kameniva v betonu

Podmínky použití recyklovaného kameniva do betonu jsou uvedeny v normách ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404. Normy rozlišují dva typy hrubého recyklovaného kameniva, které se liší v poměru jednotlivých složek obsažených v recyklátu. Shrnutí podmínek pro složení hrubého recyklovaného kameniva a jeho použití do betonu podle zmíněných norem předkládá Tabulka 3. Normy umožňují použití pouze recyklované kamenivo skládající se převážně z betonového odpadu. V praxi se ale recyklované kamenivo z betonu považuje za kvalitní surovinu, které má vlastnosti srovnatelné s kamenivem přírodním. Současně betonový recyklát není zdaleka tak dostupný jako recyklát směsný s vyšším podílem cihelné složky. Právě u směsného cihelného recyklátu, který končí převážně na skládkách nebo ve stavebních jámách jako zásypový materiál, by měla být snaha o tzv. upcycling.

V případě, že dodavatel betonu chce vyrábět beton s recyklovaným kamenivem, který nevyhovuje podmínkám Tabulka 3, musí si opatřit vlastní podnikovou normu, podle které bude beton vyrábět. Proces výroby betonu musí posoudit autorizovaná osoba, která následně vydá stavebně technické osvědčení, na základě kterého je možné materiál vyrábět. Tento složitý proces v současnosti nemotivuje mnoho výrobců betonu k zavedení betonu s recyklovaným kamenivem mezi svůj sortiment produktů.

3. PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI S VÝROBOU BETONU Z RECYKLOVANÉHO KAMENIVA

Během vývoje betonu s recyklovaným kamenivem pro průmyslovou výrobu byly v první fázi vyzkoušeny dva druhy hrubého recyklátu: betonový a cihelný. Obě receptury betonových směsí byly stejné a lišily se pouze v hrubé složce recyklovaného kameniva. V recepturách byl použit cement CEM I 42,5 R Radoťín, jako příměs byl použit popílek. Cílová pevnostní třída betonů byla C 25/30. Během míchání bylo v obou případech přidáno větší množství záměsové vody oproti navržené receptuře a to z důvodu vysoké nasákavosti recyklovaného kameniva. Více vody bylo přidáno do receptury s cihelným recyklátem.

Betonové směsi byly podrobeny zkouškám čerstvého a ztvrdlého betonu, jejichž výsledky uvádí Tabulka 1. Počáteční konzistence obou betonových směsí byla stejná a ztráta po 90 minutách

Tabulka 1: Porovnání vlastností betonových směsí s betonovým a cihelným recyklátem.

Parametr	Stáří	Jednotka	Typ recyklátu	
			betonový	cihelný
Sednutí kužele	5 min	mm	180	180
	90 min	mm	140	150
ČOH*	5 min	kg m ⁻³	2210	2130
ZOH**	28 d	kg m ⁻³	2220	2150
Pevnost v tlaku	2 d	MPa	22,6	19,1
	7 d	MPa	38,3	34,6
	28 d	MPa	46,3	41,8
Průsak	90 d	MPa	60,3	52,2
	28 d	mm	24	19
Modul pružnosti	28 d	GPa	26,5	21,7

*ČOH = objemová hmotnost čerstvého betonu

**ZOH = objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Tabulka 2: Vliv podílu směsného recyklovaného kameniva na vlastnosti betonu.

Parametr	Stáří	Jednotka	Podíl recyklátu		
			0 %	50 %	100 %
ZOH	28 d	kg m ⁻³	2300	2150	2050
Pevnost v tlaku	28 d	MPa	36,8	31,4	24,1
Modul pružnosti	28 d	GPa	30,0	19,7	14,5

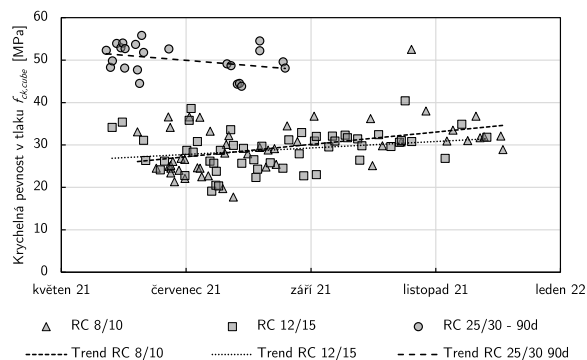
se lišila pouze o 10 mm. Hlavní rozdíl v obou směsích je v objemové hmotnosti, která má následně dopad i na pevnost a modul pružnosti betonu. Obecně lze tvrdit, že beton s betonovým recyklátem má lepší vlastnosti než beton s cihelným recyklátem, nicméně rozdíl mezi oběma není zásadní.

V druhé části vývoje byl sledován vliv podílu směsného recyklovaného kameniva na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu, pevnost a statický modul pružnosti. V receptuře s 50 % podílem recyklovaného kameniva byla nahrazena pouze hrubá frakce (8/16) kameniva, zatímco v receptuře se 100 % podílem recyklovaného kameniva byla nahrazena hrubá frakce (8/16) i drobná frakce (0/8) kameniva. Výsledky uvádí Tabulka 2, kde je vidět výrazný pokles objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a statického modulu pružnosti v závislosti na podílu recyklátu v betonu. Tento pokles má zásadní vliv na použitelnost betonu do řady konstrukcí. Beton s tak nízkým modulem pružnosti nelze použít např. do vodorovných, převážně ohýbaných konstrukcí nebo do silně tlačných svislých konstrukcí, kde by mohlo dojít k nadměrnému přetvoření vlivem dotvarování. Objemová hmotnost má naopak vliv na akustické vlastnosti betonu, což vzbuzuje nedůvěru u projektantů bytových budov, kde je akustika jeden z hlavních posuzovaných parametrů. Zatímco pokles pevnosti betonu lze kompenzovat např. vyšší dávkou cementu nebo snížením vodního součinitele, objemová hmotnost a modul pružnosti jsou z větší části závislé na vlastnostech použitého kameniva v betonu.

Následně byl beton s recyklovaným kamenivem zaveden do běžné výroby. Z důvodu výrobních možností betonáren byl vyráběn pouze beton s 50 % podílem recyklovaného kameniva hrubé frakce. Během výroby byly prováděny zkoušky pevnosti v tlaku různých pevnostních tříd betonu, aby byl získán přehled o kolísavosti kvality betonu v čase. Obrázek 5 zobrazuje výsledky kontrolních zkoušek provedených v období přibližně 7 měsíců. Z grafu je patrné, že k výkyvům v pevnosti betonu dochází, z toho důvodu byly na začátku receptury navrženy s dostatečnou rezervou.

Tabulka 3: Podmínky použití recyklovaného kameniva podle norem ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404.

Norma Typ RK	ČSN EN 206+A2		ČSN P 73 2404	
	Typ A	Typ B	Typ 1	Typ 2
Podíl betonové složky	min. 90 %	min. 50 %	min. 90 %	min. 70 %
Podíl cihelné složky	max. 10 %	max. 30 %	max. 10 %	max. 30 %
Podíl recyklátu v betonu do 50 %	pouze SVP X0	pouze SVP X0 a max. C 30/37	pouze SVP X0	pouze SVP X0 a max C 8/10
Podíl recyklátu v betonu do 30 %	do SVP XC4, XF1, XD1, XA1	nelze použít	do SVP XC4, XF1 a XF3	nelze použít



Obrázek 5: Výsledky zkoušek krychelné pevnosti v tlaku prováděného během reálné výroby na betonárně.

4. ZÁVĚR

Velké množství stavebního a demoličního odpadu, které je vyprodukované každý rok nabízí alternativní zdroj kameniva do betonu v době, kdy zásoby přírodního kameniva jsou postupně dočerpávány. V ČR dosud nebyla motivace k využívání recyklovaného kameniva do betonu, nicméně tento stav se nyní začíná měnit a výrobci betonu postupně zařazují beton s recyklovaným kamenivem do svého sortimentu produktů. Ke zvýšení motivace by pomohlo zmírnění podmínek použití recyklovaného kameniva uvedených v současných znění norem ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404. Benevolentnější přístup by mohl být kompenzován vyššími nároky na kontrolu kvality recyklovaného kameniva i samotného betonu.

Beton s recyklovaným kamenivem ukazuje také svoje limity ve formě nízkého modulu pružnosti a objemové hmotnosti. Zatímco modul pružnosti je kritický hlavně u konstrukčních prvků citlivých na přetvoření, objemová hmotnost betonu ovlivňuje stránku hlavně použitelnosti ve formě horších akustických vlastností u bytové výstavby. V dalším výzkumu se autor plánuje zaměřit právě na akustické vlastnosti toho materiálu. Při návrhu receptur betonových směsí s recyklovaným kamenivem by se měla aplikovat vždy vyšší bezpečnostní rezerva vzhledem k větším výkyvům kvality kameniva.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory společnosti TBG Metrostav s.r.o. Zároveň bych chtěl poděkovat svému školiteli prof. Ing. Janu L. Vítkoví, CSc. za konzultace a pomoc při vypracování tohoto příspěvku.

Reference

- Godány, J. (2021), 'Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a šterkopísku v ČR', *Beton TKS 2021*(1), 15–21.
- Produkce, využití a odstranění odpadů za období 2020 (2021), Publikace, Český statistický úřad, Praha.
- Vyhláška č. 273/2021 Sb. ze dne 12. července 2021 o podrobnostech nakládání s odpady (2021), Vyhláška, PS ČR, Praha.
- Zákon č. 541/2020 Sb. ze dne 1. prosince 2020 o odpadech (2020), Zákon, PS ČR, Praha.
- ČSN EN 12620+A1 (2008), Kamenivo do betonu, Česká technická norma, Český normalizační institut, Praha.
- ČSN EN 206+A2 (2021), Beton - specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, Česká technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.
- ČSN P 73 2404 (2021), Beton - specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - doplňující informace, Česká technická norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.