

1 Řez betonem s obsahem hrubého smíšeného recyklovaného kameniva

# BETON S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM A JEHO ROLE V MODERNÍM STAVEBNICTVÍ

Zdeněk Hlavsa

Článek se komplexně zabývá problematikou využívání betonu s recyklovaným kamenivem ve stavebních konstrukcích v praxi. V úvodu je stručně shrnuta motivace k využívání recyklovaného kameniva a současný stav na českém trhu. Zároveň je uvedena reálná dostupnost recyklátů a jaká to klade omezení pro jejich širší využívání. V druhé části je shrnut vliv recyklovaného kameniva na základní vlastnosti betonu a technické limity, které to přináší pro praktickou aplikaci ve stavebních konstrukcích. V poslední části je uveden příklad bytové stavby a její konstrukční části, pro které jsou navrženy dva přístupy stanovující maximální podíl recyklátu v betonu s ohledem na požadavky, které jsou na danou konstrukční část kladeny. V závěru jsou vyčísleny potenciální úspory přírodního kameniva na jedné bytové stavbě za předpokladu aplikace navržených přístupů.

Myšlenka využívání stavební suti jako náhrady přírodního kameniva pro výrobu betonu existuje již několik desítek let. První pokusy zpracování suti do betonu proběhly po druhé 2. světové válce. V městech zničených po bombardování se bylo nutné zbavit velkého množství materiálu a zároveň obnovit poničené budovy a infrastrukturu. To však trvalo krátce a poté se od recyklace a využívání stavební suti opět ustoupilo a přešlo se zpět na přírodní zdroje, které byly v té době stále velmi dostupné. Výzkum vlastností betonu s recyklovaným kamenivem ale pokračoval dál.

V 80. letech začíná vznikat koncept udržitelného rozvoje, který si klade za cíl „najít takovou rovnováhu mezi ekonomickým růstem, sociálním rozvojem a ochranou životního prostředí, aby naplňování potřeb současné generace neohrožovala schopnost budoucích generací naplňovat potřeby své“. Do popředí veřejného zájmu se tak začala dostávat témata týkající se ochrany životního prostředí, mezi která patří zejména snížení spotřeby přírodních neobnovitelných zdrojů, snížení produkce odpadů a znečištění, ochrana klimatu ad. V současné době je udržitelný rozvoj defino-

ván 17 cíly udržitelného rozvoje, které byly představeny v dokumentu *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development* a schváleny na summitu OSN v roce 2015. Jeden ze sedmnácti cílů je i odpovědná výroba a spotřeba, pro jehož naplňování je mj. potřeba dosáhnout i udržitelného hospodaření s přírodními zdroji a snížit produkci odpadu za pomoci recyklace a opětovného používání. Beton je hned po vodě druhou nejvíce využívanou látkou na světě. Na jeho výrobu je potřeba velké množství materiálu, primárně ve formě přírodních surovin. Je tedy logické se snažit snížit závislost tak hojně využívaného materiálu, jako je beton, na spotřebě přírodních surovin a nahradit je materiálem odpadním.

Zvyšující se důraz na udržitelný rozvoj ekonomiky, ale hlavně počátek problémů s nedostatkem stavebního kamene a štěrkopísků v ČR přivedly myšlenku recyklace stavebního a demoličního odpadu (SDO) a jeho následného využití pro výrobu betonu do praxe. V roce 2020 se na trhu objevil Rebetong jako první produkt společnosti Skanska Transbeton využívající stavební suti v betonu. Následoval produkt R-CRETE®

(původně Ecocrete) od společnosti TBG Metrostav. Dnes má ve svém sortimentu beton využívající recyklované kamenivo většina výrobců betonu a lze říci, že se jedná již o zavedený produkt. Jeho potenciál využití na stavbách je však stále nenaplněn, a to zejména kvůli přetrvávající nedůvěře ke kvalitě tohoto materiálu, ale částečně i kvůli ne zcela jasně definovanému vhodnému využití ve stavebních konstrukcích. Po čtyřech letech zkušeností s jeho výrobou je však role betonu s recyklovaným kamenivem ve stavebnictví zřetelnější. Cílem článku je tuto roli představit v co nejširším kontextu.

## Dostupnost recyklovaného kameniva

Myšlenka cirkulární ekonomiky je bezesporu správná, nicméně je nutné si uvědomit jednu zásadní věc. Pokud beton zůstane hlavním stavebním materiálem, a zatím nic nenaznačuje, že by se to mělo v blízké době změnit, pak množství SDO produkované každý rok není schopno pokrýt současnou spotřebu kameniva potřebného pro výrobu betonu. Graf na obr. 2 zobrazuje množství a podíl jednotlivých druhů

odpadů evidovaných v Katalogu odpadů dle vyhl. 8/2021 Sb. v kategorii 17 Stavební a demoliční odpady. Z celkem 25,5 mil. t SDO vyprodukované v roce 2021 pouze necelých 5 mil. t (20,4 %) náleželo inertnímu minerálnímu odpadu ve formě betonu, cihel a keramických výrobků, příp. jejich směrším. Největší část z SDO zaujímá vytěžená zemina a kamení, přibližně 15,6 mil. t (57,9 %). Data produkce odpadů dle jednotlivých kódů katalogu odpadů jsou dostupná pouze do roku 2021.

Podle Svazu výrobců betonu se v tomtéž roce vyrobilo 8,2 mil. t transportbetonu (číslo nezahrnuje výrobní prefabrikátů). Uvažujeme-li, že na 1 m<sup>3</sup> betonu je potřeba přibližně 1,75 t kameniva, pak se v roce 2021 spotřebovalo pouze na výrobu transportbetonu 14,35 mil. t přírodního kameniva. Za předpokladu, že by se všechen inertní minerální odpad recykloval a využíval jako kamenivo do betonu, dalo by se tak nahradit 34 % spotřeby přírodního kameniva. Reálně však tato hodnota bude výrazně nižší, jelikož určitá část nemusí vyhovovat kvalitativním požadavkům, najde jiné využití apod. Na druhou stranu je nutné dodat, že reportované množství vyprodukovaného odpadu je podhodnocené. Velká část minerálního odpadu se využívá na zpětné zásypy v rámci staveniště, příp. na jiných místech, a není tak zaevidována v celkových statistikách. Lze předpokládat, že v budoucnu se množství SDO vhodného pro recyklaci bude zvyšovat a to např. díky technologiím, které dokáží recyklovat vytěženou zeminu a separovat z ní čisté kamenivo. Nicméně deficit mezi množstvím kameniva potřebného pro výrobu betonu a množstvím recyklovatelného materiálu zde zůstane a s ním i závislost na spotřebě přírodního kameniva. Princip cirkulární ekonomiky tak nemůže být naplněn čistě z kapacitních důvodů, nehledě na to, že nemůže být naplněn i z důvodů technologických.

Vedle celkové kapacity SDO je zde i otázka lokální dostupnosti. Aby využití SDO jako recyklovaného kameniva do betonu dávalo ekologický i ekonomický smysl, musí se zdroj nacházet v blízkosti jak recyklačního střediska, tak i betonárny, která bude recyklát využívat. S prodlužováním transportních vzdáleností mezi místem demolice a recyklačním střediskem, příp. mezi recyklačním střediskem a betonárnou, se

zvyšuje jak dopad na životní prostředí primárně ve formě emisí CO<sub>2</sub> vypouštěných do ovzduší z nákladní dopravy, tak i výsledná cena recyklovaného kameniva, která nakonec nemusí být konkurenceschopná vůči ceně přírodního kameniva. Ideální schéma je, když recyklace probíhá pomocí mobilní recyklační linky přímo na stavbě a odtud je recyklované kamenivo distribuováno přímo na betonárny. Toto schéma je však ve většina případů nemožné, jelikož největší množství demolice probíhá v centrech a okolí měst, kde na tak prostorově náročné operace není místo, a ani by to neocenili lidé, kteří bydlí v okolí. S tím souvisí další bod, a to že recyklované kamenivo bude dostupné primárně v okolí větší měst. Nelze očekávat, že bude beton s recyklovaným kamenivem dostupný i na menších betonárnách situovaných v méně obydlených oblastech, a to i z toho důvodu, že samotné betonárny často nemají kapacitu pro uskladnění dalšího materiálu vedle přírodního kameniva.

V poslední řadě je zde otázka dostupnosti recyklovaného kameniva na trhu. Momentálně je velmi málo recyklačních středisek, které jsou schopné produkovat recyklát požadované kvality k použití pro výrobu betonu. Výsledná kvalita recyklátu je dána hlavně recyklačním postupem, zejména počtem kroků ve fázi třídění před samotným drčením, a také tím, jestli dochází k čištění od plovoucích částic, prachu či hlíny pomocí strojového proplachování. Právě tento krok výrazně zlepšuje kvalitu výsledného recyklátu, která se následně propíše i do vlastností betonu. Větší počáteční investice, kterou je nutné

udělat pro zajištění požadované kvality recyklátu, spolu s procesem certifikace výrobku recyklovaného kameniva podle normy ČSN EN 12620+A1, ve většině případů majitele recyklačních středisek odradí od zavedení recyklovaného kameniva do betonu mezi své produkty. Výsledkem je velmi omezené množství dodavatelů, kteří ve chvílích zvýšené poptávky nedokáží zásobovat všechny betonárny najednou.

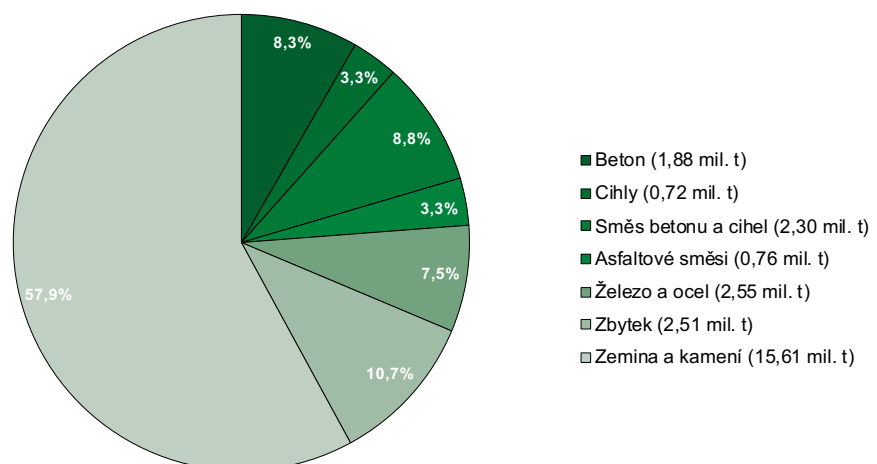
## Betonové vs směsné recyklované kamenivo

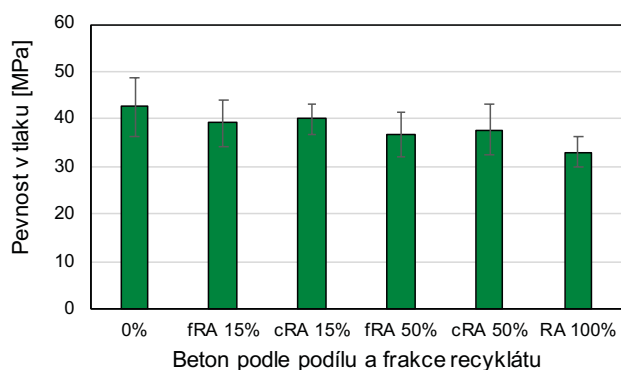
Vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem jsou závislé na dvou parametrech: kvalitě recyklátu, resp. jeho druhu, a na množství recyklovaného kameniva v betonu.

Kvalita recyklovaného kameniva je dána převážně obsahem jednotlivých materiálů v recyklátu. Čím více betonové složky recyklát obsahuje, tím nižší dopad na konečné vlastnosti betonu má. Samozřejmě vždy také záleží na zdroji betonového recyklátu, ale obecně platí, že betonový recyklát je kvalitnější než směsný nebo cihelný. Z technologického hlediska je tedy nejlepší využívat čistě betonový recyklát. Problém tkví v jeho nedostatku. Betonového recyklátu je k dispozici velmi málo a nachází uplatnění i mimo výrobu betonu. Od jeho malého množství se odvíjí i cena, která se leckdy blíží ceně přírodního kameniva a využití v betonu tak postrádá ekonomický smysl.

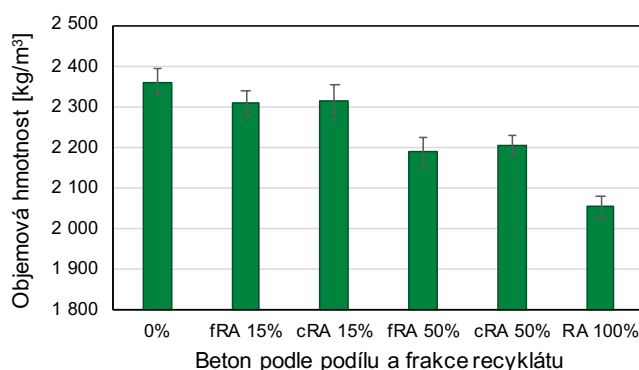
Produkcí betonového recyklátu by mohl zvýšit proces selektivní demolice staveb, který zajišťuje, aby se stavební odpad třídil již během demolice podle jednotlivých materiálů. Namísto směs-

2 Podíl jednotlivých druhů odpadů na celkovém množství SDO vyprodukovaném v roce 2021 (v legendě je uvedeno absolutní množství)





3 Pevnost betonu v tlaku stanovená po 28 dnech dle ČSN 12390-3 v závislosti na podílu recyklovaného kameniva v betonu, respektive druhu použité frakce



4 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu po 28 dnech dne ČSN EN 12390-7 v závislosti na podílu recyklovaného kameniva v betonu, respektive druhu použité frakce

ného recyklátu by tak vznikalo více čistého betonového recyklátu. V praxi se však zatím selektivní demolice uplatňuje stále jen velmi zřídka, a to zejména z důvodu velké časové náročnosti celého procesu. Betonový recyklát tak vzniká hlavně z demolice čistě betonových staveb jako jsou např. dopravní stavby. Při demolici starých průmyslových objektů nebo rezidenčních staveb, kde se nachází mix betonových a cihelných konstrukcí, vzniká převážně recyklát směsný. Většina výrobců betonu se proto z výše uvedených důvodů uchýlila k využívání směsného recyklovaného kameniva, které je kapacitně i cenově dostupnější. Nevýhodou směsného recyklátu je větší dopad na vlastnosti konečného betonu a téměř nulová podpora norem pro využití při výrobě betonu.

### Hrubá vs drobná frakce recyklovaného kameniva

Při výrobě recyklovaného kameniva vzniká během procesu drcení hrubá i drobná složka recyklátu, která se následně třídí na jednotlivé frakce. Poměr mezi hrubou a drobnou složkou závisí na typu drtiče a vstupním materiálu, obecně však vzniká drobné složky více. Hrubá frakce 8/16 nebo 11/22 je ekonomicky i technologicky efektivnější než drobná frakce 0/4 nebo 0/8. Nicméně, v případě, kdy by se zpracovávala pouze hrubá frakce recyklátu, velké množství materiálu by zůstalo nevyužito s potenciálem použití pouze pro zpětné zásypy. Pro maximalizaci využití recyklátu je potřeba zpracovávat i drobnou frakci. Zde se však opět naráží na nedostatečnou oporu norem, jelikož drobná frakce recyklovaného

kameniva se do betonu použít vůbec nedoporučuje.

### Vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem

Dopad recyklovaného kameniva na vlastnosti betonu byl zkoumán v mnoha tuzemských i zahraničních studiích. Obecně lze tvrdit, že recyklované kamenivo má negativní vliv na většinu vlastností betonu. Vedle kvality (druhu) recyklovaného kameniva hraje ještě významnější roli jeho obsah v betonu. Se zvyšujícím se podílem recyklovaného kameniva se úměrně zhoršují parametry betonu. Hlavním důvodem je vyšší pórovitost materiálů obsažených v recyklátu jako jsou cihly, malta a cementový tmel, který obaluje zrna přírodního kameniva původního betonu. Vyšší pórovitost následně ovlivňuje všechny vlastnosti betonu. Úprava množství recyklátu v betonu je hlavní nástroj k tomu, jak snížit negativní dopad recyklátu na vlastnosti betonu a využít jej v širším spektru konstrukcí.

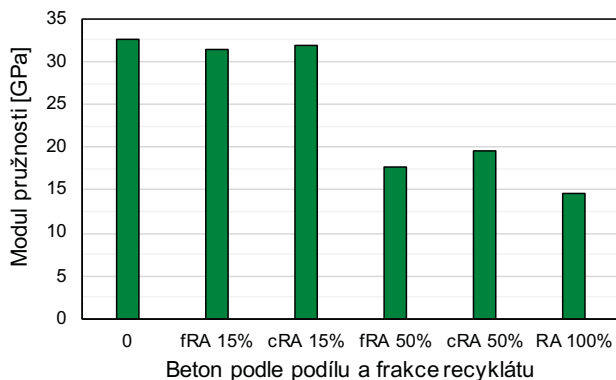
V čerstvém stavu je kvůli vyšší nasávkivosti recyklátu ovlivněna hlavně zpracovatelnost betonu, která v čase klesá rychleji než u běžného betonu. Většina výrobců chemických přísad již ale nabízí přísady, kterými lze ztrátu konzistence účinně řešit. Nicméně, i přes to je stále nutné počítat s vyšší dávkou záměsové vody, která je potřeba pro kompenzaci nasávkivosti a aktivaci chemických přísad. Dále bylo vyzpozorováno, že recykláty s vyšším podílem cihelné složky mají tendenci do betonu vnášet větší množství vzduchu, který má následně dopad i na vlastnosti ztvrdlého betonu.

Mechanické vlastnosti betonu jako je pevnost v tlaku, pevnost v tahu a mo-

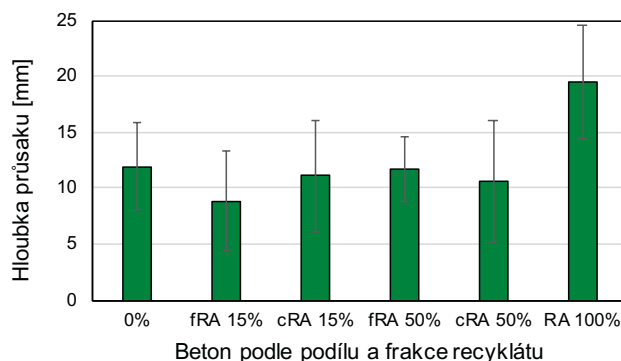
dul pružnosti se zhoršují se zvyšujícím se podílem recyklovaného kameniva v betonu. Graf na obr. 3 znázorňuje pevnost betonu v tlaku pro směsi s různým podílem směsného recyklovaného kameniva. Graf zahrnuje i rozdíl při využití drobné frakce (fRA) a hrubé frakce (cRA). Jedná se o výsledky kontrolních zkoušek betonu provedených na betonárně, které jsou průměrem za delší časové období. Betonové směsi obsahovaly srovnatelné množství cementu. Při 15% podílu recyklovaného kameniva poklesne pevnost v průměru o 6 až 8 %, v případě 50% podílu o 11 až 14 % a při plné náhradě až o 22 %. Drobné recyklované kamenivo má mírně vyšší dopad na pevnost v tlaku než hrubá frakce. U tahové pevnosti betonu je trend obdobný, pouze relativní pokles tahové pevnosti oproti běžnému betonu s přírodním kamenivem je nižší než u pevnosti v tlaku. Pokles pevnostních charakteristik vlivem použití recyklátu lze kompenzovat vyšší dávkou cementu, nicméně je vždy nutné zvážit, zda docílení vyšší pevnostní třídy betonu dává ekologický i ekonomický smysl.

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu je taktéž recyklovaným kamenivem ovlivněna. V grafu na obr. 4 je vidět pokles objemové hmotnosti o přibližně 2 % při 15% podílu recyklátu v betonu, o 7 % v případě 50% podílu a o 13 % při plné náhradě přírodního kameniva recyklovaným. Nižší objemová hmotnost betonu může mít vliv např. na vzduchovou neprůzvučnost konstrukcí.

Největší vliv má recyklované kamenivo na modul pružnosti betonu. Graf na obr. 5 zobrazuje hodnoty modulu pružnosti opět pro směsi s různým podílem recyklátu a s různou frakcí. V pří-



5 Statický modul pružnosti stanovený po 28 dnech dle ČSN ISO 1920-10 v závislosti na podílu recyklovaného kameniva v betonu, respektive druhu použité frakce



6 Hloubka průsaku tlakovou vodou stanovená po 28 dnech dle ČSN 12390-8 v závislosti na podílu recyklovaného kameniva v betonu, respektive druhu použité frakce

padě 15% podílu recyklovaného kameniva je pokles modulu pružnosti téměř zanedbatelný a pohybuje se okolo 2 až 4 %, při 50% náhradě se hodnota modulu pohybuje o 39 až 45 % níže oproti běžnému betonu, a při plné náhradě může modul poklesnout až o 55 %, což již výrazně omezuje použití betonu do konstrukčních prvků vystavených vyššímu deformačnímu namáhání. Stejně jako u pevnosti v tlaku platí, že hrubá frakce vykazuje lepší hodnoty modulu pružnosti při stejném podílu recyklátu než drobná frakce. Ztrátu modulu pružnosti nelze efektivně kompenzovat jinou úpravou složení betonové směsi, jelikož jeho hodnota závisí primárně na použitém typu kameniva. Tato skutečnost tvoří hlavní překážku v širším uplatnění betonu s recyklovaným kamenivem ve stavebních konstrukcích.

Výsledky hloubky průsaku tlakovou vodou nepotvrzují trend z pevnostních charakteristik, a to pravděpodobně kvůli nepříznivé opakovatelnosti a reprodukovatelnosti této zkoušky (graf na obr. 6). Pouze beton se 100% obsahem recyklátu reportuje v průměru vyšší hloubku průsaku než ostatní směsi, které jsou mezi sebou srovnatelné. Z hlediska požadavků na hloubku průsaku jsou však všechny výsledky vyhovující i pro nejpřísnější stupně vlivu prostředí.

Z pohledu trvanlivosti je nejzajímavější sledovat mrazuvzdornost betonu, která by mohla rozšířit aplikaci betonu s recyklovaným kamenivem i na konstrukce vystavené mrazovým cyklům. Zde jsou ale výsledky nekonzistentní, odolnost betonu totiž závisí zejména na kvalitě recyklátu. Základní předpoklad pro mrazuvzdornost betonu je

i mrazuvzdornost použitého kameniva. V případě recyklovaného kameniva lze mrazuvzdornost zaručit pouze za předpokladu, že známe zdroj SDO, ze kterého byl recyklát vyroben, a mrazuvzdornost betonu s ním byla ověřena. Recyklované kamenivo musí obsahovat převážně betonovou složku z původně mrazuvzdorných konstrukcí nebo kvalitní cihelné či keramické materiály. Zajištění takové kvality recyklátu klade vysoké nároky na recyklační proces, který, jak již bylo zmíněno dříve, není zatím rozšířeným standardem. Lze však předpokládat, že kvalita recyklátu se bude v čase zlepšovat a využití betonu i pro exteriérové konstrukce bude běžná praxe.

U dlouhodobě sledovaných parametrů jako je např. dotvarování nebo smrštění betonu vlivem vysychání bylo taktéž vyzorováno, že s rostoucím podílem recyklovaného kameniva v betonu se dotvarování a smrštění zvětšuje. Důvodem je opět vyšší pórovitost recyklovaného kameniva a s tím i spojená vyšší nasákavost a potřeba záměsové vody. Smrštění od vysychání se může při 100% náhradě recyklovaným kamenivem zvýšit v průměru až o 30 % v porovnání s běžným betonem, nicméně, tento jev lze částečně ovlivnit složením betonu a smrštění od vysychání tak snížit. Vliv recyklátu v betonu na dotvarování je ještě významnější a v případě 100% náhrady může v průměru dosahovat hodnot až o 80 % vyšších v porovnání s běžným betonem.

### Aplikace betonu s recyklovaným kamenivem

Vezmeme-li v potaz všechny výše zmíněné skutečnosti týkající se dostup-

nosti recyklovaného kameniva a vlastností betonu z něj vyrobeného, pak se nabízí otázka, na které typy staveb, potažmo konstrukcí, je tento materiál vhodný. Pro zjednodušení zde budou stavby rozděleny do tří kategorií: dopravní a inženýrské stavby, kancelářské stavby a stavby občanské vybavenosti, a bytové stavby.

Dopravní a inženýrské stavby, jakými jsou např. pozemní komunikace, mosty, tunely, vodní díla ad., se navrhuje většinou s životností přes 100 let a zásadním požadavkem na beton je jeho trvanlivost. Často se jedná o konstrukce vystavené mrazovým cyklům a nadměrnému zatížení. Pro tento typ konstrukcí by měla být snaha dosáhnout nejvyšší možné kvality, což využívání recyklovaného kameniva nepodporuje. Nicméně i u tohoto typu staveb se najdou konstrukce, kde by použití betonu s recyklátem možné bylo.

Kancelářské stavby a stavby občanské vybavenosti již nabízí širší škálu konstrukcí, kde beton s recyklátem využít. Určité omezení by mohlo být u pohledových konstrukcí, u kterých se může projevit mírné zbarvení obsahem cihelné složky recyklátu. Dále pak záleží na konstrukčním návrhu celé stavby, kde může hrát důležitou roli modul pružnosti, který je recyklovaným kamenivem významně ovlivněn.

Největší potenciál využití betonu s recyklátem nabízí bytové stavby, které jsou z hlediska konstrukčního systému a požadavků kladených na vlastnosti betonu nejjednodušší. Tato synergie dává smysl i z pohledu již zmíněné dostupnosti recyklátu. Největší objem demolice se odehrává ve velkých městech, ve kterých zároveň probíhá i velká část

výstavby bytových projektů. Využitím betonu s recyklátem na méně náročné bytové stavby lze ušetřit přírodní kamenivo na stavby, u kterých je nezbytné.

### Požadavky na konstrukční části bytových staveb

Jak již bylo zmíněno, vlastnosti betonu jsou závislé na obsahu recyklátu ve směsi. Pro jednotlivé konstrukční části lze tedy navrhnout beton s různým obsahem recyklátu tak, aby vyhovoval požadavkům, které jsou na danou konstrukci kladené. V této kapitole jsou uvedeny základní konstrukční části běžné bytové stavby a požadavky, které jsou kladené na vlastnosti betonu. Současně jsou u každé konstrukční části uvedeny dva přístupy – konzervativní a progresivní, přičemž každý navrhuje jiný maximální podíl recyklátu v betonu pro danou konstrukci. Běžnou bytovou stavbu lze rozdělit do následujících kategorií konstrukcí: hlubinné založení, podkladní betony, bílá vana, vodorovné nosné konstrukce, svislé nosné i nenosné konstrukce, exteriérové konstrukce.

**Hlubinné založení** se provádí formou železobetonových pilot. Obvyklá specifikace betonu pro piloty je C25/30 nebo C30/37, XA1 až XA3 v závislosti na podloží stavby. U pilot se klade důraz zejména na vlastnosti čerstvého betonu, které zajistí jejich správné provedení. Častým problémem je odlučování vody, tzv. bleeding, ke kterému může docházet vlivem vysokého hydrostatického tlaku a obsahu většího množství vody v betonu. Z pohledu vlastností ztvrdlého betonu se posuzuje požada-

vek hlavně na pevnost v tlaku, případně maximální hloubku průsaku tlakovou vodou, kterého lze bez problémů docílit. Pro piloty by tak bylo možné konzervativně použít 30 % recyklátu a progresivně až 50 %.

**Podkladní betony** jsou pravděpodobně nejlepší využití pro beton s recyklátem. Jediným požadavkem je docílení minimální pevnostní třídy, obvykle C12/15, a uspokojující rovinatosti pro pokládku a vázání výztuže základové desky. Stoprocentní podíl recyklátu v betonu je zcela možný bez významných rizik, konzervativně lze přistoupit na 50% podíl.

**Bílá vana**, tedy konstrukce základové desky a obvodových stěn, které jsou v kontaktu se zemí a podzemní vodou, je posuzována primárně z pohledu vodonepropustnosti. Obvyklá specifikace bílé vany je C25/30 nebo C30/37, XA1 až XA3. Vedle hloubky průsaku tlakovou vodou hraje roli i tvorba a šířka trhlin v konstrukci, kterými může voda prosakovat. Trhliny jsou ovlivněny zejména vývinem hydratačního tepla použitého cementu a následného teplotního gradientu mezi jádrem a povrchem konstrukce během zrání betonu, na což volba kameniva nemá vliv. Druhým faktorem ovlivňujícím tvorbu trhlin je smrštění betonu od vysychání a hydratace cementu. Smrštění od vysychání je u betonů s recyklovaným kamenivem vyšší, ne však natolik, aby rozhodovalo o tvorbě trhlin v konstrukci. Vzhledem k velké pozornosti, které se této části staveb při výstavbě dostává, a potenciálně vysokým nákladům spojených se sanací případných vad,

je stále rozumné přistupovat k využití recyklátu pro tento typ konstrukcí obezřetně. V případě konzervativního přístupu se tedy recyklované kamenivo použít nedoporučuje vůbec a pro progresivní přístup s maximálně 15% podílem.

**U vodorovných nosných konstrukcí**, tedy stropů, průvlaků a trámů, se vedle únosnosti posuzuje i mezní stav použitelnosti, konkrétně limitní hodnota průhybu konstrukce, která je významně ovlivněna modulem pružnosti betonu. Zde je tedy využití recyklátu omezeno, neboť modul pružnosti betonu se při vyšším podílu recyklátu výrazně snižuje. Ovšem u nižších dávek recyklátu, okolo 15 %, je modul pružnosti ovlivněn jen minimálně. Při návrhu je vždy rozhodující konstrukční systém celé stavby, konzervativně by však bylo možné využít pro vodorovné konstrukce beton s podílem recyklátu do 15 %, progresivně pak do 30 %, pokud to konstrukční návrh dovolí.

**Svislé nosné i nenosné stěnové konstrukce** se obvykle navrhují ve specifikaci C25/30 nebo C30/37, XC1. Z hlediska únosnosti je ve většině případů rozhodující pevnost betonu v tlaku, která je stejná jako u běžného betonu. Nicméně u mezibytových stěn je důležitá i vzduchová neprůzvučnost, která zajišťuje akustický komfort obyvatel stavby. Vzduchová neprůzvučnost je ovlivněna hlavně objemovou hmotností materiálů v konstrukci. Při posuzování konstrukce je tedy nutné vzít nižší objemovou hmotnost betonu s recyklátem v úvahu. Laboratorní a in-situ zkoušky potvrdily, že při ob-

7 Realizace vrtaných pilot za využití betonu s recyklovaným kamenivem o 15% podílu 8 Betonáž podkladních betonů na projektu Nová Waltrovka za využití betonu s recyklovaným kamenivem R-CRETE® o 50% podílu



vyklé tloušťce stěny 200 mm lze použít beton se 100% podílem recyklovaného kameniva, a přitom splnit požadavek ČSN 73 0532 na váženou stavební neprůzvučnost konstrukce mezi dvěma obytnými místnostmi sousedních bytů. V konzervativním přístupu se podíl recyklátu v betonu pro stěnové konstrukce omezí na 50 %, v progresivním přístupu lze využít až 100 %. U svislých nosných prutových konstrukcí typu sloup nebo pilíř je využití recyklátu omezenější, jelikož se jedná o koncentrované zatížení, kde může hrát významnou roli i dotvarování konstrukce.

**Exteriérové konstrukce,** kterými jsou míněny zejména atiky střech a balkónů, příp. opěrné stěny a pochozí plochy v okolí staveb, jsou navrhovány do prostředí XF1 až XF4, kde je pro konstrukci zásadní mrazuvzdornost betonu. Jak již bylo zmíněno, mrazuvzdornost betonu s recyklátem zatím není konzistentní natolik, aby jej bylo možné bez velkých rizik využít i pro tento typ konstrukcí. Z tohoto důvodu se v konzervativním přístupu s využitím recyklátu vůbec nepočítá a v progresivním přístupu lze přistoupit na maximálně 15% podíl, kde lze předpokládat, že vliv na mrazuvzdornost betonu bude minimální, stejně jako tomu je u ostatních parametrů betonu.

Na závěr této sekce je nutné zmínit, že podíly recyklovaného kameniva uvedené u konzervativního přístupu jsou již pro jednotlivé typy konstrukcí na mnoha stavbách běžně využívány. Současně z výše uvedeného vyplývá, že obsah recyklátu do 15 % z celkového objemu kameniva obnáší pro konstrukce

**Tab. 1** Potenciální úspory přírodního kameniva na projektu středně velké bytové stavby při využití recyklovaného kameniva v betonu

Typ konstrukce	Množství betonu [m <sup>3</sup> ]	Množství kameniva [t]	Konzervativní přístup		Progresivní přístup	
			Podíl recyklátu v betonu [%]	Úspora přírodního kameniva [t]	Podíl recyklátu v betonu [%]	Úspora přírodního kameniva [t]
Exteriérové konstrukce	600	1 050	0	0	15	160
Svislé konstrukce	1 700	2 980	50	1 490	100	2 980
Vodorovné konstrukce	3 100	5 420	15	820	30	1 630
Bílá vana	1 400	2 450	0	0	15	360
Podkladní beton	300	530	50	260	100	520
Založení – piloty	950	1 660	30	500	50	830
<b>Celkem</b>	<b>8 050</b>	<b>14 090</b>		<b>3 070</b>		<b>6 480</b>

minimální riziko a lze jej využít v zásadě pro všechny typy konstrukcí.

### Modelový příklad bytové stavby a využití betonu s recyklátem

V tab. 1 je uveden příklad středně velké bytové stavby, na niž je aplikován konzervativní i progresivní přístup k využívání betonu s recyklovaným kamenivem na jednotlivé typy konstrukcí. Množství betonu vychází z výkazu výměr reálného projektu, čísla jsou pro přehlednost zaokrouhlena na desítky. Na 1 m<sup>3</sup> betonu je uvažováno 1 750 kg kameniva. Celkem se na bytovou stavbu takového rozsahu spotřebuje přibližně 8 000 m<sup>3</sup> betonu, čemuž odpovídá 14 000 t kameniva. Při aplikaci konzervativního přístupu k využívání recyklátu lze na jednom projektu ušetřit lehce přes 3 000 t kameniva. U progresivního přístupu by se jednalo o téměř 6 500 t kameniva. Největší objem betonu bo-

hužel zaujímají stropní konstrukce, kde je využití recyklátu omezeno kvůli nepříznivému vlivu recyklátu na modul pružnosti. Nejvýznamnější úspory tedy nabízí svislé konstrukce, pro které lze využít beton s vysokým podílem recyklátu a které zároveň tvoří druhý největší objem betonových konstrukcí.

V absolutních číslech se potenciální úspory z jedné bytové stavby nezdaří být závratné, nicméně je dobré se na celou věc podívat z širší perspektivy. Bytových staveb různých rozsahů se např. v Praze a okolí během jednoho roku zhotoví desítky. Na druhou stranu, nový most vznikl v Praze naposled před 10 lety (Trojský most) a nyní se nově buduje most Dvorecký. Na výstavbu Dvoreckého mostu bude celkem potřeba přibližně 32 500 t kameniva. V případě, že bychom aplikovali konzervativní přístup k využívání betonu s recyklátem na bytové projekty, pak by stačilo pouze necelých 11 středně velkých bytových

#### 9 Betonáž stropní konstrukce v rámci bytového projektu Rohan City za využití betonu s recyklovaným kamenivem o 15% podílu





**10** Realizace obytného souboru Vackov, kde byl využit beton s recyklovaným kamenivem R-CRETE® s 50% podílem recyklátu převážně na stěnové konstrukce

#### Literatura:

- [1] BUCK, A. D. Recycled Concrete as a Source of Aggregate. *Journal Proceedings*. 1977, Vol. 74(5), pp. 212–219. ISSN 0002-8061. DOI:10.14359/11004
- [2] THE 17 GOALS | *Sustainable Development*. Dostupné z: <https://sdgs.un.org/goals>
- [3] DE BRITO, J., SAIKIA, N. *Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste*. London; New York: Springer, 2013. Green energy and technology. ISBN 978-1-4471-4539-4.
- [4] *Produkce, využití a odstranění odpadů za období 2020*. Praha: Český statistický úřad, 2021. Dostupné z: <https://csu.gov.cz/>
- [5] GODÁNY, J. Současný stav disponibilních zásob v využívaných ložiskách stavebního kamene a štěrkopísku v ČR. *Beton TKS*. 2021, roč. 21 č. 1, s. 15–21. ISSN 1213-3116.
- [6] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [7] ČSN P 73 2404. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [8] WANG, B., YAN, L., FU, Q., KASAL, B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021, Vol. 171, 105565. ISSN 0921-3449. DOI:10.1016/j.resconrec.2021.105565
- [9] SLÁNSKÝ, B., ZELINKA, P., ČERMÁK, J. Beton z recyklovaného kameniva. *Beton TKS*. 2021, roč. 21 č. 1, s. 32–37. ISSN 1213-3116.
- [10] PAVLŮ, T., FORTOVÁ, K., PEŠTA, J., ŘEPKA, J., VLACH, T. Možnosti náhrady přírodního drobného těžného kameniva v betonu recyklovaným kamenivem: experimentální a environmentální vyhodnocení. *Beton TKS*. 2023, roč. 23, č. 1, s. 28-31. ISSN 1213-3116.
- [11] HURTIG, K., RYDVAL, M., KOLÍSKO, J., Opětovné využití stavebního a demoličního odpadu jako recyklovaného kameniva do betonu. *Beton TKS*. 2023, roč. 23, č. 1, s. 14-19. ISSN 1213-3116.
- [12] HLAVSA, Z. Akustické vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem. *Beton TKS*. 2023, roč. 23, č. 1, s. 20-24. ISSN 1213-3116.
- [13] NEDELJKOVIĆ, M., VISSER, J., ŠAVIJA, B., VALCKE, S., SCHLANGEN, E. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*. 2021, Vol. 38, 102196. ISSN 2352-7102. DOI:10.1016/j.jobbe.2021.102196.
- [14] CDE | *Non hazardous soil washing*. Dostupné z: <https://www.cdegroupp.com/applications/waste-recycling/soil-washing>

staveb k ušetření dostatečného množství přírodního kameniva na výstavbu Dvoreckého mostu. Tedy na stavbu, u které očekáváme životnost 100 a více let a kde vyžadujeme maximální možnou kvalitu od všech použitých materiálů. V případě progresivního přístupu by se jednalo pouze o přibližně pět bytových staveb takového rozsahu.

### Závěr

V článku byla komplexně shrnuta problematika betonu s recyklovaným kamenivem a jeho praktické využití na stavbách, které je určeno zejména dostupností recyklátu a materiálovými vlastnostmi betonu z něj vyrobeného. Recyklát je dostupný hlavně v okolí velkých měst a nabízí se jej tedy využívat hlavně při výstavbě bytových staveb, jednak kvůli dostupnosti a jednak proto, že tyto konstrukce jsou z hlediska požadavků na vlastnosti betonu nejméně náročné. Z větší části se jedná o konstrukce s požadavkem na pevnost do třídy C30/37 a minimální náročností z pohledu trvanlivosti.

V závislosti na typu konstrukce lze aplikovat různý podíl recyklovaného kameniva v betonu a tím maximalizovat množství betonu s recyklátem využitého v konstrukcích, ale zároveň neohrozit fungování konstrukce kvůli negativnímu dopadu recyklátu na vlastnosti betonu. Momentálně je tento přístup velmi problematický, neboť

v normách pro výrobu betonu není využít směsného recyklovaného kameniva víceméně povolené a projektanti tak nemají efektivní nástroj, jak beton s recyklátem specifikovat již v projektu. Nyní toto funguje z velké části na individuální bázi, kdy se použití betonu s recyklátem řeší dodatečně v průběhu výstavby.

Podpořit využívání betonu s recyklovaným kamenivem lze neefektivněji úpravou norem. V českém prostředí se připravuje revize doplňkové normy pro výrobu betonu ČSN P 73 2404. Základním krokem vpřed by mohlo být definovat a vydat doporučení pro využívání směsného recyklovaného kameniva drobné i hrubé frakce pro specifikace betonu odpovídající konstrukcím bytových staveb, a to alespoň s podílem recyklátu 15 %. Nabízí se to jako kompromis mezi konzervativním přístupem k navrhování staveb a snahou implementovat principy udržitelnosti do výstavby nových budov.

Na příkladu modelové bytové stavby bylo ukázáno, že potenciální úspory přírodního kameniva, kterých lze docílit využitím recyklátu, nejsou v rámci jedné stavby závratné. U středně velké bytové stavby se jedná o 3 000 až 6 500 t kameniva v závislosti na podílu recyklátu v betonu použitým v jednotlivých typech konstrukcí. Nicméně, konzistentní aplikací u velkého množství staveb jsou již úspory nezanedbatelné a ušetřené přírodní kamenivo lze využít na konstrukce, kde je jen těžko nahraditelné.

Beton zůstane s velkou pravděpodobností nevyužívanějším stavebním materiálem i v následujících letech. Častějším využíváním recyklovaného kameniva lze zpomalit problémy s nedostatkem přírodního kameniva, které jsou v mnoha částech Česka i zbytku světa čím dál častější. Moderní stavebnictví by mělo brát aspekt udržitelnosti v úvahu a využívání recyklovaného kameniva v betonu tuto myšlenku zcela naplňuje.

*Příspěvek vznikl za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS24/040/OHK1/1T/11.*

*Fotografie: archiv autora*



Ing. Zdeněk Hlavsa  
TBG Metrostav s.r.o.  
zdenek.hlavsa@tbg-beton.cz