

MOŽNOSTI A OMEZENÍ RECYKLACE BETONU ■

OPPORTUNITIES AND LIMITATIONS OF CONCRETE RECYCLING

Anette Müller

Výroba betonu by v budoucnosti mohla více využívat recyklované kamenivo. První část příspěvku je zaměřena na optimalizaci návrhu směsi a procesu míchání ve vztahu k mechanickým vlastnostem výsledného betonu s recyklovaným kamenivem. ■ In the future, concrete production could increasingly rely on use of recycled aggregates. Part I of this article deals with the optimization of the mix design and mixing process and refers to the mechanical properties of recycled-aggregate concrete.

Beton je celosvětově nejužívanější stavební materiál. Uvažujeme-li množství cementu vyrobeného v Německu od roku 1950 a určeného pro výrobu betonu a spočítáme-li množství betonu, které je obsaženo ve stávajících budovách a konstrukcích, dostaneme se k hypotetickému výsledku přesahujícímu 12 bil. t (obr. 1).

Avšak skutečné množství betonu ve stávajících stavbách od roku 1950 je menší, protože je třeba odečíst objem uskutečněných demolic. Předpokládáme-li, že tento objem betonu odpovídá 18 % jeho roční produkce až do roku 1995, množství betonu obsažené v existujících budovách a konstrukcích se rovná zhruba 10 bil. t.

Člověkem vyrobené zásoby betonu tak dosahují významné úrovně. Vzrůstající podíl těchto zásob se bude postupně užívat jako surovina, přestože objem těchto zásob je stále významně nižší než stávající zásoby písku a štěrku odhadované na 220 mld. t [2].

ZAVÁDĚNÍ DO PRAXE

Každý rok podlehnou demolic stavby, v kterých je obsaženo asi 80 mil. t umělých stavebních materiálů. Po recyklaci je asi 50 až 60 mil. t materiálů opět použito v silničním a inženýrském stavitelství (obr. 2). V této oblasti jsou používány materiály získané recyklací asfaltových vrstev a drceného betonu. Tento sektor tak může těžit z téměř uzavřeného materiálového cyklu. Naopak v oblasti pozemního stavitelství je podíl použitých recyklovaných materiálů zatím nízký. Např. v průměru pouze 1,2 mil. t drceného betonu je recyklováno jako kamenivo pro použití ve výrobě betonu. Tato čísla odpovídají asi

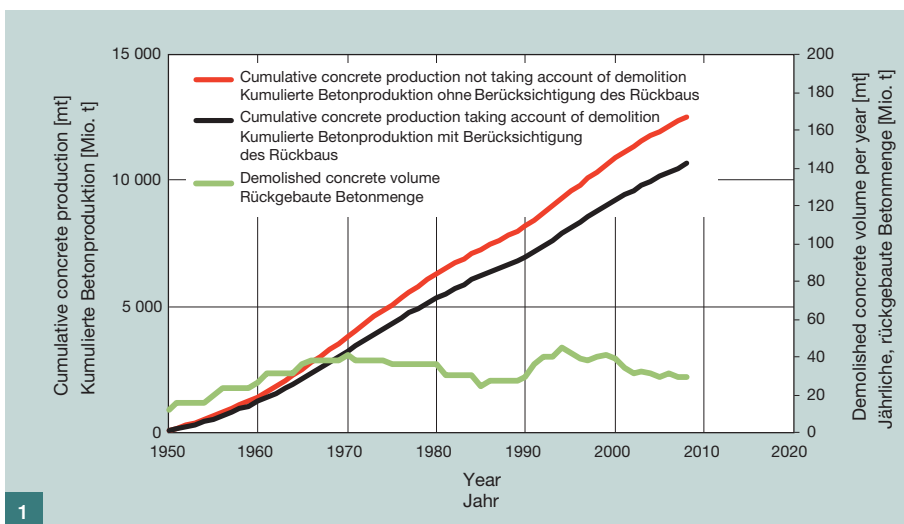
2,2% podílu v celkovém objemu recyklovaného stavebního odpadu.

Jedna z předběžných podmínek k stanovení produkce betonu z recyklovaného kameniva v praxi je existence pravidel a standardů, které definují požadavky na toto kamenivo a jeho případné použití v betonu. Tato pravidla byla připravována částečně na základě poznatků ze společného výzkumného projektu „Materiálový cyklus v betonovém stavebnictví“ a v souvislostech se zaváděním evropských norem. Mezitím jsme dosáhli stadia, kdy je možné, v závislosti na specifickém použití betonu, nahradit určitou část přírodního kameniva recyklovaným materiálem definovaného složení, které by se následně nemělo měnit.

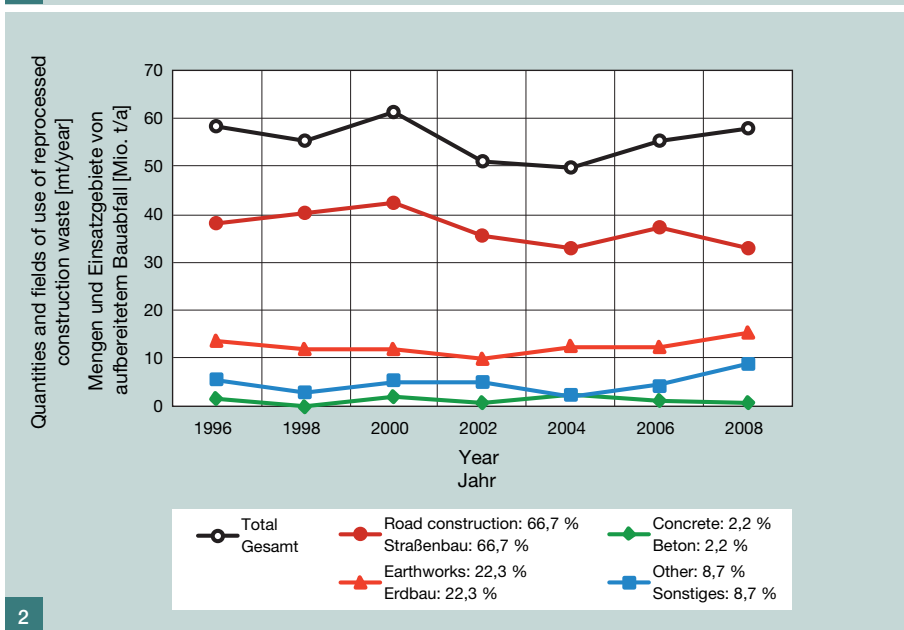
Výstavba modelových budov je další

nástroj, který byl před několika lety použit k upozornění na aspekty recyklace v oblasti výstavby budov. Iniciativy, které začaly v Ludwigshafenu a ve Stuttgartu v roce 2009, ukázaly, že beton s použitím recyklovaného kameniva vyráběný podle odpovídajících pravidel a norem je vyspělý materiál, který může mít významné přínosy zejména z hlediska udržitelnosti prostředí [4, 5, 6].

V urbanizovaných aglomeracích, kam je nutné přírodní kamenivo dovážet z velkých vzdáleností, poskytuje recyklované kamenivo řadu výhod, protože je dostupné buď místně, nebo ze zdrojů místu blízkých. Očekáváme nárůst použití recyklovaného kameniva pro výrobu betonu, zvláště v takových oblastech, kde je současně vysoká poptávka po stavebních činnostech.



1



2

Obr. 1 Množství betonu nashromážděného ve stávajících budovách a konstrukcích v Německu (data o produkci cementu použita z [1], zjednodušený výpočet objemu betonu vylučuje použití cementu v jiných produktech) ■ Fig. 1 Amount of concrete accumulated in existing buildings and structures in Germany (cement production data taken from [1], simplified calculation of the concrete volume excluding the use of cement in other products)

Obr. 2 Recyklovaná množství stavebního odpadu a obory, které užívají recyklovaný stavební materiál z tohoto odpadu v Německu [3] ■ Fig. 2 Recycled amount of construction waste and fields of use of recycled building materials produced from this waste in Germany [3]

Obr. 3 Drcený beton různých složení odebraný z haldy štěrku, a), c) zrna kompozitu tvořená zrna kameniva spojenými cementovou pastou, b) kousek malty, d) téměř od malty očištěné zrna kameniva ■

Fig. 3 Granulated concrete in various compositions taken from a rubble stockpile, a), c) composite particles from aggregates bonded by cement paste, b) mortar particle, d) almost mortar-free gravel particle



3a



3b



3c



3d

SOUČASNÝ STAV VÝZKUMU VÝROBY BETONU S POUŽITÍM RECYKLOVANÉHO KAMENIVA

Vliv postupů přípravy na kvalitu recyklovaných materiálů

Zrna recyklovaného kameniva do betonu tvoří směs, přestože demolice a následné třídění materiálu probíhalo přiměřeně pečlivě. Složení se může měnit zrna od zrna (obr. 3).

To, že recyklované kamenivo tvoří směs, má vliv na kolísání jeho vlastností. Zvláště hodnoty pórovitosti se mohou měnit od hodnot pórovitosti cementové pasty až po pórovitost přirozeného kameniva, což snižuje věrohodnost kvality recyklovaných materiálů. Kromě toho kvalita těchto materiálů kolísá ve srovnání s přírodními materiály mnohem více. Cílem různých výzkumů je proto redukovat pórozitu těchto materiálů.

Jeden z přístupů se zaměřil na vývoj postupů přípravy zrn recyklovaného kameniva bez zbytků cementové pasty. Lze je rozlišit do tří kategorií:

- metody zaměřené na vytvoření tahových a tlakových napětí působících na rozhraní cementové pasty a zrn přírodního kameniva,
- metody spoléhající na účinky brusiva,
- metody kombinující účinky tepla a brusiva.

Elektrodynamický proces a mikrovlny

Literatura [9] zahrnuje přehled těchto metod. Metoda zaměřená na vytvoření

tahových a tlakových napětí na rozhraní složek betonu byla popsána teprve nedávno [10]. Byl použit elektrodynamický proces, při kterém byl beton ponořen do vody, kde byl vystaven podvodním výbojům. Jiný proces vyšetřoval užití mikrovln k zeslabení struktury betonu. Ve srovnání s referenčním betonem bylo možno sledovat zvýšené množství zrn kameniva bez cementové pasty. Pro příklad: podíl těchto zrn v intervalu 6,3 až 8 mm dosahoval 26 % u referenčního betonu, zatímco u betonu vystavenému působení mikrovln tento podíl stoupl na 33,2 % a při působení elektrodynamického procesu na 45,6 %.

Noguchi [11] popisuje také použití mikrovln k přípravě recyklovaného kameniva do betonu prostého cementové pasty. Na povrch zrn přírodního kameniva použitého do betonu později určeného k recyklaci je předem nanesen dielektrický (nevodivý) materiál. Jsou-li takové betony později vystaveny působení mikrovln, „úprava“ kameniva způsobí zahřátí pouze přechodové vrstvy mezi kamenivem a cementovou pastou a následně rozdělení kompozitu právě v tomto místě.

Sui [12, 13] vyčerpávajícím způsobem zkoumal působení tepla a abraze. Podle závěrů těchto prací teploty od 250 do 300 °C jsou dostatečné k tomu, aby cementová pasta zkrésla tak, že může být odstraněna z povrchu zrn přírodního kameniva během následného mletí v bubnovém mlýnu. Jeden z parametrů, podle kterých lze

posoudit kvalitu předchozího „ošetření“ teplem, je podíl pasty. Před ošetřením se podíl pasty na zrnech velikosti 2-4 mm a 4-8 mm pohyboval od 18,5 do 22,3 hm. %, po ošetření klesnul na 6,9 až 9,7 hm. %.

Noguchi tvrdí [11], že příprava recyklovaných zrn kameniva bez cementové pasty kombinovaným působením tepla a abraze už byla odzkoušena na úrovni provozní zkoušky. Zařízení o denním výkonu 4 t vyrábělo hrubé a jemné kamenivo téměř bez cementové pasty a jemně dispergovaný druhotný produkt obohacený vysokým podílem pasty.

Povrchová úprava mikrosilikou

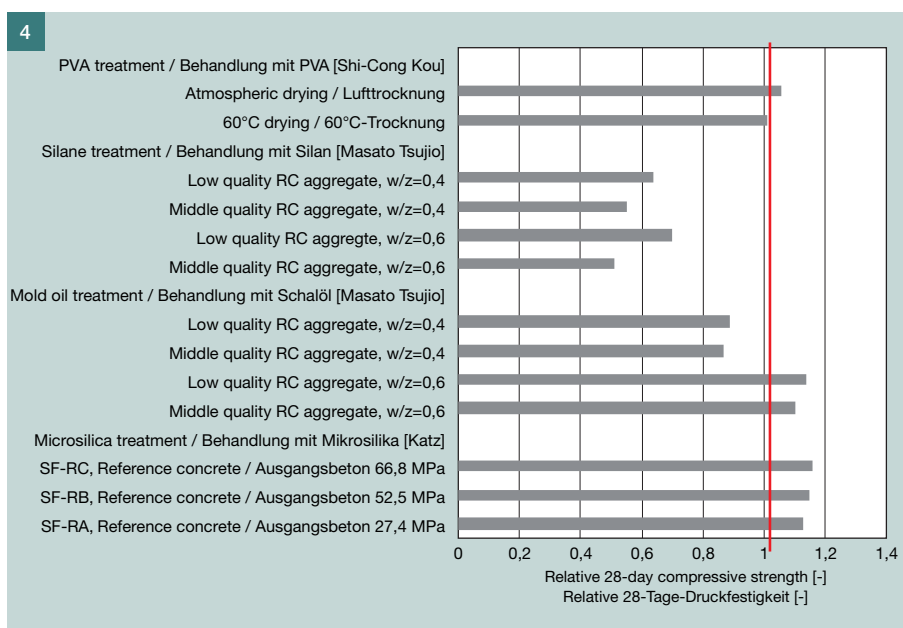
Tam [14] navrhuje oddělit cementovou pastu od hrubých zrn recyklovaného kameniva pomocí kyseliny. 0,1 mol. roztoky kyseliny chlorové, sírové a fosforečné byly použity k tomuto účelu. Dosažené výsledky však byly relativně malé. Vyhodnocení probíhala na základě porovnávání změn nasákavosti a tlakové pevnosti.

Jiný přístup jak zlepšit vlastnosti recyklovaného kameniva je řízené utěsnění povrchu zrn recyklovaného kameniva. Katz [15] použil ultrazvukové čištění na hrubá zrna recyklovaného kameniva odebraného ze tří laboratoří s různou tlakovou pevností a následně je ponořil do suspenze mikrosiliky s 10 % pevných částic. Tento krok způsobil usazení pevného materiálu na povrchu zrn kameniva v množství cca 0,5

Obr. 4 Účinky různých metod ošetření povrchu recyklovaného kameniva na relativní tlakovou pevnost betonu, jako referenční byl použit beton z recyklovaného kameniva s neošetřeným povrchem, [15, 17 a 18] ■ Fig. 4 Effects of various surface treatment methods on relative compression strength, with untreated recycled-aggregate concrete used as a reference [15, 17, 18]

Obr. 5 Proces míchání užívající dvoufázový postup (TSM) dle Tam [30] ■ Fig. 5 Mixing process applying the two-stage mixing approach (TSM) according to Tam [30]

Obr. 6 Proces míchání užívající třífázový postup podle Deyu Kong [33] ■ Fig. 6 Mixing process applying the triple mixing method according to Deyu Kong [33]



až 0,8 % hmotnosti kameniva. Betony vyrobené z tohoto „potahovaného“ kameniva vykazovaly vzrůst tlakové pevnosti ve srovnání s betony z neošetřeného kameniva. Tento nárůst byl významnější u sedmidenních pevností než u 28denních. Beton z přírodního kameniva po ošetření stejným postupem vykazoval pokles pevnosti.

Descarrega [16] zkoušel také potahovat povrch zrn recyklovaného kameniva mikrosilikou. Analýza ukázala pucolánový efekt mezi přidanou mikrosilikou a hydroxidem vápníku, který vedl ke zvýšení pevnosti zrn.

Tsujino [17] zkusil upravit povrch částic recyklovaného kameniva pomocí vodu odpuzujících přísad. Vybral dva produkty běžně používané v technologii betonu: odbedňovací olej a hydrofobní silan. Pevnosti betonů, které obsahovaly zrna kameniva ošetřené silanem, byly podstatně nižší než betonů obsahujících neošetřené kamenivo nebo kamenivo ošetřené odbedňovacím olejem.

Karbonatace

Kou [1] vyšetřoval impregnaci hrubých zrn recyklovaného kameniva pomocí polyvinyl alkoholu (PVA) jako metodu ke zlepšení jejich kvality. Z hlediska jejich pevnosti, ošetřené kamenivo vykazovalo bezvýznamné zlepšení po 28 dnech ale mnohem významnější po 90 dnech ve srovnání s neošetřeným kamenivem. Znatelné zlepšení bylo shledáno také u dalších charakteristik, např. smrštění vysycháním a odolnost proti pronikání chloridových iontů.

Zlepšení kvality pomocí tzv. „samohojení“, v tomto případě šlo o ponoře-

ní podrceného betonu do vody s očekávanou následnou hydratací, popisované v [19] bylo shledáno jako zanedbatelné. Vyšetřovaný drcený beton byl odebrán z laboratoře zabývající se zkoušením betonu, což mohlo být příčinou toho, že beton byl relativně mladý a nereprezentoval tak beton odebraný ze stojící budovy. Obr. 4 ukazuje různé použité metody úprav povrchů recyklovaného kameniva a jejich vliv na tlakovou pevnost. Tyto výsledky dovolují učinit závěr, že ošetřením mikrosilikou lze dosáhnout nejvýznamnějšího zlepšení. Účinky jiných postupů jsou buď zanedbatelné, nebo dokonce přispívají k poklesu tlakové pevnosti.

Seidemann [20] a Garbiec [21] popisují cílenou karbonataci recyklovaného kameniva určeného pro beton jako postup k utěsnění povrchu zrn. Seidemann upravoval recyklované kamenivo v trubkovém reaktoru, kterým procházela směs oxidu uhličitého a vzduchu. Použitím rtuťového porozimetru bylo změřeno, že za dvanáctihodinové vystavení kameniva působení CO_2 (20 obj. % ve vzduchu) klesla jeho porovitost z 35 obj. % na 25,2 obj. %. Garbiec vystavil zrna recyklovaného kameniva usazování biomateriálu použitím určitého druhu bakterií, což způsobilo pokles absorpce vody až na 1 hm. %.

Vliv změn v návrhu směsi na kvalitu betonu z recyklovaného kameniva

Metoda používaná pro výpočet složení směsi betonu s recyklovaným kamenivem je obvykle stejná, jaká se používá pro beton s přírodním kamenivem. Ná-

vrh směsi může zahrnovat dodatečnou vodu, jejíž požadavek je dán absorpcí vody do pórů recyklovaného kameniva. V tom případě je nutné rozlišovat mezi účinným poměrem vody a cementu, který vychází z množství cementu a množství vody potřebné k jeho hydrataci a tzv. „velkým“ nebo celkovým poměrem vody a cementu, který zahrnuje přídavné množství vody absorbované recyklovaným kamenivem.

V literatuře [22, 23] jsou popsány další metody, které jdou za objemovou specifikací návrhu betonu:

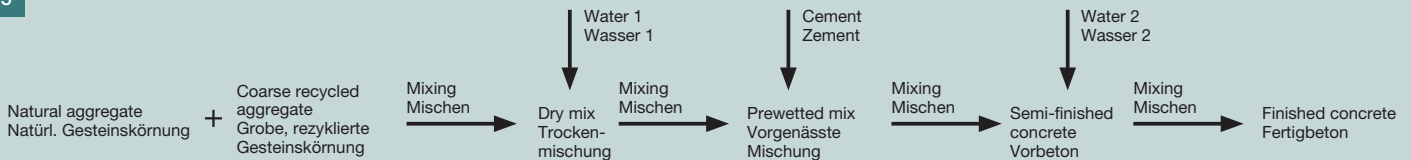
- Direct weight replacement method (DWR) – určité váhové množství přírodního kameniva je nahrazeno stejným množstvím recyklovaného kameniva. Množství cementu a vody ve směsi se nemění.
- Equivalent mortar replacement method (EMR) podle Fathifazla [23] – recyklované kamenivo je považováno za dvoufázový kompozit, který se skládá z malty ulpívající na zrnech kameniva a původního hrubého přírodního kameniva. Objem malty na zrnech je zahrnut do výpočtu návrhu směsi.

Použití druhé metody vyžaduje experimentální určení množství malty obsažené v recyklovaném kamenivu. Používají se následující postupy:

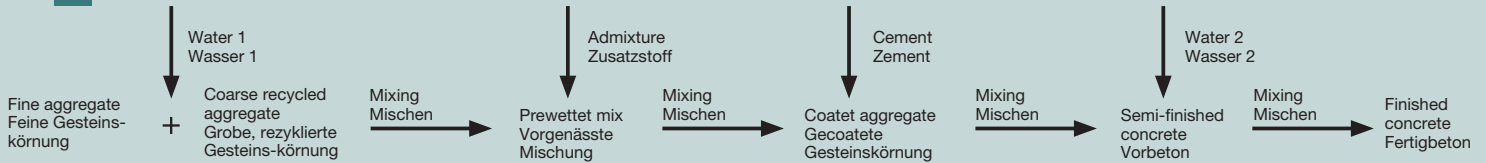
- Po nasáknutí vodou a následném vysušení je malta ze zrn mechanicky odstraněna [24].
- Struktura malty je uvolněna ošetřením Na_2SO_4 a vystavením zmrazovacím cyklům. Potom je malta odstraněna mechanicky [25].

Srovnávací analýza účinků jednotlivých přístupů ke kompozici návrhu

5



6



směsi betonu s jeho výslednými charakteristikami je popsána v [22]. Z hlediska kompozice směsi analýza ukázala relativně zanedbatelné rozdíly v návrzích směsi počítaných na základě objemové a váhové metody (tab. 1). Použitím metody EMR k výpočtu návrhu směsi bylo dosaženo významných rozdílů, když 42 obj. % přírodní hrubého kameniva bylo nahrazeno recyklovaným kamenivem.

EMR betony

Při vyčíslování charakteristik betonu dle Knaacka [22] pro porovnatelné směsi byl shledán dramatický pokles zpracovatelnosti v závislosti na rostoucím podílu recyklovaného kameniva pro EMR betony, dokonce i když byl přidáván plastifikátor k zvrácení tohoto trendu. Jen malé rozdíly v pevnosti se ukázaly u směr s náhradou kameniva určenou objemově a váhově. Pevnosti EMR betonů jsou nižší než betonů vyráběných dle postupu objemového a váhového návrhu směsi. EMR betony vyrobené Fathifazlem [23] nevykazovaly změny v pevnosti, protože obsah cementu a vody v nich se lišil jen nevýznamně od těch betonů, které byly navrženy konvenčním způsobem. Bylo však zaznamenáno zvýšení modulu pružnosti.

Porovnání různých postupů návrhu směsi betonu ukazuje, že EMR postup nevede k přesvědčivým výhodám. Předpoklady, na kterých je tato metoda založena (že stará malta na povrchu zrn je příčinou zhoršených vlastností betonu z recyklovaného kameniva), jsou však příliš neurčité. Za prvé, je to stará cementová pasta spíše než malta, co způsobuje změny. Za druhé, zdá se přijatelnější identifikovat varianty pro opětovné zpracování drceného betonu takovým způsobem, aby výsledná zrna kameniva byla zbavena cementové pasty a předešlo se snižování kvality. Dále, je otázkou, zda po-

Tab. 1 Porovnání složení betonů navržených dle různých postupů návrhu betonové směsi, [22] | Tab. 1 Comparison of the composition of concretes according to [22], calculated according to various mix design methods

Beton	Voda [dm ³ /m ³]	Cement [dm ³ /m ³]	Hrubé kamenivo		Jemné kamenivo [dm ³ /m ³]
			přírodní [dm ³ /m ³]	recyklované [dm ³ /m ³]	
referenční	160,1	117,2	444,1	0	278,6
objemový návrh směsi: 42 obj. % hrubé recykl. kamenivo	159,1	116,4	259,9	187,8	276,8
hmotnostní návrh směsi: 41 hm. % hrubé recykl. kamenivo = 43 obj. % hrubé recykl. kamenivo	160,1	117,2	262,1	197,1	263,6
návrh směsi dle EMR postupu: 42 obj. % hrubé recykl. kamenivo	114,4	83,9	349,8	252,6	199,3

stup užívaný ke stanovení obsahu malty je opravdu praktický. Z výše popsaných důvodů by měl být přednostně uváděn poměr staré cementové pasty pro charakterizování recyklovaného kameniva. Tento parametr lze stanovit částečným rozrušením působením kyseliny chlorovodíkové. Tato metoda je založena na určování obsahu cementu dle DIN 52170-3:02-1980 [26] a byla modifikována Weimannem [27] pro určení podílu cementové pasty v recyklovaném kamenivu. Dává spolehlivé výsledky pro recyklované kamenivo, které neobsahuje vápencová zrna nebo prach, jak bylo prokázáno vyšetřováním modelových směsí z čisté cementové pasty a křemičitého kameniva [28].

Poon [29] zkoumal vliv dodatečného přidání vody na kvalitu betonu. Při použití v peci vysušeného hrubého recyklovaného kameniva přidání vody zlepšilo počáteční konzistenci ve srovnání s užitím vodou saturovaného kameniva. Zhoršení konzistence, tzn. postupující tuhnutí směsi po přidání vody, je větší ve srovnání s betonem z recyklovaného kameniva nasáklého vodou, protože vysušené recyklované kamenivo absorbuje vodu ze směsi čerstvého betonu. Poon doporučuje použití recy-

klovaného kameniva s vyváženým obsahem vlhkosti. Betony z něj vyrobené mají vyšší tlakové pevnosti než betony vyrobené z vodou nasyceného recyklovaného kameniva.

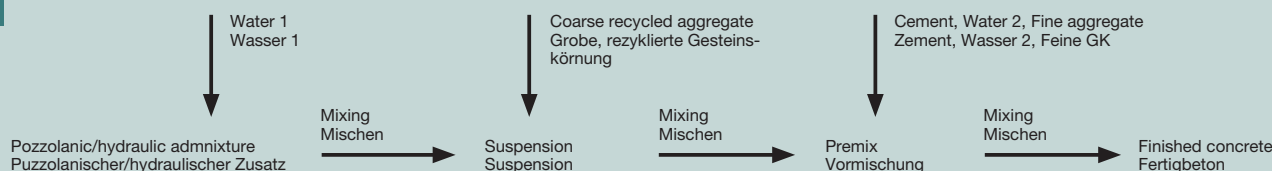
Konzistenci betonu z recyklovaného kameniva lze řídit přidáním plastifikátorů stejným způsobem jako je tomu u betonů vyráběných z přírodního kameniva. Tento postup obvykle eliminuje potřebu dalšího přidávání vody.

Vliv změn v procesu míchání a užití přísad na kvalitu betonu z recyklovaného kameniva

Tam [30, 31 a 32] zkoumal několik změn postupu míchání. Nejvýznamnější vzrůst pevnosti byl dosažen, když upravený postup zahrnoval předmíchání kameniva a jeho následné zvlhčení částí vody z navrhovaného množství vody potřebné do betonové směsi. Cement byl přidán v následujícím kroku. Zbývající část vody byla přidána až po dalším míchání. Podíl hrubého recyklovaného kameniva dosahoval až 30 hm. %.

Byly vyšetřovány i další úpravy včetně rozdělení dávky cementu na dvě po sobě přidávané dávky nebo přidání mikrosiliky v první fázi. Výsledná zlepšení však byla zanedbatelná.

7



Deyu Kong [33] porovnal tři různé postupy míchání:

- všechny složky byly promíchány v suché stavu a následně byla přidána voda,
- postup míchání dle Tama, kdy předvlhčené kamenivo bylo mícháno s cementem a případně přísadami a na konci procesu byl přidán zbytek vody,
- do míchané směsi byly nejprve přidány příměsi a až po nich cement.

Všechno hrubé kamenivo bylo nahrazeno recyklovaným kamenivem. Malý vzrůst 28denní pevnosti byl naměřen při použití dvoufázového míchání oproti míchání všech složek společně. Významné zlepšení bylo naměřeno u betonů, kde směs byla míchána ve třech postupných krocích.

Jiusu Li [34] zkoumal proces míchání, který začínal promícháním recyklovaného kameniva v suspenzi příměsí (obr. 7). V tomto případě bylo všechno hrubé kamenivo nahrazeno recyklovaným kamenivem.

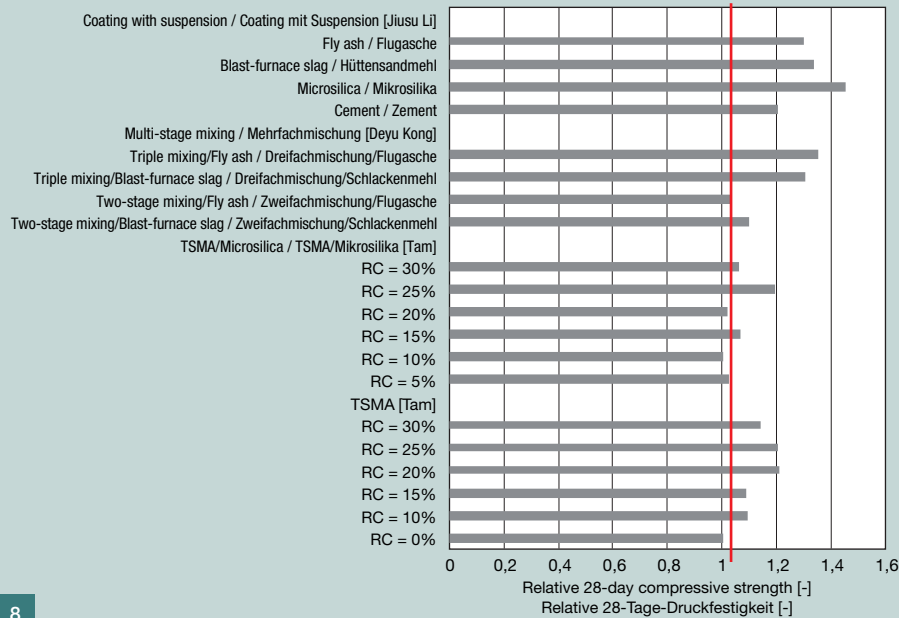
Mikrosilika, popílek a mletá struska jsou užívány jako příměsi. Pevnostní parametry betonu vylepšují významně, ale i zhoršují, pokud jsou dvě příměsi kombinovány v měnících se poměrech.

Na obr. 8 je ukázáno porovnání účinků jednotlivých postupů míchání na 28denní tlakovou pevnost betonu.

Zlepšení přidáním příměsí

Nejvýznamnější zvýšení pevnosti bylo naměřeno pro postup míchání, kdy byly jako první přidány příměsi a teprve po nich cement. Výzkumníci jsou za jedno, že důvody, proč k tomu došlo, jsou následující: příměsi zlepšily hraniční fázi mezi povrchem zrna recyklovaného kameniva a novou cementovou pastou např. vyplněním trhlin v recyklovaném kamenivu. Pro studium chování betonu v těchto specifických případech je užívána elektronová mikroskopie.

Přidání příměsí obvykle vede k zlepšení sledovaných charakteristik a chování ve srovnání s betonem bez nich. Když byly příměsi přidány k cementu, pevnosti betonu s recyklovaným kamenivem se zvýšily v přímé úměře k přida-



8

nému množství příměsí. Toto zlepšení ale nepřekonalo hodnoty stejných veličin měřené na betonu bez recyklovaného kameniva. Přidáním uhelného popílku jako náhrady části cementu však došlo k poklesu pevnosti a významněji u betonu s recyklovaným kamenivem.

Postupem přimíchávání práškových příměsí se zabývalo několik výzkumů. Výsledky ukázaly vzrůst hustoty betonu, což je přisuzováno zvýšení měrné hustoty směsi [35, 36 a 37]. Žádná ze zkoušek však nebyla navržena tak, aby umožnila identifikovat určité charakteristiky zrn recyklovaného kameniva ve spojení s užitím reaktivních práškových materiálů jako náhrady cementu. Otázka, zda hydroxid vápenatý potenciálně přítomný v cementové pastě recyklovaného kameniva je účasten pucolánové reakce, byla položena, ale nebyla systematicky sledována.

Mechanické vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem

Řada výzkumů se zabývala změnou tlakové pevnosti, modulu pružnosti a deformačními parametry betonu. Změňovaly se zejména na podíl recyklovaného kameniva z celkového množství kameniva. V mnoha případech bylo nahrazováno pouze hrubé kamenivo.

Již v roce 2003 se Müller [7] pokusi-

Obr. 7 Proces míchání s úpravou povrchu

Fig. 7 Mixing process with integrated coating according to Jiusu Li [34]

Obr. 8 Vlivy různých postupů míchání betonové směsi na relativní tlakovou pevnost betonu, jako reference byl užit beton s recyklovaným kamenivem zamíchaný obvyklým postupem [30, 31, 32, 33 a 34]

Fig. 8 Effects of various mixing processes on relative compressive strength, with recycled-aggregate concretes produced in a conventional mixing process used as a reference [30, 31, 32, 33 a 34]

la shromáždit a systematicky utřídit vysoký počet výsledků různých výzkumů. Hodnoty naměřené na betonech s recyklovaným kamenivem byly porovnávány s odpovídajícími referenčními betony k eliminaci možných vlivů použitého nového kameniva a nové cementové pasty. Při opakování těchto analýz s novými daty dospěla k stejným závěrům, jako už byly publikovány. Relativní tlaková pevnost a modul pružnosti klesá se zvyšováním podílu použitého recyklovaného kameniva a pokles hodnot modulu pružnosti je výraznější než pokles tlakové pevnosti (obr. 9 a 10). K tomu je dochází, protože podíl staré cementové pasty se zvyšuje se zvyšujícím se množstvím recyklovaného kameniva. Vliv této pasty je jiný na modul pružnosti a jiný na tlakovou pevnost. Uvažo-

Literatura:

- [1] <http://www.bdzement.de/> *Stichwort Statistik*
- [2] Weil M.: Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen. Schriftenreihe WAR der Technischen Universität Darmstadt. Heft 160. Darmstadt 2004
- [3] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB): 1.-7. Monitoring-Bericht Bauabfälle für die Jahre 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008. Berlin/ Düsseldorf/Duisburg
- [4] Ifeu-Institut Heidelberg, Hochwertige Verwertung von Bauschutt als Zuschlag für die Betonherstellung. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg, Zwischenbericht Dezember 2010, unter: <http://www.rc-beton.de/rc-betonprojekte/stuttgart-ost/stuttgart-ost-download.html>
- [5] Bauen mit RC-Beton. Downloads: <http://www.rc-beton.de/downloads1.html>
- [6] Mettke A.: RC-Beton – Qualität und Qualitätssicherung. Fachtagung Recycling R10, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, Bauhaus-Universität, Weimar 2010
- [7] Müller A.: Baustoffkreisläufe – Stand und Entwicklungen. Ibausil-Tagungsbericht, S. 1-1289 – 1-1308, Weimar, September 2003
- [8] Müller A.: Qualitätsparameter für rezyklierte Zuschläge – Ableitung aus Sicht der Betontechnik und der Aufbereitungstechnik. Ibausil-Tagungsbericht, S. 2-1015 – 2-1033, Weimar, September 2009
- [9] Müller A.; Rübner K.; Schnell A.: Das Rohstoffpotenzial von Bauabfällen. Chemie Ingenieur Technik Vol. 82 (2010), No. 11, S. 1861-1870
- [10] Menard Y.; Bru K.; Touze S.; Lemoigen A.; Poirier J. E.; Ruffie F.; Bonnaudin F., von der Weid F.: Innovative Process Routes for a High-Quality Concrete Recycling in the Aggregates and Cement Industries. Proc. 13th Intern. Waste Management and Landfill Symp., Sardinia 2011
- [11] Takafumi Noguchi; Ryoma Kitagaki; Hironori Nagai; Masato Tsujino: Completely Recyclable Concrete of Aggregate Recoverytype by Using Microwave Heating Technology. Sao Paulo, 2009
- [12] Yuwu Sui: Untersuchungen zu den Einflussgrößen der thermisch-mechanischen Behandlung für das Recycling von Altbeton sowie Charakterisierung der entstehenden Produkte, Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, 2010
- [13] Yuwu Sui; Mueller A.: Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete. Materials and Structures Vol. 45 (2012) pp.1487–1495
- [14] Tam Vivian W. Y.; Tam C. M.; Lea K. N.: Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. Resources, Conservation and Recycling Vol. 50 (2007), pp. 82–101
- [15] Katz A.: Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering® ASCE (2004) November/December, pp. 597- 603
- [16] Descarrega A.: Quality improvement of the recycled aggregates through surface treatment, Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2011
- [17] Masato Tsujio; Takafumi Noguchi; Masaki Tamura; Manabu Kanematsu; Ipppei Maruyama: Application of Conventionally Recycled Coarse Aggregate to Concrete Structure by Surface Modification Treatment. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 5 (2007), No. 1, pp. 13-25
- [18] Shi-Cong Kou; Chi-Sun Poon: Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. Cement & Concrete Composites Vol. 32 (2010), pp. 649-654
- [19] Ali Abd Elhakam; Abd Elmoaty Mohamed; Eslam Awad: Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete, Construction and Building Materials Vol. 35 (2012), pp. 421–427
- [20] Seidemann M.; Müller A.; Ludwig H.-M.: Verbesserung der Performance von Betonrezyklaten durch CO₂ Speicherung in der Zementsteinmatrix. Ibausil-Posterbeitrag, Weimar, September 2012
- [21] Grabiec A. M.; Klama J.; Zawal D.; Krupa D.: Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition. Construction and Building Materials Vol. 34 (2012) pp. 145–150
- [22] Knaack A. M.; Kurama Y. C.: Design of Normal Strength Concrete Mixtures with Recycled Concrete Aggregates. Structures Congress 2011, S. 3068-3079. Herausgegeben von Dana Ames; Theodore L. Droessler; Marc Hoit. ISBN: 978-0-7844-1171-1
- [23] Fathifazl G.; Abbas A.; Razaqpur A. G.; Isgor O. B.; Fournier B.; Foo S.: New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering © ASCE (2009) October, pp. 601–611
- [24] Marta Sanchez de Juan; Pilar Alaejos Gutierrez: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials Vol. 23 (2009), pp. 872–877
- [25] Abbas A.; Fathifazl G.; Fournier B.; Isgor O.; Zavadile R.; Razaqpur A. G.; Foo S.: Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, Materials Characterization, Vol. 60 (2009), pp. 716–728
- [26] DIN 52170: 1980: Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton. Teil 3
- [27] Weimann K.: Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar 2008
- [28] Wolff E.: Qualitätskriterien für rezyklierte Zuschläge für die Betonherstellung. Bauhaus-Universität Weimar, Diplomarbeit, 2007
- [29] Poon C. S.; Shui Z. H.; Lam L.; Fok H.; Kou S. C.: Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research Vol. 34 (2004) pp. 31–36
- [30] Tam Vivian W. Y.; Gao X. F.; Tam C. M.: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and Concrete Research Vol. 35 (2005), pp. 1195–1203
- [31] Tam Vivian W. Y.; Gao X. F.; Tam C. M.: Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete. Magazine of Concrete Research Vol. 58 (2006), pp.477–484
- [32] Tam Vivian W. Y.; Tam C. M.: Diversifying two-stage mixing approach (TSMa) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. Construction and Building Materials Vol. 22 (2008), pp. 2068–2077
- [33] Deyu Kong; Ting Lei; Jianjun Zheng; Chengchang Ma; Jun Jiang; Jing Jiang: Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials Vol. 24 (2010), pp. 701–708
- [34] Jiusu Li, Hanning Xiao, Yong Zhou: Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials Vol. 23 (2009), pp. 1287–1291
- [35] Kou S. C.; Poon C. S.: Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, Construction and Building Materials, Vol. 35 (2012), pp. 69–76
- [36] Corinaldesi V., Moriconi, G.: Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials Vol. 23 (2009), pp. 2869–2876
- [37] Rattapon Somna; Chai Jaturapitakkul; Amde M. Made: Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. Cement & Concrete Composites Vol. 34 (2012), pp. 848–854

Obr. 9 Závislost relativní 28denní tlakové pevnosti a modulů pružnosti na poměru použitého recyklovaného kameniva [38, 39, 40, 41, 42, 43 a 44] ■ Fig. 9 Dependence of relative compressive strength and elastic modulus on the ratio of recycled aggregates after 28 days [38, 39, 40, 41, 42, 43 a 44]

Obr. 10 Závislost tlakové pevnosti na objemové hustotě betonu při použití recyklovaného kameniva [45] ■ Fig. 10 Dependence of compressive strength on concrete bulk density when using recycled aggregates [45]

jeme-li např. tlakovou pevnost (pro kterou je pórovitost jeden z nejzávažnějších parametrů, který ji může ovlivnit), zvýšená pórovitost, která je důsledkem většího podílu staré cementové pasty, je hlavním faktorem snižujícím pevnost betonu. Naopak, pórovitost a struktura hydroxidu vápenatého zvyšující pevnost struktury cementové pasty jsou významným faktorem s vlivem na modul pružnosti a výsledky působení jsou v tomto případě výraznější.

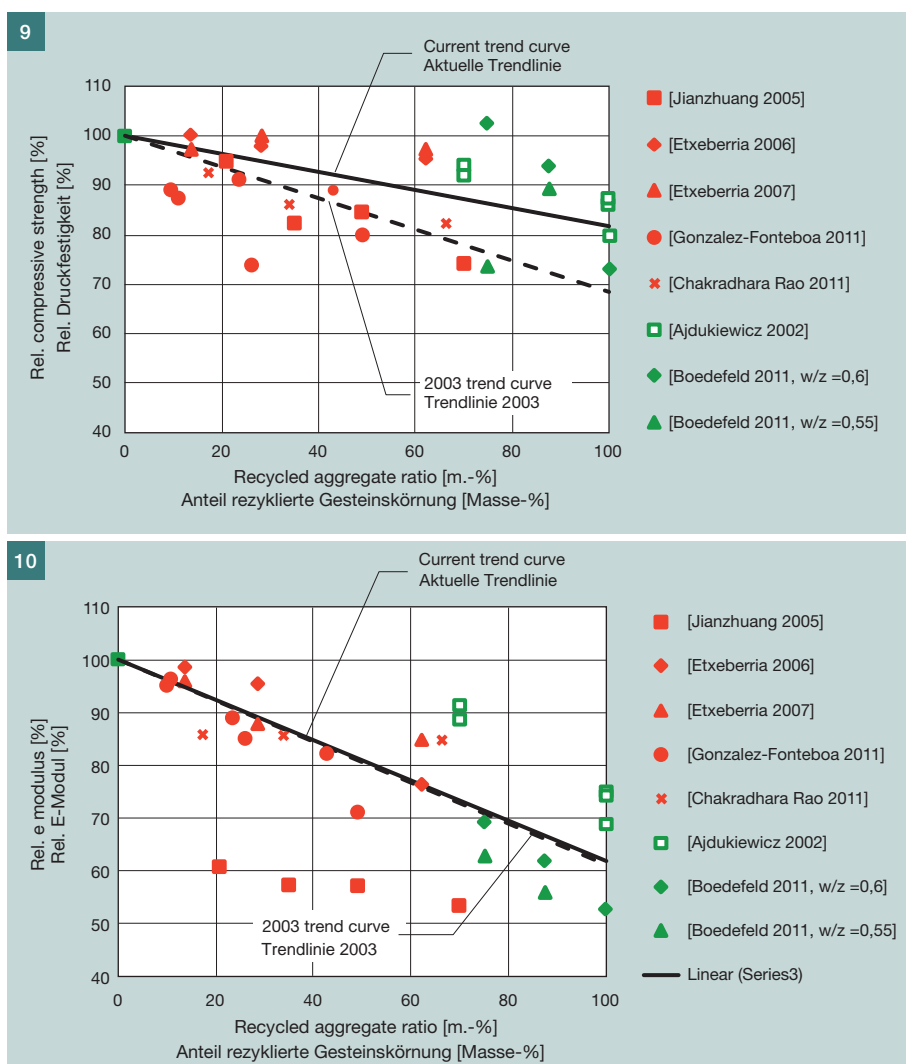
Zvyšující se variabilita pevnosti

Mezi relativní tlakovou pevností betonu a poměrem použitého recyklovaného kameniva byla nalezena jen nízká korelace. A tento výstup je konzistentní s dřívějšími analýzami. Náhrada hrubého kameniva recyklovaným se projevuje jen malým poklesem naměřených hodnot pevnosti.

Trendová křivka pro relativní modul pružnosti je charakterizována významně vyšším koeficientem regrese. Nicméně, některé závěry uváděné v literatuře se odchylojí významně od prezentované trendové křivky. V tomto směru jsou tedy třeba ještě další vyjasnění. Jedna z pravděpodobných příčin je kvalita betonu, z kterého je recyklované kamenivo připravováno.

Lineární analýza, která tvoří základ pro odhadovaný pokles pevnosti a modulu pružnosti, je pouze hrubá aproximace, alespoň co se týká závislosti pevnosti na poměru použitého recyklovaného kameniva. V porovnání použití jemného a hrubého recyklovaného kameniva, pokles pevnosti je méně významný, pokud je recyklovaným kamenivem nahrazen pouze hrubý štěrk (obr. 10).

Při porovnání kolísání pevnosti betonu s recyklovaným jemným i hrubým kamenivem a betonu z přírodního ka-



meniva se ukazuje, že kolísání naměřených pevností je u betonů z přírodního kameniva výrazně nižší.

Na rozdíl od betonu z přírodního kameniva, beton z recyklovaného kameniva obsahuje dva typy cementové pasty: „novou“ pastu vytvářející pevnost betonu a „starou“ pastu, jejíž parametry, její složení, vodní součinitel a stupeň karbonatice, nejsou známy. Dále takové betony obsahují „staré“ kamenivo, jehož původ a vlastnosti také obvykle nejsou známy. Všechny složky, recyklované kamenivo, nová cementová pasta a nové kamenivo, mohou dohromady vytvořit celek, který může mít nečekané až škodlivé chemické reakce.

Ve srovnání s betonem z přírodního kameniva, beton s recyklovaným kamenivem obecně zahrnuje významně vyšší počet faktorů, které mohou mít dopad na jeho trvanlivost. Ačkoliv tato skutečnost nemusí být nezbytně spojována s nepříznivým dopadem na trvanlivost, přináší více komplikací, pokud je ve specifikaci požadována dodávka betonu se stanovenou trvanlivostí. Protože byl učiněn předpoklad, že produkce

a užití betonu s recyklovaným kamenivem by nemělo vykazovat žádné rozdíly oproti betonu vyrobenému z přírodního kameniva, je užití recyklovaného kameniva v betonech v Německu omezeno pro určité pevnosti, expozice a vlhkost prostředí. DAFStb Praktická směrnice [48] specifikuje užití recyklovaného kameniva, jehož kvalita vyhovuje normě DIN 4226-100 [46] nebo jejím novelám [47]. Podle uvedené směrnice, hrubé kamenivo 1. typu (betonový štěrk) a 2. typu (štěrk z demolovaných konstrukcí) smí být použito pro výrobu betonu až do třídy betonu C30/37.

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
IAB – Institute for Applied
Construction Research
Weimar, Německo
e-mail: anette-m.mueller@uni-
weimar.de



První část textu článku byla poprvé publikována v časopise BFT International 04-2013, str. 78–92.

Dokončení článku bude zařazeno do některého z následujících čísel časopisu.