

MOŽNOSTI A LIMITY RECYKLOVÁNÍ BETONU ■

OPPORTUNITIES AND LIMITATIONS OF CONCRETE RECYCLING

Anette Müller

Výroba betonu by v budoucnosti mohla více využívat recyklované kamenivo. První část příspěvku (Beton TKS 6/2013) byla zaměřena na optimalizaci návrhu směsi a procesu míchání ve vztahu k mechanickým vlastnostem výsledného betonu s recyklovaným kamenivem. Druhá část článku se zabývá trvanlivostí betonu a modelováním betonu s recyklovaným kamenivem. ■ In the future, concrete production could increasingly rely on use of recycled aggregates. Part 1 of this article (Beton TKS 6/2013) dealt with the optimization of the mix design and mixing process and refers to the mechanical properties of recycled-aggregate concrete. Part 2 of this article deals with concrete durability and the modelling of recycled-aggregate concrete.

Na rozdíl od betonu vyráběného z přírodního kameniva obsahuje beton s recyklovaným kamenivem dva typy cementové pasty: „novou“ pastu tvořící pevnost betonu a „starou“, jejíž parametry, stejně jako její kompozice, vodní součinitel a stupeň karbonatce, jsou neznámé. K tomu takový beton obsahuje „staré“ kamenivo, jehož původ a vlastnosti jsou obvykle také neznámé. Jak komponenty recyklovaného kameniva, tak i nová cementová pasta a nové kamenivo mohou obsahovat složky, které mohou vzájemně vstupovat do škodlivých až nebezpečných chemických reakcí. Recyklované kamenivo dále způsobuje vyšší pórovitost, což usnadňuje transport vlhkosti, která je potřeba pro většinu typů reakcí.

Ve srovnání s přírodním zahrnuje recyklované kamenivo větší množství faktorů, které mají dopad na trvanlivost. Ačkoliv tato skutečnost nemusí nezbytně znamenat nežádoucí ovlivňování trvanlivosti, přináší více problémů pro výrobu, jestliže je trvanlivost exaktně zahrnuta ve specifikaci betonu. Vyjdeme-li z premisy, že výroba a užití betonů obsahujících recyklované kamenivo by neměly vykazovat žádné rozdíly ve srovnání s konvenčním betonem, užití recyklovaného kameniva je v Německu omezeno určitou pevnostní a expoziční třídou a podmínkami vlhkosti. DAfStb Code of Practice [48] určuje jako nezbytné podmínky pro užití recyklovaného kameniva

splnění kvalitativních požadavků uvedených v DIN 4226-100 [46] nebo následné normě [47]. Podle této praktické normy lze hrubé recyklované kamenivo typu 1 (betonový štěr, úlomky) a typu 2 (štěr a úlomky z demolovaných staveb) použít při výrobě betonu maximálně do pevnostní třídy C30/37.

TRVANLIVOST A KARBONATACE

Recyklovaný písek obvykle obsahuje velké množství cementové pasty a jiných snadněji drtitelných částic s nižší objemovou hmotností a pevností, a je proto vyloučen z užití při výrobě betonu. Přípustný podíl hrubého recyklovaného kameniva v celkovém objemu kameniva klesá s růstem napětí na mezi použitelnosti v navrhované konstrukci. Nejvyšší poměr, 45 obj. % (typ 1) a 35 obj. % (typ 2) může být použit za podmínek specifikovaných pro třídu W0/XC1, které obvykle odpovídají konstrukčním prvkům v interiérech. Nižší podíly, 35 a 25 obj. %, se používají do betonů, které jsou opakovaně vystaveny působení vlhkosti a zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům, příp. nižšímu chemickému napadení, stejně jako do betonů s vyšší odolností pronikání vody.

Tento pragmatický přístup uvažuje skutečnost, že množství přesvědčivých, souvislých a neodporujících si důkazů, dokladů a informací týkajících se trvanlivosti betonů s recyklovaným kamenivem je zatím stále nedostatečné. Např. výsledky uváděné v literatuře v souvislosti s karbonatací vykazují významné rozdíly. Byly měřeny betony jak ve standardních podmínkách, tak betony zkarbonatované do větší hloubky. Dva příklady uváděné v literatuře [49] a [43] mohou ilustrovat tuto situaci:

- Obr. 12 ukazuje hloubku karbonatce betonů s recyklovanými kamenivy, obsahujícími hrubá a do určité míry i jemná recyklovaná kameniva, ve srovnání s betonem z přírodního kameniva. Recyklovaná kameniva byla vyráběna z betonů různých pevnostních tříd starých tři měsíce.
- Obr. 13 ukazuje hloubku karbonatce betonů obsahujících recyklovaná kameniva, která byla brána z demolovaných stěn plavebních komor.

Hloubka karbonatce betonu, který obsahuje recyklované kamenivo známých vlastností z mladých betonů,

se nelišila oproti referenčnímu betonu. Naopak hloubka karbonatce betonu s kamenivem z demolovaných stěn plavební komory je významně větší než u referenčního betonu.

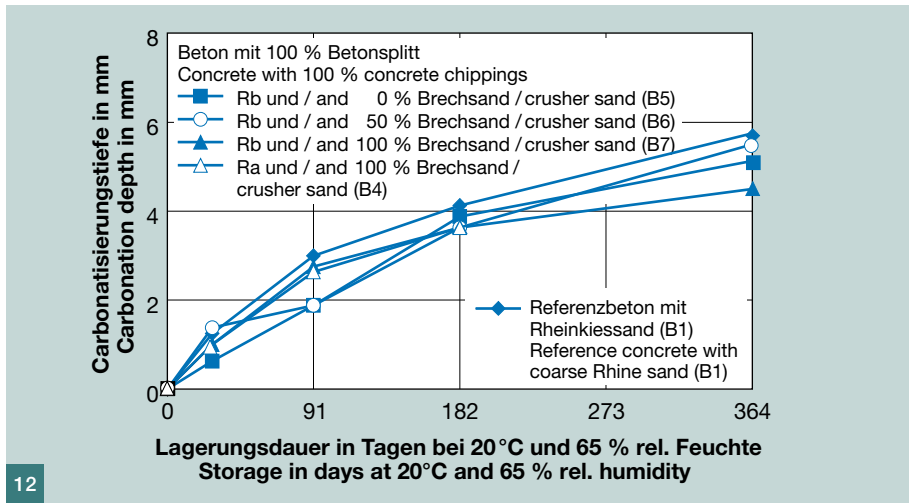
Při vysvětlování těchto rozdílů je třeba brát v potaz faktory, které mohou hloubku karbonatce ovlivnit. Zjednodušeně řečeno: na hloubku karbonatce betonů s recyklovaným kamenivem působí dva faktory, které působí proti sobě – přidávání dalších složek schopných zpomalit proces karbonatce, zatím co zvýšená kapilární porosita způsobená obsahem staré cementové pasty urychluje karbonataci. Tento předpoklad vysvětluje kolísavé a odporující si výsledky a umožňuje vytvořit závěry, že parametry dříve užívané pro charakterizování recyklovaného kameniva jsou vzhledem ke karbonataci betonu nedostatečné, protože obsah cementové pasty a její složení nejsou určovány. S ohledem na uvedené nové poznatky musí být stanoveny vhodné doplňující parametry, které lze snadno určit.

ODOLNOST PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ

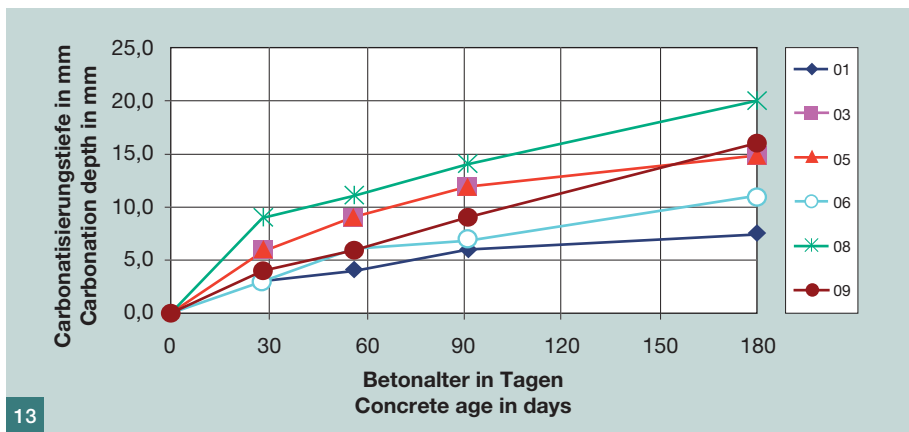
Co se týká odolnosti vůči zmrazování a rozmrazování existuje v literatuře shoda, že recyklovaná kameniva obvykle vykazují nižší odolnost zmrazovacím cyklům než přírodní kameniva, zatím co betony obsahující recyklovaná kameniva jsou opakovanému zmrazování a rozmrazování odolné.

Nižší odolnost zmrazovacím cyklům je přičítána vyšší nasákavosti a nižší pevnosti jednotlivých kousků recyklovaného kameniva, které nejsou schopné odolávat tlaku rostoucích ledových krystalů během zmrazovacích cyklů. Výsledkem je potom vyšší stupeň odpráskávání.

Betony z recyklovaného kameniva obvykle vykazují dostatečný stupeň odolnosti vůči zmrazovacím cyklům. Řada experimentálních zkoušek provedených k určení odolnosti vůči zmrazovacím cyklům ukázala, že hodnoty parametrů odolnosti betonu s recyklovaným kamenivem byly významně lepší než hodnoty dosažené u referenčních betonů s přírodním kamenivem. Pokud však bylo nahrazeno hrubé i jemné kamenivo recyklovaným materiálem, projevila se určitá omezení. Vy-



Obr. 12 Hloubka karbonatace betonů obsahujících definovaná recyklovaná kameniva vyrobená pro zkoušky [49]. Ra: recyklovaná kameniva z tří měsíce starého betonu třídy B15 s $w/c = 0,68$, Rb: recyklovaná kameniva z tří měsíce starého betonu pevnostní třídy B15 s $w/c = 0,48$, aut. Kerkhoff, Siebel



Obr. 13 Hloubka karbonatace betonů obsahujících recyklovaná kameniva z betonové suti [43], 01: referenční; 03: CEM I, 75 m.-% RC 2/32 mm; 05: CEM III/A, 75 m.-% RC 2/32 mm + 12.5 m.-% RC 0/2 mm; 06: CEM I, 75 m.-% RC 2/32 mm + 12.5 m.-% RC 0/2 mm; 08: CEM III/A, 75 m.-% RC 2/32 mm + 12.5 m.-% RC 0/2 mm; 09: CEM I, 75 m.-% RC 2/32 mm + 25 m.-% RC 0/2 mm, aut. Bödefeld, Reschke

znamné zhoršení bylo identifikováno pro některé betony obsahující recyklovaný písek. Proto je doporučováno nahradit recyklovaný písek při užití hrubého recyklovaného kameniva v betonu přírodním, má-li mít vyráběný beton stejnou odolnost vůči zmrazování jako beton s přírodním kamenivem.

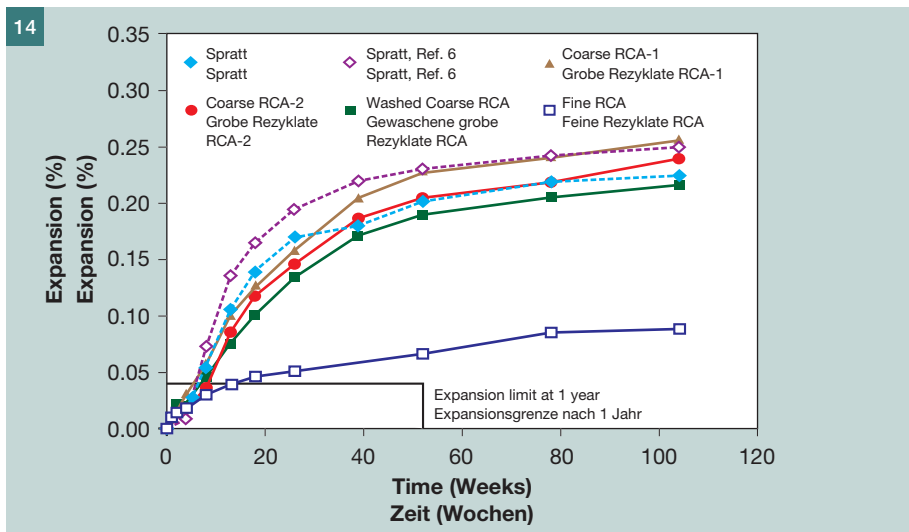
Vyšší podíl cihel vede k dalšímu zlepšení, protože podporují vznik pórů (podobně jako provzdušňovací přísady), tedy vytváření dutinek, do kterých se může voda během růstu ledových krystalů roztahovat.

ALKALICKO-SILIKÁTOVÁ REAKCE

Doposud bylo publikováno jen málo výsledků popisujících chování recyklovaného kameniva z hlediska alkalicko-silikátové reakce (ASR). Neexistuje tak jasná odpověď na otázku, zda recyklovaná kameniva z betonů, které obsahovaly ASR reaktivní kamenivo, bude i nadále vykazovat reaktivní potenciál, který může způsobit poškození nového betonu s tímto (recyklovaným) kamenivem.

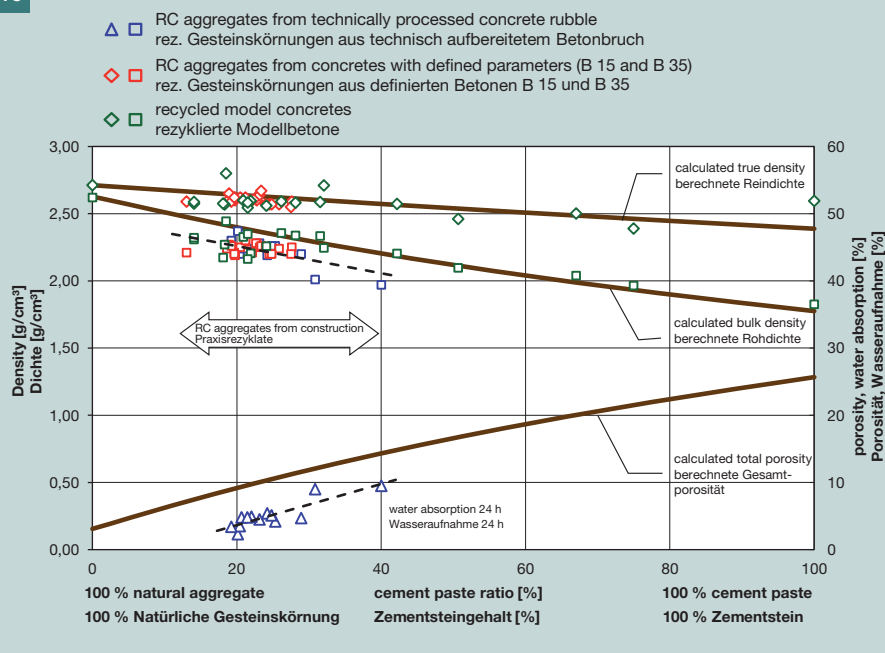
V [50] je uveden příklad (obr. 14), který ukazuje nárůst tlaků v původním

betonu s alkalicky reaktivním kamenivem. Tlaky byly měřeny na betonovém hranolu velikosti 40 x 40 x 285 mm. Graf ukazuje i tlaky měřené na betonu vyrobeném z kameniva po recyklaci původního betonu. Původní beton byl v době recyklace starý 12 let. Měření neukázala žádné rozdíly. Reaktivita kameniva použitého v těchto zkouškách pokračovala a významně působila na vzrůst tlakových napětí i v druhé generaci betonů. Naměřená napětí jsou menší, pokud jsou hranoly vyráběny z jemného recyklovaného



Obr. 14 Nárůst objemu betonového kvádrů obsahujícího recyklovaná kameniva vyrobená z betonu s ASR reaktivním kamenivem [50], obr. Cement and Concrete Research

15



Obr. 15 Fázový diagram pro recyklovaná kameniva (hodnoty pro technologicky zpracované recyklované kamenivo [56], recyklovaná kameniva z betonů definovaných vlastností [57] a modelové betony [28])

Fig. 15 Phase diagram for recycled aggregates (data for technically reprocessed recycled aggregates [56], recycled coarse aggregates from concretes with defined parameters [57], model concretes [28])

Obr. 16 Závislost mechanických vlastností betonu z recyklovaného kameniva na vlastnostech původního betonu [44] [58]

Fig. 16 Dependence of mechanical properties of the recycled-aggregate concrete on the characteristics of the original concrete [44] [58]

Obr. 17 Závislost relativní tlakové pevnosti a modulu pružnosti betonů s recyklovaným kamenivem na množství staré cementové pasty obsažené v nové směsi [28] [27] [59] [60]

Fig. 17 Dependence of relative compressive strength and modulus of elasticity of recycled-aggregate concretes on the amount of old cement paste introduced into the concrete mix [28] [27] [59] [60]

kameniva, ale stejně přesahují povolené limity.

V druhém případě, který byl publikován v [51], recyklovaný beton vyrobený ze starého, vážně poškozeného cementobetonového krytu vozovky nevykazoval žádné projevy ASR. To dovolu- je učinit závěry, že reaktivita kameniva byla již zcela vyčerpána.

Další beton s recyklovaným kamenivem byl vyráběn z betonu z demolo- vané konstrukce, o jejíž historii neby- lo nic známo. Na tomto betonu se pro- jevoval průběh ASR reakce nárůstem vnitřních tlaků.

Přestože zatím nejsme schopni dojít k jasným závěrům, betony poškozené ASR by měly být preventivně vyčleně- ny ze zpracování na recyklovaný ma- teriál pro opětovné použití do betonů. V reálných podmínkách je však prak- ticky nemožné stanovit, zda vyrobené recyklované kamenivo obsahuje zna- alkalicky reaktivní, pokud jeho původ není jasně deklarován. Z tohoto dů- vodu ASR doporučení používané v Ně- mecku předepisuje, že recyklovaná kameniva mají být zkoušena na možný obsah jakýchkoliv alkalicky reaktivních složek, které mohou pocházet z pů- vodního přírodního kameniva, a má být stanoven obsah alkálií v nich.

SÍRANOVÉ NAPADENÍ

Obsah síranů i množství částic sádry obsažených v recyklovaných kameni- vech jsou přísně omezeny, aby se za- bránilo expansivnímu síranovému napa- dení. I při této opatrnosti nelze přítom- nost částic sádry vyloučit zcela, protože

zkoušená množství nejsou obvykle do- statečně velká, aby s jistotou vyhověla předepsaným nízkým prahovým hodno- tám s dostatečnou statistickou jistotou.

Ve stádiu čerstvého betonu může sádra narušovat proces jeho tvrdnu- tí. Když beton s recyklovaným kame- nivem ztvdne, sádra může reagovat s produkty hydratace v nové ale i sta- ré cementové pastě. Např. trikalci- um aluminat monosulfat se může přemě- nit na trisulfat, což je doprovázeno 2,3ná- sobným nárůstem objemu. Trikalci- um aluminat hydrát může také konverto- vat do ettringitu, jehož objem je potom 4,8krát větší. Obě reakce vedou k po- škození betonu expanzivními jevy.

PŘÍSTUPY K MODELOVÁNÍ BETONU S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM

V případě standardního betonu můžeme použít zjednodušený přístup před- pokládající, že jeho pevnost závisí na je- ho hlavních složkách, tj. na kamenivu, cementové pastě a přechodové oblas- ti, která se mezi nimi tvoří. Počet ovliv- ňujících parametrů je v případě beto- nu s recyklovaným kamenivem význa- mně vyšší. Je třeba rozlišovat vlivy recy- klovaného kameniva, které bylo původně přírodním kamenivem, staré cementové pasty, kterou jsou drobnější zrna kame- niva slepena do hrudek, nebo větší zr- na obaluje, nového přírodního kameni- va a aktivní cementové pasty, která vy- volává tvrdnutí nového betonu. Počet přechodových oblastí se zvýšil na šest, jestliže předpokládáme, že takové ob- lasti vznikají na styku všech komponent.

Popis kameniva

Až do současnosti byly mechanické vlastnosti recyklovaného kameniva mo- delovány převážně na základě statis- tických metod [53], [54] a [55]. Nebyly popsány žádné fenomenologické mo- dely, které by byly odvozeny ze vzá- jemného působení jednotlivých složek obsažených v kompositu betonu s re- cyklovaným kamenivem. Pro pochop- ení složité problematiky je třeba pos- tupovat po jednotlivých postupných krocích:

- sestavení popisu recyklovaného ka- meniva,
- nalezení korelace mezi charakteris- tickými vlastnostmi recyklovaného ka- meniva a mechanickými vlastnost- mi betonů z daného kameniva vyro- bených,
- v nalezených korelacích je třeba iden- tifikovat vliv nového kameniva a no- vé cementové pasty, která aktivuje ztvrdnutí vyrobených betonů.

Obsah cementové pasty a fyzikální vlastnosti

Charakteristika recyklovaného kameniva jako prvního stavebního kamene modelu vychází z faktu, že tato zrna kameniva, pokud jsou vyrobena ze starého betonu konvenčním recyklačním procesem, jsou tvořena původním kamenivem a cementovou pastou (obr. 3, první část článku *Beton TKS 6/2013*, pozn. red.). Zanedbáme-li přechodovou plochu, mohou být tato zrna uvažována jako dvousložkový (binární) systém, v kterém zrna přírodního kameniva a cementová pasta tvoří dva koncové body celé řady směsí. Fyzikální parametry koncových bodů mohou být použity k určení zjednodušeného fázevého grafu pro odpovídající charakteristiky výpočtem objemu a skutečných hustot jednotlivých směsí, dosažením hodnot čistého přírodního kameniva a čisté cementové pasty do vztahu (1).

$$\rho_{RC} = \frac{\rho_{ZS} \rho_{GK}}{\alpha_{ZS} \rho_{GK} + \alpha_{GK} \rho_{ZS}} \quad (1)$$

Na obr. 15 je ukázáno srovnání vypočítaných změn objemu a skutečných hustot a celkové porosity s odpovídajícími naměřenými hodnotami, které byly určeny pro technologicky zpracované recyklované kamenivo, recyklované kamenivo z betonů s definovanými parametry a modelových betonů s odstupňovaným poměrem cementové pasty. Naměřené hodnoty odpovídají křivce odvozené z výpočtů směsí.

Poměr cementové pasty v recyklovaném stavebním materiálu vyrobeném z betonové sutě se pohybuje od 10 do 40 hm. %, což už samo vede k širokému rozptýlu dalších charakteristik, např. 2,4 až 2,1 g/cm³ pro objemovou hmotnost a 0,6 až 9,8 % pro absorpci vody.

V literatuře je recyklované kamenivo popisováno jako komposit sestávající z malty (tu tvoří cementová pasta a jemné kamenivo) a hrubého kameniva. Měření uskutečněná Abbasem [25] ukazují, že poměr malty se mění od 21 do 43 hm. %. De Juan [24]

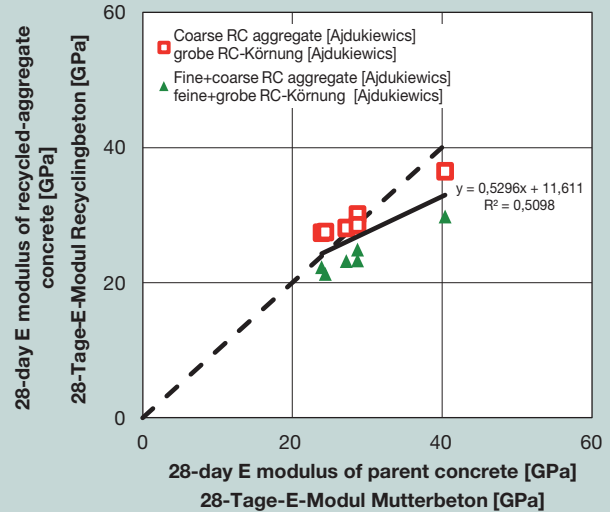
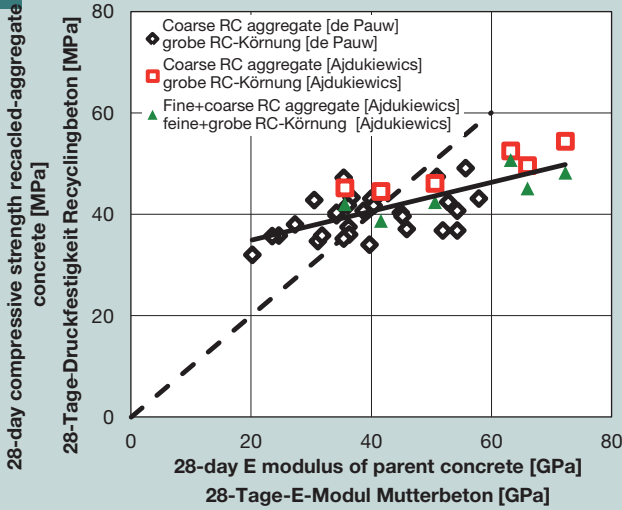
uvádí obsah malty mezi 33 a 55 hm. % pro kamenivo 4–8 mm a mezi 23 a 44 hm. % pro kamenivo 8–16 mm. Z definice je zřejmé, že podíl malty by měl být výrazně vyšší než poměr cementové pasty, jak je ukázáno na hodnotách stanovených de Juanem. Tento autor také prokázal, že důležité fyzikální charakteristiky recyklovaného kameniva korelují s velikostí podílu malty.

Mechanické vlastnosti betonů

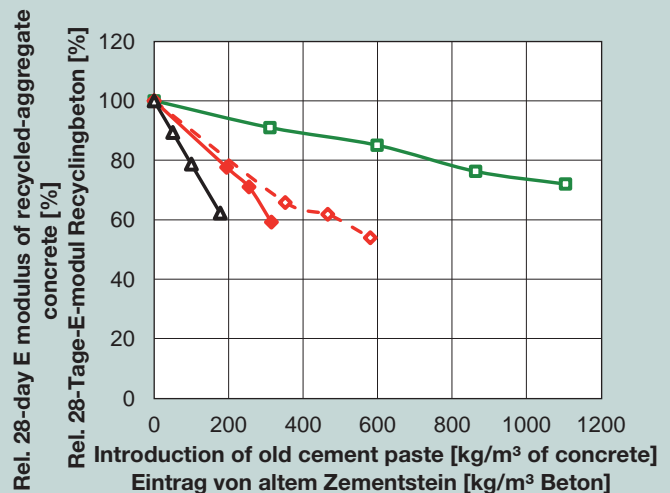
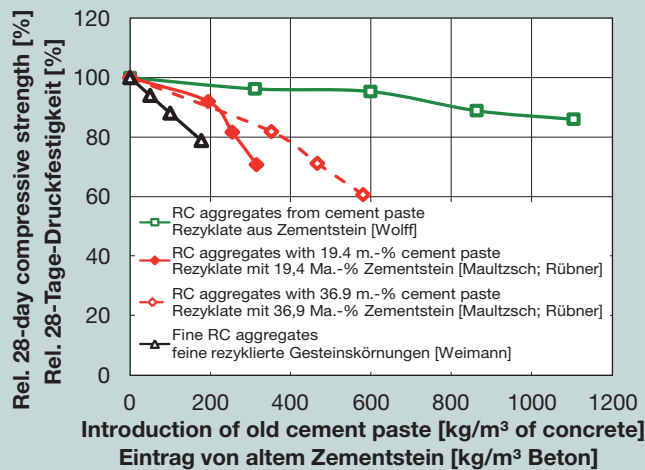
Druhým stavebním kamenem v příkladu modelování je určení korelace mezi charakteristikami recyklovaných kameniv a mechanickými vlastnostmi betonů z nich vyrobených. K rozhodujícím parametrům patří množství staré cementové pasty, ale také typ původního kameniva a pevnost betonu, z kterého bylo recyklované kamenivo vyrobeno.

Výsledky shromážděné Ajdukiewiczem [44] a de Pauwem [58] byly analyzovány s cílem určit způsob, jak pevnost nebo modul pružnosti „rodičovského“ betonu ovlivňují odpovídající

16



17



Literatura:

- [38] *Jianzhuang Xiaoa; Jiabin Lia; Zhang Ch.*: Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 (2005), pp. 1187–1194
- [39] *Etcheberria M.; Vázquez E.; Mari A.*: Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 58 (2006), No. 10, December, pp. 683–690
- [40] *Etcheberria M.; Vázquez E.; Mari A.; Barra M.*: Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37 (2007), pp. 735–742
- [41] *González-Fontebova B.; Martínez-Abella F.; Eiras-Lopez J.; Seara-Paz S.*: Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete, *Materials and Structures*, Vol. 44 (2011), pp. 1759–1771
- [42] *Chakradhara Rao M.; Bhattacharyya S. K.; Barai S. V.*: Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (2011), pp. 69–80
- [43] *Bödefeld J.; Reschke T.*: Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei Verkehrswasserbauten, BAW-Mitteilungen, Nr. 93 2011, S. 49-60
- [44] *Ajdkiewicz A.; Kliszczewicz A.*: Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 24 (2002), pp. 269–279
- [45] *Roos F.*: Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezyklierten Gesteinskörnung nach DIN 1045-1, Dissertation, TU München 2002
- [46] DIN 4226-100:2002-02: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. Beuth-Verlag, Berlin, 2002
- [47] DIN EN 12620:2008-07: Gesteinskörnungen für Beton, Beuth-Verlag, Berlin 2008
- [48] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb Richtlinie Teil 1: Beton nach DIN EN 206-1 und DIN1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100, Berlin, Sept. 2010
- [49] *Kerhoff B.; Siebel E.*: Eigenschaften von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen. *Beton* (2001), Jan., S. 47-50, Febr., S. 105–108
- [50] *Shehata M. H.; Christidis Ch.; Waleed M.; Rogers Ch.; Lachemi M.*: Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research* Vol. 40 (2010), pp. 575–582
- [51] *Gottfredsen F. R.; Thogersen F.*: Recycling of concrete in aggressive environment, Proc. of the 3rd inter. RILEM symp. on demolition and reuse of concrete and masonry, Odense, Denmark, October (1993), pp. 309-317
- [52] *Jianzhuang Xiao; Jingwei Ying; Luming Shen*: FEM simulation of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 29 (2012) pp. 12–23
- [53] *Bezerra Cabral A. E.; Schalch V.; Carpena Coitinho Dal Molin D.; Duarte Ribeiro J. L.*: Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 24 (2010), pp. 421–430
- [54] *Duan Z. H.; Kou S. C.; Poon, C. S.*: Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks. *Construction and Building Materials* (2012) article in press, (Vol. 40, March 2013, pp. 1200-1206, pozn. red.)
- [55] *Lovato P. S.; Possan E.; Carpena Coitinho Dal Molin D.; Masuero A. B.; Ribeiro J. L. D.*: Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes, *Construction and Building Materials*, Vol. 26 (2012), pp. 437–447
- [56] *Rübner K.*: Untersuchung von Brechsanden. Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 7. 06. 2011
- [57] Baustoffkreislauf im Massivbau. Teilprojekt C 05. Einfluss der Brechwerkzeuge auf die Eigenschaften von Recycling-Granulaten im Hinblick auf eine Eignung als Zuschlag für Beton nach DIN 1045. Gesellschaft zur Aufbereitung von Baustoff mbH, Bremen 1998
- [58] *Pauw C. D.*: Béton Recyclé, Centre Scientifique et Technique de la Construction. CSTC – Revue Nr. 2, 15 (1980) 6, S. 2–15
- [59] *Maultzsch M.; Mellmann G.; Meinhold U.*: Eigenschaften hochwertiger Betone aus aufbereitetem Bauschutt, IBAUSIL 2003, Band 1, S. 33–47
- [60] *Rübner K.*: Untersuchung der Zementsteingehalte von Rezyklaten, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 2012
- [61] *Krüger W.*: Neue Recyclinganlage zur Herstellung von Baustoffen aus Bauschutt in Düsseldorf. Aufbereitungs-Technik – Nr. 10/1984. S. 613–614
- [62] *Müller A.; Liebezeit S.; Badstübner A.*: Verwertung von Überschusssanden als Zusatz im Beton. *Steinbruch und Sandgrube*. Nr. 5, 2012, S. 46–49
- [63] *Schnell A.; Müller A.; Ludwig H.-M.*: Heterogener Mauerwerkbruch als Rohstoffbasis zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen. 18. Ibausil, Vortrag 3.32, 2012

jší charakteristiky betonu s recyklovaným kamenivem. V grafu na obr. 16a je shrnutý vliv pevnosti. Hodnoty pevnosti původních betonů se pohybovaly od 20 do 70 MPa. Nové betony s recyklovaným kamenivem z nich vyrobeným dosahovaly pevností 30 až 50 MPa. Existují tedy prokazatelné záznamy, že pevnost „rodičovského“ betonu má jen mírný vliv na pevnost betonu s kamenivem vyrobeným recyklováním původního betonu. Výsledky ukazují, že beton vyrobený za použití kameniva recyklovaného z betonu s nízkou pevností může dosáhnout stejnou nebo dokonce přesáhnout pevnost původního betonu. To může být způsobeno tím, že během drcení je velká část zrn kameniva uvolněna z „obalu“ cementové pasty, která má výrazně nižší pevnost než kamenivo. Pokud je v novém betonu použito jako náhrada pouze hrubé recyklované kamenivo, dostane se do betonu s ním jen malé množství staré cemen-

tové pasty, která může způsobit snížení jeho pevnosti. Pokud je na recyklaci použit beton vyšších pevností, zůstává na zrnech kameniva po recyklaci větší množství staré cementové pasty, která je následně zanesena do nového betonu, což může přispět k nižší pevnosti nového betonu ve srovnání s původním „rodičovským“ betonem.

Modul pružnosti

Modul pružnosti původního, recyklovaného, betonu také odhaluje jisté oslabení vlivu, a původní beton není „překonáván“ novým betonem s kamenivem recyklovaným z původního. Jistota těchto závěrů je však slabší, protože je dostupné jen omezené množství údajů.

Byly realizovány tři úrovně zkoušek pro určení vlivu přítomnosti staré cementové pasty na pevnost a modul pružnosti nového betonu:

- Zjednodušený přístup – směs simulující (modelující) recyklované kamenivo obsahovala pouze přírodní kameni-

vo a čistou cementovou pastu. Tento přístup je spojen s vysokým stupněm zjednodušení, protože nevzniká vazba mezi oběma složkami kompozitu.

- Byla použita dvě hrubá recyklovaná kameniva, přičemž na každém bylo jiné množství zbytků staré cementové pasty. Postup ukázal vliv různého množství cementové pasty při stejném podílu recyklovaného kameniva.
- Drcený písek byl užit jako jemná složka obsahující starou cementovou pastu, byl přidáván do směsi v různém množství.

Obě, modelovaná i skutečná, recyklovaná kameniva byla použita pro výrobu betonů s odstupňovanou hrubostí kameniva.

Výsledky prezentované na obr. 17 ukazují, že charakteristiky betonů s recyklovaným kamenivem s různými poměry cementové pasty jsou relativně podobné. Tyto poznatky dovolují učinit závěry, že obsah cementové pasty se jeví jako jeden z hlavních ovlivňujících

parametrů. Betony, které obsahují čistou cementovou pastu a betony s jemným recyklovaným kamenivem vykazují podstatné rozdíly, které mohou být způsobeny chováním přechodových oblastí. Beton obsahující čistou cementovou pastu má nedostatek „přechodových“ oblastí mezi původním kamenivem a cementovou pastou. Beton vyrobený ze směsi obsahující jemné recyklované kamenivo vykazoval významně vyšší pevnosti přechodové oblasti mezi recyklovaným kamenivem a novou cementovou pastou.

Nové kamenivo a aktivní cementová pasta

Třetí krok fenomenologického modelování – faktory ovlivňující sekundární výrobu betonu je třeba integrovat jako další stavební kámen modelu a je třeba počítat s korelacemi, jako je tomu obecně u vodního součinitele.

Navržené prvky modelu a jejich vzájemné vazby umožňují už celkem dobré odhady mechanických vlastností, pokud jsou požadovány. Popsané úvahy jsou však stále nedostatečné směrem k trvanlivosti. Např. nejdůležitější fyzikální charakteristiky ukazuje pouze fázový graf na obr. 15. Dále, koncové body řad směsí se liší v chemickém a mineralogickém složení i v reaktivitě. Přírodní kamenivo, které vyhovuje specifikaci, obvykle obsahuje křemen a živec, nebo vápenec. Ty jsou inertní. Cementová pasta přítomná v recyklovaném kamenivu obsahuje portlandit, C-S-H fáze a vápenaté sulfoalumináty, ale může také obsahovat nezhydratované částice cementu a jiné fáze. Tyto složky mohou reagovat s vodou, oxidy uhlíku, sírou ad. Jakékoli zodpovědné posouzení betonu s recyklovaným kamenivem z hlediska trvanlivosti tedy vyžaduje pečlivou analýzu jeho chemického složení.

BUDOUCNOST RECYKLACE

Recyklace jako znovunavrácení použitých produktů a materiálů do materiálového cyklu není pouze současný jev. Opakované využití starších materiálů můžeme nalézt v mnoha památkově chráněných objektech od antiky po středověk. Význam recyklace stavebních materiálů poklesl pouze v době průmyslové revoluce, která umožnila vysoký růst produkce nových stavebních materiálů.

Je celkem obtížné stanovit jednoznačně dobu, kdy se „moderní“ stavební materiály začaly opět recyklo-

vat. V současnosti jsme svědky přechodu od pouhé demolice k rozebírání, od zavážení roklí stavebním rumem k novému užití recyklovaných stavebních materiálů. Konstrukce, které již dále nevyhovují současným technickým předpisům, nebo je jejich majitelé už nepotřebují a nechťejí je přestavovat, jsou rozebírány.

Dnes můžeme říci, že kroky demolice, rozebrání a recyklace materiálů se staly nezbytnými částmi stavebních činností. Přesto stále mezi veřejností zůstává určitá rezervovanost k použití recyklovaných stavebních materiálů v nových konstrukcích.

Cyklus hrubého kameniva

Znovu zpracovaná betonová suť může být využita pro výrobu betonu pouze za předpokladu, že vyhoví odpovídajícím normám a požadavkům. Přestože jsou z preventivních důvodů předpokládány jen takové oblasti použití, kde recyklované kamenivo nemá vliv na trvanlivost materiálu, mohlo by být využito pro výrobu nového betonu všechno hrubé recyklované kamenivo získané z betonového rumu. Zatímco použitelného recyklovaného kameniva se vyrobí cca 20 mil. t, spotřeba přírodního kameniva pro výrobu betonu je zhruba desetkrát vyšší. Tzn., že by byl možný „uzavřený“ cyklus recyklace hrubých zrn kameniva.

V minulosti se obvykle jemná zrna kameniva oddělovala a pro výrobu recyklovaných surovin nebyla využívána. Tyto jemné složky však mohou být užity jako příměsi při výrobě betonu, budou-li namlety do jemností cementu. Podle vlastních šetření autorky může toto užití přispět k snížení spotřeby cementu a zvýšit užité vlastnosti betonu [62].

Uvedené však platí pouze pro užití čistého betonu k recyklaci. Ve skutečnosti však betonový rum z demolice konstrukce obvykle obsahuje i jiné, další složky, které je třeba před přípravou k recyklaci odstranit. Jiné sektory recyklačního průmyslu, např. plastické hmoty nebo sklo, spoléhají na senzory vybavené procesy klasifikace materiálů, během nichž jsou v objemu hmoty určovány jednotlivé částice a tříděny na různé skupiny materiálů. Zdá se, že je nezbytné vyvinout podobné postupy i pro recyklaci betonu.

Stanovení všeobecnějších kritérií kvality

Skutečnost, že recyklované kameniva jsou kompozity složené z cementové

pasty a zrn přírodního kameniva, musí být vzata v úvahu, pokud chceme více porozumět betonům z nich vyrobených. Jsou-li k výrobě nového betonu užívána recyklovaná kameniva, má ten potom obvykle vyšší celkový podíl cementové pasty a hodnoty jeho mechanických vlastností systematicky kolísají a vykazují vyšší variabilitu. Vyšší podíl cementové pasty hraje klíčovou roli i v trvanlivosti betonu, protože v jeho důsledku má materiál vyšší porositu. Voda je podmínkou většiny reakcí, které snižují trvanlivost, a vyšší porositu betonu jí dovoluje snadněji do něj pronikat.

Mezi další důležité vlivné parametry patří chemické podmínky, které byly v původní cementové pastě a původním kamenivu. Např. u betonu z velmi starého nebo recyklovaného kameniva, které bylo po dlouhou dobu skladováno a kde již proběhla celková karbonatace, takže už zřejmě neobsahuje žádné hydratační produkty, může být obtížné určit ASR reaktivitu původního kameniva.

Kvalitativní kritéria potřebují vývoj všeobecnějším směrem, protože naše znalosti vlastností recyklovaných kameniv a betonů z nich vyrobených se ukazují jako nedostatečné. Statistické analýzy jsou zde ještě důležitější než u betonů z přírodních kameniv.

Budoucnost recyklace je těsně svázána se současnými trendy vývoje stavebních materiálů. Beton je materiálový produkt stavebnictví, který je relativně snadno recyklovatelný do svých původních složek. Další vývoj může z jeho dobré recyklovatelnosti těžit. Významné příklady zahrnují spojení betonu s jinými složkami pro vytváření kompozitních prvků nebo nových návrhů směsí. V těchto případech se již nehledá řešení, které by spoléhalo na materiálové charakteristiky betonu, ale to, které dokáže využít jeho potenciál opět jako suroviny.

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



Tato druhá část textu článku byla poprvé publikována v časopise BFT International 05-2013, str. 28–39.