

POSUZOVÁNÍ KONSTRUKČNÍHO BETONU S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM S OHLEDEM NA TRVALOU UDRŽITELNOST

ASSESSMENT OF CONSTRUCTION CONCRETE MADE WITH RECYCLED AGGREGATES REGARDING ITS SUSTAINABILITY

Kristýna Hrabová, Břetislav Teplý, Vladimír Veselý

Stavební průmysl má mezi lidskými činnostmi svým rozsahem nepřehlédnutelný vliv na životní prostředí. V posledních letech je proto kladen velký důraz na trvalou udržitelnost stavebních konstrukcí a materiálů a jsou hledány cesty a způsoby, jak toho dosáhnout. Konkrétně jde o snižování emisí a o využití vyprodukovaného odpadu formou recyklace např. u kameniva. Motivací pro využití recyklovaného kameniva je rovněž snížení závislosti na přírodních zdrojích, kterých ubývá. Příspěvek se zabývá posouzením betonu s recyklovaným kamenivem pomocí indikátoru trvalé udržitelnosti.

Amongst the many activities of mankind, the impact of construction industry on the environment is not one to be overlooked. Long-term sustainability of building structures and materials has been therefore emphasised in the last few years and ways and means of how to achieve it are being sought. Specifically, it is about reducing emissions and using waste. For example by recycled materials, e.g. aggregate. The motivation for using recycled aggregates derives from an effort to reduce dependence on natural resources, which are declining. The article deals with the assessment of concrete with recycled aggregate using tan indicator of sustainability.

Recyklované kamenivo

Celosvětová snaha o směřování k uhlíkové neutralitě vede k tzv. trvalé udržitelnosti. Beton, který je nejčastěji používaný stavební materiál, je zatížen množstvím CO₂, vneseným do konečného produktu vstupními materiály, především cementem a kamenivem. Započítat je třeba množství CO₂ při jejich výrobě a dopravě na betonárnu. Zajímavou příležitostí se proto jeví i možnost použití recyklovaného kameniva (dále též RA – recycled aggregate), tj. kameniva vzniklého úpravou anorganického materiálu již jednou použitého v konstrukci, pro výrobu recyklovaného betonu (RAC – recycled aggregate concrete). Protože s použitím a vlastnostmi RAC není prozatím dostatek zkušeností, je nezbytné zkoumat jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti, životnost a ekologické i ekonomické souvislosti. Jedná se o aktuální, nikoliv však nové

téma – viz např. příspěvky [1], [2], později např. [3], [4], stovky dalších prací v odborné zahraniční literatuře a také zcela nedávný příspěvek [5] v časopise Beton, který se zaměřil na stávající legislativní možnosti použití recyklovaného kameniva pro výrobu betonu dle ČSN EN 206. Recyklované kamenivo do betonu je dostatečně popsáno v ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu včetně všech požadavků na něj kladených a postupů prokazování shody. V širší odborné i laické veřejnosti je však skoro výhradně používán zcela nesprávný pojem stavební suť. Ta je jen výsledkem demolice konstrukce a výchozím materiálem pro získání recyklovaného kameniva procesem extrakce znečištěných organickými materiály, drcením a tříděním.

Pro aplikaci principů trvalé udržitelnosti je nezbytně nutné používat efektivní nástroje umožňující

kvantifikaci materiálových, technologických i konstrukčních variant. Jednou z možností je využití tzv. indikátoru udržitelnosti. Tato metodika byla již v časopise Beton představena na příkladu betonů obsahujících pucolánovou příměs [6] a v prezentovaném textu ji použijeme obdobně pro posuzování betonů s kamenivem z recyklovaného betonu (podobně viz také příspěvek [7], kde se jednalo o použití netypického RA).

K tématice RAC je třeba připomenout řadu souvislostí [3], [4], [5], [8], [9]. Např. je nezbytné znát původ RA, obsah jednotlivých složek (beton, stmelené vrstvy, pálený materiál apod.), zrnitost, tvarový index, nasávkavost a z toho vyplývající zatřídění (klasifikaci). Dále je pak potřeba stanovit míchání RAC a následně kromě základní charakteristiky (pevnost v tlaku) i příp. další charakteristiky (modul pružnosti, smršťování,

dotvarování, karbonatace, průnik chloridů apod.). V případě betonů s recyklovaným kamenivem není dosud vyvinut spolehlivý model predikce karbonatace (postup karbonatace je ovlivněn řadou dalších veličin a jevů) a je tak výhodné použít spolu s modelem pro karbonataci klasického betonu korekční faktor dle [8], který byl doporučen na základě analýzy testů 787 různých betonů s RA s ohledem na procento náhrady přírodního kameniva. Použití recyklovaného kameniva do konstrukčních betonů je také omezeno kvůli nedostatečným znalostem o jeho dlouhodobých vlastnostech, většina studií se věnuje krátkodobým a střednědobým mechanickým vlastnostem. Nahrazení přírodního kameniva recyklovaným je však ve stavebnictví kvůli stále silnějšímu důrazu na cirkulární ekonomiku důležitým tématem.

Hodnocení trvalé udržitelnosti

Indikátor k_{SB} dle vztahu (1) umožňuje při hodnocení variant směsí betonu přihlížet současně k mechanickým vlastnostem, k trvanlivosti a k ekologickým i ekonomickým hlediskům na materiálové úrovni (obdobně lze postupovat i na úrovni nosné konstrukce [10]).

$$k_{SB} = \frac{\frac{R}{R_{ref}} \cdot \frac{L}{L_{ref}}}{\frac{E}{E_{ref}} \cdot \frac{C}{C_{ref}}}, \quad (1)$$

kde:

- veličina R představuje vhodnou fyzikálně-mechanickou charakteristiku betonu, obvykle pevnost v tlaku,
- životnost L musí být stanovena pro použití posuzovaného betonu v návrhovém prostředí se zřetelem na příslušný mezní stav a návrhovou hodnotu pravděpodobnosti poruchy – u železobetonových konstrukcí jde obvykle o korozi výztuže. Lze to provést pomocí vhodného pravděpodobnostního softwarového nástroje a analytického modelu (např. [11], využitím FREt-D), tj. nejčastěji analýzou postupu karbonatace betonu. Neměly-li vhodný model či nástroj k dispozici, lze pro L použít také tzv.

pseudoživotnost, tj. hodnotu veličiny, která by vystupovala při analýze skutečné životnosti – např. difuzní součinitel při prostupu chloridových iontů betonem [12] apod., kde by se mohlo využít také výsledků testů,

- ekologické náklady E jsou fiktivními náklady, které by mohly být vynaloženy na redukci dopadů na životní prostředí na udržitelnou úroveň, zahrnují vliv těžby, zpracování materiálů a s tím také související svázané emise různého druhu, spotřebu energií atd. (např. databáze [13]),
- cena betonu C , tj. cena materiálů, je převážně závislá na regionu či zemi, což je nutno při hodnocení a srovnávání různých typů betonů mít na zřeteli,
- referenční hodnoty R_{ref} , L_{ref} , E_{ref} a C_{ref} jsou libovolně zvolené hodnoty, např. hodnoty příslušné jednomu ze studovaných betonů. To zajišťuje bezrozměrnost indikátoru udržitelnosti k_{SB} ,
- volba druhu hodnot R a L by měla odpovídat příslušné expoziční třídě (ČSN 73 2404),
- varianta s nejvyšší hodnotou k_{SB} určuje nejvýhodnější beton z pohledu trvalé udržitelnosti, tj. nejedná se přímo o měřítko (kvantifikaci) trvalé udržitelnosti.

Použití indikátoru k_{SB} včetně výše uvedené metodiky výpočtu je

navrženo do informativní přílohy v rámci revize ČSN P 73 2404 jako možnost pro porovnávání jednotlivých konkrétních složení betonu.

Posuzování betonů s recyklovaným kamenivem

Hodnocení trvalé udržitelnosti pomocí indikátoru k_{SB} (1) vyžaduje znalost příslušných hodnot R , L , E a C popsaných výše. Pro účely ilustrace metodiky posuzování směsí s recyklovaným kamenivem využíváme některých výsledků rozsáhlé studie a podrobného testování dvanácti směsí, které byly uveřejněny v práci [9]. Jednalo se o podrobnou studii mechanických vlastností i parametrů trvanlivosti betonů s RAC. Použité recyklované kamenivo obsahovalo téměř výhradně betonovou drt z demoličních prací. Pro zlepšení některých vlastností RAC byl do určitých směsí přidán také popílek jako doplňkový pojivový materiál, a to jako 0%, 25%, 35% a 55% hmotnostní náhrada slínku v cementu (CEM I 42,5 R). Recyklát byl použit jako 0%, 50% a 100% hmotnostní náhrada hrubého drceného kameniva. RA z demolic betonových konstrukcí bylo ve dvou velikostech zrn, v poměru 1 : 2. Jako drobné těžené kamenivo byl použit říční písek. Podrobnější informace o zrnitosti kameniva jsou uvedeny v článku [9]. Složení směsí je shrnuto v tab. 1.

Tab. 1 Složení směsí (zdroj: [9])

Tab. 1 Mix designs (source: [9])

Mix ID	Voda [l/m ³]	CEM I 42,5 R [kg/m ³]	Popílek [kg/m ³]	Drobné těžené kamenivo [kg/m ³]	Hrubé drcené kamenivo [kg/m ³]	Recyklované kamenivo [kg/m ³]
RA0	225	410	0	642	1 048	0
RA50					524	506
RA100					0	1 017
RA0F25		307,5	102,5	611	1 048	0
RA50F25					524	506
RA100F25					0	1 017
RA0F35		266,5	143,5	598	1 048	0
RA50F35					524	506
RA100F35					0	1 017
RA0F55		184,5	225,5	530	1 048	0
RA50F55					524	506
RA100F55					0	1 017

Jednotlivé vzorky byly uloženy ve venkovních podmínkách a testovány až do stáří 10 let [9]. Pro náš případ jsme zvolili analýzu důsledků působení karbonátce (expoziční třídy XC). Pro výpočet indikátoru k_{SB} posloužily hodnoty pevnosti betonu (resp. alternativně hodnoty modulu pružnosti) jako R a pro L pak hloubka karbonátce (tj. pseudoživotnost). Ekologické náklady byly stanoveny pouze na základě složení směsi, cena byla stanovena na základě průměrných cen bez DPH. Ekologická i cenová výhodnost použití recyklovaného kameniva závisí také na transportních vzdálenostech a energetické náročnosti přeměny původního betonu na recyklované kamenivo; toto zde nebylo uvažováno proto, aby výsledky nebyly vztaženy k určité lokalitě/výrobně/betonárně/staveništi/firmě.

Poznamenejme ještě, že karbonátce se obvykle uplatňuje při vyšetřování mezního stavu použitelnosti a je vhodné si uvědomit, že důležitým parametrem může být i modul pružnosti, který vstupuje nejenom do výpočtu deformací, ale u staticky neurčitých konstrukcí též do výpočtu vnitřních sil – tedy podílí se také na hodnocení mezních stavů únosnosti. Otázkám spojeným s modulem pružnosti se v časopise Beton věnují např. články [15], [16], [17]. Kamenivo z recyklovaného betonu zcela jistě hodnoty modulu pružnosti ovlivňuje.

Z dat v tab. 2 vyplývá, že se pevnost v tlaku s nárůstem obsahu recyklovaného kameniva snižuje, což je způsobeno větší porozitou RAC a nižší vlastní pevností v tlaku RA oproti přírodnímu kamenivu. Rozdíly pevnosti v tlaku se však v průběhu

Tab. 2 Vstupní hodnoty pro výpočet indikátoru trvalé udržitelnosti k_{SB}
 Tab. 2 Input values for the calculation of the sustainability indicator k_{SB}

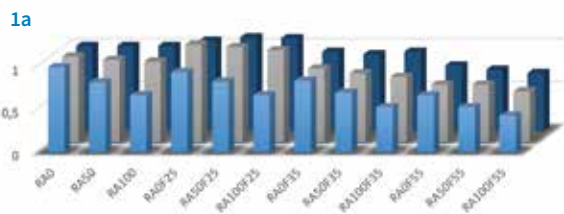
Mix ID	Eko-náklady [€/m ³]	Cena [Kč/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa] v čase			Modul pružnosti [GPa] v čase			Hloubka karbonátce [mm] v čase		
			28 dní	1 rok	10 let	28 dní	1 rok	10 let	28 dní	1 rok	10 let
RA0	60,03	1 491	46,7	53,3	61,3	29,5	30,9	35,1	3,22	5,03	12,09
RA50	57,35	1 377	41,3	47,1	57,5	25,8	27,4	32,4	3,35	5,25	12,79
RA100	54,70	1 265	36,5	43,1	52,2	21,6	22,8	27,4	3,48	5,58	13,36
RA0F25	54,17	1 482	42,3	57,5	65,9	28,5	29,8	36,5	3,42	5,32	13,61
RA50F25	51,50	1 368	39,8	52,4	63,1	27,1	28,6	35,3	3,53	5,64	14,43
RA100F25	48,84	1 256	35,2	47,6	59,1	23,1	24,6	31,1	3,76	6,13	15,54
RA0F35	51,83	1 478	38,9	46,6	63,4	27,4	29,2	34,2	3,68	5,95	15,68
RA50F35	49,15	1 364	35,9	42,3	58,8	23,9	25,8	30,5	3,95	6,62	17,22
RA100F35	46,49	1 252	29,7	37,5	56,3	20,7	22,6	28,1	4,15	7,12	18,37
RA0F55	46,84	1 457	34,9	41,2	60,4	25,4	27	32,4	4,49	7,62	20,25
RA50F55	44,17	1 344	29,9	38,6	54,8	21,3	23,6	29,6	4,74	8,23	22,64
RA100F55	41,51	1 231	26,6	32,5	49,4	20,4	22,3	27,6	5,15	9,05	25,25

Tab. 3 Indikátor trvalé udržitelnosti k_{SB}
 Tab. 3 Sustainability indicator k_{SB}

Mix ID	Pevnost-karbonátce v čase			Modul pružnosti - karbonátce v čase		
	28 dní	1 rok	10 let	28 dní	1 rok	10 let
RA0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
RA50	0,82	0,96	1,00	0,95	0,96	0,99
RA100	0,67	0,94	1,00	0,88	0,86	0,91
RA0F25	0,94	1,14	1,06	1,01	1,02	1,03
RA50F25	0,83	1,11	1,10	1,06	1,05	1,07
RA100F25	0,67	1,07	1,09	0,98	0,95	1,01
RA0F35	0,84	0,86	0,93	0,95	0,93	0,88
RA50F35	0,70	0,80	0,90	0,88	0,85	0,81
RA100F35	0,53	0,76	0,93	0,84	0,79	0,81
RA0F55	0,67	0,67	0,77	0,81	0,76	0,72
RA50F55	0,53	0,67	0,72	0,74	0,70	0,68
RA100F55	0,43	0,59	0,68	0,76	0,70	0,66

let zmenšují. Lze také pozorovat, že použití většího množství RA ovlivňuje i hodnotu modulu pružnosti betonu. Použití RA snížilo mj. odolnost betonu proti karbonátci, která je ovlivněna také obsahem popílku.

Výsledky analýzy udržitelnosti dle vztahu (1) jsou ukázány v tab. 3 a znázorněny na obr. 1. Je vidět, že stáří vzorků hraje výraznou roli a že nejčastěji používané testování ve stáří 28 dní by nemuselo vést k použitelným



k_{SB} pevnost-karbonátce v čase:
 ■ 28 dní ■ 1 rok ■ 10 let



k_{SB} modul pružnosti-karbonátce v čase:
 ■ 28 dní ■ 1 rok ■ 10 let

1 Indikátor trvalé udržitelnosti dle (1), kdy je jako mechanická vlastnost betonu uvažována: a) pevnost v tlaku, b) modul pružnosti

1 Sustainability indicator according to (1), where: a) compressive strength, b) modulus of elasticity are considered as a mechanical property of concrete

Literatura:

- [1] ZÍDEK, R., TEPLÝ, B. Konstrukční využití betonu z recyklovaného kameniva. In: *Betonářské dny 2000*. Pardubice: Česká společnost pro beton a zdivo ČSSI, 2000. S. 205–210.
- [2] TEPLÝ, B., NOVÁK, D. Možnosti navrhování nosných prvků z betonu s recyklovaným kamenivem. In: *Recycling 2000*. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2000. S. 28. ISBN 80-214-1557-6.
- [3] VESELÝ, V. Současnost a perspektivy recyklovaného kameniva do betonu – poznámky a komentáře z pohledu norem. *Beton TKS*. 2021, roč. 21, č. 1, s. 38–40.
- [4] MÜLLER, A. Možnosti a omezení recyklace betonu. *Beton TKS*. 2013, roč. 13, č. 6, s. 46–52.
- [5] MÜLLER, A. Možnosti a limity recyklování betonu. *Beton TKS*. 2014, roč. 14, č. 1, s. 64–69.
- [6] LEHNER, P., HRABOVÁ, K., GHOSH, P., KONEČNÝ, P., TEPLÝ, B. Efektivní hodnocení trvalé udržitelnosti betonu s přírodním pucolánem. *Beton TKS*. 2020, roč. 20, č. 3, s. 52–55.
- [7] VYMAZAL, T., HRABOVÁ, K., TEPLÝ, B., KOCÁB, D. Sustainability quantification of concrete with recycled aggregate. In: *Special Concrete and Composites 2019: 16th International Conference. AIP Conference Proceedings*. College Park, Maryland: American Institute of Physics, 2020. S. 1–4. ISBN 978-0-7354-1961-2. ISSN 0094-243X.
- [8] SILVA, R. V., NEVES, R., BRITO, J., DHIR, R. K. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2015, Vol. 62, pp. 22–32.
- [9] KOU, S. C., POON, C. S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*. 2013, Vol. 37, pp. 12–19.
- [10] HORŇÁKOVÁ, M., KONEČNÝ, P., TEPLÝ, B., HÁJEK, P. Sustainability based design of RC structures: material and structural level. In: *Symposium fib*. Lisabon, 2021 (v revizi).
- [11] TEPLÝ, B., NOVÁK, D. Predikce degradace betonových konstrukcí výpočetním modelováním. *Beton TKS*. 2014, roč. 14, č. 2, s. 56–57.
- [12] ČSN EN 12390-11. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 11: Stanovení odolnosti betonu proti chloridům, jednosměrná difuze*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [13] Eco Cost Database. *Design-4-Sustainability: Inspiration and knowledge by designers for designers* [online]. Dostupné z: <http://www.design-4-sustainability.com/ecocosts>
- [14] TEPLÝ, B. Ještě k modulu pružnosti. *Beton TKS*. 2008, roč. 8, č. 1, s. 74–75.
- [15] MISÁK, P., VYMAZAL, T. Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku. *Beton TKS*. 2009, roč. 9, č. 2, s. 58–59.
- [16] HELA, R., KRÍŽOVÁ, K. Modul pružnosti betonu. *Beton TKS*. 2021, roč. 21, č. 1, s. 76–79.
- [17] GODÁNY, J. Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a šterkopísku v ČR. *Beton TKS*. 2021, roč. 21, č. 1, s. 15–21.

výsledkům v případech, kdy aplikujeme jako mechanickou vlastnost pevnost betonu. Jak ukazuje obr. 1b, tj. k_{SB} při aplikaci modulu pružnosti, je v analyzovaném případě proměnnost v čase méně významná. Výsledné hodnocení trvalé udržitelnosti je ale v obou těchto variantách velmi podobné, takže lze říci, že jako nejhodnější směsi lze považovat RA0F25, resp. RA50F25. Je ovšem nutno poznamenat, že RA v kvalitě potřebné pro výrobu konstrukčního betonu není zatím na trhu běžně k dispozici, což se v blízké budoucnosti pravděpodobně zlepší, jistě s dopadem na ceny. Také u přírodního kameniva bude docházet ke změnám v cenové hladině v důsledku postupného omezování jeho těžby [17].

Závěr

Pomocí indikátoru trvalé udržitelnosti k_{SB} je možno hodnotit a vzájemně porovnat varianty směsí pro přípravu betonu a současně přitom přihlížet k mechanickým vlastnostem, k trvanlivosti a k ekologickým i ekonomickým hlediskům. Takovýto komplexní pohled není zatím v praxi využíván, ale výhled a současné trendy ve vývoji cirkulární ekonomiky k tomu směřují i u betonových konstrukcí.

Autoři doufají, že hodnocení betonu s ohledem na trvalou udržitelnost se uplatní také při snahách o nahrazení přírodního kameniva recyklovaným i s ohledem na to, že přírodní kamenivo se stává nedostatkovým.

Příspěvek vznikl za podpory fakulního specifického výzkumu VUT Vliv vlastností recyklovaných kameniv na životnost a udržitelnost betonových konstrukcí, evidovaného pod číslem FAST-J-20-6459.



Ing. et Ing. Kristýna Hrabová
Fakulta stavební VUT v Brně
kristyna.hrabova@vutbr.cz



prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc., FENg.
Fakulta stavební VUT v Brně
teply.b@fce.vutbr.cz



Ing. Vladimír Veselý
Svaz výrobců betonu ČR
vladimir.vesely@svb.cz