

Posuzování recyklovaného betonu z hlediska jeho dopadu na životní prostředí

Assessing recycled concrete in terms of its environmental impact

Jan Pešta¹ | Tereza Pavlů² | Klára Anna Mocová³ | Vladimír Kočí⁴

INFORMACE O ČLÁNKU

DOI

10.35933/ENTECHO.2019.12.002

HISTORIE

Datum doručení: 9. 12. 2019

Datum revize: 13. 1. 2020

Datum akceptace: 14. 1. 2020

AFILACE

¹Ústav chemie ochrany prostředí, VŠCHT Praha

pestaj@vscht.cz

 0000-0002-5655-6759

²Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze;

Ústav chemie ochrany

prostředí, VŠCHT Praha,

tereza.pavlu@cvut.cz,

³Ústav chemie ochrany prostředí,

VŠCHT Praha,

klara.mocova@vscht.cz

 0000-0002-6832-682X

⁴Ústav chemie ochrany prostředí,

VŠCHT Praha,

vlad.koci@vscht.cz

 0000-0001-9428-8655

KLÍČOVÁ SLOVA

beton, stavební a demoliční odpad, posuzování životního cyklu

KEYWORDS

concrete, construction and demolition waste, life cycle assessment

SOUHRN

Recyklací stavebního a demoličního odpadu jsou produkovány materiály, které mohou být využity jako náhrada primárních surovin. Tyto recyklační procesy ale mohou být energeticky náročné, a proto je nutné posuzovat environmentální dopady takových procesů. Posuzovali jsme environmentální dopady recyklovaného betonového a cihelného kameniva a také environmentální dopady produktů s recyklovaným obsahem. Metoda Posuzování životního cyklu byla použita jako analytický nástroj pro vyhodnocení environmentálních dopadů recyklovaných materiálů (1 t betonového a cihelného kameniva), výrobků (1 m³ betonových směsí s obsahem recyklátu) a konstrukcí (tvarovek a základů budov). Také byly diskutovány vlivy na životní prostředí jako je ekotoxicita betonových výrobků, následky omezení skládkování a karbonatace. Prezentujeme výsledky posuzování environmentálních dopadů s cílem ukázat, jaký dopad má vybraná funkce recyklovaného produktu. Navrhujeme posuzovat environmentální dopady recyklovaného kameniva s ohledem na jeho použití v budoucnu.

SUMMARY

Recycling of construction and demolition waste produce materials, which can be used as primary resources replacement. However, these recycling processes can be very energy consuming and therefore environmental impacts of such processes should be considered. We assessed environmental impacts of recycled concrete and brick aggregates and also environmental impacts of products with recycled content. The Life Cycle Assessment method was used as analytical tool for evaluating environmental impacts of recycled materials (1 t of concrete or brick aggregates), products (1 m³ recycled concrete mixtures) and constructions (blocks and building foundations). Also, various effects on environment were discussed such as ecotoxicity of concrete products, the consequence of landfilling limitations and carbonation effect. We present the results of environmental impacts assessments to show, what influence the chosen function of recycled product has. We suggest to assess environmental impacts of recycled aggregates considering their future function.

1 Úvod

Ve stavebnictví se využije významná část domácí materiálové spotřeby primárních surovin. Vedle toho stavební a demoliční odpad tvoří přibližně 30 % odpadů v České republice. Tyto dopady na životní prostředí ale nejsou jediné, které můžeme posuzovat. Další dopady jsou spojeny s produkcí stavebních výrobků a jejich užíváním. Jedním z takových dopadů, který můžeme posuzovat ve všech dílčích fázích životního cyklu, je dopad výrobku na globální oteplování.

Globální oteplování je dopad významně ovlivněný celosvětovou výrobou cementu. Uvádí se, že až 8 % skleníkových plynů pochází z výroby tohoto pojiva, které je základní složkou betonu. A je to právě beton, druhý nejpoužívanější materiál na světě, který je díky

svým fyzikálními vlastnostem klíčovým materiálem pro stavebnictví. To se odráží i v procentuálním zastoupení betonu ve stavebním a demoličním odpadu, kde beton, tašky, cihly a keramika tvoří přibližně polovinu tohoto odpadu.

Při posuzování recyklovaného betonu je potřeba zohlednit několik hledisek. Předně je to původ kameniva a možnost využít recyklované kamenivo tak, aby se snížilo množství skládkovaného stavebního a demoličního odpadu. Dalším hlediskem je dopad vlastního recyklačního procesu. V neposlední řadě je potřeba uvažovat i proměnlivé vlastnosti recyklovaného kameniva a vzniklého recyklovaného betonu.

Beton určitě není jen nevyužitelným odpadem. Může být recyklován a využit jako náhrada přírodního kameniva v betonu (Rao et al., 2007; Debieb and Kenai, 2008; Tošić et al., 2015). Navíc při třídění

a recyklaci stavebního a demoličního odpadu se vrací do oběhu i další materiálové toky. Jedním z nich může být například ocelová výztuž betonů. Na druhou stranu, recyklace betonu může být spojena s mnoha nevýhodami, které se projeví na dopadu výrobku na životní prostředí. Recyklace je energeticky náročná a vlastní proces drcení betonu je spojen s emisemi prachových částic a hlukem. Výsledný produkt, tedy recyklované kamenivo má proměnlivé vlastnosti v závislosti na vstupním odpadu a často i nižší pevnost než přírodní kamenivo (Rao et al., 2007). To může vést k nižší pevnosti betonových směsí. Požadované pevnosti se pak při výrobě nového betonu dosahují navýšením množství cementu.

Pro posouzení dopadu recyklace betonu je tedy nutné uvažovat několik možných environmentálních dopadů najednou (Schiesel et al., 2003). Zároveň je nutné environmentální dopady posuzovat s ohledem na funkci recyklovaného kameniva, resp. recyklovaného betonu, díky čemuž tak můžeme zohlednit i změnu vlastností nově vzniklé betonové směsi s obsahem recyklovaného kameniva.

Pro posouzení environmentálních dopadů jsme v této práci využili metodu Posuzování životního cyklu (LCA - Life Cycle Assessment). Ta slouží jednak k analýze životního cyklu a inventarizaci toků materiálů a energií mezi výrobkem a prostředím, ale také k posuzování dopadů těchto toků. Tato metoda je definována normou ISO 14040:2006 (CEN, 2006). Náležitosti posuzování environmentálních dopadů betonů jsou popsány v pravidlech pro beton a betonové výrobky (CEN, 2018).

V této práci pomocí metody LCA posuzujeme environmentální dopady spojené s životním cyklem recyklovaného kameniva a porovnáváme různá hlediska pro posouzení těchto dopadů jako je vliv karbonatice betonu, ekotoxicita betonových výrobků nebo následky omezení skládkování.

2 Posuzované materiály a výrobky

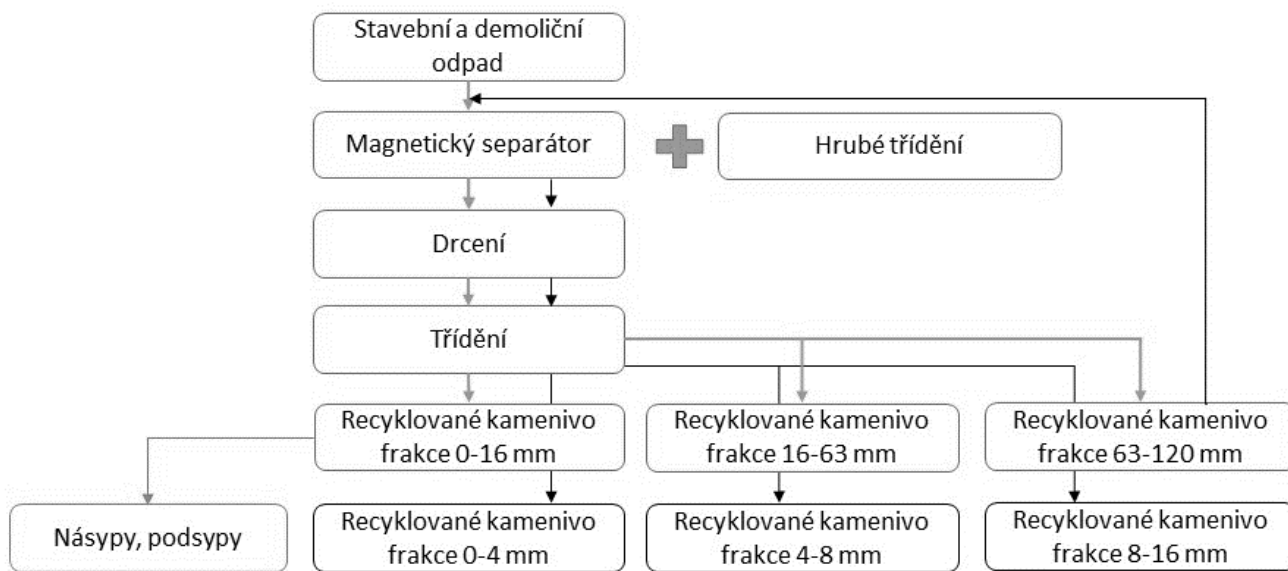
Podle místa recyklace rozlišujeme dva způsoby recyklace. Prvním je recyklace v mobilní recyklační lince přímo na stavbě, kde stavební a demoliční odpad (SDO) vzniká. Druhým je recyklace v recyklačním centru, kam je SDO dovážen. V této práci uvažujeme recyklaci a následnou výrobu betonu a betonových výrobků přímo v recyklačním centru.

Do recyklačního centra je dovážen SDO z místa bourání stavby. Výhodou je, pokud je v místě bourání odpad separován už během dekonstrukce, tak aby se odpady z jednotlivých konstrukcí nemísily. Nevyužitelné složky a nebezpečný odpad pak mohou být odváženy na skládku. Odpadní beton je opakovaně drcen a tříděn a jsou z něj separovány železné výztuže a další příměsi.

Recyklovaný železný šrot je vrácen zpátky do oběhu. Recyklaci betonu tedy předcházíme spotřebě dalších primárních surovin.

2.1 Recyklované kamenivo

Z procesu recyklace vystupuje několik frakcí kameniva. V prvním kroku recyklace vznikají frakce 0-16 mm, 16-63 mm a 63-120 mm a je odstraněn železný šrot. Všechny zmíněné frakce jsou vhodné jako náhrada přírodního kameniva pro podsypy a zásypy. Nejhrubší frakci je pak možné opětovně drtit na tři další frakce: 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm. Tyto zmíněné frakce jsou vhodné jako náhrada přírodního kameniva nejen pro podsypy a zásypy, ale i jako kamenivo do betonu dle ČSN EN 12620 + A1 a ČSN EN 206 + A1 (ČAS, 2008, 2018). Dalším výstupem z recyklace je recyklovaný cementový prach (RCP), který vzniká při drcení betonu a je zachytáván v úletu z prostoru drcení. Ale jen frakce ze druhé fáze jsou vhodné pro použití do betonu, protože neobsahují drobné jílové částice. Schéma procesu je na obrázku 1.



Obr. 1 Schéma procesu recyklace

2.2 Betony s obsahem recyklátu

Z popsaného recyklovaného kameniva byly navrženy betonové směsi, jejichž receptury jsou popsány v tabulce 1. Betonové receptury byly navrženy tak, aby dosahovaly pevnostní třídy C20/25 podle normy ČSN EN 206 + A1 (ČAS, 2018). Podle těchto receptur byly vyrobeny vzorky betonů. U betonů byly změřeny základní vlastnosti, výsledky měření jsou v tabulce 2. Tyto směsi byly navrženy tak, aby došlo k porovnání několika vlivů. Směs REF představuje referenční směs

připravenou z primárních surovin. Směs OPT je naopak optimalizována tak, aby nebylo nutné spotřebovávat přírodní kamenivo. Štěrka je nahrazen recyklovaným kamenivem. Směs REC má větší procentuální zastoupení písku. Směs CEM byla navržena s nižší spotřebou cementu. Ten byl nahrazen přídatkem RCP. Tato směs používá jen přírodní kamenivo. REC CEM (+) a REC CEM (-) naopak obsahují recyklované kamenivo a neobsahují přírodní štěrku. Tyto dvě směsi se liší přídatkem

cementu tak, aby bylo pozorovatelné, jaký vliv má změna přídavku cementu v kombinaci s jiným množstvím a poměrem recyklovaného kameniva.

Navržené směsi nedosahují stejných vlastností. Výrazně se liší v naměřené pevnosti v tlaku. Liší se také vodní absorpční součinitel. Tyto odlišnosti v charakteristikách směsí vedou k tomu, že se liší i jejich potenciální funkce resp. možnosti využití těchto směsí.

Tabulka 1 Receptury betonů pevnostní třídy C20/25 na 1 m³ betonové směsi

Přísady	REF	OPT	REC	CEM	REC CEM (-)	REC CEM (+)
Voda [kg]	160	234	215	160	207	231
CEM I 42,5 R [kg]	320	320	320	288	304	352
Písek [kg]	681	374	668	681	603	668
Štěrka 4/8 [kg]	550	0	0	550	0	0
Štěrka 8/16 [kg]	633	0	0	633	0	0
Recyklát 0/4 [kg]	0	438	0	0	216	0
Recyklát 4/8 [kg]	0	279	416	0	310	416
Recyklát 8/16 [kg]	0	733	722	0	714	722
RCP [kg]	0	0	0	32	16	0

Tabulka 2 Vlastnosti betonů pevnostní třídy C20/25

Vlastnosti	REF	OPT	REC	CEM	REC CEM (-)	REC CEM (+)
Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	2280	2140	2190	2260	2150	2490
Pevnost v tlaku [MPa]	36,6	25,4	29,3	37,8	35	40,6
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	4,6	4,7	5,6	5,1	4,1	4,8
Statický modul pružnosti v tlaku [GPa]	28,3	31,4	29,4	28,4	25,2	29,2
Kapilární nasákavost [%]	2,9	4,1	4,8	3	8,2	9,5

2.3 Recyklované betony do základů budov

Častým způsobem využití recyklovaného kameniva je jejich přidání do základů budov. Recyklované kamenivo je použito do směsí s různými vlastnostmi ale vždy tak, aby základy budovy splňovaly definovanou funkci. Tuto funkci můžeme popsat pomocí přeneseného zatížení z budovy do základů a zeminy a účinné plochy základů.

Návrhy porovnávaných základových patek byly provedeny v závislosti na zatížení do základového prvku a únosnosti zeminy, kde bylo počítáno se zatěžovací silou 1000 kN a únosností zeminy 250 kPa. Všechny základové prvky byly navrženy na stejné zatížení a bylo uvažováno se stejným typem zeminy. Zároveň se uvažovalo se stejnou efektivní plochou základu. Lišila se výška základů v závislosti na třídě betonu a v závislosti na tom se pro navrhované směsi měnil objem spotřebovaného materiálu.

V tabulce 3 jsou popsány receptury betonových směsí, které byly navrženy pro použití do základů budovy. Jedná se o betonové směsi s mírou náhrady přírodního kameniva 30, 50 nebo 100 % (N30, N50, N100) recyklovaným betonovým kamenivem (RCA). Pro směsi s recyklovaným betonovým kamenivem (RCA) bylo použito jak jednostupňové kamenivo (označení směsi V1) tak kamenivo dvoustupňové (označení směsi V2).

Betony pouze z přírodního kameniva jsou navrženy ve dvou pevnostních třídách a to C25/30 (směs REF I) a C30/35 (směs REF II). Pro směsi

označené REC I bylo použito 260 kg cementu na 1 m³ betonu a pro směsi REC II bylo použito 300 kg cementu na m³ betonu. Směsi s recyklovaným kamenivem dosahovaly různých vlastností, a tedy i pevnostních tříd od C8/10 do C25/30. Skutečné naměřené vlastnosti betonových směsí ovlivňují množství betonu nutného do základu budovy. Vlastnosti betonu a potřebné objemy betonových směsí, které představují porovnávané referenční toky, jsou popsány v tabulce 4.

2.4 Výrobky z recyklovaného betonu

Recyklovaný beton může být použit pro výrobu tvarovek. Tvarovky mají tu výhodu, že jsou znovupoužitelné a navrhnutá konstrukce z nich může být dekonstruována a jednotlivé tvarovky znovu použity. Jedná se tak o postup kombinující recyklaci SDO a výrobu znovupoužitelných výrobků, což umožní snížit produkci odpadu a spotřebu primárních surovin i v budoucnu. V tabulce 5 jsou uvedeny vstupy pro výrobu navrhnutých konstrukcí. V konstrukci REC B jsou použity tvarovky z betonu s obsahem cihelného recyklátu získaného recyklací SDO podobným způsobem jako betonový recyklát. Jediná odlišnost těchto dvou recyklačních procesů je, že vstupní surovinou je cihelný odpad. Tvarovky s obsahem recyklátu jsou využity v konstrukci REC C. Pro srovnání byly tyto konstrukce porovnávány s referenční železobetonovou zdí (REFS), která po skončení životnosti není recyklována a s konstrukcí kde na výrobu tvarovek byl použit beton z primárních surovin. Posuzované konstrukce byly navrženy se stejnými tepelně izolačními vlastnostmi.

Tabulka 3 Receptury betonových směsí do základů budov na 1 m³ betonové směsi

Přísady	REF I	REC I N30-V1	REC I N30-V2	REC I N50-V1	REC I N50-V2	REC I N100-V1	REC I N100-V2
CEM 42.5 R [kg]	260	260	260	260	260	260	260
Voda [kg]	169	201	184	206	206	179	211
NA (0-4 mm) [kg]	736	632	632	611	611	415	588
NA (4-8 mm) [kg]	533	0	0	0	0	0	0
NA (8-16 mm) [kg]	570	656	656	311	311	0	0
RCA (4-8 mm) [kg]	0	485	485	506	506	239	526
RCA (8-16 mm) [kg]	0	0	0	283	283	1134	538
Vodní součinitel	0,65	0,77	0,71	0,79	0,79	0,69	0,81
Efektivní vodní součinitel	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
	REF II	REC II N30-V1	REC II N30-V2	REC II N100-V1	REC II N100-V2		
CEM 42.5 R [kg]	300	300	300	300	300		
Voda [kg]	165	200	183	175	208		
NA (0-4 mm) [kg]	700	615	615	364	549		
NA(4-8 mm) [kg]	538	0	0	0	0		
NA (8-16 mm) [kg]	601	674	674	0	0		
RCA (4-8 mm) [kg]	0	485	485	225	533		
RCA (8-16 mm) [kg]	0	615	615	1198	564		
Vodní součinitel	0,55	0,67	0,65	0,58	0,69		
Efektivní vodní součinitel	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55		

Tabulka 4 Receptury betonových směsí do základů budov na 1 m³ betonové směsi

	Objemová hmotnost	Kapilární nasákovost	Pevnost v tlaku	Pevnost v tahu za ohybu	Statický modul elasticity	Navrhnutá pevnostní třída	Objem základu
Směs	[kg/m ³]	[%]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[-]	[m ³]
REF I	2250	5,5	31,4	4,4	25,7	C25/30	3,74
REC I N30-V1	2143	7,6	21,9	4,1	23,6	C12/15	4,62
REC I N30-V2	2199	5,6	32,4	5,6	28,9	C25/30	3,74
REC I N50-V1	2023	13,4	22,1	3,8	18,0	C16/20	4,40
REC I N50-V2	2168	6,1	33,5	5,0	25,4	C25/30	3,74
REC I N100-V1	1977	15,0	15,2	3,6	14,2	C8/10	5,06
REC I N100-V2	2054	11,8	22,3	3,3	18,0	C16/20	4,40
REF II	2277	5,4	46,3	7,3	33,2	C30/37	3,52
REC II N30-V1	2141	9,4	24,9	4,7	22,7	C16/20	4,40
REC II N30-V2	2200	6,7	32,4	5,4	28,5	C25/30	3,74
REC II N100-V1	2006	14,3	21,9	4,2	13,8	C12/15	4,62
REC II N100-V2	2109	11,0	32,0	4,0	24,5	C25/30	3,74

Tabulka 5 Popis konstrukcí z tvarovek a konstrukce železobetonové zdi

Materiálové vstupy na 1 m ² [kg]	Konstrukce			
	REC B	REC C	PRIM C	REFS
Cement (I 42.5R)	96	96	84	84
Kamenivo (cihlové/betonové/primární)	446,7	418,2	551,4	551,4
Minerální vlna	4,8	4,8	5,2	5,2
Dřevo pro konstrukci	9,6	9,6	9,6	0
Omítka (vápenná, vnitřní)	24	24	24	24
Omítka (vnější)	6	6	6	6
Voda	64,8	57,6	42	42
Celková hmotnost konstrukce	651,9	616,2	722,2	712,6

3 Charakteristika studií LCA

Pro porovnání environmentálních dopadů byla použita metoda Posuzování životního cyklu (Life Cycle Assessment, LCA). Jedná se o analytický nástroj, který porovnává dopady produktového systému či služby a pomocí kterého lze vyčíslit potencionální environmentální dopady. Studie LCA se provádějí podle mezinárodních standardů ČSN EN ISO 14040 a ČSN EN ISO 14044 (Finkbeiner et al., 2006). Metoda LCA se skládá ze čtyř kroků: definice cíle a rozsahu, inventarizace, posuzování dopadu a interpretace (Guinée, 2001).

Pro sběr a modelování dat byl použit software GaBi (Thilo et al., 2019). Součástí tohoto softwaru je databáze, která byla použita pro získání dat o generických procesech jako je například produkce elektřiny v Čechách. Pro posuzování potenciálních environmentálních dopadů byly použity metodiky ReCiPe a CML (Guinée, 2001; Verbitsky and Pushkar, 2018).

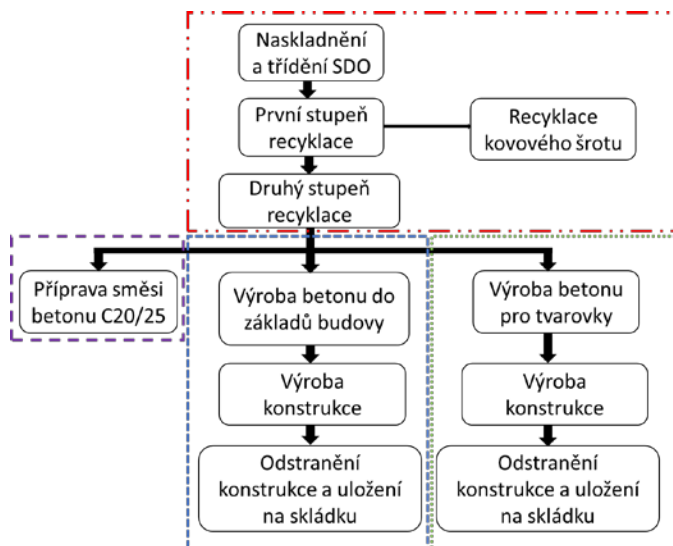
3.1 Funkční jednotka a hranice systému

Metoda LCA je iterační metodou, která je založená na opětovném zpřesňování výstupů z jednotlivých fází. Pro jednotlivá dílčí porovnání byly environmentální dopady vztaheny k jiné jednotce s ohledem na to, jaký systém byl posuzován.

V první studii byla porovnávána deklarovaná jednotka, která byla definována jako 1 tuna kameniva. Funkce kameniva by měla odrážet také jeho možné použití do betonu. Proto v druhé studii byly porovnávány dopady vztahené na deklarovanou jednotku, která pro toto druhé porovnání byla definována jako 1 m³ betonové směsi. Tyto směsi byly navrženy tak, aby splnily požadavky na vlastnosti třídy C20/25. I přesto, že všechny směsi dané požadavky splňovaly, potenciál jejich využití byl odlišný. Vlastnosti některých směsí dosahovaly významně vyšších hodnot, než pro jaké byly navrženy a jejich potenciál pro možné využití byl tím pádem větší. V dalších dvou studiích je uvažováno s použitím recyklovaného kameniva přímo do konkrétního prvku, resp. konstrukce. V těchto dvou studiích se plně odráží potenciál využití recyklovaného kameniva jako materiálu a tento recyklát pak lze porovnávat s přírodním kamenivem, které by mohlo být použito pro stejný účel. Pro porovnání v třetí studii byla definována funkční jednotka jako stejně široký betonový základ pro budovy, navržený se zatěžovací silou 1000 kN a únosností zeminy 250 kPa. Ve čtvrté studii byly dopady vztaheny na deklarovanou jednotku 1 m² konstrukce.

Posuzované produktové systémy začínají naskladněním demoličního odpadu do recyklačního centra. Zahrnují procesy nakládání s SDO v recyklačním centru, třídění, drcení a recyklaci. Produktové systémy

zahrnují také výrobu betonů a produkci dalších surovin pro konstrukce. V studiích porovnávajících betony, tvarovky a základy je uvažována i jejich dekonstrukce a odstranění na skládky na konci jejich životního cyklu. Systémy jsou znázorněny na obrázku 2. Červeně označený systém představuje posuzovaný systém produkce recyklovaného kameniva. Na tento systém navazují tři alternativní systémy. Fialově označený systém představuje případ, kdy se recyklované kamenivo použije pro přípravu betonových směsí pevnostní třídy C20/25. Modrá čára ohraničuje systém výroby betonů pro konstrukci základů. Zeleně označený systém představuje procesy produkce tvarovek a výroby konstrukce z nich. Produktové systémy výroby tvarovek a výroby základů budovy zahrnují i jejich odstranění na skládku.



Obr. 2: Hranice posuzovaných systémů

4 Výsledky a diskuze

4.1 Environmentální dopady recyklovaného kameniva

Z procesu recyklace SDO vznikají dva typy kameniva. Environmentální dopady alokované na 1 t produkovaného kameniva jsou uvedeny v tabulce 6. První typ pochází z jednostupňové recyklace a druhý typ pak z druhého stupně recyklace. Jelikož byla v studii použita hmotnostní alokace, jsou environmentální dopady rovnoměrně rozloženy mezi frakce stejného typu. Jednostupňové kamenivo je v tabulce zastoupeno pouze kamenivem frakce 63-120 mm a kamenivo z druhého stupně je zastoupeno frakcí 8-16 mm (Pešta, 2018).

Významný vliv na výsledky má proces recyklace železného šrotu. Tím,

že do oběhu vracíme šrot, předcházíme nejen dopadům způsobeným jeho spotřebou, ale také dopadům, které by byly vynaloženy při těžbě primární suroviny a navazujících procesech. Z betonového odpadu se vytřídí více železného šrotu, a proto i vliv recyklace šrotu je zde významnější než u kameniva z cihelného odpadu.

Primární kamenivo má téměř ve všech vybraných indikátorech větší dopad než recyklované kamenivo. Jedinou výjimkou je výsledek v kategorii Úbytek stratosférického ozonu. Frakce z prvního stupně recyklace na sebe alokují větší část environmentálních benefitů způsobených recyklací železa. Z toho důvodu a také z důvodu, že je pro dvoustupňovou recyklaci potřeba více energie, vychází lépe produkce jednostupňového recyklátu.

Jednostupňový recyklát obsahuje velké množství drobných částic, a proto betonové směsi z něj vyrobené dosahují horších vlastností. Tato skutečnost není v tomto porovnání zahrnuta a je tedy nutné porovnat environmentální dopady betonových směsí.

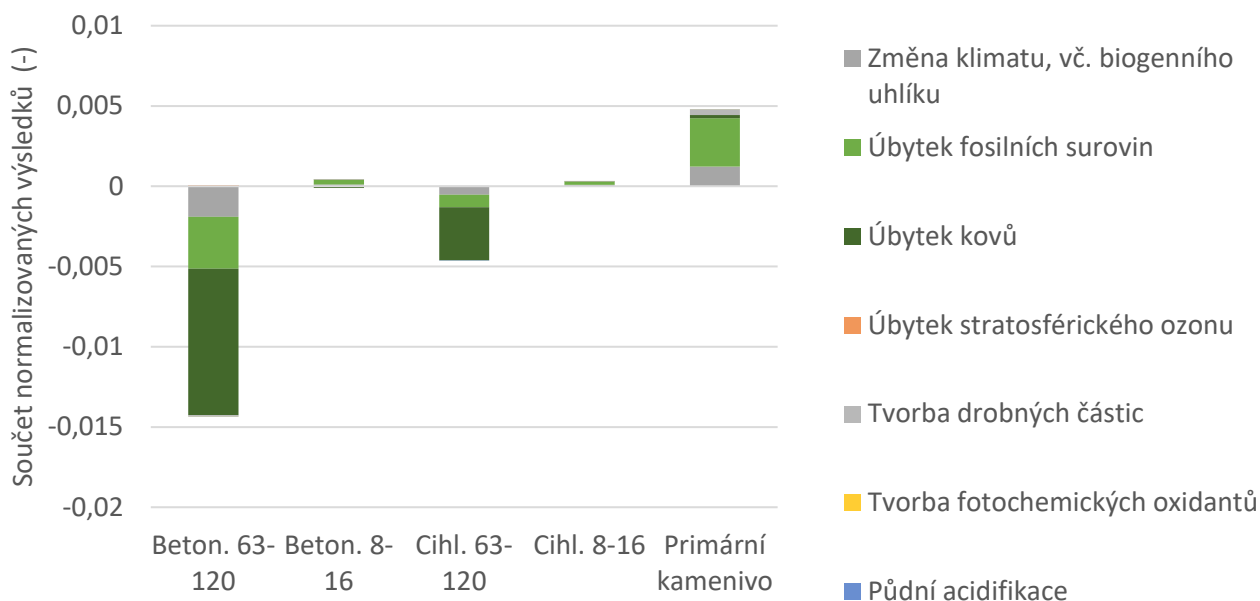
Aby bylo možné porovnat celkový environmentální dopad jednotlivých frakcí kameniva, byly jejich dopady normalizovány. Výsledek

normalizace a součet normalizovaných výsledků je uveden na obrázku 3. Záporné hodnoty součtu zobrazené v grafu znázorňují dopad, který může být potencionálně příznivý. Z tohoto grafu vyplývá, že největší příznivý dopad je alokován na betonovou frakci 63-120 mm. Naopak ve sledovaných kategoriích největší dopad je způsoben přírodním kamenivem.

Environmentální dopady alokované na recyklované kamenivo se liší také s ohledem na region, kde je kamenivo vyráběno a na uvažované vzdálenosti přepravy (Marinković et al., 2010). Bez ohledu na vliv dopravy nižší dopady recyklovaného kameniva vzhledem ke kamenivu těženému z řeky nebo drcením potvrzují další studie (Hossain et al., 2016). Mezi dopady, které nejsou přímo charakterizované použitou charakterizační metodou, patří i využití stavebního a demoličního odpadu (Rao et al., 2007). Zásadní pro využití kameniva do betonu jsou vlastnosti kameniva, které jsou mimo jiné ovlivněny i způsobem odstranění budovy (Silva et al., 2014). Proto je potřeba porovnávat environmentální dopady jednotlivých betonových směsí vzniklých z tohoto typu kameniva.

Tabulka 6 Výsledky vybraných indikátorů vztažené na 1 t kameniva

Midpointový indikátor kategorie dopadu	Beton. 63-120	Beton. 8-16	Cihl. 63-120	Cihl. 8-16	Prim. kamenivo
Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku [kg CO ₂ eq.]	-27,98	1,51	-7,87	1,18	17,96
Úbytek fosilních surovin [kg oil eq.]	-6,05	0,55	-1,43	0,40	5,64
Úbytek kovů [kg Fe eq.]	-39,37	-0,49	-14,26	-0,12	0,86
Úbytek stratosférického ozonu [kg CFC-11 eq.]	2,1E-07	2,6E-09	7,5E-08	6,2E-10	5,6E-12
Tvorba drobných částic [kg PM ₁₀ eq.]	-0,00923	0,00304	0,00050	0,00211	0,05403
Tvorba fotochemických oxidantů [kg NMVOC eq.]	-0,0161	0,0127	0,0099	0,0087	0,0998
Acidifikace půd [kg SO ₂ eq.]	-0,0350	0,0089	-0,0013	0,0062	0,1068



Obr. 3 Sumarizace normalizovaných výsledků vztažených na 1 t kameniva

4.2 Environmentální dopady recyklovaných betonů

Z recyklovaného betonového kameniva byly připraveny směsi navržené tak, aby splnily požadavky pro pevnostní třídu betonu C20/25. Výsledky posouzení environmentálních dopadů jejich přípravy jsou uvedeny v tabulce 7 a jsou vztaženy na deklarovanou jednotku 1 m³ betonu. Na výsledky posuzování celkových environmentálních dopadů má hlavní vliv proces výroby cementu. Směs bez použití recyklátů a cementu (CEM) působí relativně nejnižší environmentální dopady. Množství použitého cementu je hlavním faktorem, který je zodpovědný za environmentální dopad životního cyklu betonu. Použitím recyklovaného kameniva ve směsích se shodným množstvím cementu jako je u referenční směsi (REF), došlo k částečnému snížení environmentálních dopadů betonů. Směs OPT má nižší celkový dopad než směs REC. Obě tyto směsi používají stejné množství cementu a liší se hlavně v množství použitého přírodního písku. Z toho vyplývá, že je vhodnější použít recyklát než zvyšovat množství přírodního písku (Pešta et al., 2019).

Ze srovnání směsi REF a REC vyplývá, že je vhodnější použít recyklované kamenivo než nově vytěžený štěrk. Tím spíše, je dopad směsi nižší, když snížíme i množství písku ve směsi a nahradíme jej vyšším

množstvím přírodního kameniva, jak dokládá srovnání směsi REF a OPT.

Z naměřených vlastností betonů, které jsou uvedeny v tabulce 2, vyplývá, že směsi mají odlišné vlastnosti. Přestože splňují podmínky zařazení do pevnostní třídy C20/25, některé směsi dosahují lepších vlastností, a proto potenciál pro jejich využití je větší. Proto je vhodné porovnávat jejich funkci přímo podle jejich použití.

Environmentální dopady betonů obsahující různé druhotné suroviny byly posuzovány v řadě studií (Jiang et al., 2014; Marinković et al., 2016; Vieira et al., 2016). Aby byly výsledky porovnatelné, je potřeba hodnotit betony se stejným potenciálním použitím. Betony pro strukturální použití s příměsí popílku hodnotí Marinković (2017) jako příznivější. Snížení environmentálního dopadu lze dosáhnout i využitím ocelové výtzuže z odpadních betonových konstrukcí. Příznivý dopad recyklace se pak dá započítat do celkového dopadu nové betonové směsi (Turk et al., 2015). Funkci betonu, a tedy i alokované environmentální dopady výrazně ovlivňuje životnost betonu. Pro odhad potenciální životnosti je potřeba prokázat i další vlastnosti betonu (Zaharieva et al., 2004; Kenai and Debieb, 2011). Výsledek podobného multikriteriálního hodnocení shrnul Tošić (2015), který i při zahrnutí ekonomického hlediska doporučuje betonovou směs s 50 % recyklovaného kameniva.

Tabulka 7 Výsledky vybraných indikátorů vztažené na 1 m³ betonových směsí

Midpointový indikátor kategorie dopadu	REF	OPT	REC	CEM	REC CEM (-)	REC CEM (+)
Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku [kg CO ₂ eq.]	280,1	271,1	278,5	254,2	263,9	304,4
Úbytek fosilních surovin [kg oil eq.]	22,7	19,3	22,3	21,3	21,0	23,8
Úbytek kovů [kg Fe eq.]	3,38	2,59	2,78	3,05	2,56	3,11
Úbytek stratosférického ozonu [kg CFC-11 eq.]	4,3E-11	3,8E-09	3,0E-09	3,9E-11	3,2E-09	3,0E-09
Tvorba drobných částic [kg PM ₁₀ eq.]	0,212	0,184	0,191	0,195	0,181	0,208
Tvorba fotochemických oxidantů [kg NMVOC eq.]	0,356	0,359	0,363	0,323	0,346	0,397
Acidifikace půd [kg SO ₂ eq.]	0,377	0,376	0,381	0,342	0,362	0,416

Pro charakterizaci byly použity faktory převzaté z metodiky ReCiPe (E), verze 1.08

4.3 Environmentální dopady základů budov z recyklovaných betonů

Environmentální dopady posuzovaných základů budov z recyklovaných betonů jsou uvedeny v tabulce 8. Tyto dopady se odvíjí od různých referenčních toků jednotlivých betonových směsí. Porovnávané objemy směsí jsou uvedeny v tabulce 4. Stavba základů s obsahem recyklovaného kameniva z druhého stupně recyklace vede k nižšímu dopadu v kategorii Změna klimatu. Kameniva z prvního stupně dosahují lepších výsledků v kategorii Úbytek stratosférického ozonu.

Směs REC II N100-V2 obsahuje dvoustupňové kamenivo a větší obsah cementu. Díky tomu tento betonový základ dosáhl malého objemu. Tento efekt se projevil ve výsledcích několika kategorií jako například Úbytek fosilních surovin a Tvorba drobných částic.

Množství cementu v kombinaci s přírodním kamenivem ale není vždy rozhodující. Referenční směsi REF I a REF II nedosahovaly takových

příznivých dopadů a malý objem celkového použitého betonu se významně projevil jen ve výsledcích kategorií Úbytek fosilních surovin a Tvorba drobných částic.

Ukazuje se, že dosažená pevnost ani množství nebo kvalita použitého recyklovaného kameniva nejsou samy o sobě rozhodující. Důležitá je kombinace těchto tří faktorů pro daný posuzovaný příklad.

Podobně se dají porovnávat i jiné konstrukce. Na základě multikriteriálního hodnocení se dají porovnávat například environmentální dopady podlah nebo střech (Contarini and Meijer, 2015; Dossche et al., 2018).

Při porovnávání konstrukcí se ukazuje, jak důležité je porovnávat nejen jejich výrobu, ale celý jejich životní cyklus. Penadés-Plà (2017) popisuje, jak se rozdíl v designu mostních konstrukcí projeví v jednotlivých fázích životního cyklu. Design konstrukcí hraje významnou roli, a proto i obecné přístupy designu byly porovnávány na specifickém příkladu mostní konstrukce (Du et al., 2014).

Tabulka 8 Výsledky vybraných indikátorů pro posuzované základy budov

Midpointový indikátor kategorie dopadu	REF I	REC I N30-V1	REC I N30-V2	REC I N50-V1	REC I N50-V2	REC I N100-V1	REC I N100-V2
Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku [kg CO ₂ eq.]	1177	1379	983	1268	865	1369	888
Úbytek fosilních surovin [kg oil eq.]	175	197	131	176	104	179	94
Eutrofizace sladkovodních vod [kg P eq.]	0,00426	0,00169	0,00123	-0,00073	-0,00083	-0,00475	-0,00318
Úbytek kovů [kg Fe eq.]	19,3	-31,7	-155	-63,6	-264	-145,5	-426
Úbytek stratosférického ozonu [kg CFC-11 eq.]	1,2E-06	-9,4E-08	-7,6E-08	-1,1E-06	-9,3E-07	-3,0E-06	-2,0E-06
Tvorba drobných částic [kg PM ₁₀ eq.]	0,97	1,11	0,553	0,99	0,293	1,04	0,064
Tvorba fotochemických oxidantů [kg NMVOC eq.]	2,16	2,50	1,95	2,26	1,81	2,44	1,97
Acidifikace půd [kg SO ₂ eq.]	1,97	2,27	1,68	2,05	1,49	2,20	1,54
Midpointový indikátor kategorie dopadu	REF II	REC II N30-V1	REC II N30-V2	REC II N100-V1	REC II N100-V2		
Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku [kg CO ₂ eq.]	1224	1491	969	1395	865		
Úbytek fosilních surovin [kg oil eq.]	172	214	118	170	84		
Eutrofizace sladkovodních vod [kg P eq.]	0,00417	-0,00054	-0,00075	-0,00447	-0,00276		
Úbytek kovů [kg Fe eq.]	19,7	-91,7	-370	-136,5	-372		
Úbytek stratosférického ozonu [kg CFC-11 eq.]	1,1E-06	-1,2E-06	-1,0E-06	-2,8E-06	-1,8E-06		
Tvorba drobných částic [kg PM ₁₀ eq.]	0,99	1,19	0,241	1,04	0,109		
Tvorba fotochemických oxidantů [kg NMVOC eq.]	2,19	2,78	2,20	2,42	1,83		
Acidifikace půd [kg SO ₂ eq.]	2,01	2,51	1,77	2,19	1,45		

Pro charakterizaci byly použity faktory převzaté z metodiky ReCiPe (H), verze 1.08.

4.4 Environmentální dopady konstrukcí z tvarovek s obsahem recyklátu

Environmentální dopady konstrukcí tvarovek jsou popsány v tabulce 9. Výsledky indikátorů jsou vztaženy na 1 m² konstrukce. V plánu REC B je použit beton pro tvarovky vyrobený z cihelného kameniva. Na betonové kamenivo je alokován příznivější dopad, a proto je konstrukce REC C spojena s menším environmentálním dopadem.

Dopady železobetonové zdi (REFS) a tvarovek z primárního betonu (PRIM C) jsou téměř srovnatelné a v obou případech jsou vyšší než u konstrukcí s recyklátem.

Mezi často porovnávané stavební prvky patří cihly. Jednou z posuzovaných inovací je přidávání organického odpadu do materiálu pro výrobu cihly, což také vede ke snížení energetické spotřeby a celkového

dopadu na životní prostředí (Lozano-Miralles et al., 2018). U podobných výrobků jsou však environmentální dopady obvykle porovnávány jen od výroby surovin do produkce výrobků (tzv. cradle-to-gate). Nevýhodou takového přístupu, který využil například Özkan (2016) je úzká perspektiva, která nezohlední environmentální výhodnost výrobku při jeho skutečném použití. Proto je vhodné posuzovat jednotlivé prvky přímo v konkrétním použití.

4.5 Další nezahrnuté vlivy

Při posuzování potenciálních environmentálních dopadů recyklovaného betonu lze uvažovat i další vlivy jako například: vliv karbonatce betonu na sekvestraci CO₂ z atmosféry, vliv způsobený vyluhováním látek z betonových výrobků a následky rozhodnutí o omezení skládkování.

Tabulka 9 Výsledky vybraných indikátorů vztažené na 1 m² konstrukce

Midpointový indikátor kategorie dopadu	REC B	REC C	PRIM C	REFS
Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku [kg CO ₂ eq.]	106	45,6	109	114
Úbytek fosilních surovin [kg oil eq.]	12,3	0,854	15,4	16,6
Eutrofizace sladkovodních vod [kg P eq.]	0,000105	9,22E-05	0,000178	0,000171
Úbytek kovů [kg Cu eq.]	5,43	2,73	5,81	5,8
Úbytek stratosférického ozonu [kg CFC-11 eq.]	1,51E-05	1,68E-05	1,62E-05	1,55E-05
Tvorba fotochemických oxidantů [kg NO _x eq.]	0,333	0,291	0,341	0,323
Acidifikace půd [kg SO ₂ eq.]	0,183	0,0924	0,201	0,202

Pro charakterizaci byly použity faktory převzaté z metodiky ReCiPe (H), verze 2016.

4.5.1 Vliv karbonatace

Karbonatace betonu představuje jev, kdy je CO₂ z okolního prostředí zpětně chemicky vázán do betonu a v reakce s CaO znovu vzniká CaCO₃ (Souto-Martinez et al., 2018).

Podle pravidel upřesňujících zpracování environmentálního prohlášení o produktu pro beton a betonové prvky lze zahrnout do výpočtu potenciálního dopadu na globální oteplování množství CO₂, které může být zpětně absorbováno do betonu ČSN 16757. Maximální teoretický příjem CO₂ pro úplně zkarbonatovaný beton závisí na množství reaktivního CaO v pojivu. Výpočet příjmu CO₂ v kg na m² betonového povrchu v průběhu t let se vypočítá podle rovnice 1.

$$CO_{2,příjem} = k \times K_k \times \frac{\sqrt{t}}{1000} \times U_{Tcc} \times D_c \quad (1)$$

Kde k je faktor popisující hloubku karbonatace pro různé třídy pevnosti betonu a různé podmínky prostředí, t je čas, U_{Tcc} je maximální teoretický příjem v kg CO₂ na kg cementu, C je obsah cementu v kg na m³ betonu a D_c je stupeň karbonatace.

Výpočet příjmu CO₂ vlivem karbonatace nemusí být marginální (Huang et al., 2019), přesto v těchto studiích nebyl výpočet zahrnut, protože pro betony nebyla získána data o rychlosti karbonatace a maximální životnosti betonových prvků a konstrukcí.

4.5.2 Ekotoxicita

Metodou pro odhad vlivu betonu na životní prostředí může být testování pomocí testů ekotoxicity. V těchto testech jsou látky nebo výrobky vystaveny organismům různých druhů. Podle vlivu na ně se pak usuzuje, jaký ekotoxický vliv mohou látky mít. Tato metoda slouží také k posouzení odpadu vč. SDO tak, aby se zamezilo toku nebezpečných látek do životního prostředí.

Vlastnost ekotoxicita se u vzorků odpadů zkouší až po jejich homogenizaci a to proto, aby se do vodného výluhu uvolnilo co nejvíce nebezpečných látek. Pokud ale předpokládáme, že betonový základ budovy nebo betonový prvek má životnost minimálně 100 let, neodpovídá testování homogenizovaného materiálu skutečnosti. Proto jsme se pokusili vyčíslit potenciální dopad v kategorii sladkovodní ekotoxicita pomocí charakterizace výluhů z celých betonových kostek.

Nehomogenizované betonové kostky byly vyluhovány do vody, aby

se ukázalo, jestli se z celého prvku uvolňují nějaké nebezpečné látky. Bylo vyluhováno šest různých vzorků kostek o rozměrech 40 mm. Popis receptur jednotlivých směsí je uveden v tabulce 10.

Kostky byly zváženy a uloženy do skleněných nádob, kde se vyluhovaly do vody. Potřebný objem vody byl vypočítán podle hmotnosti testované kostky. Na každých 100 g betonu bylo použito 1000 ml (1 díl materiálu a 10 dílů vody). Kostka byla 24 hodin, volně ponechána v přikryté nádobě. Výluh byl posléze přefiltrován přes filtrační papír. Stanovení prvků bylo provedeno pomocí Atomového absorpčního spektrometru: Agilent 280FS AA s plamenovou technikou atomizace a jednoúčelovým atomovým absorpčním spektrometrem AMA 254 s elektrotermickou technikou atomizace (Hg). V tabulce 11 jsou uvedeny výsledky stanovených prvků.

Pomocí metody LCA můžeme charakterizovat emise látek do životního prostředí a vyčíslit tak dopad, který tato emise má potenciál působit. Zjištěný obsah Zn byl na mezi stanovitelnosti, a proto tato emise nebyla dále charakterizována. Pro vyluhované prvky Ca a Na nejsou dostupné charakterizační faktory v kategorii sladkovodní ekotoxicity. Z tohoto důvodu nebyl hodnocen potenciál ekotoxicity betonů během fáze, kdy mohou být vystaveny kontaktu se životním prostředím.

Pro ověření vlivu výluhů na živé organismy byly provedeny testy ekotoxicity na řasách podle normy ISO 8692 (CEN, 2012). Výsledky těchto testů jsou uvedeny v tabulce 12. Výluhy byly testovány po upravení pH a přidání solí. Budou probíhat další testy, ale získané výsledky neprokázaly, že by testované výluhy byly ekotoxické. V rozvoji tohoto hlediska se bude dále pokračovat.

Ekotoxicita betonů s obsahem druhotných surovin byla testována v předchozích studiích. Například betony s obsahem popílku z biomasy mohou mít příznivější ekotoxické výsledky (Barbosa et al., 2013).

4.5.3 Skládkování

Jedním z možných způsobů využití SDO je jeho využití pro technické zabezpečení skládek. Na skládce tento materiál slouží k vytvoření vrstvy oddělovací jednotlivé vrstvy skládkovaného odpadu a přispívá ke stabilitě skládkového tělesa. Tento efekt nebyl v uvedených studiích uvažován.

V případě, že by došlo k omezení skládkování, je možné předpokládat, že by se SDO musel ve větší míře recyklovat. Toto hledisko nebylo ve studiích uvažováno. Přesto už teď je nutné hledat jiné možné využití pro SDO než využití jako technické zabezpečení skládek. Využití betonového a cihelného recyklátu pro výrobu recyklovaných betonů a betonových prvků může být jednou z možností.

Tabulka 10 Receptury betonových směsí na testované kostky na 1 m³ betonové směsi

Přísady [kg]	REF	FS	REC BET	REC C	EPS	UHPC
CEM 42,5 R ČC	320	650	320	320	320	650
Skelný prach (hrubý)	0	600	0	0	0	0
ST 06/12 (písek)	0	600	0	0	0	600
ST6 (písek)	0	240	0	0	0	240
Plastifikátor	0	30	0	0	0	30
Voda	160	180	169	184	208	180
Klasický písek	681	0	0	0	217	600
Recyklát 0/4	0	0	363	529	250	0
Recyklát 4/8	0	0	130	188	187	0
Recyklát 8/16	0	0	1198	772	557	0
Štěrka 4/8	541	0	0	0	0	0
Štěrka 8/16	616	0	0	0	0	0
EPS 4/8	0	0	0	0	4	0

Tabulka 11 Výsledky stanovení prvků ve výluhu

	REF	FS	REC - B	REC - C	EPS	UHPC
Zn [mg·L ⁻¹]	~ 0,004	< 0,004	≤ 0,003	~ 0,01	~ 0,008	~ 0,004
Ca [mg·L ⁻¹]	23,0	25,8	17,4	7,7	28,6	18,0
Na [mg·L ⁻¹]	1,06	5,90	4,30	2,50	2,32	2,70

Tabulka 12 Výsledky testů ekotoxicity

Organismus	REF	FS	REC BET	REC C	EPS	UHPC
Algae GR	N	S	S	N	N	S

N – Nebyl pozorován žádný efekt, netoxický výluh; S – mírně stimulující efekt

5 Závěr

V předložené studii byly porovnávány environmentální dopady produkce recyklovaného kameniva a z něj vyrobeného betonu. Zatímco recyklované kamenivo jako takové působí příznivější dopad na životní prostředí než primární kamenivo, při posuzování environmentálních dopadů přípravy betonových směsí je nutné uvážit vzájemnou porovnatelnost betonových směsí a brát v úvahu jejich možné využití.

Environmentální dopady betonových směsí s obsahem recyklátu byly posuzovány na základě použití těchto směsí v konkrétních konstrukcích. V navrhnutých konstrukcích tvarovek se potvrdil příznivý vliv použití recyklovaného kameniva, což mělo za následek menší dopad této konstrukce. Při použití pro základy budov se ukázalo, že je rozhodující kombinace tří faktorů: kvalita recyklovaného kameniva, množství betonu, pevnost betonové směsi.

Environmentální dopady recyklace stavebního a demoličního odpadu by se neměly hodnotit při výstupu z procesu produkce recyklovaného materiálu, ale pro jednotlivé použití, které bude reflektovat jejich předpokládanou funkci.

V této práci byla dále naznačena další hlediska, která by měla být dále rozpracována pro přesnější posuzování dopadů v oblasti recyklace stavebního a demoličního odpadu.

6 Poděkování

Financováno z účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum (MŠMT č.21-SV/2019).

7 Literatura

- Barbosa, R.; Lapa, N.; Dias, D.; Mendes, B., 2013. *Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances*. Construction and Building Materials 48, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.031>
- CEN, 2018. *ČSN EN 16757 Udržitelnost staveb - Environmentální prohlášení o produktu - Pravidla produktové kategorie pro beton a betonové prvky*.
- CEN, 2012. *ČSN EN ISO 8692 Kvalita vod - Zkouška inhibice růstu sladkovodních zelených řas*.
- CEN, 2006. *ČSN EN ISO 14040 Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Zásady a osnova*.
- Contarini, A.; Meijer, A., 2015. *LCA comparison of roofing materials for flat roofs*. Smart and Sustainable Built Environment 4(1), 97–109. <https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2014-0031>

- ČAS, 2018. ČSN EN 206 + A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.
- ČAS, 2008. ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu.
- Debieb, F.; Kenai, S., 2008. *The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete*. Constr Build Mater 22(5), 886–893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013>
- Dossche, C.; Boel, V.; De Corte, W., 2018. *Comparative material-based life cycle analysis of structural beam-floor systems*. Journal of Cleaner Production 194, 327–341. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.062>
- Du, G.; Safi, M.; Pettersson, L.; Karoumi, R., 2014. *Life cycle assessment as a decision support tool for bridge procurement: environmental impact comparison among five bridge designs*. Int J Life Cycle Assess 19(12), 1948–1964. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0797-z>
- Finkbeiner, M.; Inaba, A.; Tan, R.; Christiansen, K.; Klüppel, H.-J., 2006. *The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044*. Int J Life Cycle Assessment 11(2), 80–85. <https://doi.org/10.1065/lca2006.02.002>
- Guinée, J., 2001. *Handbook on life cycle assessment — operational guide to the ISO standards*. Int J LCA 6(5), 255–255. <https://doi.org/10.1007/BF02978784>
- Hossain, Md. U.; Poon, C. S.; Lo, I. M. C.; Cheng, J. C. P., 2016. *Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA*. Resources, Conservation and Recycling 109, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>
- Huang, H.; Wang, T.; Kolosz, B.; Andresen, J.; Garcia, S.; Fang, M.; Maroto-Valer, M. M., 2019. *Life-cycle assessment of emerging CO₂ mineral carbonation-cured concrete blocks: Comparative analysis of CO₂ reduction potential and optimization of environmental impacts*. Journal of Cleaner Production 241, 118359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118359>
- Jiang, M.; Chen, X.; Rajabipour, F.; Hendrickson, C. T., 2014. *Comparative Life Cycle Assessment of Conventional, Glass Powder, and Alkali-Activated Slag Concrete and Mortar*. Journal of Infrastructure Systems 20(4), 04014020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000211](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000211)
- Kenai, S.; Debieb, F., 2011. *Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés*. Mater Struct 44(4), 815–824. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9668-7>
- Lozano-Miralles, J. A.; Hermoso-Orzáez, M. J.; Martínez-García, C.; Rojas-Sola, J. I., 2018. *Comparative Study on the Environmental Impact of Traditional Clay Bricks Mixed with Organic Waste Using Life Cycle Analysis*. Sustainability 10(8), 2917. <https://doi.org/10.3390/su10082917>
- Marinković, S.; Dragaš, J.; Ignjatović, I.; Tošić, N., 2017. *Environmental assessment of green concretes for structural use*. Journal of Cleaner Production 154, 633–649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.015>
- Marinković, S.; Habert, G.; Ignjatović, I.; Dragas, J.; Tošić, N.; Brumaud, C., 2016. *Life Cycle Analysis of Recycled Aggregate Concrete with Fly Ash as Partial Cement Replacement*, In: Expanding Boundaries: Systems Thinking in the Built Environment. vdf Hochschulverlag, 390–396. <https://doi.org/10.3218/3774-6>
- Marinković, Snežana; Radonjanin, V.; Malešev, M.; Ignjatović, Ivan, 2010. *Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete*. Waste Management, Special Thematic Section: Sanitary Landfilling 30(11), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- Özkan, A.; Günkaya, Z.; Tok, G.; Karacasulu, L.; Metesoy, M.; Banar, M.; Kara, A., 2016. *Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis of Magnesia Spinel Brick Production*. Sustainability 8(7), 662. <https://doi.org/10.3390/su8070662>
- Penadés-Plà, V.; Martí, J. V.; García-Segura, T.; Yepes, V., 2017. *Life-Cycle Assessment: A Comparison between Two Optimal Post-Tensioned Concrete Box-Girder Road Bridges*. Sustainability 9(10), 1864. <https://doi.org/10.3390/su9101864>
- Pešta, J., 2018. *Posouzení životního cyklu postupů recyklace demoličních odpadů* (Diploma thesis). Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha.
- Pešta, J.; Pavlů, T.; Kočí, V., 2019. *Life Cycle Assessment of Recycling Processes for Demolition Waste*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 290, 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012026>
- Rao, A.; Jha, K. N.; Misra, S., 2007. *Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*. Resources, Conservation and Recycling 50(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- Schiessel, P.; Hanehara, S.-S.; Hohberg, I.; Jacobs, F.; Meyer, L.; Sommer, P.; Volland, G., 2003. *Environmental effects of concrete: state-of-art report*, Bulletin / International Federation for Structural Concrete. International Federation for Structural Concrete, Lausanne.
- Silva, R. V.; de Brito, J.; Dhir, R. K., 2014. *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. Construction and Building Materials 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Souto-Martinez, A.; Arehart, J. H.; Srubar, W. V., 2018. *Cradle-to-gate CO₂e emissions vs. in situ CO₂ sequestration of structural concrete elements*. Energy and Buildings 167, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.042>
- Thilo, K.; Baitz, M.; Makishi Colodel, C.; Kokborg, M.; Schöll, S.; Rudolf, M.; Thellier, L.; Bos, U.; Bosch, F.; Gonzalez, M.; Schuller, O.; Hengstler, J.; Stoffregen, A.; Thylmann, D., 2019. *GaBi Database and Modelling Principles*. thinkstep AG, Leinfelden-Echterdingen, Germany.
- Tošić, N.; Marinković, S.; Dašić, T.; Stanić, M., 2015. *Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use*. Journal of Cleaner Production 87, 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>
- Turk, J.; Cotič, Z.; Mladenovič, A.; Šajna, A., 2015. *Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA*. Waste Management, Urban Mining 45, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>
- Verbitsky, O.; Pushkar, S., 2018. *Eco-indicator 99, ReCiPe and anova for evaluating building technologies under LCA uncertainties*. Environ. Eng. Manag. J. 17(11), 2549–2559. <https://doi.org/10.30638/eemj.2018.253>
- Vieira, D. R.; Calmon, J. L.; Coelho, F. Z., 2016. *Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review*. Construction and Building Materials 124, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- Zaharieva, R.; Buyle-Bodin, F.; Wirquin, E., 2004. *Frost resistance of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research 34(10), 1927–1932. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.025>