

CIRKULÁRNÍ A NÍZKOUHLÍKOVÉ STAVEBNÍ MATERIÁLY

Autoři:

Janez Turk,

Tajda Potrč Obrecht,

Katja Malovrh Rebec,

Patricija Ostruh



Prosinec 2023

CirCon4Climate

Tato publikace vznikla jako jedna z aktivit projektu CirCon4Climate. Tento projekt je součástí Evropské iniciativy pro klima (EUKI) německého Spolkového ministerstva pro hospodářství a ochranu klimatu (BMWK).

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



European
Climate Initiative
EUKI

on the basis of a decision
by the German Bundestag

Název	Cirkulární a nízkouhlíkové stavební materiály
Podtitul	
Verze	1.1
Datum	11. prosince 2023
Autoři	Janez Turk, Tajda Potrč Obrecht, Katja Malovrh Rebec, Patricija Ostruh
Kontaktní osoba	Janez Turk janez.turk@zag.si
Instituce	Slovinský národní stavební a inženýrský institut (ZAG) Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana, Slovinsko https://www.zag.si/

Obsah

1.	Úvod k cirkulárním a nízkouhlíkovým stavebním materiálům	4
1.1.	Účel příručky	6
2.	Cirkulární materiály	7
2.1.	Různé typy recyklace	9
3.	Nízkouhlíkové materiály	11
3.1.	Možné způsoby výroby nízkouhlíkových výrobků pro stavebnictví	12
3.1.1.	Použití alternativních materiálů	12
3.1.2.	Použití druhotných materiálů	12
3.1.3.	Použití přírodních (biologických) materiálů	14
3.1.4.	Použití místních materiálů	14
3.1.5.	Zvýšení výkonu	14
3.1.6.	Integrace obnovitelných zdrojů energie	15
3.1.7.	Další přístupy	15
4.	Seznam cirkulárních a nízkouhlíkových stavebních materiálů	16
4.1.	Kompozitní dřevěné výrobky	19
4.2.	Beton	19
4.3.	Cihla	21
4.4.	Ocel	22
4.5.	Geopolymery	22
4.6.	Recyklovaný asfalt	23
4.7.	Výkopová zemina	24
4.8.	Další nízkouhlíkové stavební materiály	24
4.9.	Případové studie: stavby založené na cirkulárních a nízkouhlíkových stavebních materiálech	25
5.	Posouzení životního cyklu	27
5.1.	Příklady případových studií pro environmentální hodnocení stavebních výrobků	29
5.1.1.	Betony z druhotných surovin	29
5.1.2.	Asfaltová obrusná vrstva	30
5.1.3.	Případová studie oceli	31
6.	Shrnutí a závěry	32
7.	Bibliografie	33
	Seznam obrázků	37
	Seznam tabulek	37

1. Úvod k cirkulárním a nízkouhlíkovým stavebním materiálům

Podpora ekologicky udržitelných výrobků vyvolala zájem o materiály na biologické bázi, materiály s recyklovaným obsahem a výhodné využití odpadních (druhotných) materiálů. Z hlediska životního prostředí jsou ekologicky udržitelné materiály ty, které mají minimální zabudovanou energii. Zabudovaná energie ve stavebních materiálech označuje celkovou energii spotřebovanou během celého životního cyklu materiálu. Zahrnuje energii potřebnou pro těžbu surovin, výrobu, dopravu, výstavbu, údržbu a likvidaci nebo recyklaci na konci životnosti. Aby bylo možné pokročit na cestě k ekologicky udržitelným materiálům, včetně nízkouhlíkových stavebních materiálů, musí průmysl upřednostnit optimalizaci stávajících ekologicky udržitelných technologií. Kromě toho je třeba zkoumat nové technologie, optimalizovat konvenční metody, integrovat okrajové technologie do běžných postupů, urychlit zavádění hybridních technologií, zkoumat biotechnologické aplikace a zabývat se aplikacemi nanotechnologií.

Nicméně podstatné snížení nebo radikální odklon od konvenčních sypkých materiálů je v krátkodobém až střednědobém horizontu nepravděpodobný. Nové trendy se mohou projevit v oblasti izolačních materiálů, odklonu od keramických výrobků, snížení používání zinku a mědi v potrubí ve prospěch PVC a jiných plastů, příklonu k biokompozitním materiálům a zvýšeného využívání recyklovaných materiálů, zejména v betonu prostřednictvím náhrady kameniva, jakož i v oceli a hliníku (Van Wyk et al., 2012).

Pro stavebnictví jako celek, a zejména pro výrobce stavebních materiálů, je nezbytné identifikovat environmentální překážky spojené se současnou a budoucí výrobou a spotřebou materiálů. Stejně důležité je rozpoznat technologické možnosti řešení těchto environmentálních problémů. Pozornost by se měla zaměřit na dopady materiálů na životní prostředí (včetně potenciálu globálního oteplování, ale nejen na něj), které vznikají při výrobních procesech (těžba, spotřeba energie a vody) a při zpracování na konci životnosti (nakládání s odpady a recyklace). V některých případech může fáze používání převažovat nad celkovými dopady životního cyklu výrobku na životní prostředí v důsledku nepřetržité spotřeby energie a/nebo materiálů během používání, jak je tomu například u budov (provoz, údržba, opravy).

Tradičně se tento problém řeší především pomocí energeticky účinných strategií, které se osvědčily zejména u staveb, u nichž chybějí energetické předpisy a které byly postaveny v nevyhovující kvalitě. V současné době se nejambicióznější modernizace zaměřují na dosažení standardu budov s téměř nulovou spotřebou energie, který se stal měřítkem pro nové stavby v Evropě. Nicméně s tím, jak se snižuje provozní potřeba energie a do budov jsou integrovány systémy obnovitelných zdrojů energie, které vyrovnávají potřebu zbytkové energie, se ekologická zátěž budov výrazně přesouvá z fáze provozu do fáze výstavby; např. na stavební materiály s ohledem na jejich zabudovanou energii a emise skleníkových plynů.

Integrace principů cirkulární ekonomiky neboli oběhového hospodářství má potenciál výrazně snížit emise spojené se stavebními materiály, jak dokládá řada projektů financovaných EU, které usilují o dosažení pozoruhodného 50% snížení. Potenciál snížit emise je o to větší vzhledem k tomu, jak významný podíl ekonomiky tvoří stavebnictví, které je zodpovědné za více než 40% spotřeby primární energie v Evropě a za značných 36% evropské uh-

líkové stopy (Eurostat, 2020). Příklad uhlíku (např. emisí skleníkových plynů) zabudovaného do různých stavebních materiálů je uveden v tabulce 1.

Na podporu snižování celkové uhlíkové stopy budov vydala Evropská unie různé studie, směrnice a rámce, včetně směrnice o energetické náročnosti budov (z angličtiny EPBD), směrnice o energetické účinnosti (z angličtiny EED), směrnice o nakládání s odpady, směrnice o zadávání veřejných zakázek na ekologické výrobky (z angličtiny GPP), směrnice o ekodesignu, rámce Level(s), směrnice o taxonomii atd.

V souvislosti s cirkulárními a nízkouhlíkovými stavebními materiály je důležité zdůraznit roli zadávání cirkulárních veřejných zakázek. To slouží jako politický nástroj k dosažení cílů v oblasti kvality životního prostředí. Cílem tohoto nástroje je využít poptávku jako páku, která usnadňuje a urychluje přechod od lineárního k oběhovému hospodářství. Konkrétně ve stavebnictví poptávka vytváří trh s recykláty a inovativními cirkulárními a nízkouhlíkovými výrobky. Cirkulární veřejné zakázky proto hrají zásadní roli při podpoře environmentálně udržitelného stavebnictví. ***Další podrobnosti o zadávání cirkulárních veřejných zakázek naleznete v souvisejícím dokumentu „Příručka k zadávání cirkulárních veřejných zakázek ve stavebnictví“.***

Tato příručka se zaměřuje na cirkularitu na úrovni materiálů, zatímco cirkularitou na úrovni celé budovy nebo stavby se zabývá související příručka s názvem „***Cirkulární design budov: strategie a nástroje***“. Tato druhá jmenovaná příručka nabízí náhled na zásady navrhování cirkulárních budov, včetně navrhování pro demontáž, reverzibilitu, adaptabilitu, rekonfiguraci a prostorovou transformovatelnost. Kromě toho poskytuje přehled potenciálních nástrojů pro zpětnou vazbu k cirkulárnosti.

Vzhledem k tomu, že nízkouhlíkové stavební materiály často zahrnují druhotné materiály, související příručku s názvem „***Bezpečné používání druhotných stavebních materiálů. Informační balíček pro výrobce***“) doporučujeme přečíst pro získání dalších informací. Mimo jiné uvádí požadavky týkající se posuzování technických vlastností a dopadů na životní prostředí a zdraví při používání druhotných materiálů, stavebních výrobků, které je obsahují, a recyklovaných a znovu uváděných materiálů na trh.

Tabulka 1: Zabudovaný uhlík různých stavebních materiálů (Zdroj: Calkins, 2009).

Stavební materiál	Zabudovaný uhlík (kg CO ₂ /t)
Vápenec	12
Těžba kamene/šterku	16
Hutněná hlína	24
Půdní cement	140
Beton, nevyztužený (pevnost 20 MPa)	134
Beton vyztužený ocelí	222
Řezivo z měkkého dřeva	132
Portlandský cement obsahující 64-73% strusky	279
Portlandský cement obsahující 25-35% popílku.	858
Místní žula	317
Konstrukční cihla	850
Dlaždice	430
Ocel, tyče a pruty	1720
Polypropylen, vstřikování	3900

1.1. Účel příručky

Předkládané příručky mají za cíl shrnout stávající poznatky o nízkouhlíkových stavebních materiálech a strategiích oběhového hospodářství, které mohou zmírnit dopady na životní prostředí spojené se stavebními systémy a prvky. Příručka je určena především tvůrcům politik, výrobcům stavebních výrobků, odpadovým hospodářům, veřejným investorům a dalším subjektům zapojeným do stavebnictví. S ohledem na informace uvedené v této příručce mohou zúčastněné strany přispět k tomu, aby se stavebnictví stalo environmentálně udržitelnějším. Tím hrají zásadní roli při dosahování cílů v oblasti klimatu stanovených v Pařížské dohodě a usnadňují přechod na oběhové hospodářství.

2. Cirkulární materiály

Strategie oběhového hospodářství pro stavební materiály je založena na mnohostranném přístupu. Hlavní důraz je kladen na vývoj nových materiálů a pokročilých stavebních metod, které mají zlepšit výkonnost a trvanlivost budov a zároveň minimalizovat množství odpadu. Uhlíkově negativní stavební materiály představují cestu k dlouhodobé sekvestraci uhlíku a také ke zlepšení výkonnosti a trvanlivosti. Pokročilé stavební metody zahrnují tyto nové materiály a zároveň snižují celkovou spotřebu materiálů a zvyšují potenciál jejich opětovného použití.

Cirkulární materiály jsou navrženy tak, aby umožňovaly úplnou recyklaci materiálů a nové strategie syntézy bez toxických prekurzorů nebo vedlejších produktů pro regeneraci surovin. Cirkulární materiály se zpracovávají nejprve na místní úrovni pro místní potřeby. Využívání cirkulárních materiálů ve stavebnictví je založeno na zásadách maximalizace využití primárních materiálů a materiálů na biologické bázi, maximalizace potenciálu pro opětovné použití s vysokou hodnotou a množství použitých recyklovaných materiálů. V roce 2021 činil odhadovaný podíl cirkulárních materiálů v Evropské unii 11,7 % (Andabaka, 2023), což znamená, že je stále potřeba dosáhnout výrazných zlepšení.

Snahou je dosáhnout uzavřených materiálových toků, které by podpořily oběhové hospodářství tím, že by se materiál, z něhož se výrobek skládá, používal déle a maximalizovala by se jeho regenerace na vysoce hodnotné výrobky po skončení životnosti výrobku. Tímto způsobem se minimalizuje množství odpadu a materiály se na konci své životnosti znovu používají, recyklují nebo využívají.

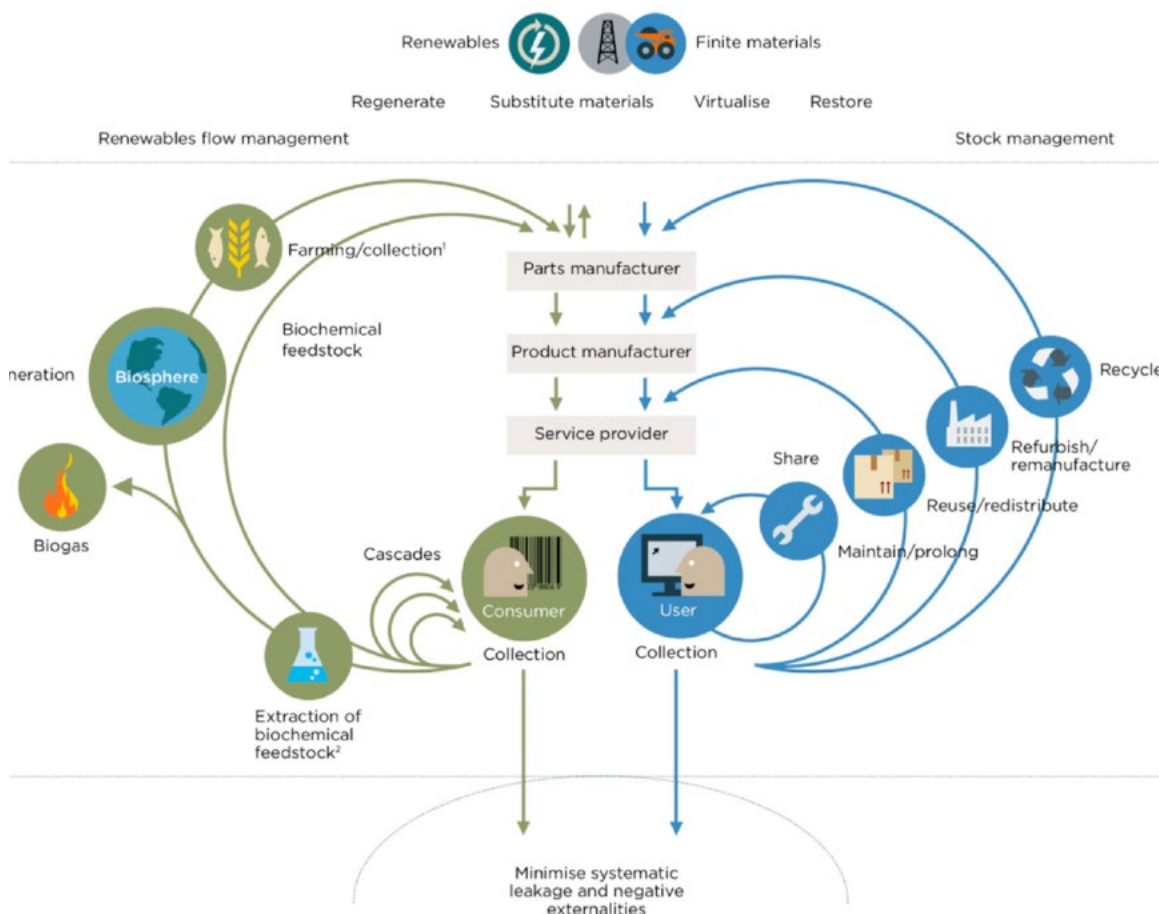
Oběhové hospodářství je ekonomický model, jehož cílem je optimalizovat využívání zdrojů v rámci planetárních mezí, maximalizovat hodnotu aktiv v ekonomice a minimalizovat plýtvání uzavřením ekonomických smyček (obrázek 1). Oběhové hospodářství vnímá souhrn ekonomických hodnot v dlouhodobé perspektivě, tj. zohledňuje náklady všech externalit (environmentálních, sociálních atd.) a diskontovanou hodnotu aktiv v celém jejich životním cyklu. Oběhové hospodářství lze definovat jako průmyslový systém záměrně navržený pro obnovu a regeneraci. Jejím cílem je nahradit koncept likvidace »konce životnosti« regenerativním růstem, upřednostňovat obnovitelné zdroje energie, eliminovat toxické chemické látky, které brání opětovnému použití, a usilovat o eliminaci odpadu prostřednictvím dokonalějšího návrhu materiálů, výrobků, systémů a obchodních modelů.

Oběhové hospodářství je přístup ke zvýšení udržitelnosti. Oběhové hospodářství zahrnuje postupné oddělování hospodářské činnosti od spotřeby omezených zdrojů a vyřazování odpadu ze systému (obrázek 1). Je založena na třech principech:

- Odstranění odpadů a znečištění už ve fázi designu
- Udržování produktů a materiálů v aktivním používání
- Regenerace přírodních systémů

Cílem přístupu oběhového hospodářství je tedy prodloužit životnost výrobků, usnadnit jejich opětovné použití a odklonit odpadní materiály ze skládek zpět do výrobních linek. V dlouhodobém horizontu povedou tyto přístupy k dalšímu racionálnímu navrhování výrobků, které lze snadno rozebrat na základní části pro opětovné použití nebo recyklaci.

Obrázek 1: Motýlí diagram oběhového hospodářství



Zdroj: Ellen MacArthur Foundation (2013)

Výrobci musí navrhovat výrobky v souladu s požadavky na udržitelnost. Toho lze dosáhnout vývojem řešení s delší životností (design for durability) a zajištěním, aby koncepce výrobků zohledňovala nejen náklady na výrobu, ale také na opětovné použití, demontáž a recyklaci zboží.

S ohledem na úroveň staveb musí být stavby navrhovány, stavěny a odstraňovány tak, aby bylo zajištěno udržitelné využívání přírodních zdrojů a zejména: opětovné použití nebo recyklace budov a nestavebních konstrukcí, jakož i jejich materiálů a částí po demolici, čímž se zajistí trvanlivost stavebních konstrukcí; používání ekologicky udržitelných surovin a druhotných materiálů ve stavebních konstrukcích.

Cirkulární design umožňuje vytvářet udržitelné stavební prostředí tím, že budovy jsou přizpůsobivější a usnadňují opětovné využití výrobků a materiálů staveb s vysokou hodnotou po skončení jejich životnosti. Oboustranný design budov je design budov, které lze snadno dekonstruovat nebo u nichž lze snadno odebírat a přidávat části, aniž by došlo k poškození budovy nebo výrobků, komponentů či materiálů, a zaměřuje se tak na jejich budoucí využití. Různé vrstvy, jako jsou okna, podlahy, vnitřní stěny a ventilace, lze zpřístupnit, aniž by došlo k poškození jiných částí budovy, což umožňuje opravy, výměnu, opětovné použití a využití výrobků, stavebních materiálů a součástí s účinným využitím zdrojů.

Zásady oběhového hospodářství, jak jsou vymezeny v akčním plánu EU pro oběhové hospodářství do roku 2030 a jsou základní součástí evropské Zelené dohody z roku 2019, vycházejí z hierarchie nakládání s odpady stanovené v rámcové směrnici EU o odpadech

(2008/98/ES). Tato hierarchie kategorizuje přístupy k nakládání s materiály na konci jejich životního cyklu s hlavním důrazem na zachování jejich ekonomické hodnoty na trhu, pokud je to možné a optimální z hlediska životního prostředí. Přednost má předcházení vzniku odpadů, následuje opětovné použití, recyklace, energetické využití a odstranění (např. skládkování), které je nejméně preferovanou možností. Jako ekologicky nejatraktivnější řešení vystupuje přímé opětovné použití stavebních prvků, i když jeho praktičnost může být v době masové výroby omezená (Stahel a MacArthur, 2019).

Naopak stávající opětovné využití minerálního odpadu, který je převažující složkou stavební a demoliční suti, obvykle zahrnuje zasypávání, které významně nepřispívá k udržení ekonomické hodnoty těchto materiálů na trhu. Obavy, které se v literatuře objevují, se týkají používání materiálů s vysokým obsahem recyklátu a jsou spojeny s mezními nárůsty nákladů na dosažení ekvivalentních mechanických vlastností betonů, snížením zpracovatelnosti a dostupnosti zdrojů stavebního a demoličního odpadu. **Více informací o recyklovaných materiálech naleznete v příručce »Bezpečné používání druhotných stavebních materiálů. Informační balíček pro výrobce«.**

Různé přístupy ke snižování emisí materiálů do životního prostředí s ohledem na principy oběhového hospodářství jsou následující:

- Snižování dopadů materiálů začleněním zásad oběhového hospodářství na konci jejich životnosti (opětovné použití, oprava, renovace, repasování, recyklace a využití).
- Použití druhotných materiálů (opětovně použitých nebo recyklovaných) pro stavbu.
- Navrhování s ohledem na trvanlivost.

2.1. Různé typy recyklace

Představíme dva hlavní přístupy k recyklaci. Zjednodušeně řečeno, k **recyklaci v uzavřeném cyklu** dochází tehdy, když se odpad použije k výrobě podobných výrobků výrobní společnosti (skupiny společností), takže recyklační proces se může po každém cyklu opakovat.

Oproti tomu k **recyklaci v otevřeném cyklu** dochází, když odpad vstupuje do obchodu s odpady a odpad je využíván neznámými subjekty.

Otevřený a uzavřený cyklus recyklace by se neměl zaměřovat s »upcyklací« a »downcyklací«. Upcyklace je navrácení suroviny do původní nebo dokonce vyšší kvality (třídy). Downcyklace používá odpad v jeho současné podobě. Otevřená smyčka downcyklace se často provádí v kaskádě výrobků, např. výrobek A je beton s přírodním štěrkem, výrobek B je beton s drceným kamenivem (např. recyklovaným kamenivem). Výrobek C je drcený beton (recyklované kamenivo) pod silnicí.

3. Nízkouhlíkové materiály

Celosvětově je stavebnictví zodpovědné za 36% všech emisí skleníkových plynů, přibližně 40% veškeré spotřeby materiálů a 40% veškerého odpadu (Wouterszoon Jansen a kol., 2022). Výstavba a provoz budov hrají klíčovou roli při dosahování cílů z Pařížské dohody, která má omezit růst globálních teplot pod 2°C a dosáhnout neutrálních čistých emisí skleníkových plynů v druhé polovině jednadvacátého století (např. do roku 2050). Kromě toho Evropská komise představila Zelenou dohodu s několika návrhy na snížení čistých emisí skleníkových plynů do roku 2030 nejméně o 55% oproti úrovni z roku 1990 a na dosažení klimatické neutrality Evropské unie v roce 2050.

Provozní spotřeba energie v nízkoenergetických budovách se v posledních desetiletích výrazně snížila. Důsledkem toho je, že emise skleníkových plynů zabudovaných do stavebních materiálů použitých při výstavbě mohou představovat přibližně polovinu uhlíkové stopy životního cyklu budovy. ***Tento problém lze řešit výrobou nízkouhlíkových stavebních materiálů a uplatňováním zásad oběhového hospodářství, což může vést k výraznému snížení emisí zabudovaných ve stavebních materiálech.***

Aby se budovy staly uhlíkově pozitivními, musí být z atmosféry odstraněn měřitelný a významný objem CO₂ a zachycen ve formě uhlíku ve stavebních materiálech, přičemž toto množství uloženého uhlíku musí být větší než emise spojené s těžbou, výrobou a přepravou všech materiálů použitých v budově. Za tímto účelem byly ve stavebnictví zavedeny technologie, jako je bioenergie se zachycováním a ukládáním uhlíku. Uhlík z atmosféry lze ve stavebních materiálech ukládat dvěma způsoby: (i) trvalým ukládáním do minerálních materiálů a (ii) dočasným ukládáním do biogenních materiálů.

Hlavní strategie pro snížení obsahu uhlíku v budovách nebo obsahu uhlíku ve stavebních materiálech a tím i zabudovaného uhlíku v budovách jsou uvedeny níže.

Hlavní strategie pro snížení obsahu uhlíku v budovách nebo obsahu uhlíku ve stavebních materiálech a tím i zabudovaného uhlíku v budovách jsou uvedeny níže:

1. Návrh s ohledem na **trvanlivost** (např. životnost materiálů – delší používání materiálů).
2. Návrh pro **přizpůsobivost**.
3. Konstrukce pro **demontáž** a separaci u zdroje.
4. Uplatňování **zásad oběhového hospodářství** (snížování produkce odpadů, přímé opětovné použití materiálů z odpadů nebo demolice, používání recyklovaných materiálů, renovace, repasování, opětovné použití, využití atd.).
5. Použití materiálů s **nízkou uhlíkovou stopou** (např. materiálů na bázi biohmoty), které nahradí materiály s vysokou uhlíkovou stopou (např. beton), aniž by došlo k ústupkům v oblasti trvanlivosti.
6. Zvýšení **environmentální výkonnosti** výrobních řetězců (energetická účinnost, integrace obnovitelných zdrojů energie, technologický rozvoj, průmyslová symbióza atd.).
7. Používání **místních produktů**.

Strategie, které se uplatňují na úrovni budov, jsou návrh pro trvanlivost/životnost, návrh pro přizpůsobivost a návrh pro dekonstrukci/demontáž. Tyto strategie se však odrážejí i na úrovni materiálů, a to s ohledem na menší poptávku po nové výrobě stavebních materiálů a menší množství odpadu, které časem vznikne. Materiály, které tyto strategie podporují, přispívají ke snížení uhlíkové stopy budov.

Cílem **designu pro dlouhou životnost** je dosáhnout nadčasové architektury a zároveň použít trvanlivé výrobky a materiály, které lze v budoucnu upravit a znovu použít. Dlouhověkost umožňuje, aby zdroje použité při stavbě budovy vydržely dlouho (např. zpomalení smyčky).

Design pro přizpůsobivost umožňuje budově nově definovat její účel bez větších zásahů a použít podstatně méně materiálu než při rozsáhlé rekonstrukci, snižuje nutnost demolice a zabraňuje vzniku značného množství stavebního a demoličního odpadu. Adaptabilní budovy mohou v průběhu své životnosti procházet prostorovými a funkčními změnami, což umožňuje několik životních cyklů. Větší přizpůsobivost je zajištěna použitím modulárních koncepcí, snadno vyměnitelných fasád umožňujících změny vzhledu a funkčnosti budovy a technických instalací typu plug-and-play.

Design pro dekonstrukci/demontáž usnadňuje dekonstrukci budovy na konci její životnosti tak, aby komponenty a části, které přesáhnou svou životnost jako součást systému (budovy), mohly být recyklovány, znovu použity nebo obnoveny pro další ekonomické využití. Dekonstrukci budovy lze usnadnit snížením složitosti budovy upřednostněním modularity a lehkosti komponentů, prefabrikací a zjednodušením spojů mezi konstrukčními a nekonstrukčními prvky a minimalizací počtu a typů komponentů; výběrem opakovaně použitelných a ekologicky kompatibilních materiálů při minimalizaci používání nebezpečných a kompozitních materiálů; a poskytováním informací o konstrukci a dekonstrukci budovy. Dekonstrukce zahrnuje také zajištění stávající konstrukce, analýzu obsahu budovy, dekontaminaci a odstranění veškerého nebezpečného odpadu, demoliční činnosti a recyklační operace pro využití hodnoty stávajících materiálů.

Další informace o strategiích cirkulárního designu naleznete v příručce „Cirkulární design budov: strategie a nástroje„.

Opakovaná použitelnost a recyklovatelnost stavebních materiálů spolu s jejich celkovou cirkulárností a dalšími principy oběhového hospodářství představují přístupy zaměřené na minimalizaci uhlíkové stopy a dalších dopadů na životní prostředí ve fázi konce životnosti těchto materiálů. Efektivnější využívání zdrojů je důležitým aspektem pro snížení emisí skleníkových plynů (z angličtiny GHG). Odhaduje se například, že v roce 2050 by uplatňování kombinovaných cirkulárních postupů ve stavebnictví (jako je modulární konstrukce, používání lehčích materiálů, snížené používání oceli, recyklace nezreagovaného cementu a zvýšené využívání budov prostřednictvím sdílení činností) mohlo v EU snížit až 80 megatun emisí skleníkových plynů ročně.

3.1. Možné způsoby výroby nízkouhlíkových výrobků pro stavebnictví

Existuje několik přístupů a doporučení pro výrobce stavebních materiálů, jak snížit ekologickou stopu (zejména uhlíkovou stopu) svých materiálů. Tyto přístupy se do značné míry opírají o principy oběhového hospodářství

Možné způsoby výroby nízkouhlíkových výrobků pro stavebnictví, které popisují Orsini a Marrone (2019), jsou následující:

- použití alternativních materiálů,
- použití přírodních materiálů,
- použít druhotné suroviny,
- zavádět systémy zachycování a ukládání uhlíku (z angličtiny CCS) a zachycování a využívání uhlíku (z angličtiny CCU) do výrobního procesu,
- zvýšit využívání energie z obnovitelných zdrojů a
- zvýšit výkonnost výrobku.

3.1.1. Použití alternativních materiálů:

Typickým příkladem je beton, jehož dopad na životní prostředí je silně spojen s výrobou portlandského cementu. Tento proces zahrnuje emise více než 1 tuny CO₂ na tunu vyrobeného cementu. K výrobě betonu s relativně nižší uhlíkovou stopou lze jako náhradu cementu použít různé alternativní materiály.

- uhelný popílek (vedlejší produkt spalování uhlénoho prachu v tepelných elektrárnách),
- granulovaná struska (vedlejší produkt při výrobě litiny, při níž vzniká velké množství tekuté strusky, která se příliš neliší od portlandského cementu),
- křemičité dýmy (vedlejší produkt při výrobě kovového křemíku a slitin železa a křemíku v elektrických pecích),
- odpad z červených cihel,
- atd.

Výhody:

- snížení uhlíkové stopy a dalších dopadů na životní prostředí (což je třeba ověřit metodou Analýzy životního cyklu, z angličtiny Life Cycle Analysis),

Překážky používání alternativních materiálů v odvětví výroby betonu:

- riziko ztráty výkonu,
- vzácnost některých alternativních materiálů,
- nedostatek znalostí v oblasti výroby,
- odlišný estetický vzhled.

3.1.2. Použití druhotných materiálů

Tento přístup je založen na využívání znovu použitých, recyklovaných a odpadních materiálů. Některé příklady jsou:

- Použití materiálů z demolic (stavební a demoliční odpad - SDO). Použití SDO může pomoci snížit uhlíkovou stopu betonu založeného na druhotných materiálech.
- Použití vyřazeného stavebního dřeva jako suroviny pro výrobu křížem lepeného dřeva.
- Použití odpadního materiálu, jako je popílek a struska, při výrobě betonu může snížit emise skleníkových plynů.
- Recyklované/odpadové materiály by se mohly použít i na cihly, což by vedlo ke snížení emisí skleníkových plynů.
- Vozovky postavené z různých recyklovaných materiálů (regenerovaný asfaltový povrch, ocelová struska atd.).

S používáním druhotných materiálů je spojeno několik problémů:

1. Dostupnost a kvalita druhotných materiálů představuje problém při hledání vhodných a stálých zdrojů pro recyklaci nebo opětovné použití. Nedostatečné systémy sběru a třídění mohou rovněž omezovat dostupnost vysoce kvalitních druhotných materiálů.
2. význam má odpovídající infrastruktura pro sběr, třídění a zpracování druhotných surovin. Zavedení účinných systémů sběru a investice do moderních třídících zařízení mohou být nákladné a vyžadují koordinaci mezi různými zúčastněnými stranami.
3. Ekonomické zdůvodnění použití druhotných materiálů závisí na poptávce na trhu, výrobních nákladech a cenách. Pokud náklady na sběr, třídění a zpracování druhotných surovin převyšují hodnotu získaných produktů, může být podpora jejich využívání neproduktivní.

4. Při podpoře využívání druhotných surovin hrají významnou roli účinné předpisy a politiky. Je třeba stanovit jasné pokyny, normy a mechanismy prosazování, aby byla zajištěna kvalita, bezpečnost a kompatibilita druhotných materiálů se stávajícími výrobními procesy.
5. Přimět spotřebitele, aby si oblíbili výrobky z druhotných surovin, může být náročné. Pro změnu chování spotřebitelů je nezbytná osvěta, vzdělávání veřejnosti a propagace výhod používání druhotných surovin.
6. Začlenění většího množství druhotných surovin do výroby může vyžadovat úpravy nebo modernizaci stávající infrastruktury a technologií. Při začleňování druhotných materiálů do výrobních procesů mohou vyvstat problémy s kompatibilitou a technickými omezeními, což si vyžádá investice do výzkumu a vývoje.
7. Řízení složitého dodavatelského řetězce zahrnujícího více zúčastněných stran, včetně sběračů, zpracovatelů, výrobců a prodejců, může být náročné. Pro úspěšnou integraci druhotných surovin je zásadní koordinace činností, zajištění transparentnosti a udržování kontroly kvality v celém dodavatelském řetězci.
8. Zásadní význam má překonání společenských předsudků týkajících se používání druhotných materiálů. Někteří lidé mohou stále spojovat recyklované nebo opětovně použité materiály s nižší kvalitou, což může bránit jejich přijetí v různých průmyslových odvětvích a na spotřebitelských trzích.

Výhody:

- Použití SDO ve výrobním procesu vede k ochraně před skládkováním a snižuje dopady výstavby nových obytných budov. Použití SDO může pomoci při snižování uhlíkové stopy betonu na bázi druhotných surovin.

Další překážky:

- chybějící standardizace EU v oblasti obchodu s druhotnými surovinami,
- právní předpisy týkající se používání druhotných surovin,
- zvýšené náklady při stejné konstrukční pevnosti,
- ztráta zpracovatelnosti,
- vzdálenostní limit týkající se poskytování SDO,
- nedostatek znalostí v oblasti výroby,
- rozdílný estetický vzhled,
- nedostatečné společenské přijetí,
- nedostatek potřebné zpracovatelské infrastruktury,
- nedostatečný dodavatelský řetězec.

Použití druhotných materiálů může vést ke snížení dopadů na životní prostředí, včetně uhlíkové stopy. Nejdůležitějšími ovlivňujícími faktory jsou však kvalita jak výchozího demoličního materiálu, tak konečného stavebního výrobku, definovaná požadavky na výrobek.

Další informace o druhotných materiálech a jejich použití ve stavebních materiálech naleznete v dokumentu „Bezpečné používání druhotných stavebních materiálů - informační balíček pro výrobce“.

3.1.3. Použití přírodních (biologických) materiálů:

Typickým materiálem na biologické bázi, který může nahradit stavební materiály s vysokým obsahem uhlíku, jako je beton a cihly, aniž by to bylo na úkor trvanlivosti, je stavební dřevo.

Dalším příkladem stavebních materiálů na biologické bázi je zemina smíchaná s přírodními pojivy (vápno, popílek) nebo přírodními vlákny (dřevo, konopí, ovčí vlna, materiály ze zemědělství).

Výhody:

- nízká úroveň zpracování a levné výroby,
- zdravotní nezávadnost výrobku,
- místní dostupnost,
- potenciál aktivovat místní inovační řetězce schopné obnovit aspekty stavební tradice,
- sekvestrace biogenního uhlíku v přírodních materiálech. Některé přírodní materiály absorbují během celého životního cyklu větší množství uhlíku, než kolik uhlíku se uvolní při výrobě samotného výrobku.

Překážky:

- je třeba kompenzovat nízký výkon zvýšením tloušťky stavebních výrobků,
- nedostatek znalostí v oblasti výroby a
- nedostatek kvalifikovaných pracovníků.

3.1.4. Použití místních materiálů:

Emise skleníkových plynů lze snížit minimalizací přepravních vzdáleností surovin. Nejvýhodnější možností je využití materiálů z demolic přímo na místě.

Překážky:

- nutnost kompenzovat nízký výkon zvýšením tloušťky součástí/stavebních výrobků,
- nedostatek znalostí v oblasti výroby,
- vzdálenostní limity pro zadávání veřejných zakázek (*viz „Příručka k zadávání cirkulárních veřejných zakázek ve stavebnictví“*),
- prostor potřebný pro dočasné skladování materiálů z demolice.

3.1.5. Zvýšení výkonu

Zvýšení výkonu souvisí s optimalizací, například:

- použití menšího množství surovin,
- zlepšování designu z hlediska snižování emisí skleníkových plynů,
- vývoj nových materiálů založených na nanotechnologiích, které by mohly zlepšit vlastnosti tradičních materiálů (dřevo, beton) a zlepšit design z hlediska snížení emisí skleníkových plynů.

Výhody:

- snížení emisí,
- šetří přírodní zdroje.

Překážky:

- nedostatek znalostí v oblasti výroby,
- vysoké náklady na výzkum a vývoj.

3.1.6. Integrace obnovitelných zdrojů energie

Energie se spotřebovává ve všech fázích životního cyklu stavebního materiálu (výroba, použití, likvidace/recyklace). Emise skleníkových plynů lze snížit využitím energie z fotovoltaických (solárních) panelů, větrných turbín, vodní energie a dalších obnovitelných zdrojů energie) a také využitím odpadních materiálů k výrobě energie (tepla/elektřiny).

Výhody:

- snížení emisí skleníkových plynů

Překážky:

- vysoké náklady na zavádění obnovitelných zdrojů

3.1.7. Další přístupy

Způsoby snižování emisí skleníkových plynů se týkají také:

- zpětného získávání tepla z výrobního procesu a jeho opětovného zavádění do samotného procesu,
- technologického vývoje nebo inovací výrobního procesu,
- zvýšení efektivity výroby procesů,
- energetické účinnosti,
- průmyslové symbiózy,
- biotechnologického zachycování uhlíku,
- zavedení systémů, jako je zachycování a sekvence uhlíku, zachycování a využívání uhlíku.

Kromě těchto přístupů k výrobě nízkouhlíkových stavebních výrobků poskytl Grazieschi (2022) přehled některých iniciativ týkajících se oběhového hospodářství a nízkouhlíkových stavebních materiálů ve stavebnictví. Jedná se rovněž o strategie snižování zabudovaného uhlíku budov (*související s příručkou „Cirkulární design budov: strategie a nástroje“*):

- Konstrukce pro dlouhou životnost,
- Uplatňování zásad oběhového hospodářství (snižování produkce odpadu, přímé opětovné použití materiálů z odpadu nebo demolice, používání recyklovaných materiálů),
- Konstrukce pro demontáž a separaci u zdroje.






Lze zde zdůraznit i další aspekty, jako je strategie zahrnující pět pilířů pro maximalizaci účinnosti současných technologií a pokrok ve výzkumu a vývoji nových technologií šetrných k životnímu prostředí. Těchto pět pilířů, které jsou navrženy tak, aby se vzájemně doplňovaly, zahrnují:

- Zvýšení účinnosti současných technologií.
- Začlenění environmentálně udržitelných okrajových technologií do běžných postupů.
- Urychlení integrace hybridních technologií do běžných aplikací.
- Vytváření aplikací pro biotechnologie ve stavebnictví.
- Vývoj aplikací nanotechnologií ve stavebnictví.

4. Seznam vybraných cirkulárních a nízkouhlíkových stavebních materiálů

Některé z možných cirkulárních a nízkouhlíkových stavebních materiálů jsou uvedeny v tabulce 2. Tyto materiály jsou považovány za ekologicky udržitelnější díky svým cirkulárním vlastnostem, opětovnému využití druhotných materiálů a nižší uhlíkové stopě ve srovnání s tradičními stavebními materiály. Tento seznam je však pouze příkladem, nikoli úplným výčtem stavebních materiálů. Rozhodnutí o tom, které stavební materiály použít v určitých stavebních projektech, závisí na případové studii a jako takové je nelze zobecnit.

Tabulka 2: Seznam stavebních materiálů, které jsou považovány za cirkulární a mají relativně nízkou uhlíkovou stopu.

		Funkčnost	Další komentář
Technické dřevěné výrobky (EWP)			
Dřevovláknité izolační desky (WFIB)		Použití jako izolační materiál (střecha, stěna, podlaha, strop, interiér, fasáda, podkroví).	
Výrobky z křížem lepeného dřeva (CLT)		Alternativa k železobetonovým systémům (betonová podlahová deska) a ocelovým konstrukcím.	Lepidla mohou být problematická
Laminované dýhové řezivo (LVL)		Použití v nosnících, nadpražích, sloupech (s ohledem na stavební konstrukce), dveřních a okenních nadpražích, schodišťových podélnících, příčlích a nosnících stavebních rámců.	Lepidla mohou být problematická
Lepené lamelové dřevo (Glulam)		Použití v konstrukčních prvcích, stavebních rámech, sloupech, nosnících atd. Alternativa ocelových konstrukcí a betonových podlahových desek.	Problémem mohou být lepidla.
Stavební dřevo		Použití: stavební prvky, rámy budov, sloupy, nosníky atd. Alternativa k ocelovým konstrukcím a betonovým podlahovým deskám.	
Beton s použitím druhotných materiálů			
Beton s použitím recyklovaného kameniva (SDO)		Použití může být omezené, protože závisí na požadavcích na kvalitu. Použití při zakládání staveb, stavbě silničních základů, podkladů a chodníků, konstrukčních betonových prvků, stavbě náspů a opěrných zdí, výrobě betonových prefabrikátů atd.	Recyklovaný beton zhoršuje odolnost součástí a zkracuje jejich životnost.
Beton s použitím vysokopecní strusky		Použití v základech, deskách a příjezdových cestách, hromadné betonové aplikace (hráze a základy), výroba prefabrikovaných betonových výrobků (tvárnice a panelů), vysoce výkonný beton.	Vyluhování sloučenin.

	Funkčnost	Další komentář
Beton s použitím popílku ze spalování uhlí	Použití při stavbě chodníků, v bytové výstavbě (základy, desky, příjezdové cesty), při výrobě betonových prefabrikátů (tvárnice, panely, trubky), při stavbě mostních konstrukcí (nosníky, sloupy, paluby), přehrad, základů atd.	Vyluhování sloučenin.

Cihly s použitím druhotných materiálů a regenerovaných cihel

Cihla s vytěženým bahnem		Použití v nízkopodlažních stavbách (obytné budovy, drobné stavby), tradiční a lidové architektuře, hraničních zdech a plotech, přístřešcích, zemědělských stavbách a dalších nebytových stavbách, uměleckých a dekorativních aplikacích.	
Cihly s popílkem (z angličtiny FAB)		Výstavba stěn, příček a dalších konstrukčních prvků, výstavba komerčních a průmyslových objektů (kanceláře, sklady), výstavba mostů a propustků, aplikace pro dláždění (příjezdové cesty, chodníky a další venkovní povrchy), použití pro vnitřní a příčkové stěny, použití při renovaci a modernizaci atd.	Obavy související s možnou kontaminací způsobenou odpadními materiály a pomalým průmyslovým rozvojem. a míra přijetí ze strany veřejnosti by mohly být příčinou omezení.
Cihla s ocelovou struskou		Použití pro stěny, fasády a další konstrukční prvky, výstavbu komerčních a průmyslových objektů (kanceláře, sklady, výrobní objekty), mosty a propustky, výstavbu opěrných zdí, dlažby (příjezdové cesty, chodníky a další venkovní plochy), zahradní stěny a dekorativní prvky, protihlukové stěny podél dálnic, použití pro vnitřní a dělicí stěny atd.	Obavy související s možnou kontaminací způsobenou odpadními materiály a pomalým průmyslovým rozvojem. a míra přijetí ze strany veřejnosti by mohly být příčinou omezení.
Cihla s kalem z karbidu vápnicku		Použití v dlažbě (chodníky, krajinné prvky), použití v dekorativních prvcích v architektonických návrzích, použití v nízkopevnostních nebo nenosných konstrukcích.	Obavy související s možnou kontaminací způsobenou odpadními materiály a pomalým průmyslovým rozvojem. a míra přijetí ze strany veřejnosti by mohly být příčinou omezení. Strukturální omezení.
Rekultivované cihly		Použití pro fasády budov, vytváření cest a chodníků v zahradách, parcích a obytných zahradách, výstavbu teras a dvorů, výstavbu nebo renovaci krbů a komínů, výstavbu opěrných zdí, vnitřní podlahy, použití v různých architektonických prvcích (oblouky, sloupy, ozdobné prvky), lemování zahrad atd.	Obvykle není vhodný pro nosné aplikace. Pro takové aplikace je třeba splnit požadavky na pevnost.

Ocel

Ocel

Různá použití: výztužné tyče, konstrukční nosníky, trubky, plechy, automobilové díly, kontejnery, výroba domácích spotřebičů (ledničky, pračky, sporáky), stavba a údržba železničních tratí a mostů, výroba nábytku (židle s ocelovou konstrukcí, stoly a další kovové nábytkové předměty), výztuž v betonových konstrukcích atd.

Ocel není ve skutečnosti nízkouhlikový materiál kvůli vysoce energetickým procesům těžby, kalení, obohacování a válcování. Ocel však lze recyklovat znovu a znovu a vyrábět z ní novou ocel. Z tohoto pohledu se jedná o cirkulární materiál.

	Funkčnost	Další komentář
Geopolymery		
Geopolymery	Používá se jako pojivo pro udržitelné stavební materiály (alternativa k vápnu a běžnému portlandskému cementu), při výrobě betonových prefabrikátů (tvárnic, panelů a trubek), v silničním stavitelství pro výrobu trvanlivého a vysoce pevného betonu pro chodníky a další konstrukční prvky, při výrobě izolačních materiálů, protipožárních nátěrů konstrukcí a materiálů, při 3D tisku stavebních prvků, při výrobě keramiky, architektonických prvků (dekorativních panelů, soch a fasád budov).	
Ostatní stavební materiály		
Sklo	Okna a dveře, domácí potřeby, nábytek, skleníkové panely atd.	
Hliněný plášť (stěna)	Používá se v drobných stavbách (obytné domy), oplocení a ohradních zdech, při obnově historických budov, stodol, skladů, protihlukových stěn podél dálnic.	
Sádkartonové desky	Použití pro vnitřní příčky, zavěšené nebo podhledy, protipožární stěnové sestavy, akustické panely, snižující přenos zvuku, oblouky, výklenky, dekorativní prvky atd.	
Konopný beton	Izolace stěn a střech, výstavba nenosných vnitřních stěn, v některých případech i vnějších nenosných stěn, renovace a restaurování historických budov, výstavba malých domů atd.	
Rekultivovaný asfaltový povrch	Použití při stavbě silnic (asfaltové směsi, stavba podkladů a základů, obnova povrchu silnic a sanace).	Neplatí pro budovy, ale pro jiné stavební projekty.
Vytěžená zemina	Použití při zásypech, terénních úpravách, zahradách, sanaci brownfieldů, výstavbě nebo renovaci sportovišť, jako násypový materiál při stavbě silnic, v některých případech jako náhrada stavebního kamene při určitých aplikacích, jako krycí materiál při skládkování.	Při použití vytěžené zeminy je třeba dodržovat místní předpisy a směrnice, aby bylo zajištěno dodržování předpisů o ochraně životního prostředí a zabráněno se kontaminaci.

4.1. Kompozitní dřevěné výrobky

Dřevo lze ve stavebnictví použít jako udržitelnou alternativu oceli a betonu. Panely z masivního dřeva se používají jako konstrukční stavební prvky, například nosné podlahy a stěny.

Kromě stavebního dřeva je křížem lepené dřevo (z angličtiny CLT) jedním z nejběžnějších konstrukčních dřevěných výrobků používaných ve stavebnictví. Vyrábí se z měkkého dřeva a polyuretanových lepidel. Technologie lepeného lamelování umožňuje výrobu konstrukčních prvků na bázi dřeva s libovolně velkými rozměry. Díky tomu se výrobky z konstrukčního dřeva, jako je lepené lamelové dřevo (glulam) a křížem lepené dřevo, staly konkurenty oceli a železobetonu na stavebním trhu středně vysokých až vysokých vícepodlažních budov. Možnosti použití různých výrobků z konstrukčního dřeva jsou uvedeny v tabulce 2.

S přihlédnutím k literárním údajům lze konstatovat, že varianta nebytové středně-podlažní dřevostavby s využitím prvků CLT a lepeného lamelového dřeva má ve srovnání se svým železobetonovým ekvivalentem vyšší zabudovanou energii. Tento rozdíl se připisuje významnému použití energeticky náročných prvků CLT ve variantě dřevostavby. Varianta těžké dřevostavby by však měla za následek nižší GWP než varianta železobetonová, protože při výrobě prvků CLT převažovala spotřeba energie z obnovitelných zdrojů spolu s vyšší energií vstupních surovin obsažených v panelech CLT.

Dřevní odpad z demolic se nejčastěji zpracovává na štěpku a využívá se buď k výrobě energie (např. k výrobě tepla a elektřiny spalováním), nebo k výrobě dřevotřískových desek. Stále se praktikuje i skládkování dřevního odpadu. Pokud však jde o principy oběhového hospodářství, je třeba věnovat pozornost recyklovatelnosti a opětovnému použití technických dřevěných výrobků. Opětovná použitelnost technických dřevěných výrobků po skončení jejich životnosti závisí na možnosti jejich separace během fáze demontáže. Tuto otázku je důležité zvážit již ve fázi návrhu.

Dalším faktorem, který má významný vliv na ekologickou udržitelnost technických dřevěných výrobků, je používání impregnačních látek a lepidel při jejich výrobě, při nichž se uvolňují těkavé organické látky (VOC) a formaldehyd. Nedávné pokroky vedly k vývoji konstrukčních dřevěných výrobků bez použití lepidel.

Kontaminace z použitých stavebních materiálů, které mohou obsahovat nebezpečné látky, se týká obytných a veřejných budov a průmyslových objektů. Materiály naleznete v dokumentu „Bezpečné používání druhotných stavebních materiálů - informační balíček pro výrobce“.

4.2. Beton

Beton je nejpoužívanějším umělým materiálem na světě a po vodě je druhým nejpoužívanějším zdrojem na Zemi. Ve většině evropských zemí tvoří beton více než polovinu (hmotnostně) materiálů v budovách, například v Nizozemsku 77%. Důvodem, proč je beton nejpoužívanějším stavebním materiálem, je jeho tvarová flexibilita, trvanlivost a vysoká odolnost vůči tlaku, ohni a vodě. Tradiční beton je stavební materiál s významným dopadem na potenciál globálního oteplování (což přímo souvisí s uhlíkovou stopou), důvodem je použití cementu, který je nejčastěji používaným pojivem v betonu. Cementářský průmysl je zodpovědný za přibližně 8 % světových emisí CO₂. Výroba cementu je také energeticky velmi náročná a vyžaduje značné množství vody (Graaf a Schuitemaker, 2022). Například cementárny v České republice vypouštějí 2,84 MT CO₂, 65% těchto emisí souvisí s procesem kalcinace při výpalu slínku.

Jednou z možných alternativ snížení ekologické (uhlíkové) stopy konvenčního betonu je synergické spojení odvětví odpadů a betonu. Nejslibnější suroviny pro výrobu „zelených betonů“ lze získat ze stavebního a demoličního odpadu (SDO). Stavební a demoliční odpady jsou jedním z největších toků pevných odpadů, neboť v Evropské unii vzniká ročně více než 450 milionů tun těchto odpadů (Ortiz et al., 2010), z nichž 40-67% tvoří beton. V České republice se hmotnost SDO pohybuje v rozmezí 20-23 milionů tun ročně. Recyklace betonu s ukončenou životností (získaného z demolic) na užitečné materiály, jako je recyklované kamenivo, je důležitým způsobem, jak by se dal objem SDO výrazně snížit. Dalšími slibnými surovinami pro výrobu „zeleného betonu“ jsou různé druhy průmyslových odpadů, ať už v roli kameniva, nebo jako pojiva. S ohledem na udržitelné nakládání s těmito materiály by druhotné materiály z jednoho odvětví mohly v ideálním případě sloužit jako zdroj pro jiné odvětví. Předpokladem jejich využití jako náhrady přírodních materiálů je však jejich ekologická přijatelnost a technická přiměřenost.¹

1. České příklady (převzato z Pavlů et al., 2018):

S ohledem na české předpisy může beton obsahovat struskové kamenivo, které splňuje požadavky ČSN EN 12620+A1. Použití struskového kameniva závisí na druhu, původu, složení, vlastnostech a stáří strusky. Betony se struskovým kamenivem se hodnotí podle ČSN EN 206+A1 - deklaráce vlastností).

Beton a betonové prefabrikáty z popílku. Filer z popílku lze použít do betonu podle ČSN EN 450-1 (Prohlášení o shodě) jako příměs typu II pro výrobu betonu, včetně betonu vyráběného na staveništi nebo prefabrikovaných betonových konstrukčních dílců, které odpovídají ČSN EN 206-1 (nyní ČSN EN 2016+A1).

Norma ČSN EN 206+A2 stanovuje limity pro obsah recyklovaného kameniva do betonu na úrovni vlivu na životní prostředí v závislosti na zdroji recyklovaného kameniva. Norma povoluje maximálně 50% objemu recyklovaného kameniva jako náhradu hrubého přírodního kameniva do betonu

Všechny alternativy je třeba hodnotit z hlediska jejich environmentálních přínosů a kompromisů, a proto se v současné době hojně využívá metoda posuzování životního cyklu (LCA). Několik autorů se zabývalo vlivem recyklovaného kameniva na životní prostředí ve srovnání s přírodním kamenivem a také vlivem betonů na bázi recyklovaných/alternativních materiálů ve srovnání s konvenčními betony, přičemž zohlednili výsledky analýzy LCA. Například Blengini a Garbarino (2010) studovali, jak může recyklované kamenivo doplnit přírodní kamenivo v rámci udržitelného toku dodávek pro stavebnictví. Ukázali, že řetězec recyklace SDO může být ekologicky účinný, protože zamezené dopady jsou vyšší než dopady vyvolané.

V jiné studii Knoeri et al. (2013) analyzovali dopady životního cyklu 12 alternativních betonových směsí a porovnali je s dopady odpovídajících konvenčních betonů. Zkoumané betonové směsi se lišily podílem recyklovaného kameniva, typem cementu a obsahem cementu. Bylo zjištěno, že betony na bázi recyklovaných/alternativních materiálů mohou snížit dopady na životní prostředí na přibližně 70% dopadů způsobených konvenčními betony. To bylo přičítáno zejména přínosům získaným ze zpětně získaného železného šrotu (z ocelové výztuže), jakož i tomu, že odpadá nutnost přepravy SDO na skládku a že se předejde dopadům takové likvidace.

Nahrazení výhradně přírodního kameniva recyklovaným kamenivem v procesu výroby betonu nepřináší výrazné snížení uhlíkové stopy. To potvrdili i Faleschini et al. (2014), kteří po-

rovnávali výrobu betonu obsahujícího kamenivo ze strusky EAF C s výrobou odpovídajícího konvenčního betonu. Struska EAF C byla použita jako náhrada hrubozrnného přírodního kameniva v různých betonových směsích. Výsledky LCA ukázaly, že emise spojené s výrobou umělého kameniva ze strusky EAF C jsou výrazně nižší než emise spojené s těžbou přírodního kameniva. Obsah cementu byl však v alternativním scénáři mírně vyšší. Vzhledem k tomu, že cement je hlavním faktorem, který je zodpovědný za emise způsobené výrobou betonu, vykazovaly analyzované alternativní a konvenční betony zcela srovnatelné dopady. Výsledky jsou však citlivé na typ použité dopravy a na dodací vzdálenosti přírodního a recyklovaného kameniva.

Hodnocením uhlíkové stopy typických betonových směsí se zabývá řada studií (viz například Flower a Sanjanyan, 2007, Marceau a kol., 2007; Zhang a kol., 2014). Některé cementové složky, jako je popílek a mletá granulovaná vysokopecní struska (obojí jsou vedlejší průmyslové produkty), vykazují potenciál ke snížení emisí při výrobě betonu (podrobněji viz studie Flower a Sanjanyan, 2007 a O'Brien a kol., 2009). Bylo zjištěno, že popílek je schopen snížit emise skleníkových plynů z betonu přibližně o 15% a vysokopecní struska přibližně o 22% v typických betonových směsích.

Vzhledem k demolici betonové konstrukce lze odpadní beton recyklovat jako stavební materiál (např. obvykle drcený za účelem výroby recyklovaného kameniva), pokud splňuje třídu kvality podle nařízení o recyklaci stavebních materiálů. Mezi recyklovatelné materiály patří například: betonová a železobetonová suť, prefabrikované betonové prvky (např. sloupky, stropní prvky) a betonové základy. Možné využití je výplňový materiál, zásypový materiál, podkladní vrstvy pro stavbu silnic, podklady pro podlahy budov ve stavebnictví, betonové kamenivo, drenážní vrstvy atd. Skládkováání se stále praktikuje (v zemích EU se skládkuje přibližně 11 % betonového odpadu), zejména pokud je betonová frakce kontaminována jinými materiály. Betonový odpad se však považuje za nevyužitelný, pokud nemůže splňovat třídu kvality požadovanou pro jeho použití. To se týká zejména těchto materiálů: betonové suti z průmyslových oblastí a betonové suti znečištěné škodlivinami (např. dehtovými náterými).

V případě selektivní demolice betonových konstrukcí má odpadní beton méně nečistot a může být použit při výrobě recyklovaného kameniva do betonu. Konstrukce pro demontáž, jako je modulární výstavba a prefabrikace, umožňují opětovné použití betonových dílů. Prefabrikované sloupové nosníky lze znovu použít. Správný typ spoje může umožnit opětovné použití betonových podlahových systémů a prefabrikovaných betonových fasád.

4.3. Cihla

Cihly jsou jedním z nejpoužívanějších stavebních materiálů a také nejstarším, protože se používají již více než sedm tisíc let. Tradiční hliněné cihly vyžadují po celou dobu svého životního cyklu neobnovitelné suroviny, vysoké teploty při výrobě, a tím i velké množství energie, při níž se uvolňují skleníkové plyny potenciálně zodpovědné za globální oteplování.

Aby se zlepšila ekologická udržitelnost cihel, vyrábějí se alternativní cihly přidáváním průmyslových odpadních materiálů (viz tabulka 2). Vzhledem k životnímu cyklu alternativních cihel se rozdílý oproti tradičním cihlám týkají (i) těžby surovin, (ii) použití odpadních materiálů, které zcela nebo částečně nahrazují jíl, a (iii) fáze výroby – vypalování je často vyloučeno a nahrazeno stabilizačními procesy.

Pro optimalizaci výhodného využití odpadů a druhotných surovin lze při výrobě cihel použít popílek, vytěžené bahno, ocelářskou strusku, kaly z karbidu vápničku (tabulka 2). Například vápenopopílkové cihly nabízejí několik výhod, včetně dostupnosti v různých nosných tří-

dách, úspory při omítání maltou a vytvoření esteticky přitažlivého zdiva. Nezatěžují konstrukci žádným dodatečným zatížením, vykazují zvýšenou odolnost proti zemětřesení díky působení panelů s vysokopevnostními cihlami, poskytují uspokojivou zvukovou izolaci, nabízejí maximální odraz světla bez oslnění a vykazují vynikající požární odolnost a trvanlivost (Ferrer Polancos, 2009).

S ohledem na konec životnosti cihel lze doporučit následující způsoby recyklace: (i) recyklace na materiál pro stavbu silnic a zásypy, (ii) recyklace pro náhradu cementu v omítkách, (iii) recyklace na materiál (kamenivo) pro výrobu betonu a (iv) alkalická aktivace. Kromě toho lze cihly na konci životnosti recyklovat na jemné kamenivo a použít je jako hliněné povrchy sportovišť. Recyklace cihel na materiál pro stavbu silnic a zásypy se zdá být nejběžnější praxí. Při tomto druhu použití se cihly drtí spolu s dalšími inertními materiály a používají se při výrobě recyklovaného kameniva.

S ohledem na konstrukci pro dekonstrukci je hlavní strategií výstavba konstrukcí bez malty, v nichž jsou cihly spojeny pomocí ocelových desek a stěnových vazeb. Prefabrikace modulárních jednotek dále zvyšuje potenciál opětovného použití cihel.

4.4. Ocel

Ocel je materiál hojně používaný ve stavebnictví díky své trvanlivosti, pružnosti, odolnosti proti namáhání a vysoké hustotě, která umožňuje realizaci relativně lehkých konstrukcí. Používá se téměř ve všech konstrukčních prvcích. Přibližně 50% světové poptávky po oceli souvisí s výstavbou infrastruktury a budov. Výroba oceli je spolu s výrobou cementu hlavním přispěvatelem k emisím skleníkových plynů, které mohou mít vliv na globální oteplování. S ohledem na informace Světové ocelářské asociace z roku 2023 se při výrobě jedné tuny oceli vyprodukuje 1,9 tuny oxidu uhličitého, což odpovídá přibližně 8% celosvětových emisí CO₂. Ocel je však 100% recyklovatelný materiál a při opětovném použití si zachovává téměř všechny své původní vlastnosti. Ocel lze recyklovat opakovaně a vyrábět z ní novou ocel. Problém spojený s recyklací oceli se týká poměrně vysoké spotřeby energie. Přesto lze recyklovanou ocel použitou v nových budovách považovat za nízkouhlíkový materiál.

Vzhledem k demolici budovy nebo jiných konstrukcí se ocel obvykle sbírá k recyklaci. Proto je recyklace oceli obvyklou praxí nakládání s odpady. V případě selektivní demolice lze některé ocelové součásti, jako jsou pláty, nosníky a sloupy, znovu použít. Opětovné použití po skončení životnosti obvykle zahrnuje pískování ocelové součásti za účelem odstranění barvy a opětovné natření (přidání nové barvy a zinkového povlaku a jako ochranné vrstvy).

4.5. Geopolymery

„Geopolymer“ označuje amorfní silikaluminát alkalických kovů, který se vyznačuje opakující se sialátovou monomerní jednotkou (-Si-O-Al-O-). Geopolymer je považován za cement třetí generace a slouží jako alternativa k vápnu a běžnému portlandskému cementu. Geopolymerní beton lze vyrobit polymerací hlinitokřemičitanů, jako je popílek, metakaolin, struska, popel z rýžových slupek a dřevěný popel s vysokým obsahem vápníku, aktivací pomocí alkalického roztoku. Účinnost výroby geopolymerního betonu je tedy do značné míry závislá na aktivátorech i na typech hlinitokřemičitanů. Proces výroby geopolymerního betonu obvykle eliminuje potřebu portlandského cementu, který je nejpoužívanějším cementem v betonové směsi. Geopolymery vykazují slibný potenciál jako pojiva pro udržitelné stavební materiály, neboť nabízejí brzkou pevnost v tlaku, nízkou propustnost, vynikající chemickou odolnost a pozoruhodné protipožární vlastnosti (viz Singh et al., 2015).

Jsou považovány za nízkouhlíkový materiál, protože výrobní proces vyžaduje méně energie ve srovnání s cementem. Bylo zjištěno, že použití geopolymerního betonu jako alternativy ke konvenčnímu portlandskému cementovému betonu vede až k 80% snížení množství zabudovaného uhlíku v závislosti na použitém prekurzoru a aktivátoru.

4.6. Recyklovaný asfalt

Recyklovaný asfalt je recyklovaný nízkouhlíkový materiál používaný při stavbě silnic. Skládá se z asfaltu a kameniva regenerovaného ze stávajících asfaltových povrchů, které byly odstraněny, často při údržbě nebo rekonstrukci silnic.

Recyklovaný asfaltový povrch (RAP) slouží jako cenný zdroj kameniva a asfaltu. Začlenění RAP do výroby asfaltu nejen prodlužuje životnost současných lomových zdrojů, ale také snižuje závislost na fosilních palivech při výrobě asfaltu.

Co se týče recyklace asfaltu, lze ji obecně rozdělit na „horkou“ a „studenou“ a na metody „na místě“ a „v závodě“. Při recyklaci za tepla se RAP mísí na místě s novými materiály ze závodu na výrobu horkých asfaltových směsí a následuje standardní pokládka a válcování. Tento přístup je obzvláště účinný pro rychlé řešení problémů s povrchovými vrstvami. V případě recyklace „na místě“ se RAP převáží na centrální sklad závodu, kde se uskladní a znovu zpracuje. Následně se RAP zpracovává jako surovina pro výrobu směsí za horka. Významné úspory při recyklaci mimo závod plynou především z materiálů obsažených v RAP, jako je asfalt, kamenivo a minerální plnivo. Výroba těchto materiálů je spojena s emisemi skleníkových plynů a dalšími emisemi. Úspory primárních materiálů spojené s recyklací RAP mohou vést ke snížení emisí skleníkových plynů a dalších emisí.

Recyklace za studena využívá techniku „zpeněného asfaltu“ k obnově poškozených asfaltových vozovek. Při této metodě se z vozovky pomocí recyklačního stroje získá materiál, který vytvoří novou vrstvu vozovky a revitalizuje stávající konstrukci vozovky. Tato technika se od ostatních metod recyklace asfaltu liší zejména tím, že odpadá nutnost zahřívání kameniva, čímž se snižuje spotřeba energie a následně i emise – včetně skleníkových plynů.

Některé příklady z literatury, které ukazují snížení emisí skleníkových plynů díky recyklaci RAP, jsou následující. Giustozzi et al. (2012) zkoumali uhlíkovou stopu rekonstrukce letištní dlažby. Byly porovnávány dva scénáře: obnova stávajícího povrchu (1) pouze s použitím primárního kameniva a asfaltu a (2) s použitím 85% recyklovaných materiálů. V druhém případě se emise skleníkových plynů snížily o 35%. Spotřebu energie a emise skleníkových plynů odpovídající různým typům prací na obnově a údržbě vozovek studovali také Chappat a Bilal (2003), Chehovits a Galehouse (2010), Cross a Chesner (2011) atd.

Lze shrnout, že použití RAP při stavbě silnic přináší několik ekologických a ekonomických výhod:

- Zachování zdrojů: Začlenění RAP do nových asfaltových směsí šetří přírodní zdroje díky opětovnému využití materiálů ze starých vozovek.
- Úspory energie: Výroba asfaltu z RAP obvykle vyžaduje méně energie než výroba primárního asfaltu ze surovin. To přispívá ke snížení celkových emisí uhlíku.
- Efektivita nákladů: Použití RAP může být nákladově efektivní, protože snižuje potřebu nových surovin a minimalizuje náklady na likvidaci odpadu spojeného se starým asfaltovým povrchem.
- Zlepšená udržitelnost: Díky opětovnému využití stávajících materiálů podporuje RAP udržitelnost při výstavbě silnic a je v souladu s ekologicky uvědomělými postupy.

Je třeba poznamenat, že konkrétní dopad na životní prostředí a udržitelnost projektů výstavby silnic závisí na různých faktorech, včetně procenta použitého RAP, celkového návrhu směsi a přepravních vzdáleností. Nicméně začlenění regenerovaného asfaltu je obecně považováno za pozitivní krok směrem k cirkulárním, udržitelnějším a nízkouhlíkovým postupům výstavby silnic.

4.7. Výkopová zemina

Výkopová zemina je materiál, který vzniká výkopem nebo odstraněním zeminy a jiných přírodních materiálů, a to i po přemístění.

Výkopová zemina musí být před tím, než je uznána za vhodnou pro jakýkoli účel, podrobena základní charakterizaci z hlediska nebezpečnosti. Musí se jednat o zeminu nekontaminovanou, tedy takovou zeminu, která má obsah škodlivin maximálně rovný hodnotám pozadí dané lokality. Zemina musí být vytěžena během stavební činnosti. V České republice jsou povinnosti při nakládání se zeminou definovány zákonem č. 541/2020 Sb. a podrobnosti dané vyhláškou č. 273/2021 Sb. Podrobnější informace o použití viz tabulka 2.

4.8. Další nízkouhlíkové stavební materiály

Dalšími široce používanými stavebními materiály s relativně nízkými emisemi uhlíku jsou **sklo**, **sádkartón** a různé druhy **izolačních materiálů**.

Hliněné stěny a **konopný beton** jsou nízkouhlíkové stavební materiály, které nejsou tak rozšířené jako tradiční stavební materiály. Stále více se však uznávají jejich výhody z hlediska udržitelnosti. S rostoucím povědomím o ekologických problémech a potřebě ekologičtějších stavebních postupů si tyto alternativní materiály získávají oblibu mezi architekty, staviteli a majiteli domů, kteří hledají „zelenější“ stavební řešení.

Hutněná zemina spočívá ve zhutňování přírodních surovin, jako je zemina, křída, vápno nebo štěrk, do pevných stěn. Tato stavební technika je známá svými tepelně izolačními vlastnostmi, které přispívají k energetické účinnosti budov.

Konopný beton je kompozitní materiál vyrobený z vnitřních dřevitých vláken konopí smíchaných s vápnem a vodou. Je ceněn pro svůj nízký dopad na životní prostředí, potenciál sekvestrace uhlíku a izolační schopnosti.

Další informace o postupech recyklace a opětovného použití různých stavebních materiálů s ohledem na jejich fázi po skončení životnosti jsou k dispozici v dokumentu „Bezpečné používání druhotných stavebních materiálů. Informační balíček pro výrobce“. V tomto dokumentu jsou uvedeny případové studie týkající se stavebních materiálů po demolici.

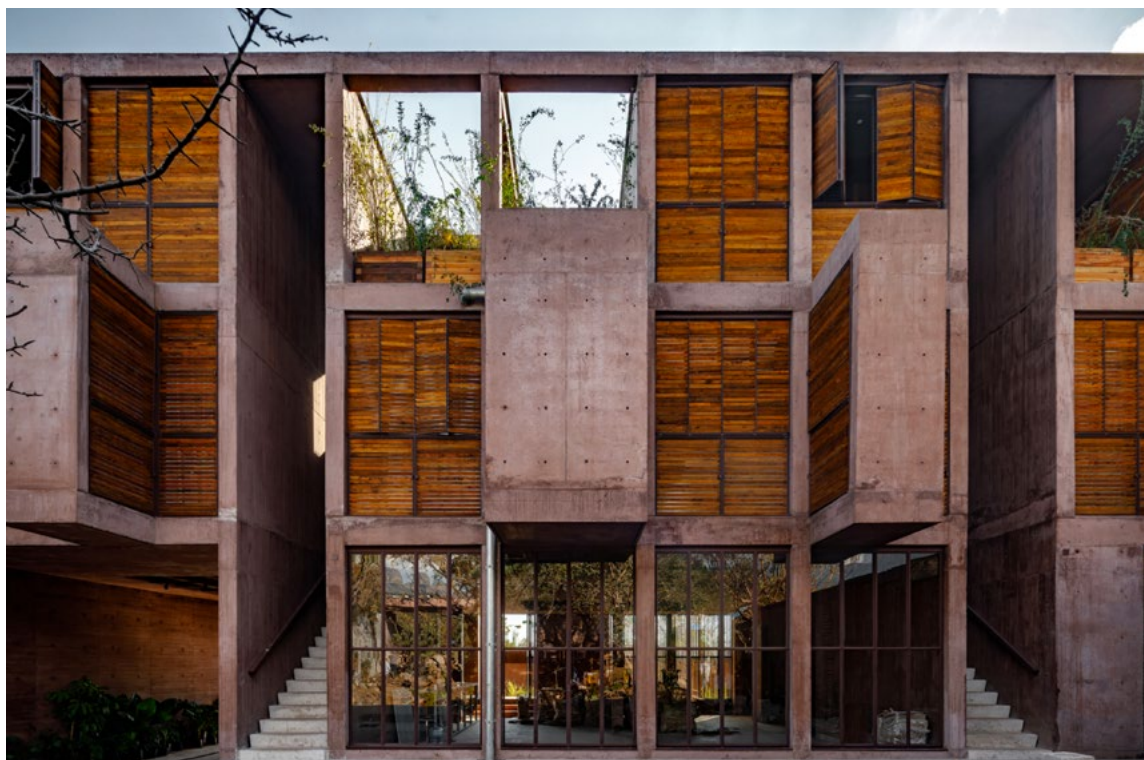
4.9. Případové studie: stavby založené na cirkulárních a nízkouhlíkových stavebních materiálech

Případové studie

Hotel Tepoztlán (Mexiko, 2020):

- stěny a dlažba: místní kámen,
- viditelný beton s přírodními pigmenty,
- dřevěné bednění použité ve stavebnictví bylo znovu použito na nábytek nebo podlahu.

Obrázek 2: Hotel Tepoztlán [zdroj: <https://architizer.com/projects/tepoztlan-hotel/>]



Případové studie

Rezidence Cheopsovy observatoře / Studio Malka Architecture, Nekropole v Gíze (Egypt, 2020):

- místní stavební techniky,
- použité recyklované materiály.

Obrázek 3: Sídlo Cheopsovy observatoře [zdroj: <https://www.designboom.com/architecture/studio-malka-cheops-observatory-pyramid-giza-03-05-2020/>]

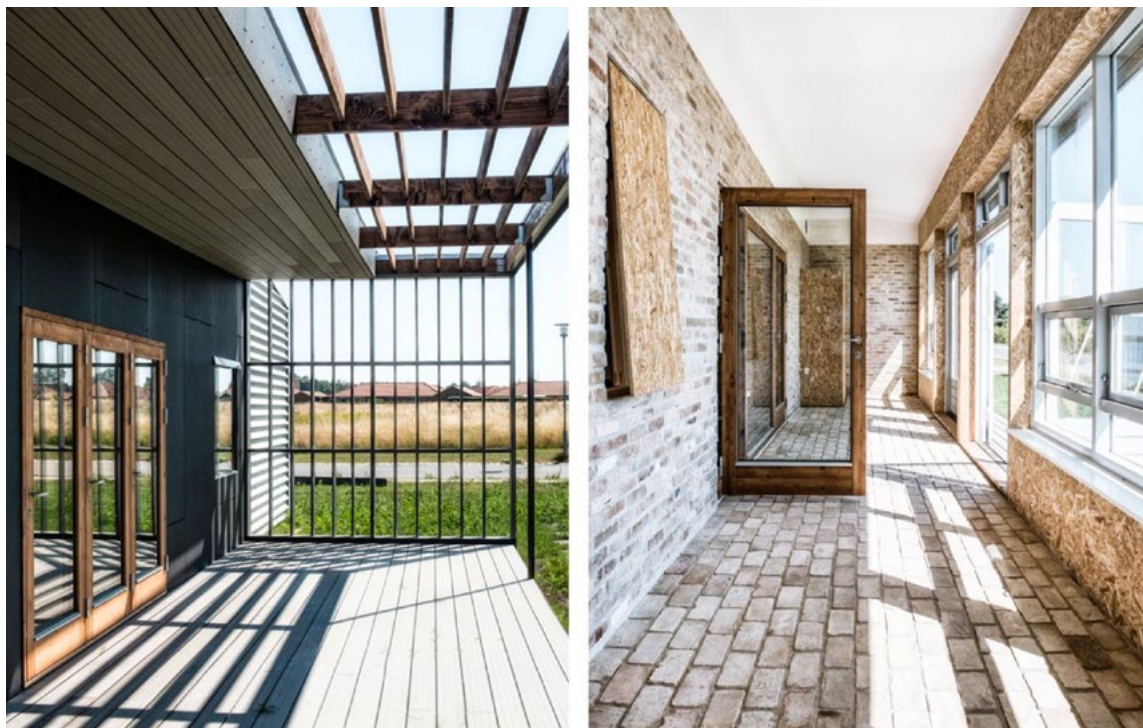


CIRKULÁRNÍ A NÍZKOUHLÍKOVÉ STAVEBNÍ MATERIÁLY

Upcycle House, Lendager Arkitekter, Nyborg (Dánsko, 2013):

- dům postavený s důrazem na recyklaci a zpracování materiálů,
- použité vyřazené materiály,
- materiály přeměněné na stavební materiály s vyšší hodnotou.

Obrázek 4: Upcycle House, Lendager Arkitekter, Nyborg [zdroj: <https://www.archdaily.com/458245/upcycle-house-lendager-arkitekter>]



5. Posouzení životního cyklu

Řešením environmentálních vlastností jednotlivých stavebních materiálů/komponent lze posoudit celkovou ekologickou stopu budovy. Dopady na životní prostředí jsou však spojeny s:

- Návrhem a konstrukcí budovy (použité materiály a prvky),
- Spotřebou energie a vody během provozní fáze budovy,
- Potenciály, které se projeví po ukončení užívání budovy (vhodnost materiálů a prvků pro opětovné použití atd.).

Posuzování životního cyklu (LCA) je metoda hodnocení environmentální výkonnosti (např. ekologické stopy) výrobku nebo procesu. Tuto metodu lze tedy použít k vyhodnocení potenciálu globálního oteplování (např. uhlíkové stopy) a souboru dalších environmentálních dopadů během celého životního cyklu budovy, infrastruktury nebo jednoduše určitého stavebního materiálu.

LCA musí být provedena podle zásad a rámce pro LCA, které jsou definovány v mezinárodní normě pro LCA ISO 14040:2006 a ISO 14044:2006, v příručce ILCD a v evropské normě pro environmentální prohlášení o produktu (EPD) EN 15804:2012+A2:2019, která stanoví základní pravidla pro kategorii produktu (PCR) pro environmentální prohlášení typu III pro jakýkoli stavební výrobek a stavební službu. Normalizační proces proběhl podle normy ISO 14025:2010. ***Další informace o cirkulárních standardizovaných (normativních) typech environmentálního značení a prohlášení (včetně EPD) naleznete v příručkách „Bezpečné používání důležitých stavebních materiálů. Informační balíček pro výrobce“ a „Cirkulární design budov: strategie a nástroje“.***

Studie LCA se skládá ze čtyř různých fází:

1. Fáze vymezení cíle a rozsahu, která stanoví kontext studie definováním funkční/deklarované jednotky, hranic systému a případných předpokladů a omezení studie.
2. Fáze inventarizační analýzy, která vytváří soupis vstupních a výstupních toků do a ze zkoumaného systému, jako jsou vstupy vody, energie a surovin a výstupy do ovzduší, půdy a vody.
3. Fáze hodnocení dopadů, jejímž cílem je vyhodnotit význam a velikost potenciálních dopadů na životní prostředí na základě výsledků inventarizační analýzy.
4. Fáze interpretace, ve které se shrnují a hodnotí zjištění z fáze inventarizační analýzy a/ nebo fáze posouzení dopadů ve vztahu k definovanému cíli a rozsahu studie..

Systémové hranice LCA výrobků se mohou lišit v závislosti na cíli a rozsahu studie. Systémové hranice se mohou lišit v závislosti na typu údajů: od kolébky k bráně (Cradle-to-gate) nebo od kolébky k hrobu (Cradle-to-grave).

Cradle-to-gate: označuje fázi výroby, která zahrnuje těžbu surovin, jejich dodávku do továrny (výrobního závodu) a následnou výrobu konečného výrobku.

Cradle-to-grave: Kromě fáze výroby jsou zahrnuty všechny další fáze životního cyklu: fáze instalace, fáze používání a fáze ukončení životnosti (vyřazení z provozu, odstranění, zpracování odpadu, likvidace odpadu).

Pro LCA používanou v ekodesignu může být relevantní zahrnout recyklační potenciál výrobků, čímž se rozšíří hranice systému (přístup „od kolébky ke kolébce“ Cradle-to-cradle).

Tabulka 3: Etapy celého životního cyklu s ohledem na modulární přístup

HRANICE SYSTÉMU																
Fáze produktu			Fáze stavebního procesu		Použijte fázi							Fáze na konci životnosti			Výhody a zatížení za hranicemi systému	
Zásobování surovinami	Doprava	Výroba	Doprava	Proces instalace	Použití	Údržba	Oprava	Náhrada	Renovace	Provozní spotřeba energie	Provozní spotřeba vody	Demolice	Doprava	Zpracování odpadu	Likvidace	Potenciál opětovného použití, obnovy a recyklace
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Hranice systému se řídí modulární strukturou podle normy EN 15804 (tabulka 3). Popis fází životního cyklu a modulů je následující:

- Stupeň produktu:** **A1:** těžba a zpracování surovin, zpracování druhotných vstupních materiálů (např. recyklační procesy);
A2: přeprava k výrobci;
A3: výroba;
 včetně zajištění veškerých materiálů, výrobků a energie, jakož i zpracování odpadu až do stavu „konec odpadu“ nebo likvidace konečných zbytků ve fázi výroby.
- Fáze stavebního procesu:** **A4:** doprava na staveniště;
A5: instalace v budově;
 včetně zajištění všech materiálů, výrobků a energie, jakož i zpracování odpadu až do stavu „konec odpadu“ nebo likvidace konečných zbytků ve fázi stavebního procesu. Tyto informační moduly zahrnují také všechny dopady a aspekty související s případnými ztrátami během této fáze stavebního procesu (tj. výroba, doprava a zpracování odpadu a likvidace ztracených materiálů).
- Fáze použití:** **B1:** použití nebo aplikace instalovaného výrobku;
B2: údržba;
B3: oprava;
B4: výměna;
B5: renovace;
B6: provozní spotřeba energie (např. provoz topného systému a dalších instalovaných služeb souvisejících s budovou);
B7: provozní využití vody
 včetně zajištění veškerých materiálů, výrobků a energie, jakož i zpracování odpadů až do stavu, kdy odpad přestane být odpadem, nebo likvidace konečných zbytků ve fázi stavebního procesu. Tyto informační moduly zahrnují také všechny dopady a aspekty související s případnými ztrátami během tohoto stavebního procesu (tj. výroba, doprava a zpracování odpadu a likvidace ztracených výrobků a materiálů).
- Fáze na konci životnosti:** **C1:** demontáž, demolice;
C2: přeprava ke zpracování odpadu;
C3: zpracování odpadu za účelem opětovného použití, využití a/nebo recyklace;
C4: likvidace;
 včetně zajištění a veškeré dopravy, zajištění všech materiálů, výrobků a související spotřeby energie a vody.
- Výhody a zatížení za hranicemi systému:** **D:** potenciály opětovného použití, využití a/nebo recyklace vyjádřené jako čisté dopady a přínosy.

Jak se vypořádat s cirkulací v LCA? Opětovné použití a často i recyklace přináší environmentální výhody ve srovnání s výrobou nových materiálů. Opětovné použití může zabránit dopadům spojeným s těžbou surovin i výrobou výrobků. Zatímco recyklace je většinou spojena se zamezením těžby primárních surovin. Přínosy pro životní prostředí přisuzované opětovnému použití tak mohou být významnější než přínosy přisuzované recyklaci.

Existují různé metodické přístupy, jak se zabývat přínosy opětovně použitých stavebních materiálů/komponent v rámci LCA. V rámci komunity LCA však nebylo v této otázce dosaženo shody. V případě navrhování pro demontáž lze věnovat pozornost skutečnosti, že každý konstrukční nebo technický systém v budově má svou vlastní životnost. Přístup spočívá v zaměření se na jedinečnou životnost každé součásti. V takovém případě lze celou LCA budovy sestavit pomocí funkční jednotky, v níž se emise životního cyklu každé komponenty vydělí její historickou a očekávanou životností v letech. Možností pro hodnocení environmentálních dopadů souvisejících s opětovným použitím by mohlo být použití zbývající doby provozu jako kompenzačního prvku v LCA budovy.

5.1. Příklady případových studií pro environmentální hodnocení stavebních výrobků

5.1.1. Betony z druhotných surovin

V této případové studii je LCA použita jako nástroj pro porovnání výroby tradičního betonu s výrobou betonu s využitím druhotných surovin:

- Tradiční beton
- Beton s použitím popílku (jako částečná náhrada cementu)
- Beton s použitím slévárenského písku (jako částečná náhrada přírodního kameniva a cementu)
- Beton s použitím ocelové strusky (jako částečná náhrada přírodního kameniva)
- Beton s použitím recyklovaného kameniva (jako částečná náhrada přírodního kameniva)

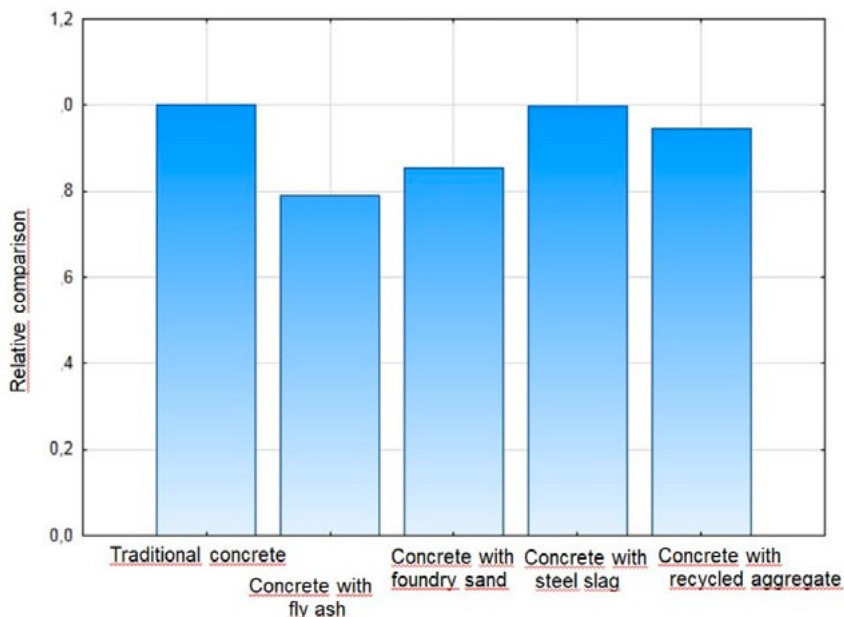
Vzhledem k porovnávání je důležité, aby všechny betony měly podobnou pevnost v tlaku a trvanlivost.

Výsledky LCA jsou následující (viz také obrázek 5):

- Beton s použitím popílku:
snížení uhlíkové stopy o 21% ve srovnání s tradičním betonem.
- Beton s použitím slévárenského písku:
snížení uhlíkové stopy o 18% ve srovnání s tradičním betonem.
- Beton s použitím ocelové strusky:
žádné snížení uhlíkové stopy ve srovnání s tradičním betonem.
- Beton s použitím recyklovaného kameniva:
snížení uhlíkové stopy o 7% ve srovnání s tradičním betonem

Podrobnější informace o této případové studii jsou k dispozici v článku Mladenovič et al. (2015).

Obrázek 5: Potenciál globálního oteplování (uhlíková stopa) 1 m³ betonu.



5.1.2. Asfaltová obrusná vrstva

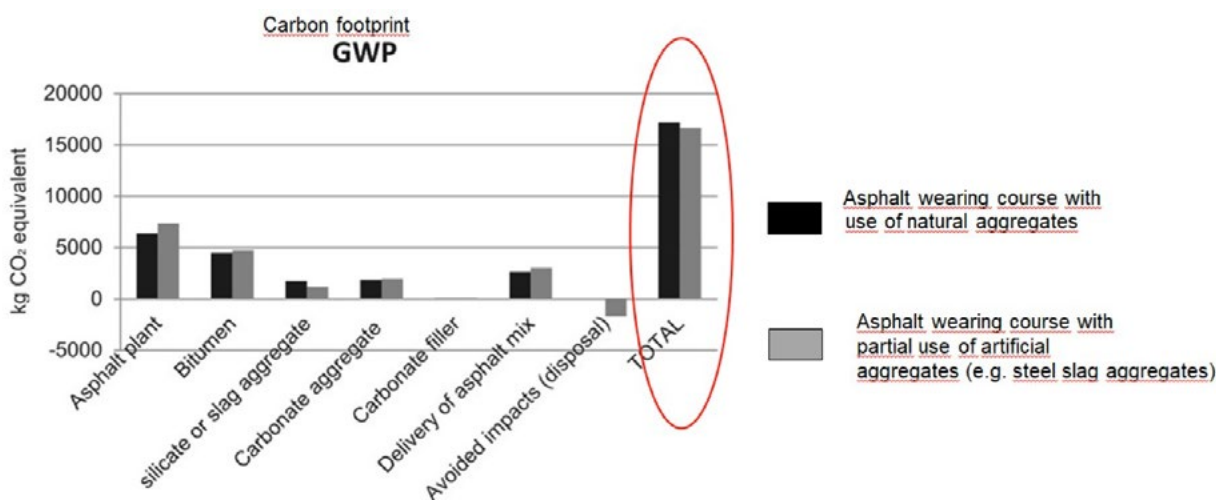
V této případové studii je LCA použita jako nástroj pro porovnání dvou scénářů v případě výstavby asfaltové obrusné vrstvy:

1. Výroba asfaltové obrusné vrstvy s použitím běžného stavebního kameniva (karbonátové a křemičité kamenivo).
2. Výroba asfaltové obrusné vrstvy s použitím kameniva ze stusky EAF C místo křemičitého kameniva.

Výsledky LCA ukazují, že využití ocelového kameniva z EAF C v asfaltové obrusné vrstvě vede ke snížení uhlíkové stopy asfaltové obrusné vrstvy přibližně o 5% (obr. 6).

Podrobnější informace o této případové studii jsou k dispozici v článku Turk et al. (2015).

Obrázek 6: Potenciál globálního oteplování (uhlíková stopa) 1 m³ tradičních a alternativních asfaltových směsí určených pro obrusnou vrstvu vozovky.



5.1.3. Případová studie oceli

Varesa et al (2019) provedli studii, ve které porovnávali dopady na životní prostředí v rámci životního cyklu průmyslové budovy. S ohledem na demolici budovy a výstavbu nové průmyslové budovy porovnávali dopady na životní prostředí související s opětovným použitím ocelových komponentů z demolované budovy v nové budově oproti nové výstavbě s použitím nových ocelových konstrukcí.

S ohledem na výsledky LCA činí emise skleníkových plynů v základním scénáři 686 kg CO₂ ekv./m², zatímco emise v alternativním scénáři činí 605 kg CO₂ ekv./m² (v případě opětovného použití ocelových součástí). Snížení potenciálu globálního oteplování (nebo uhlíkové stopy) za dobu životnosti budovy je tedy 12%, pokud se vezme v úvahu opětovné použití ocelových komponent.

6. Shrnutí a závěry

Odvětví stavebnictví se podílí na celosvětových emisích skleníkových plynů přibližně jednou třetinou. Vzhledem k tomu, že nové stavby se vyznačují sníženou provozní spotřebou energie, je třeba věnovat stále větší pozornost zabudovaným složkám, jako je zabudovaná energie a potenciál globálního oteplování (GWP) způsobený stavebními materiály. Stavebnictví by se mělo zaměřit na řešení environmentálních dopadů materiálů, které vznikají při jejich výrobních procesech (včetně těžby, spotřeby energie a spotřeby vody), a také na nakládání s materiály po skončení jejich životnosti (zahrnující nakládání s odpady, jejich opětovné využití, recyklaci atd.)

V této příručce jsou shromážděny vybrané přístupy a doporučení ke snížení ekologické stopy (zejména uhlíkové stopy) stavebních materiálů. Tyto přístupy se do značné míry opírají o integraci materiálů na biologické bázi, materiálů s recyklovaným obsahem, prospěšné využití odpadních (druhotných) materiálů a o principy oběhového hospodářství; např. udržování hmoty, z níž se materiály skládají, déle v užívání jako výrobků a maximální regenerace hmoty do vysoce hodnotných výrobků na konci životnosti výrobků.

V těchto příručkách je uveden vybraný seznam možných materiálů pro cirkulární a nízkouhlíkové stavby. Každý stavební materiál ze seznamu je popsán s ohledem na jeho použití, cirkularitu (zpracování po skončení životnosti) a environmentální udržitelnost. Seznam je však pouze příkladem, nikoli úplným a pevným výčtem stavebních materiálů. Poskytuje tipy pro tvůrce politik a další zúčastněné strany, jak učinit stavební (konstrukční) odvětví ekologicky udržitelnějším a více v souladu se zásadami oběhového hospodářství. Rozhodnutí o tom, které stavební materiály použít v určitých stavebních projektech, však závisí na konkrétních případech a jako takové je nelze zobecnit.

Stručně je představena metoda posuzování životního cyklu, která se jeví jako nejslibnější nástroj pro hodnocení uhlíkové stopy a celkového dopadu materiálů (stavebních materiálů) a staveb (budov) na životní prostředí. Tři praktické příklady mohou zúčastněným stranám pomoci pochopit použití této metody. Tyto příklady zahrnují srovnávání výroby různých stavebních materiálů (tradičních oproti materiálům s recyklovaným obsahem) a srovnávání lineárních technik zpracování po skončení životnosti s cirkulárními technikami zpracování po skončení životnosti.

7. Bibliografie

Ahn, N., Dodoo, A., Riggio, M., Muszynski, L., Schimleck, L., Puettmann, M., 2022: Circular economy in mass timber construction: Dřevěné dřevěné konstrukce: současný stav, nedostatky a naléhavé potřeby výzkumu. *Journal of Building Engineering* 53, 104562.

Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., El-Zeadani, M., 2020. Čistá výroba a vlastnosti geopolymerního betonu; přehled. *J. Clean. Prod.* 251, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>

Andabaka, A., 2023: A.: Zásady cirkulárního stavitelství: A.: Okružní stavebnictví: od teoretické perspektivy k praktické aplikaci ve veřejných zakázkách.

Asdrubali F., Baggio, P., Prada, A., Grazieschi, G., 2019: Dynamic life cycle assessment modeling of a NZEB building. *Energy* 191, 116489. DOI:10.1016/j.energy.2019.116489

Asdrubali, F., Grazieschi, G., 2020: Posuzování životního cyklu energeticky účinných budov. *Energy Reports* 6, 270-285. DOI:10.1016/j.egyr.2020.11.144

Blengini, G.A., Garbarino, E., 2010. Nakládání se zdroji a odpady v Turíně (Itálie): úloha recyklovaného kameniva v udržitelném mixu dodávek. *J. Cleaner Prod.* 18, 1021–1030. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.027>.

Bostanci S.C., Limbachiya, M., Kew, H., 2018: , K.: Use of Recycled Aggregates for Low Carbon and Cost Effective Concrete Construction (Využití recyklovaného kameniva pro nízkouhlíkové a nákladově efektivní betonové konstrukce). *Journal of Cleaner Production* 189, DOI:10.1016/j.jclepro.2018.04.090.

Calkins, M., 2009: *Calkins: Materials for Sustainable Sites*: John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA: A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials.

Carpenter, A.C., Gardner, K.H., 2009. Využití vedlejších průmyslových produktů v infrastruktuře městských komunikací. *Argument pro zvýšení průmyslové ekologie. J. Ind. Ecol.* 13 (6), 965-977. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00175.x>.

Chappat, M., Bilal, J., 2003. *Ekologická cesta budoucnosti: Vydavatelství a nakladatelství, s. r. o., Praha, s. l. Colas group.* <http://www.colas.com/FRONT/COLAS/upload/com/pdf/route-future-english.pdf>

Chevovits, J., Galehouse, L., 2010. Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements (Spotřeba energie a emise skleníkových plynů při procesech konzervace asfaltobetonových vozovek). *First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach CA, USA, 13. až 15. dubna 2010.* https://www.pavementpreservation.org/icpp/paper/65_2010.pdf

Cheung, 2003. Využití recyklovaných asfaltových vozovek - praktický přístup k recyklaci asfaltu.

cityloops.eu, 2023: Příručka pro místní a regionální samosprávy https://cityloops.eu/fileadmin/user_upload/Resources/City-Loops-Circular-Construction-handbook.pdf

Cross, S.A., Chesner, W.H., 2011. Environmentální analýza životního cyklu pro hodnocení možností obnovy vozovek. 90. výroční zasedání Rady pro dopravní výzkum, 23.-27. ledna 2001, Washington, D.C.

D'Amico, B., Pomponi, F., Hartet, J., 2021: Globální potenciál pro substituci materiálů ve stavebnictví: Příklad křížem lepeného dřeva. *Journal of Cleaner Production* 279, 123487.

D'Amico, B., Pomponi, F., Hart, J., 2021: Globální potenciál pro substituci materiálů ve stavebnictví: případ křížem lepeného dřeva. *Journal of Cleaner Production*, 279, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123487>

De Schepper, M., Van den Heede, P., Van Driessche, I., De Belie, N., 2014. Posouzení životního cyklu zcela recyklovatelného betonu. *Materials* 7, 6010-6027. <http://dx.doi.org/10.3390/ma7086010>.

de Graaf, D., Schuitemaker, S., 2022: Cirkulární budovy: konstrukce udržitelné budoucnosti *Materiály v budovách*

Dumée, L.F. Cirkulární materiály a cirkulární design - přehled výzev na cestě k udržitelné výrobě a recyklaci. *Circ.Econ.Sust.* 2, 9-23 (2022). <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00085-2>

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S.J., 2007. Geopolymerní technologie: současný stav techniky. *J. Mater. Sci.* 42, 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

Nadace Ellen MacArthurové, 2013: SUN a McKinsey Center for Business and Environment; čerpáno z Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C).

Faleschini, F., De Marzi, P., Pellegrino, D., 2014. Recyklovaný beton s obsahem strusky EAF: environmentální hodnocení pomocí LCA. *Euro. J. Environ. Civil Eng.* 18 (9),1009-1024. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.922505>.

Ferrer Polancos, C.J., 2009: Kritéria pro posuzování ekologického bydlení - verze II: PŘÍLOHA 4 EKOLOGICKY ŠETRNÉ STAVEBNÍ MATERIÁLY A TECHNOLOGIE. *Ekologické bydlení - budování lepšího zítřka*. Dostupné na https://www.academia.edu/10992817/ANNEXURE_4_ECO_FRIENDLY_BUILDING_MATERIALS_AND_TECHNOLOGIES_Eco_housing_Assessment_Criteria_Version_II

Flower, D.J.M., Sanjayan, J.G., 2007. Emise skleníkových plynů z výroby betonu. *Int. J. Life Cycle Assess.* 12 (5), 282-288.

Fort, J., Černý, R., 2020: Přejít na oběhové hospodářství ve stavebnictví: Ekologické aspekty scénářů recyklace odpadních cihel. *Odpadové hospodářství* 118 (2020) 510-520

Giustozzi, F., Toraldo, E., Crispino, M., 2012. Recyklovaná letištní dlažba pro dosažení environmentální udržitelnosti, italská případová studie. *Resources, Conservation and Recycling* 68, 67-75. doi:10.1016/j.resconrec.2012.08.013.

Grazieschi, G., 2022: Cirkulární a nízkouhlíkové stavební materiály ve stavebnictví (přehledový článek). <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-circularity-and-low-carbon-building-materials>. Přístup 6. října 2023.

Gruhle, K., Schiller, G., 2023: Šedý energetický dopad recyklace stavebních materiálů - nová metoda hodnocení založená na procesních řetězcích. *Resources, Conservation & Recycling Advances* 18, 200139.

Heijungs, R., Guinée, J.B., 2007. Alokace a scénáře „co kdyby“ při posuzování životního cyklu systémů nakládání s odpady. *Waste Manage.* 27, 997-1005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.013>.

- Hu, M., Kleijn, R., Bozhilova-Kisheva, K.P., Di Maio, F., 2013. Přístup k LCSA: případ recyklace betonu. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1793-1803. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0599-8>.
- Huang, Y., Bird, R.N., Heidrich, O., 2007. A review of the use of recycled solid waste materials in asfaltové povrchy. *Resour., Conserv. Recycl.* 52, 58-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.
- Joensuu, T., Leino, R., Heinonen, J., Saari, a., 2022: Developing building s Life Cycle Assessment in Circular Economy-Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components. *Sustainable Cities and Society* 77, 103499.
- Knoeri, C., Sanye-Mengual, E., Althaus, H.J., 2013. Srovnání LCA recyklovaného a konvenčního betonu pro konstrukční aplikace. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 909-918. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>.
- Llana, D.F., Gonzalez-Alegre, V., Portela, M., Iniguez-Gonzalez, G., 2022: Cross Laminated Timber (CLT) manufactured with European oak recovered from demolition: V tomto případě se jedná o konstrukční vlastnosti a nedestruktivní hodnocení. *Construction and Building Materials* 339 (2022) 127635
- Magwood, C., 2019: Možnosti odstraňování a ukládání oxidu uhličitého ve stavebních materiálech. *Doktorská práce, magisterský program Sustainability Studies, Trent university, Peterborough, Ontario, Kanada.*
- Marceau, M.L., Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., 2007. Inventarizace životního cyklu portlandského betonu. *PCA R&D Serial No. 3007, Portland Cement Association 2007.*
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I., 2010. Srovnávací environmentální hodnocení betonu z přírodního a recyklovaného kameniva. *Waste Manage.* 30, 2255–2264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- Mladenovič, A., Turk, J., Kovač, J., Mauko, A., Cotič, Z., 2014. Environmentální hodnocení dvou scénářů pro výběr materiálů pro asfaltové obrusné vrstvy. *J. Cleaner Prod.* 87, 683–691. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.013>.
- Mroueh, U.M., Wahlström, M., 2002. Vedlejší produkty a recyklované materiály v zemních stavbách ve Finsku - posouzení použitelnosti. *Resour., Conserv. Recycl.* 35, 117-129.
- Nußholz, J.L.K., Rasmussen, F.N., Whalena, K., Plepysa, A., 2019: A circular business model for material reuse in buildings: implications on value creation. *Journal of Cleaner Production* 245.
- O'Brien, K.R., Ménaché, J., O'Moore, L.M., 2009. Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water consumption in concrete (Vliv obsahu popílku a přepravní vzdálenosti popílku na emise skleníkových plynů a spotřebu vody v betonu). *Int. J. Life Cycle Assess.* 14, 621-629. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-009-0105-5>.
- Orsini a Marrone, 2019: Přístupy k nízkouhlíkové výrobě stavebních materiálů: Přehled. *Journal of Cleaner Production* 241 (2019) 118380.
- Ortiz, O., Pasqualino, J.C., Castells, F., 2010. Environmentální výkonnost stavebního odpadu: srovnání tří scénářů z případové studie v Katalánsku, Španělsko. *Waste Manage.* 30, 646-654. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.013>.

Pastori, S., Mazzucchelli, E., Wallhagen, M., 2022: Hybridní konstrukce na bázi dřeva: V tomto případě se jedná o přehled současného stavu techniky. *Stavebnictví a stavební materiály*. 359. 129505. [10.1016/j.conbuildmat.2022.129505](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129505).

Pavlů, T., Pešta, J., Volf, M., Lupišek, A., 2018: Katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin. <http://www.recyklujmestavby.cz/wp-content/uploads/2019/10/Recyklujme-stavby-katalog-3.08.pdf>

Potrč Obrecht, T., Kunič, R., Jordan, S., Legat, A., 2019. Role referenční životnosti (RSL) budov a RSL stavebních prvků v dopadech budov na životní prostředí. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 323 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012146>.

Ramos Huarachia, D.A., Gonçalves, G., de Francisco, A.C., Giovanetti Canteria, M.H., Piekarskiaet C.M., 2020: Posouzení životního cyklu tradičních a alternativních cihel: A review. *Environmental Impact Assessment Review* 80 (2020) 106335

Robertson, A.B., Lam, F.C.F., Cole, R.J., 2012: A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminátové dřevo nebo železobeton. *Buildings* 2(4), 245-70.

Rosado, L., Kalmykova, Y., Patrício, Y., 2017: Vydáno v roce 2017: Reprint of: Metabolismus ve městech: profily městského metabolismu. Empirická analýza charakteristik materiálových toků tří metropolitních oblastí ve Švédsku. *Journal of Cleaner Production* 163, 254-266.

Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K., 2015. Geopolymerní beton: A review of some recent developments. *Constr. Build. Mater.* 85, 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>

Stahel, W.R., MacArthur, E., 2019: Oběhové hospodářství: E.: Obilná cirkulace: uživatelská příručka. DOI:10.4324/9780429259203

Tee, K.F., Mostofizadeh, S., 2021. A Mini Review on Properties of Portland Cement Concrete with Geopolymer Materials as Partial or Entire Replacement [Mini přehled vlastností portlandského betonu s geopolymerními materiály jako částečnou nebo úplnou náhradou]. *Infrastructures* 6, 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6020026>

Thenoux, G., Gonzalez, A., Dowling, R., 2007. Porovnání spotřeby energie pro různé techniky sanace asfaltových vozovek používané v Chile. *Resour. Conserv. Recycl.* 49, 325e339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.005>.

Tonini, D., Caro, D., Cristobal, J., Foster, G., Pristera, G., 2023: Technicko-ekonomické a environmentální hodnocení nakládání se stavebním a demoličním odpadem. S cílem podpořit posouzení proveditelnosti přípravy na opětovné použití a recyklační cíle pro jednotlivé materiálové frakce. *Zpráva JRC Science for policy*.

Van den Heede, P., De Belie, N., 2012. Dopad na životní prostředí a hodnocení životního cyklu (LCA) tradičních a „zelených“ betonů: přehled literatury a teoretické výpočty. *Cem. Concr. Compos.* 34, 431-442. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>.

Van Wyk, J., Mapiravana, J., Ampofo-Anti, N.L., 2012: Sustainable Materials in Building and Architecture. In: *Sborník příspěvků k tématu architektury a stavebnictví*: Letcher, T.M., Scott, J.L. (eds.), *Materials for a Sustainable Future* (Chapter 25). doi: <https://doi.org/10.1039/BK9781849734073-00668>

Varesa, S., Hradila, P., Sansomb, M., Ungureanuc, V., 2019: Economic potential and environmental impacts of reused steel structures, Structure and Infrastructure Engineering, DOI: 10.1080/15732479.2019.1662064.

Vilches, A., Garcia-martinez, A., Sanchez-Monta, B., 2017: Posouzení životního cyklu (LCA) renovace budov. Lit. Rev. 135, 286-301. <https://doi.org/10.1016/j>.

Weil, M., Jeske, U., Schebek, L., 2006. Uzavřený cyklus recyklace stavebních a demoličních odpadů v Německu s ohledem na přísnější prahové hodnoty pro ochranu životního prostředí. Waste Manage. Res. 24, 197-206. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X06063686>.

Světová rada pro šetrné budovy, 2022: Výroční zpráva. https://worldgbc.org/wp-content/uploads/2022/12/WorldGBC-Annual-Report-2022_FINAL-version_LR.pdf

Světová ocelářská asociace. (2023) Zpráva o indikátorech udržitelnosti 2023, <https://world-steel.org/wp-content/uploads/Sustainability-indicators-report-2023.pdf>

Wouterszoon Jansen, B., van Stijn, A., Malabi Eberhardt, L.C., van Bortela, G., Gruis, V., 2022: Technická nebo biologická smyčka? Ekonomická a environmentální výkonnost cirkulárních stavebních prvků.

Zhang, J., Cheng, J.C.P., Lo, I.M.C., 2014. Měření uhlíkové stopy životního cyklu portlandského cementu a transportbetonu pro město s místním nedostatkem zdrojů, jako je Hongkong. Int. J. Life Cycle Assess. 19, 745-757. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0689-7>.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Motýlí diagram oběhového hospodářství. Zdroj: Ellen MacArthur Foundation (2013)

Obrázek 2: Hotel Tepoztlán [zdroj: <https://architizer.com/projects/tepoztlan-hotel/>]

Obrázek 3: Sídlo Cheopsovy observatoře [zdroj: <https://www.designboom.com/architecture/studio-malka-cheops-observatory-pyramid-giza-03-05-2020/>]

Obrázek 4: Upcycle House, Lendager Arkitekter, Nyborg [zdroj: <https://www.archdaily.com/458245/upcycle-house-lendager-arkitekter>].

Obrázek 5: Potenciál globálního oteplování (uhlíková stopa) 1 m³ betonu.

Obrázek 6: Potenciál globálního oteplování (uhlíková stopa) 1 m³ tradičních a alternativních asfaltových směsí určených pro obrusnou vrstvu vozovky.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Zabudovaný uhlík různých stavebních materiálů (Zdroj: Calkins, 2009).

Tabulka 2: Seznam stavebních materiálů, které jsou považovány za cirkulární a mají relativně nízkou uhlíkovou stopu

Tabulka 3: Etapy celého životního cyklu s ohledem na modulární přístup

CirCon4Climate



Členové konsorcia:



Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

<https://www.euki.de/en/>

Za názory uvedené v této publikaci nese výhradní odpovědnost autor (autoři) a nemusí nutně odrážet názory Spolkového ministerstva pro hospodářství a ochranu klimatu (BMWK).

