

KROŽNI IN NIZKO- OGLJIČNI GRADBENI PROIZVODI

Avtorji:

Janez Turk,

Tajda Potrč Obrecht,

Katja Malovrh Rebec,

Patricija Ostruh



December 2023

CirCon4Climate

Ta publikacija je nastala v okviru dejavnosti projekta CirCon4Climate. Projekt je del Evropske pobude za podnebje (EUKI- European Climate Initiative) nemškega Zveznega ministrstva za gospodarstvo in podnebne ukrepe (BMWK- Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz).

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



European
Climate Initiative
EUKI

on the basis of a decision
by the German Bundestag

Naslov	[Krožni in nizko-ogljčni gradbeni proizvodi]
Verzija	1.1
Datum	11 12 2023
Avtorji	Janez Turk, Tajda Potrč Obrecht, Katja Malovrh Rebec, Patricija Ostruh
Kontaktna oseba	Janez Turk janez.turk@zag.si
Inštitucija	Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG) Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana, Slovenija https://www.zag.si/

Kazalo

1.	Uvod v krožne in nizko-ogljične gradbene proizvode	4
1.1.	Namen smernice	6
2.	Krožni materiali	7
2.1.	Različni pristopi recikliranja	9
3.	Nizko-ogljični materiali	10
3.1.	Možni načini proizvodnje nizko-ogljičnih gradbenih proizvodov/materialov	11
3.1.1.	Uporaba alternativnih materialov	11
3.1.2.	Uporaba sekundarnih materialov	12
3.1.3.	Uporaba naravnih (bio-osnovanih) materialov	13
3.1.4.	Uporaba lokalnih materialov	14
3.1.5.	Povečanje učinkovitosti	14
3.1.6.	Uporaba obnovljivih virov energije	14
3.1.7.	Ostali načini	15
4.	Poljubni seznam krožnih in nizko-ogljičnih gradbenih proizvodov/materialov	16
4.1.	Inženirski lesni izdelki	19
4.2.	Beton	19
4.3.	Opeka	21
4.4.	Jeklo	22
4.5.	Geopolimeri	22
4.6.	Asfaltni rezkanec	22
4.7.	Izkopana zemljina	23
4.8.	Ostali nizko-ogljični materiali	24
4.9.	Izbrani primeri: Stavbe zgrajene z uporabo krožnih in nizko-ogljičnih gradbenih materialov	24
5.	Analiza življenjskega cikla	26
5.1.	Primeri vrednotenja okoljskih odtisov gradbenih proizvodov	28
5.1.1.	Betoni z uporabo sekundarnih materialov	28
5.1.2.	Obrabna asfaltna plast	29
5.1.3.	Primer jeklene komponente	30
6.	Povzetek in sklep	31
7.	Seznam literature	32
	Seznam slik	36
	Seznam tabel	36

1. Uvod v krožne in nizko-ogljicne gradbene proizvode

Okoljsko ozaveščanje na področju gradbeništva je spodbudilo zanimanje za bio-osnovane proizvode, proizvode z vsebnostjo reciklatov in koristno uporabo odpadnih materialov. Z okoljskega vidika so okoljsko trajnostni proizvodi tisti, ki imajo minimalno vgrajeno energijo. Vgrajena energija v gradbenih proizvodih se nanaša na celotno energijo, porabljeno v življenjskem ciklu proizvoda. To vključuje energijo, potrebno za pridobivanje surovin, proizvodnjo izdelka, njegov prevoz, gradnjo, vzdrževanje, demontažo in odlaganje ali recikliranje ob koncu življenjske dobe. Za doseganje napredka pri proizvodnji okoljsko trajnostnih proizvodov (npr. nizko-ogljicni gradbeni proizvodi), mora industrija dati prednost optimizaciji obstoječih tehnologij. Poleg tega je treba razvijati nove tehnologije, optimizirati konvencionalne metode, vključiti nišne tehnologije v splošne prakse, pospešiti uvedbo hibridnih tehnologij, raziskati uporabo biotehnologije in se poglobiti v uporabnost nanotehnoloških rešitev.

V kratkoročnem in srednjeročnem obdobju je znatno zmanjšanje, oziroma koreniti odmik od uporabe konvencionalnih materialov malo verjeten. Novi trendi se lahko kažejo pri izolacijskih materialih, odmiku od keramičnih izdelkov, zmanjšani uporabi cinka in bakra v ceveh (nadomeščanje s PVC in drugimi vrstami plastike), nagibanju k uporabi biokompozitnih materialov ter povečani uporabi recikliranih materialov, predvsem v betonu (nadomeščanje naravnega agregata z recikliranim), ter z nadomeščanjem jekla in aluminija.

V gradbeni industriji, še zlasti to velja za proizvajalce gradbenih proizvodov, je nujno potrebno prepoznavanje in upoštevanje okoljskih omejitev, povezanih z obstoječo in prihodnjo proizvodnjo ter potrošnjo surovin. Enako pomembno je prepoznavanje tehnoloških priložnosti za reševanje okoljskih izzivov. Osredotočiti se je potrebno na okoljske odtise proizvodov (pomemben, vendar ne edini okoljski odtis je ogljični odtis, strokovno imenovan potencial globalnega segrevanja), ki izhajajo iz proizvodnih procesov (pridobivanje surovin, poraba energije in vode) ter na ravnanje z odpadki (povečati delež ponovne uporabe in recikliranja) na koncu življenjskega cikla proizvodov. V določenih primerih lahko faza uporabe prevladuje nad drugimi okoljskimi vplivi v življenjskem ciklu, npr. zaradi stalne porabe energije in/ali materialov v fazi rabe, tipičen primer je življenjski cikel stavbe (faza rabe vključuje predvsem obratovanje, vzdrževanje, popravila itd.).

Osnovni pristop k reševanju tega problema je temeljil na uporabi energetske učinkovite strategije, ki so se izkazale za učinkovite, zlasti pri starejših stavbah, ki niso bile zgrajene po energetskih predpisih in stavbah z nizko kakovostjo gradnje. V današnjem času ambiciozne prenove stremijo k doseganju cilja skoraj ničelne porabe energije v stavbah, kar je postalo merilo za nove gradnje v Evropi. Pri tem je treba poudariti, da zmanjševanje porabe energije v fazi rabe stavbe vpliva na premik okoljskih odtisov iz operativne faze (raba) v konstrukcijsko fazo (izgradnja); to pomeni, da večino okoljskih vplivov v življenjski fazi stavbe prevzamejo gradbeni materiali, mišljena je njihova vgrajena energija in posredno emisije toplogrednih plinov vgrajene v te materiale.

Vključevanje načel krožnega gospodarstva lahko bistveno primore k zmanjšanju t.i. vgrajenih emisij, povezanih z gradbenimi materiali. To potrjujejo številni projekti financirani s strani EU, v katerih si prizadevajo doseči 50-odstotno zmanjšanje omenjenih emisij. To je še

posebej pomembno zaradi velikega okoljskega odtisa gradbenega sektorja, ki je v evropskem prostoru odgovoren za več kot 40% porabe primarne energije in za 36% ogljičnega celotnega odtisa. Primer vgrajenega ogljika, vsebovanega v različnih gradbenih materialih, je prikazan v Tabeli 1.

Evropska unija je za spodbujanje zmanjšanja ogljičnega odtisa stavb izdala različne smernice, vključno z direktivo o energetske učinkovitosti stavb (Energy Performance of Buildings - EPBD), Direktivo o energetske učinkovitosti (the Energy Efficiency Directive - EED), Direktivo o ravnanju z odpadki (the Waste Management Directive), direktivo o zelenem javnem naročanju (the Green Product Procurement Directive - GPP), Direktivo o ekodizajniranju (Ecodesign Directive), kazalnike trajnostne gradnje (Levels framework), Direktivo o taksonomiji (the Taxonomy Directive) itd.

V okviru krožnih in nizko-ogljčnih gradbenih proizvodov je pomembno poudariti vlogo krožnega javnega naročanja. Slednje služi kot politični instrument za doseganje okoljskih ciljev. Cilj tega instrumenta je uporabiti povpraševanje kot vzvoda za lajšanje in pospeševanje prehoda iz linearnega v krožno gospodarstvo. Zlasti v gradbenem sektorju je trg tisti, ki ustvarja povpraševanje po reciklatih in inovativnih krožnih ter nizko-ogljčnih proizvodih. Krožno javno naročanje ima zato ključno vlogo pri spodbujanju okoljsko trajnostnega gradbenega sektorja. ***Več podrobnosti o krožnem javnem naročanju najdete v povezanem dokumentu »Smernice za krožno javno naročanje«.***

Te smernice se osredotočajo na krožnost na ravni materialov, medtem ko se krožnost na ravni celotne stavbe obravnava v smernici z naslovom ***»Strategije krožne gradnje«.*** Slednja smernica ponuja vpogled v načela krožnega načrtovanja gradnje, vključno z načrtovanjem za razgradnjo, reverzibilnostjo, prilagodljivostjo, preureditvijo in prostorsko spremenljivostjo. Omenjena smernica ponuja tudi pregled potencialnih orodij za preverjanje načela krožnosti.

Nizko-ogljčni gradbeni proizvodi pogosto vključujejo sekundarne materiale. V zvezi s tem je več informacij na voljo v smernici ***»Varna uporaba sekundarnih gradbenih materialov. Informacijski paket za proizvajalce«.*** Med drugim določa zahteve glede ocenjevanja tehničnih lastnosti ter okoljskih in zdravstvenih vplivov povezanih z uporabo sekundarnih materialov in gradbenih proizvodov na osnovi sekundarnih materialov.

Tabela 1: Ogljik vgrajen v različne gradbene materiale (Vir: Calkins, 2009).

Gradbeni material	Vgrajen ogljik (kg of CO ₂ /ton)
Naravni kamen (apnenec)	12
Naravni agregat	16
Zbita zemlja	24
Nearmiran beton (trdnost 20 MPa)	134
Armiran beton	222
Les (iglavci)	132
Portlandski cement (64–73% žlindre)	279
Portlandski cement (25–35% elektrofilitrskega pepela)	858
Naravni kamen (granit)	317
Opeka	850
Keramične ploščice	430
Jeklana armature (mreža, palice)	1720
Polipropilen	3900

1.1. Namen smernice

V predstavljeni smernici smo povzeli obstoječe znanje o nizko-ogljčnih gradbenih proizvodih ter strategijah krožnega gospodarstva, ki lahko omilijo okoljske vplive, ki jih povzročajo gradbeni proizvodi tekom svojega življenjskega cikla. Smernice so v prvi vrsti namenjene oblikovalcem politik, proizvajalcem gradbenih proizvodov, upravljavcem odpadkov, javnim vlagateljem in drugim deležnikom v gradbenem sektorju. Ob upoštevanju informacij, predstavljenih v tej smernici, lahko zainteresirane strani prispevajo k večji okoljski trajnosti gradbenega sektorja. Slednje je bistvenega pomena za doseganje podnebnih ciljev, zastavljenih v Pariškem sporazumu, in spodbuja prehod na krožno gospodarstvo.

2. Krožni materiali

Strategija krožnega gospodarstva za gradbene proizvode/materialne temelji na večstranskem pristopu. Glavni poudarek je na razvoju novih materialov in naprednih gradbenih metod, namenjenih izboljšanju učinkovitosti in trajnostnosti stavb ter hkratnem zmanjšanju količine odpadkov. Gradbeni proizvodi z negativnim ogljičnim odtisom omogočajo dolgoročno skladiščenje ogljika ter izboljšanje učinkovitosti in trajnosti (imajo daljšo življenjsko dobo). Napredne gradbene metode vključujejo uporabo novih materialov in omogočajo njihovo ponovno uporabo. Predvsem pa temeljijo na manjši porabi virov (surovin).

Krožni proizvodi so zasnovani tako, da jih je mogoče v celoti reciklirati. Krožni proizvodi velikokrat temeljijo na novih proizvodnih postopkih, pri katerih se ne sproščajo strupene snovi in ne nastajajo stranski proizvodi. Krožni materiali so proizvedeni iz lokalnih surovin in so namenjeni za lokalne potrebe. Krožna raba proizvodov v gradbeništvu temelji na načelih maksimalne uporabe primarnih in bio-osnovanih materialov. Poudarek je na maksimalnem možnem potencialu za visokovredno ponovno uporabo, ter na čim večji možni uporabi recikliranih materialov. Leta 2021 je stopnja krožne rabe gradbenih proizvodov v Evropski uniji po oceni znašala 11,7% (Andabaka, 2023). To pomeni, da obstaja še velik potencial za izboljšave.

Želja je vzpostaviti zaprto zanko snovnih (materialnih) tokov, ki podpirajo krožno gospodarstvo, in sicer na način, da se materiali, ki gradijo proizvod, ohranjajo v uporabi čim dlje časa. Namen je tudi čim boljša izraba materialov iz odpadnih proizvodov v nove visokovredne izdelke/proizvode. Na ta način lahko količino odpadkov zmanjšajmo na minimum, materiali pa se po koncu življenjske dobe ponovno uporabijo, reciklirajo ali kako drugače predelajo.

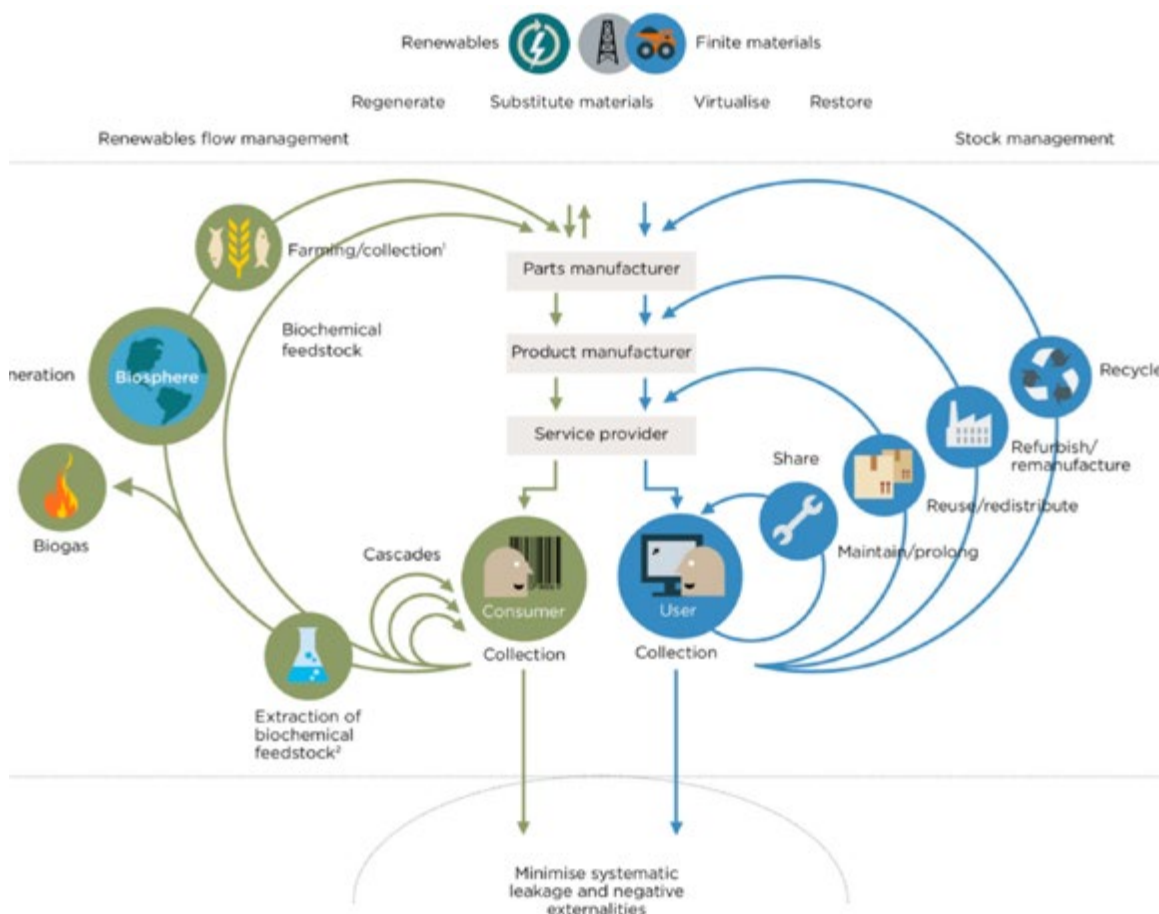
Krožno gospodarstvo je ekonomski model, ki si prizadeva za optimalno uporabo virov v okviru naravnih danosti in omejitev, maksimizacijo vrednosti gospodarskih sredstev ter minimizacijo odpadkov z zapiranjem ekonomskih zank (Slika 1). Krožno gospodarstvo zajema celotno ekonomsko vrednost v dolgoročni perspektivi, torej upošteva stroške vseh zunanjih dejavnikov (okoljskih, socialnih) ter diskontirano vrednost sredstev v njihovem celotnem življenjskem ciklu. Krožno gospodarstvo je mogoče opredeliti kot industrijski sistem, ki je namenoma zasnovan za obnovo in regeneracijo. Namen tega pristopa je zamenjati koncept odlaganja z regenerativno rastjo, dati prednost obnovljivim virom energije, ukiniti uporabo strupenih snovi, ki predstavljajo oviro za ponovno uporabo, ter si prizadevati za preprečevanje nastajanja odpadkov, ki so posledica presežne zasnove materiala ali izdelka.

Krožno gospodarstvo je pristop k izboljšani trajnostnosti. Teži k postopnemu odvajanju gospodarske dejavnosti od porabe neobnovljivih virov in oblikuje sistem brez odpadkov (Tabela 1). Krožno gospodarstvo temelji na treh načelih:

- Načrtovanje brez nastajanja odpadkov in brez onesnaževanja okolja
- Ohranjanje izdelkov in materialov v uporabi
- Obnavljanje naravnih ekosistemov

Cilji pristopa krožnega gospodarstva so podaljšanje življenjsko dobo izdelkov/proizvodov, olajšati njihovo ponovno uporabo in preusmeriti odpadne tokove materialov z odlagališč nazaj v proizvodne linije. Dolgoročno bodo takšni pristopi vodili k bolj racionalnemu oblikovanju proizvodov, ki jih bo mogoče enostavno razstaviti na osnovne dele za ponovno uporabo ali recikliranje.

Slika 1: Diagram krožnega gospodarstva.



Vir: Ellen MacArthur Foundation, 2013

Proizvajalci morajo načrtovati proizvode v skladu s trajnostnostnimi zahtevami. To je mogoče doseči z razvojem trajnejših rešitev in zagotovitvijo, da se pri zasnovi proizvodov ne upoštevajo le stroški proizvodnje, temveč tudi možnost za ponovno uporabo, razstavljanje in recikliranje proizvoda. Na ravni stavb je treba objekte načrtovati, graditi in rušiti na način, da je raba naravnih virov trajnostnostna in je omogočeno zlasti: ponovna uporaba ali recikliranje elementov stavb in gradbenih materialov/proizvodov po razgradnji ali rušenju, s čimer se zagotovi trajnost gradbenih objektov. V fazi gradnje pa se daje poudarek na uporabi gradbenih proizvodov na osnovi sekundarnih materialov.

Krožno načrtovanje omogoča ustvarjanje trajnostnega grajenega okolja, saj pripomore k večji prilagodljivosti stavb in olajšuje visokovredno ponovno uporabo gradbenih proizvodov in materialov po koncu njihove življenjske dobe. Reverzibilno načrtovanje z možnostjo razgradnje je načrtovanje stavb na način, da jih je mogoče enostavno razstaviti, ali pri katerih je mogoče preprosto odstraniti in dodati elemente, ne da bi pri tem poškodovali stavbo. Pri odstranjenih elementih/materialih se osredotočamo na njihovo ponovno uporabo. Različne sloje, kot so okna, tla, notranje stene in prezračevalni sistemi, je možno odstraniti brez poškodovanja drugih delov stavbe, kar omogoča učinkovito obnovo, zamenjavo, ponovno uporabo in obnovitev elementov, materialov ter drugih sestavnih delov stavbe.

Načela krožnega gospodarstva so opredeljena v Akcijskem načrtu EU za krožno gospodarstvo iz leta 2020. V Evropskem Zelenem dogovoru iz leta 2019, črpajo navdih za hierarhično razporeditev ravnanja z odpadki, ki je določena v Okvirni direktivi EU o odpadkih (Waste Framework Directive, 2008/98/ES).

Hierarhija kategorizira pristope o ravnanju s proizvodi po koncu njihovega življenjskega cikla, pri čemer je osrednji poudarek na ohranjanju njihove ekonomske vrednosti na trgu, če je to izvedljivo in okoljsko vzdržno. Prioriteta je preprečevanje nastajanja odpadkov, sledi ponovna uporaba, recikliranje, obnovitev in na zadnjem mestu odlaganje, kot najmanj zaželena možnost. Neposredna ponovna uporaba gradbenih proizvodov/materialov se izkaže kot najučinkovitejša ekološko rešitev. Vendar ta pristop ogroža vsesplošna masovna proizvodnja.

Ponovna uporaba mineralnih odpadkov, ki so prevladujoča sestavina gradbenih ruševin, običajno vključuje procese zasipavanja. Ta način ponovne uporabe ne prispeva bistveno k ohranjanju tržne vrednosti teh materialov. V literaturi navedeni pomisleki se nanašajo na uporabo materialov z visoko vsebnostjo recikliranega materiala in so povezani z višjimi stroški za doseg enakovrednih mehanskih lastnosti betonov na osnovi recikliranih materialov, ter zmanjšanjem namembnosti teh betonov. ***Več informacij o recikliranih materialih je na voljo v smernici „Varna uporaba sekundarnih gradbenih materialov. Informacijski paket za proizvajalce“.***

Načini, s katerimi po načelih krožnega gospodarstva zmanjšamo okoljske vplive gradbenih proizvodov/materialov so sledeči:

- Vključevanje načel krožnega gospodarstva ob koncu življenjskega cikla gradbenih proizvodov (ponovna uporaba, popravilo, prenova, preureditev, recikliranje in obnovitev).
- Uporaba sekundarnih materialov (ponovno uporabljenih ali recikliranih).
- Načrtovanje za daljšo trajnost.

2.1. Različni pristopi recikliranja

Obstajata dva glavna pristopa recikliranja. O recikliranju znotraj zaprtega sistema govorimo, ko se odpadni material uporabi za proizvodnjo podobnih proizvodov s strani istega proizvajalca. Postopek recikliranja se lahko ponovi po vsakem življenjskem ciklu.

Recikliranje znotraj odprtega sistema pomeni, da odpadni material po oddaji na trg uporabijo v neke druge namene, kot je bil material prvotno uporabljen.

Recikliranja v zaprtem in odprtem sistemu ne smemo zamenjevati s nadcikliranjem in podcikliranjem. Nadcikliranje je proces pri katerem se ohrani prvotna stopnja kakovosti proizvoda ali pa njegova kvaliteta celo naraste. Podcikliranje je proces pri katerem se odpadki uporabi v njegovi prvotni obliki. Podcikliranje v odprtem sistemu se pogosto izvaja na nivoju kaskadnega sistema. Na primer, proizvod A predstavlja beton na osnovi naravnega agregata, proizvod B predstavlja beton z uporabo recikliranega agregata (agregat iz odpadnega betona), proizvod C pa predstavlja drobljen beton (recikliran agregat) uporabljen kot tampon v cestogradnji.

3. Nizko-ogljčni materiali

Na svetovni ravni je gradbeni sektor odgovoren za 36 % toplogrednih izpustov, za približno 40 % porabo materialov in za 40 % vseh proizvedenih odpadkov (Wouterszoon Jansen et al., 2022). Gradnja in obratovanje stavb imata ključno vlogo pri doseganju ciljev iz Pariškega sporazuma. Namen tega sporazuma je omejiti dvig globalnih temperatur pod 2°C in v drugi polovici enaindvajsetega stoletja (npr. do leta 2050) doseči ogljično nevtralnost. Poleg tega je Evropska komisija predstavila Zeleni dogovor z več predlogi za zmanjšanje neto emisij toplogrednih izpustov za vsaj 55 % do leta 2030 v primerjavi z letom 1990 in za doseg podnebne nevtralnosti Evropske unije do leta 2050.

V zadnjih desetletjih se je poraba energije pri obratovanju v nizko-energijskih stavbah znatno zmanjšala. Posledica tega je, da vgrajene emisije toplogrednih plinov v gradbenih proizvodih/materialih, iz katerih so zgrajene nizko-energijske stavbe, predstavljajo približno polovico ogljičnega odtisa v življenjski dobi stavbe. To težavo je mogoče rešiti s proizvodnjo nizko-ogljčnih gradbenih proizvodov/materialov in izvajanjem načel krožnega gospodarstva, kar lahko privede do znatnega zmanjšanja toplogrednih emisij, ki so vgrajene v gradbene materiale.

Da postanejo stavbe ogljično nevtralne, mora biti iz ozračja odstranjena znatna količina CO₂ in skladiščena v gradbenih materialih v obliki ogljika. Ta količina skladiščenega ogljika mora biti večja od emisij, povezanih s pridobivanjem, proizvodnjo in prevozom vseh uporabljenih materialov v stavbi. Za doseg tega cilja so bile v gradbenem sektorju uvedene tehnologije, kot je zajemanje in skladiščenje ogljika. Ogljik iz ozračja se lahko skladišči v gradbenih proizvodih/materialih na dva načina: (i) trajno skladiščenje v mineralnih materialih in (ii) začasno skladiščenje v biogenih materialih.

Glavne strategije, ki pripomorejo k zmanjšanju količine ogljika v materialih in s tem količine vgrajenega ogljika v stavbah so sledeče:

1. Načrtovanje za **dolgotrajnost** (daljša uporaba materialov)
2. Načrtovanje za **prilagodljivost**
3. Načrtovanje za **razgradnjo** (razstavljanje/demontažo) in ločevanje na viru.
4. Uporaba načel krožnega gospodarstva (zmanjšanje količine nastalih odpadkov, neposredna ponovna uporaba odpadnih materialov - odpadkov iz ruševin, uporaba recikliranih materialov)
5. Uporaba materialov z **nizko vsebnostjo vgrajenega fosilnega ogljika** (npr. bio-osnovani materiali) za zamenjavo tistih z visoko vsebnostjo vgrajenega fosilnega ogljika (kot je beton), brez znižanja trajnosti.
6. Povečanje **okoljske učinkovitosti** proizvodnih verig (energetska učinkovitost, integracija obnovljivih virov energije, tehnološki razvoj, industrijska simbioza itd.).
7. Uporaba lokalnih surovin/proizvodov

Načrtovanje za trajnost (dolgotrajnost), načrtovanje za prilagodljivosti, načrtovanje za razgradnjo so strategije, ki se izvajajo na nivoju stavbe. Vendar se te strategije odražajo tudi na nivoju materialov, ob upoštevanju zmanjšane potrebe po proizvodnji novih gradbenih materialov in manjši količini nastalih odpadkov. Materiali, ki podpirajo te strategije, prispevajo k zmanjšanju ogljičnega odtisa stavb.

Načrtovanje za dolgotrajnost si prizadeva doseči časovno trajno arhitekturo, pri čemer uporablja trajne proizvode in materiale, ki jih je mogoče prilagoditi in ponovno uporabiti v prihodnosti. Dolgotrajnost omogoča, da se surovine, uporabljene pri gradnji, dolgoročneje ohranijo.

Načrtovanje za prilagodljivost omogoča, da se stavbi spremeni njena namembnost brez večjih posegov in minimalno uporabo novih materialov v primerjavi s prenovo stavbe. Zmanjšuje potrebo po rušenju in preprečuje nastajanje večjih količin gradbenih odpadkov. Povečano prilagodljivost je možno doseči z uporabo modularnih konceptov, enostavno spremenljivih fasad in lahko zamenljivih inštalacij. Te spremembe spreminjajo videz in funkcionalnost stavbe.

Načrtovanje za razgradnjo/demontažo omogoča razgradnjo stavbe ob koncu njene uporabne dobe na način, da se razstavljeni elementi in materiali lahko reciklirajo, ponovno uporabijo ali obnovijo za nadaljnjo uporabo. Manjša kompleksnost stavbe s pridihom modularnosti in preprostostjo gradbenih elementov omogoča lažjo gradnjo, preprostejše povezave med nosilnimi in nenosilnimi elementi in posledično lažjo razgradnjo/demontažo stavbe. Hkrati takšen pristop omogoča zmanjšanje števila in vrst gradbenih elementov/materialov. Pri procesu gradnje se poslužujemo izbire uporabnih in okoljsko trajnostnih materialov. Razgradnja vključuje postopke zavarovanja konstrukcije, pregled stavbe, ter dekontaminacijo in odstranitev morebitnih nevarnih odpadkov. Vključuje tudi rušitvene dejavnosti in procese recikliranja, ki omogočajo ohranitev vrednosti obstoječih materialov.

Za dodatne informacije o načrtovanju krožnih strategij preberite smernice »Krožno načrtovanje stavb«.

Ponovna uporabnost in reciklabilnost gradbenih proizvodov/materialov, skupaj z drugimi načeli krožnega gospodarstva, predstavljajo pristope, ki so usmerjeni h zmanjšanju ogljičnega odtisa in drugih okoljskih vplivov v fazi po koncu življenjske dobe gradbenih proizvodov/materialov. Učinkovitejša raba virov je pomemben pristop h zmanjševanju toplogrednih izpustov. Po oceni, bi sedanja vpeljava kombiniranih krožnih praks (kot so modularna gradnja, zmanjšana uporaba jekla, izboljšana izraba stavb) v gradbenem sektorju v Evropski Uniji do leta 2050 lahko zmanjšala do 80 megaton toplogrednih emisij letno.

3.1. Možni načini proizvodnje nizko-ogljicnih gradbenih proizvodov/materialov

Obstaja več pristopov in priporočil za proizvajalce gradbenih proizvodov/materialov, kako zmanjšati okoljski odtis proizvodov/materialov, predvsem ogljični odtis. Ti pristopi temeljijo predvsem na načelih krožnega gospodarstva.

Možni načini za proizvodnjo nizko-ogljicnih proizvodov/materialov za gradnjo, kot jih opisujeta Orsini in Marrone (2019), so naslednji:

- uporaba alternativnih materialov,
- uporaba naravnih materialov,
- uvedba sekundarnih surovin,
- implementacija sistemov zajemanja in shranjevanja ogljika ter izkoriščanje ogljika v proizvodnem procesu,
- povečanje uporabe energije iz obnovljivih virov in
- povečanje zmogljivosti/kakovosti proizvodov.

3.1.1. Uporaba alternativnih materialov:

Tipičen primer je okoljski odtis betona, ki je povezan s proizvodnjo Portlandskega cementa.

Med proizvodnjo cementa prihaja do izpustov več kot 1 tone CO₂ na tono proizvedenega cementa.

Kot nadomestilo za Portlanski cement se lahko uporabi več alternativnih veziv za proizvodnjo betona z relativno nižjim ogljičnim odtisom.

- elektrofilterski pepel (stranski proizvod pri kurjenju premoga v termoelektrarnah),
- granulirana žindra (stranski proizvod v procesu proizvodnje litega železa),
- amorfni silicijev dioksid (stranski proizvod pri industrijski proizvodnji kovinskega silicija in železo-silicijevih zlitin),
- odpadki pri proizvodnji rdeče glinene opeke,
- itd.

Koristi:

- zmanjšanje ogljičnega odtisa in drugih okoljskih vplivov (potrebna je preverba z metodo LCA- analiza življenjskega cikla),

Omejitve uporabe alternativnih materialov v proizvodnji betona:

- slabša kakovost
- nekateri alternativni materiali so lahko dokaj redki,
- pomanjkanje ustreznega znanja v proizvodnih obratih,
- vpliv na estetski videz proizvoda.

3.1.2. Uporaba sekundarnih materialov

Uporaba sekundarnih materialov je eno izmed temeljnih načel krožnega gospodarstva. Primeri sekundarnih materialov:

- Materiali, ki nastanejo pri rušenju objektov (gradbene ruševine). Beton na osnovi recikliranega agregata iz betonskih ruševin ima lahko nižji ogljični odtis, kot beton z uporabo naravnega agregata.
- Konstrukcijski les ob koncu življenjske dobe stavbe, kot surovina za izdelavo križno lepljenega lesa.
- Odpadni materiali, kot sta pepel iz kurjenja premoga in žindra. Uporaba pri proizvodnji betona lahko zmanjša emisije toplogrednih plinov.
- Reciklirani/odpadni materiali se lahko uporabijo tudi pri proizvodnji opeke, kar se lahko odraža v manjših emisijah toplogrednih plinov.
- Asfaltne mešanice, ki so izdelane z uporabo recikliranih materialov (asfaltni rezkalec, uporaba jeklarske žindre kot nadomestek silikatnega agregata itd.).

Z uporabo sekundarnih materialov so povezani številni izzivi:

1. Razpoložljivost in kakovost sekundarnih materialov, izziv je najti primerne surovine za recikliranje ali ponovno uporabo. Tudi neprimerni sistemi zbiranja in ločevanja lahko omejujejo razpoložljivost visokokakovostnih sekundarnih materialov.
2. Ustrezna infrastruktura za zbiranje, razvrščanje in predelavo sekundarnih materialov je ključnega pomena. Izvajanje učinkovitih sistemov zbiranja in naložbe v sodobne sortirnice so lahko drage in zahtevajo usklajevanje med različnimi deležniki.
3. Ekonomska upravičenost uporabe sekundarnih materialov je odvisna od: povpraševanja na trgu, proizvodnih stroškov in cene. Če stroški zbiranja, sortiranja in predelave sekundarnih materialov presegajo vrednost pridobljenih proizvodov, je spodbujanje njihove uporabe lahko neproduktivno.
4. Učinkoviti predpisi in politike imajo pomembno vlogo pri spodbujanju uporabe sekundarnih materialov. Vzpostaviti je treba jasne smernice, standarde in mehanizme izvrševanja, da se zagotovijo kakovost, varnost in združljivost sekundarnih materialov z obstoječimi proizvodnimi postopki.

5. Spodbujanje potrošnikov, da sprejmejo izdelke iz sekundarnih surovin, je lahko izziv. Ozaveščanje, izobraževanje javnosti in promocija prednosti uporabe sekundarnih surovin so bistveni za spremembo vedenja potrošnikov.
6. Vključevanje večjih količin sekundarnih materialov v proizvodnjo ima za posledico prilagoditev ali nadgradnjo obstoječe infrastrukture in tehnologij. Pri vključevanju sekundarnih materialov v proizvodne procese se lahko pojavijo vprašanja združljivosti in tehnične omejitve, kar zahteva naložbe v raziskave in razvoj.
7. Upravljanje zapletene dobavne verige, ki vključuje več zainteresiranih strani, vključno z zbiralci, predelovalci, proizvajalci in trgovci na drobno, je lahko zahtevno. Usklajevanje dejavnosti, zagotavljanje preglednosti in ohranjanje nadzora kakovosti v celotni dobavni verigi so ključnega pomena za uspešno vključevanje sekundarnih materialov.
8. Premagovanje družbenih predsodkov glede uporabe sekundarnih materialov je ključnega pomena. Nekateri ljudje lahko reciklirane ali ponovno uporabljene materiale še vedno povezujejo z nižjo kakovostjo, kar lahko ovira njihovo sprejemanje v različnih panogah in na potrošniških trgih.

Koristi:

- Uporaba gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja zgradb v proizvodnem procesu je koristna v smislu zmanjševanja obremenjenosti odlagališč (prihranek prostora), hkrati zmanjšuje okoljske odtise pri gradnji novih stavb. Uporaba sekundarnih materialov lahko pomaga zmanjšati ogljični odtis betona.

Dodatne omejitve:

- večji stroški za proizvodnjo izdelka s primerljivimi mehanskimi lastnostmi,
- slabša kakovost,
- pomanjkanje ustreznih znanj v proizvodnem procesu,
- vpliv na estetski videz,
- pomanjkanje družbenega konsenza (sprejetost v družbi),
- pomanjkanje potrebne infrastrukture za recikliranje,
- pomanjkljiva dobavna veriga.

Uporaba sekundarnih materialov v novih proizvodih se lahko odraža v nižjih okoljskih odtisih (vključno z nižjim ogljičnim odtisom) proizvodov.

Dodatne informacije o uporabi sekundarnih materialov najdete v dokumentu »Varna uporaba sekundarnih gradbenih materialov - Informacijski paket za proizvajalce«.

3.1.3. Uporaba naravnih (bio-osnovanih) materialov:

Običajno gre za biogene materiale, ki lahko nadomestijo gradbene materiale z visoko vsebnostjo vgrajenega ogljika, kot so beton in opeka, brez zmanjšanja trajnosti. Na primer:

- konstrukcijski les in
- prst zmešana z naravnimi vezivi (apno, pepel iz kurjenja premoga) ali naravnimi vlakni (les, konoplja, volna, materiali iz kmetijskega sektorja).

Koristi:

- nizka stopnja obdelave in nizko-cenovni proizvodi,
- zdravju neškodljivi proizvodi,
- lokalna dostopnost,
- možnost vzpostavitve lokalnih inovativnih verig, ki so sposobne obnoviti vidike gradbene tradicije, in
- skladiščenje biogenega ogljika v naravnih materialih. Nekateri naravni materiali v celotnem življenjskem ciklu absorbirajo večjo količino ogljika, kot ga izpustijo med samo proizvodnjo proizvoda/materiala.

Omejitve:

- potreba po kompenzaciji slabše učinkovitosti na račun večje debeline gradbenih proizvodov,
- pomanjkanje ustreznega znanja v proizvodnem sektorju in
- pomanjkanje usposobljenih delavcev za vgradnjo.

3.1.4. Uporaba lokalnih materialov:

Uporaba lokalnih materialov omogoča zmanjšanje toplogrednih izpustov zaradi krajših transportnih razdalj surovin. Najbolj zaželeni so materiali iz rušenja objekta, ki se lahko koristno uporabijo na samem gradbišču.

Omejitve:

- potreba po kompenzaciji slabše učinkovitosti na račun večje debeline sestavnih delov/gradbenih proizvodov,
- pomanjkanje ustreznih znanj v proizvodnem sektorju,
- omejitve pri transportnih poteh vezanih na nabavo (*glej smernice "Krožno javno naročanje"*),
- prostorske zahteve za začasno skladiščenje materialov, ki nastanejo pri rušenju.

3.1.5. Povečanje učinkovitosti

Povezano z optimizacijo, na primer:

- zmanjšana poraba surovin,
- izboljšanje načrtovanja z vidika zmanjšanja toplogrednih izpustov,
- razvoj novih materialov na osnovi nanotehnologij, ki bi lahko izboljšali lastnosti tradicionalnih materialov (les, beton) in izboljšanje načrtovanja zmanjšanja toplogrednih izpustov.

Koristi:

- zmanjšanje emisij,
- varčevanje z naravnimi viri.

Omejitve:

- pomanjkanje znanja v proizvodnem sektorju,
- visoki stroški raziskav in razvoja.

3.1.6. Uporaba obnovljivih virov energije

Energijska poraba se vrši v vseh fazah življenjskega cikla gradbenega proizvoda/materiala (proizvodnja, uporaba, razgradnja, recikliranje). Toplogredni izpusti se lahko zmanjšajo z uporabo elektrike pridobljene iz sončnih celic, vetrnih turbin, hidroelektrarn in drugih obnovljivih virov energije ter tudi z izkoriščanjem odpadnih materialov za proizvodnjo energije.

Koristi:

- zmanjšanje toplogrednih izpustov

Omejitve:

- visoki stroški investicije v uvedbo obnovljivih virov energije

3.1.7. Ostali načini

Načini zmanjšanja toplogrednih izpustov so povezani tudi z:

- rekuperacijo toplote iz proizvodnega procesa (njeno ponovno vključevanje v sam proces),
- tehnološkim razvojem ali inovacijami proizvodnega procesa,
- povečanjem učinkovitosti proizvodnje,
- energetske učinkovitostjo,
- industrijsko simbiozo,
- biotehnološkim odvzemom ogljika,
- uvedbo sistemov, kot je zajem in shranjevanje ogljika ter zajem in uporaba ogljika,
- itd.

Poleg teh pristopov za proizvodnjo gradbenih proizvodov z nizko vsebnostjo ogljika je Grazieschi (2022) podal pregled nekaterih pobud, ki se navezujejo na načela krožnosti in na gradbene materiale z nizko vsebnostjo ogljika. Strategije za zmanjšanje vgrajenega ogljika v stavbah so tudi sledeče (*glej smernico: "Krožne strategije stavb"*):

- Trajnostno načrtovanje
- Uporaba načel krožnega gospodarstva (zmanjšanje količine nastalih odpadkov, neposredna ponovna uporaba odpadnih materialov, uporaba recikliranih materialov),
- Načrtovanje razgradnje in ločevanja pri samem viru.

Obstajajo tudi drugi vidiki, na primer strategija, ki zajema pet stebrov za povečanje učinkovitosti trenutnih tehnologij ter pospeševanje raziskav in razvoja novih okolju prijaznih tehnologij. Pet stebrov je zasnovanih tako, da se dopolnjujejo in vključujejo:

- Povečanje učinkovitosti obstoječih tehnologij.
- Vključevanje okoljsko trajnostnih nišnih tehnologij v običajne prakse.
- Integracija hibridnih tehnologij v splošne aplikacije.
- Izdelava aplikacij za uporabo biotehnologije v gradbeništvu.
- Razvoj aplikacij za uporabo nanotehnologije v gradbeništvu.

4. Poljubni seznam krožnih in nizko-ogljčnih gradbenih proizvodov/materialov

Nekateri možni krožni in nizko-ogljčni gradbeni materiali so predstavljeni v Tabeli 2. Ti materiali se smatrajo za okoljsko trajnostne, predvsem zaradi krožnostnih lastnosti, zasnovane na osnovi sekundarnih materialov, oziroma zaradi nižjega ogljičnega odtisa v primerjavi s tradicionalnimi gradbenimi materiali. Seznam služi zgolj kot primer in ne predstavlja popolnega seznama krožnih in nizko-ogljčnih gradbenih materialov. Odločitev, katere gradbene materiale uporabiti pri določenih gradbenih projektih, je odvisna od posameznega primera. Podajanje tovrstnih priporočil ni namen te smernice.

Tabela 2: Seznam gradbenih materialov, ki veljajo za krožne in imajo relativno nizek ogljični odtis.

	Slika	Namen uporabe	Komentar
Inženirski lesni izdelki			
Izolacijske plošče iz lesnih vlaken		Uporaba kot izolacijski material (za strehe, stene, pode, strope, notranjost stavb, fasade, podstrešja).	
Križno lepljen les		Alternativa betonski talni plošči in jeklenim konstrukcijam.	Lepila so problematična z vidika vpliva na zdravje
Furnirane vezane plošče		Uporaba v nosilcih vrat in oken, za stebre, stopnice, letve in tramove.	Lepila so problematična z vidika vpliva na zdravje
Lepljen les		Uporaba v gradbenih elementih, okvirjih stavb, stebrih, nosilcih itd. Kot alternativa jeklenim konstrukcijam in betonski talni plošči.	Lepila so problematična z vidika vpliva na zdravje
Konstrukcijski les		Uporaba v: gradbenih elementih, okvirjih stavb, stebrih, nosilcih itd. Kot alternativa jeklenim konstrukcijam in betonskim talnim ploščam.	
Beton iz sekundarnih materialov			
Beton z uporabo recikliranih agregatov		Uporaba je lahko omejena, saj je odvisna od zahtev glede kakovosti. Uporaba pri betoniranju temeljev, cest, tlakov. Uporaba za konstrukcijske betonske elemente, gradnja nasipov in opornih zidov, proizvodnja prefabriciranih betonskih izdelkov itd.	Recikliran agregat zmanjšuje trdnost betonskih komponent, skrajšuje njihovo življenjsko dobo. Uporaba je lahko omejena, saj je odvisna od zahtev glede kakovosti.
Beton z uporabo jeklarske žindre		Uporaba za betonske temelje, plošče in dovoze, za masivni beton (jezovi), proizvodnja prefabriciranih betonskih izdelkov (bloki in plošče).	Recikliran agregat zmanjšuje trdnost betonskih komponent, skrajšuje njihovo življenjsko dobo. Izluževanje potencialno strupenih snovi.

Slika	Namen uporabe	Komentar
<p>Beton z uporabo elektrofiltrskega pepela iz kurjenja premoga</p>	<p>Uporaba pri gradnji cestišč, stanovanjski gradnji (temelji, plošče, dovozi), prefabričani betonski izdelki (bloki, plošče, cevi), gradnja mostnih konstrukcij (tramovi, stebri, plošče), betonski jezovi, itd.</p>	<p>Izluževanje potencialno strupenih snovi.</p>
Opeka izdelana iz sekundarnih materialov in ponovno uporabljena opeka		
<p>Opeka z uporabo rečnega mulja</p>		<p>Uporabnost za nizke gradnje (stanovanjske stavbe, majhne konstrukcije), tradicionalna arhitektura, mejne ograje in stene, skladišča, kmetijske stavbe ter drugi nestanovanjski objekti, umetniške in dekorativne inštalacije.</p>
<p>Opeka z uporabo elektrofiltrskega pepela</p>		<p>Gradnja sten, predelnih sten in drugih nosilnih elementov, gradnja poslovnih in industrijskih objektov (pisarne, skladišča), gradnja mostov in prepustov, tlakovanje (dovozi, pločniki in druge zunanje površine), uporaba za notranje in predelne stene, uporaba pri obnovitvenih in posodobitvenih projektih itd.</p> <p>Pomisleki glede možne kontaminacije, ki jo povzročajo odpadni materiali. Omejitev zaradi nizke stopnje sprejemanja s strani industrijskega sektorja in splošne javnosti je lahko razlog za omejitev.</p>
<p>Opeka z uporabo jeklarske žilindre</p>		<p>Uporaba za stene, fasade in druge nosilne elemente, gradnjo poslovnih in industrijskih objektov (pisarne, skladišča, proizvodne objekte), mostove in prepuste, gradnja opornih zidov, tlakovanje (dovozi, pločniki in druge zunanje površine), vrtni zidovi in dekorativni elementi, zvočno izolacijski zidovi ob avtocestah, uporaba za notranje in predelne stene itd.</p> <p>Pomisleki glede možne kontaminacije, ki jo povzročajo odpadni materiali. Omejitev zaradi nizka stopnje sprejemanja s strani industrije in splošne javnosti je lahko razlog za omejitev.</p>
<p>Opeka z uporabo kalcijevega karbidovega mulja</p>		<p>Uporaba pri tlakovanju (pločniki in urejanja okolice), uporaba v dekorativnih elementih, uporaba v nizkih nebivalnih konstrukcijah.</p> <p>Pomisleki glede možne kontaminacije, ki jo povzročajo odpadni materiali. Omejitev zaradi nizka stopnje sprejemanja s strani industrije in splošne javnosti je lahko razlog za omejitev.</p>
<p>Ponovno uporabljena opeka</p>	<p>Uporaba za fasade stavb, tlakovanje poti v vrtovih in parkih, gradnjo teras in dvorišč, gradnjo ali obnovo kaminov in dimnikov, gradnjo opornih zidov, notranje talne obloge, uporaba v različnih arhitekturnih elementih itd.</p>	<p>Običajno niso primerne za nosilne konstrukcije. Za slednje morajo biti izpolnejsne zahteve glede trdnosti.</p>

Jeklo

<p>Jeklo</p>	<p>Različne uporabe: ojačitev v betonski gradnji (armaturne palice in mreže), nosilci konstrukcij, plošče, avtomobilski deli, zabojniki, izdelava gospodinjskih aparatov (hladilniki, pralni stroji in štedilniki), gradnja in vzdrževanje železniških tirov in mostov, proizvodnja pohištva (stolov z jeklenim ogrodjem, miz, in drugih kovinskih izdelkov za pohištvo) itd.</p>	<p>Jeklo v resnici ni nizko-ogljikni material zaradi visoko-energijskih procesov rudarjenja, kaljenja, obogatitve in varjenja. Jeklo je možno znova in znova reciklirati v novo jeklo. Iz slednjega vidika gre za krožni material.</p>
--------------	---	--

Slika	Namen uporabe	Komentar
Geopolimeri		
Geopolimeri	Uporaba kot veziva za trajnostnostne gradbene materiale (alternativa apnu in običajnemu Portlandskemu cementu), proizvodnja prefabriciranih betonskih izdelkov (bloki, plošče in cevi), gradnja cest za proizvodnjo trajnega in visokotrpežnega betona za tlakovce in druge nosilne elemente, proizvodnja izolacijskih materialov, protipožarnih premazov za konstrukcije in materiale, 3D tiskanje gradbenih komponent, proizvodnja keramike, arhitekturnih elementov (dekorativne plošče, skulpture in fasade stavb).	Uporablja se kot vezivo za trajnostnostne gradbene materiale. Alternativa apnu in navadnemu Portlandskemu cementu.
Ostali gradbeni materiali		
Steklo	Okna in vrata, gospodinjski aparati, pohištvo, paneli za rastlinjake itd.	
Zbita zemlja za stene	Uporaba v nizkih gradnjah (stanovanjskih hišah), ograjah, obnovi zgodovinskih stavb, hlevih, skladiščnih zgradbah, zvočnih zaporah ob avtocestah.	Uporablja se v manjših konstrukcijah
Mavčne plošče	Uporaba za notranje predelne stene, strope, protipožarne stene, zvočne panele za zmanjševanje prenosa zvoka, dekorativne elemente itd.	
Konopljin beton	Izolacija sten in streh, gradnja nenosilnih notranjih sten, v nekaterih primerih tudi zunanjih nenosilnih sten, obnova in restavracija zgodovinskih stavb, gradnja manjših hiš itd.	
Asfaltni rezkanec	Uporaba v cestogradnji (asfaltne zmesi, gradnja nevezanih in vezanih nosilnih plasti, preplastitev in obnova cest).	Uporaba pri gradnji cest
Izkopana zemljina	Uporaba pri nasipavanju, urejanju terena, vrtovih, obnovi zapuščenih industrijskih območij, gradnji ali obnovi športnih igrišč, material za nasipe v cestnih gradbenih projektih, v nekaterih primerih lahko tudi kot nadomestek za naravni agregat, pokrivni material pri odlaganju odpadkov.	

4.1. Inženirski lesni izdelki

V gradbeništvu se masivni les uporablja kot trajnostna alternativa jeklu in betonu. Masivne lesene plošče se uporabljajo kot konstrukcijski gradbeni elementi, kot so nosilna tla in stene. Križno lepljen les je poleg gradbenega lesa eden najpogostejših inženirskih lesnih proizvodov, ki se uporablja v gradbeništvu. Izdelan je iz lesa iglavcev in poliuretanskih lepil. Tehnologija laminacije z lepilom omogoča izdelavo konstrukcijskih elementov poljubnih dimenzij. To je omogočilo inženirskim lesnim proizvodom, kot sta lepljen les in križno lepljen les, da postanejo alternativa jeklu in armiranemu betonu na področju gradnje večnadstropnih stavb.

Literaturni viri so pokazali, da imajo nebivanjske srednje visoke lesene stavbe, zgrajene iz križno lepljenega in lepljenega lesa, večjo količino vgrajene energije, v primerjavi s podobnimi stavbami grajenimi iz armiranega betona. To je posledica uporabe energetsko potratnih elementov (lepljen les) pri leseni gradnji. Vendar uporaba lesnih proizvodov povzroči nižji potencial globalnega segrevanja (ogljični odtis) kot uporaba armiranega betona, ker med proizvodnjo elementov iz križno lepljenega lesa prevladuje uporaba obnovljivih in biogenih virov.

Lesni odpadki pri rušenju se najpogosteje predelajo v sekance in uporabijo za proizvodnjo energije (sežig) ali proizvodnjo ivernih plošč. Tudi odlaganje lesnih odpadkov se še vedno izvaja. Z vidika krožnega gospodarstva, se pozornost posveča možnostim recikliranja in ponovne uporabe lesenih izdelkov. Les je mogoče reciklirati v nove izdelke, ali pa ga energetsko izrabiti (sežig) za proizvodnjo toplote in električne energije. Ponovna uporaba gradbenih materialov po koncu njihove življenjske dobe je odvisna od možnosti njihove ločitve v fazi razgradnje/rušenja. To je pomembno upoštevati že v fazi načrtovanja stavbe.

Uporaba impregnacijskih snovi in lepil, ki tekom proizvodnje inženirskih lesnih izdelkov sproščajo lahkohlapne organske spojine (VOC-Volatile organic compounds) in uporaba formaldehida sta naslednji pomembni dejavniki, ki vplivata na trajnost proizvodov. Nove izboljšave so privedle do razvoja inženirskih lesnih izdelkov brez uporabe lepil. Tudi ti proizvodi so lahko uporabljeni za konstrukcijske namene.

Možnost kontaminacije zaradi ponovno uporabljenih gradbenih materialov, ki bi lahko vsebovali nevarne snovi, je problematična predvsem pri stanovanjskih in javnih stavbah ter pri industrijskih objektih. Informacije o tem, kako na varen način uporabiti sekundarne gradbene materiale, so podane v dokumentu »Varna uporaba sekundarnih gradbenih materialov - Informacijski paket za proizvajalce«.

4.2. Beton

Beton je najpogosteje uporabljen antropogeni material. Hkrati je tudi drugi najbolj uporabljen vir na Zemlji, takoj za vodo. V večini evropskih držav beton predstavlja več kot polovico (po masi) materialov uporabljenih v stavbah, na Nizozemskem kar 77 %. Razlog, da je beton najpogosteje uporabljen material je njegova prilagodljiva oblika, vzdržljivost in visoka tlačna trdnost, ter odpornost na požar in vodo. Tradicionalni beton je gradbeni material z velikim vplivom na potencial globalnega segrevanja. Razlog je uporaba Portlandskega cementa, ki je najpogosteje uporabljeno vezivo v betonu. Cementna industrija je odgovorna za približno 8 % svetovnih emisij CO₂. Proizvodnja cementa je tudi energetsko zelo intenzivna in zahteva precejšnjo količino vode.

Med možnimi alternativami za zmanjšanje okoljskega odtisa tradicionalnega betona je sinergijsko združevanje med panogo predelave odpadkov in industrijo proizvodnje betona. Surovine za proizvodnjo »zelenih betonov« je mogoče pridobiti iz gradbenih odpadkov. Gradbeni odpadki iz ruševin so eden največjih masnih tokov med odpadki. V državah Evropske Unije letno nastane več kot 450 milijonov ton teh odpadkov (Ortiz et al., 2010), v 40–67 % gre za betonske odpadke (De Schepper et al., 2014). Recikliranje odpadnega betona (pridobljenega na mestih rušenja) v recikliran agregat, je pomemben način, s katerim lahko znatno zmanjšamo količino gradbenih odpadkov. Druge primerne surovine za proizvodnjo »zelenih betonov« so različne vrste industrijskih odpadkov, uporabne bodisi kot agregat, bodisi kot vezivo. Ob upoštevanju trajnostnega upravljanja s temi materiali bi v idealnem primeru sekundarni materiali iz ene industrijske panoge služili kot surovina za drugo industrijsko panogo. Predpogoj za njihovo uporabo kot nadomestek za naravne materiale pa je njihova okoljska sprejemljivost in tehnična ustreznost.

Vse alternative je treba ovrednotiti glede na njihove okoljske koristi in kompromise, zato se dandanes široko uporablja metoda analiza življenjskega cikla (LCA). Več avtorjev je primerjalo okoljski odtis recikliranih agregatov z okoljskim odtisom naravnih agregatov. Primerjali so tudi okoljski odtis betonov z uporabo recikliranih/alternativnih materialov z okoljskim odtisom tradicionalnega betona. Blengini in Garbarino (2010) sta preučevala, kako lahko reciklirani agregati dopolnjujejo naravne agregate v trajnostnem toku dobave za gradbeno industrijo. Izkazalo se je, da je recikliranje gradbenih odpadkov ekološko učinkovito, saj so preprečeni okoljski vplivi večji od povzročenih vplivov.

Knoeri in sod. (2013) so ugotavljali okoljske odtise 12 alternativnih betonskih mešanic in jih primerjali z okoljskimi odtisi ustreznih tradicionalnih betonov. Raziskane betonske mešanice so se razlikovale po deležu recikliranih agregatov in tipu ter vsebnosti cementa. Ugotovljeno je bilo, da betoni z uporabo recikliranih/alternativnih materialov, zmanjšajo vplive na okolje na približno 70 % tistih, ki jih povzročajo tradicionalni betoni. To je bilo v glavnem pripisano koristim, povezanimi z recikliranjem odpadnega armaturnega železa in preprečenemu odlaganju gradbenega odpadka zaradi njegove predelave v agregat.

Zgolj zamenjava naravnih agregatov z recikliranimi agregati v procesu proizvodnje betona ne prinaša opaznega zmanjšanja ogljičnega odtisa. To potrjuje raziskava Faleschini in sodelavci (2014), kjer so primerjali proizvodnjo betona z vsebnostjo žlindre agregata (EAF C) in proizvodnjo ustreznega tradicionalnega betona. Žlindra je bila uporabljena za zamenjavo naravnega agregata v različnih betonskih mešanicah. Rezultati analize LCA so pokazali, da so izpusti, povezani s proizvodnjo umetnega agregata iz žlindre, bistveno nižji kot tisti, povezani s pridobivanjem naravnega (rečnega) agregata. Vendar pa je bila v alternativnem scenariju vsebnost cementa rahlo višja. V proizvodnji betona glavnino okoljskih vplivov prispeva cement. Predvsem zaradi tega so izračuni za alternativni in tradicionalni beton pokazali primerljive okoljske odtise. Na okoljski odtis vpliva tudi način transporta in predvsem razdalja transporta naravnih oziroma recikliranih agregatov.

Ogljični odtis tradicionalnih betonskih mešanic je preučevalo več avtorjev (Flower in Sanjanyan, 2007, Marceau et al., 2007; Zhang et al., 2014). Flower in Sanjanyan (2007) sta preučila potencial nekaterih industrijskih stranskih proizvodov (elektrofiltrskega pepela in zmlete granulirane plavžne žlindre) za zmanjšanje okoljskih odtisov betona. Ugotovljeno je bilo, da elektrofiltrski pepel lahko zmanjša toplogredne izpuste za približno 15 %, žlindra pa za približno 22 % - pri proizvodnji betonskih mešanic. Podobno študijo so izvedli O'Brien in sodelavci (2009), ki so količinsko opredelili toplogredne izpuste in porabo vode v proizvodnji betona.

Odpadni beton nastal pri rušenju betonske konstrukcije se običajno zdrobi v recikliran agregat, če ustreza kakovostnemu razredu po uredbi o recikliranju gradbenih materialov. Materiali, ki se lahko reciklirajo, vključujejo betonske in armirane betonske odpadke, prefabricirane betonske elemente (npr. stebri, stropni elementi) in betonske temelje. Možni načini uporabe so: materiali za nasipavanje in zasipanje, uporaba v cesto-gradnji (tampon za nevezano nosilno plast), recikliran agregat za proizvodnjo betona, drenažne plasti itd. (glejte Tabelo 2). Odlaganje na odlagališčih se še vedno prakticira (približno 11 % odpadnega betona se odlaga na odlagališčih v državah članicah EU), zlasti kadar je betonska frakcija onesnažena z drugimi materiali. Odpadni beton ni primeren za recikliranje, če ne izpolnjuje zahtevanega kakovostnega razreda za predelavo. To velja zlasti za odpadni beton iz industrijskih območij in odpadni beton, ki je onesnažen s škodljivimi snovmi (npr. s prevlekami iz katrana).

V primeru selektivnega rušenja betonskih konstrukcij ima odpadni beton manj nečistoč in se lahko uporablja pri proizvodnji recikliranih agregatov za beton. Načrtovanje za razgradnjo (modularna gradnja, prefabricirani gradbeni proizvodi) omogoča ponovno uporabo betonskih komponent. Prefabricirani stebri in nosilci lahko služijo ponovni uporabi. Pravilna vrsta spoja omogoča ponovno uporabo betonskih talnih sistemov in prefabriciranih betonskih fasad.

4.3. Opeka

Opeka je en izmed najpogosteje uporabljenih gradbenih materialov in tudi eden najstarejših, saj je v uporabi že več kot sedem tisoč let. Proizvodnja tradicionalnih glinenih opek je povezana z uporabo neobnovljivih virov, veliko porabo energije (žganje), ter posledično z veliko količino toplogrednih izpustov.

Za izboljšanje okoljske trajnostnosti opeke se kot alternativna opeka proizvaja opeka na osnovi industrijskih odpadkov. Razlike alternativne opeke v primerjavi s tradicionalno opeko se nanašajo na (i) pridobivanje surovin, (ii) uporabo odpadnih materialov, ki v celoti ali delno nadomestijo glino in (iii) fazo proizvodnje – žganje ni potrebno, oziroma je nadomeščeno s stabilizacijskimi procesi.

Za optimizacijo koristne uporabe odpadnih in sekundarnih materialov se lahko v proizvodnji opeke uporablja elektrofiltrski pepel, rečni mulj, jeklarska žindra, mulj v obliki kalcijevega karbida. Na primer, opeka iz pepela in apnenega peska nudi določene prednosti, kot so z različni nosilnostni razredi opečnatih izdelkov, prihranek pri uporabi malte, ter ustvarjanje estetsko privlačnega opečnatega zidu. Ne predstavljajo dodatne obremenitve za konstrukcijo, izkazujejo povečano protipotresno varnost, zagotavljajo zadovoljivo zvočno izolacijo, ponujajo največji odboj svetlobe in izkazujejo odlično požarno varnost.

Opeke po koncu življenjske dobe se lahko reciklirajo na različne načine (Fort in Černy, 2020): (i) recikliranje v material za gradnjo cest in zasipanje, (ii) recikliranje za zamenjavo cementa v ometih in (iii) alkalno aktiviranje. Recikliranje opeke v material za gradnjo cest in zasipavanje je najpogostejša praksa. Opeke se zdrobijo skupaj z drugimi inertnimi materiali in uporabijo v obliki recikliranih agregatov.

Ob upoštevanju načrtovanja za razgradnjo, je glavna strategija gradnja brez uporabe malte, kjer so opeke povezane z jeklenimi ploščami in stenski vezmi. Montažna izdelava modularnih enot dodatno poveča možnost ponovne uporabe opek.

4.4. Jeklo

Jeklo ki je material, je vsesplošno uporaben v gradbeništvu zaradi velike trpežnosti in prilagodljivosti, kar omogoča izdelavo relativno lahkih konstrukcij. Uporablja se v skoraj vseh nosilnih elementih. Okoli 50 % svetovnega povpraševanja po jeklu je povezano z gradnjo infrastrukture in stavb. Proizvodnja jekla je skupaj s cementom glavni vir toplogrednih izpustov, ki vplivajo na globalno segrevanje. Glede na informacije World steel organization iz leta 2023 proizvodnja ene tone jekla povzroči 1,9 ton izpustov ogljikovega dioksida, kar ustreza približno 8 % svetovnih izpustov CO₂. Kljub temu je jeklo 100 % reciklabilen material in skoraj v celoti ohranja svoje prvotne lastnosti ob ponovni uporabi. Jeklo se lahko reciklira znova in znova za izdelavo novega jekla. Težava, povezana z recikliranjem jekla je relativno visoka poraba energije. Kljub temu se reciklirano jeklo, uporabljeno v novih zgradbah, lahko šteje za material z nizkim ogljičnim odtisom.

V primeru rušenja stavbe ali drugih konstrukcij se jeklo običajno ločeno zbira za recikliranje, zato je recikliranje običajna praksa ravnanja s tovrstnim odpadnim materialom. Pri selektivnem rušenju se lahko nekateri jekleni elementi, kot so nosilci in stebri, ponovno uporabijo. Ponovna uporaba ob koncu življenjske dobe običajno vključuje peskanje jeklenega elementa za odstranitev barve, nato pa ponovno barvanje (nanašanje nove barve in cinka kot zaščitnega sloja).

4.5. Geopolimeri

Beseda »geopolimer« se nanaša na amorfni silikoaluminat alkalijske kovine, za katerega je značilna ponavljajoča se sialatna monomerna enota (-Si-O-Al-O-) (Duxson et al., 2007). Geopolimer, ki velja za cement tretje generacije, služi kot alternativa apnu in Portlandske-mu cementu. Geopolimerni beton je mogoče proizvesti s polimerizacijo aluminosilikatov, kot so elektrofiltrski pepel, metakaolin, žindra, pepel iz riževih luščin in lesni pepel z visoko vsebnostjo kalcija, z aktivacijo z uporabo alkalne raztopine. Učinkovitost pri proizvodnji geopolimernega betona je močno odvisna od aktivatorjev in vrst aluminosilikatov. Proizvodni proces geopolimernega betona običajno odpravlja potrebo po OPC, ki je najpogosteje uporabljen cement v betonski mešanici. Geopolimeri izkazujejo obetaven potencial kot veziva za trajnostne gradbene materiale, saj izkazujejo nizko prepustnost, odlično kemično odpornost in izjemno odpornost na požar. Pogosto se uporablja tudi kot nizko-ogljični material, saj proizvodni proces zahteva manj energije v primerjavi s cementom. Ugotovljeno je bilo, da uporaba geopolimernega betona kot alternative običajnemu betonu iz Portlandskega cementa povzroči do 80% zmanjšanje ogljičnega odtisa, odvisno od uporabljenega prekursorja in aktivatorja.

4.6. Asfaltni rezkanec

Asfaltni rezkanec je recikliran nizko-ogljični material, ki se uporablja pri gradnji cest. Asfaltni rezkanec je sestavljen iz asfalta in agregatov, pridobljenih iz obstoječih asfaltnih vozišč, ki so bili odstranjeni, pogosto med vzdrževanjem ali rekonstrukcijo cest.

Asfaltni rezkanec služi kot dragocen vir agregatov in bitumna. Vključevanje asfaltne rezkanca v proizvodnjo asfalta ne zmanjšuje zgolj potrebe po izkoriščanju mineralnih virov, ampak tudi zmanjša odvisnost od fosilnih goriv pri proizvodnji bitumna. Asfaltni zmesi lahko splošno razdelimo na »vroče« in »hladne«. Upoštevajoč lokacijo proizvodnje asfaltnih zmesi ločimo proizvodnjo na mestu vgradnje in proizvodnjo v obratu (asfaltni bazi). Asfaltni rezkanec se lahko na mestu vgradnje zmeša z drugimi surovinami za proizvodnjo vroče

asfaltne mešanice, čemur sledijo standardni postopki asfaltiranja. V primeru recikliranja asfaltnega rezkanca v obratu, se odpadni asfalt pripelje do asfaltne baze, kjer se skladišči in predela. Pridobljen asfalti rezkanec se obravnava kot surovina za proizvodnjo vročih mešanic. Koristi recikliranja v asfalti bazi se nanašajo predvsem na prihranek materialov, ki jih vsebuje asfalti rezkanec (bitumen in naravni agregat). Proizvodnja teh materialov je povezana s toplogrednimi in drugimi izpusti. Prihranek primarnih materialov, povezanih z recikliranjem asfaltnega rezkanca, lahko povzroči zmanjšanje toplogrednih in drugih izpustov.

Hladno recikliranje na licu mestu temelji na uporabi penjenega bitumna. S tem postopkom se z uporabo ustrezne mehanizacije materiale vgrajene v cesto porezka, zmeša s penjenim bitumnom in ponovno vgradi v cestišče. Ta postopek se razlikuje od drugih postopkov recikliranja asfalta, ker agregatov ni potrebno segreti. Na ta način se zmanjša poraba energije in posledično tudi izpusti – vključno s toplogrednimi.

Nekateri primeri iz literature, ki kažejo zmanjšanje toplogrednih izpustov zaradi recikliranja asfaltnega rezkanca, so naslednji. Giustozzi in sodelavci (2012) so proučevali ogljični odtis rekonstrukcije letališke steze. Primerjali so dva scenarija: rekonstrukcija obstoječega asfalta z (1) uporabo naravnih agregatov in bitumna in (2) z uporabo recikliranih agregatov (85 %). V slednjem primeru so se toplogredni izpusti zmanjšali za 35 %. Chappat in Bilal (2003), Chehovits in Galehouse (2010) ter Cross in Chesner (2011) so preučevali porabo energije in toplogredne izpuste, pri različnih načinih rekonstrukcije cestišča in vzdrževalnih del.

Uporaba asfaltnega rezkanca pri gradnji cest ponuja več okoljskih in finančnih koristi:

- Ohranjanje virov: uporaba asfaltnega rezkanca v novih asfaltnih zmeseh ohranja naravne vire zaradi ponovne uporabe materialov iz obstoječih cestišč.
- Prihranek energije: Proizvodnja asfalta iz asfaltnega rezkanca običajno zahteva manj energije v primerjavi s proizvodnjo klasičnega asfalta iz primarnih surovin. To prispeva k zmanjšanju toplogrednih izpustov.
- Stroškovna učinkovitost: uporaba asfaltnega rezkanca je lahko stroškovno učinkovita, saj zmanjšuje potrebo po novih surovinah in zmanjšuje stroške odlaganja odpadkov (odpadnega asfalta).
- Izboljšana trajnostnost: S ponovno uporabo obstoječih materialov (asfaltnega rezkanca) se spodbuja okoljska trajnostnost pri gradnji cest.

Potrebno je omeniti da so okoljski vplivi oziroma trajnostnost projektov gradnje cest odvisni od različnih dejavnikov, vključno z odstotkom uporabljenega asfaltnega rezkanca, celotno zasnovano asfaltne mešanice in transportnimi razdaljami. Kljub temu se vgradnja asfalta z vsebnostjo asfaltnega rezkanca na splošno šteje za pozitiven korak h krožnim, bolj trajnostnim in nizko-ogljicnim praksam gradnje cest.

4.7. Izkopana zemljina

Izkopni material nastane med izkopom ali odstranjevanjem zemljine in drugih naravnih materialov.

Izkopni material je treba pred kakršno koli uporabo temeljito karakterizirati, s strani pooblaščenega strokovnjaka ali inštitucije. Glede na določen kakovostni razred lahko Izkopni material uporabimo za različne namene, vključno z namenom sanacije površin. Za več podrobnosti o uporabi glejte Tabela 2.

4.8. Ostali nizko-ogljčni materiali

Drugi široko uporabljeni razmeroma nizko-ogljčni gradbeni materiali so **steklo, mavčne plošče** in različne vrste **izolacijskih materialov**.

Zid iz zbite zemlje in **konopljin beton** sta nizko-ogljčna gradbena materiala, katerih uporaba je manj razširjena, kot uporaba običajnih gradbenih materialov. Njuna koristnost je vse bolj prepoznavna v smislu trajnostnosti. Z večanjem okoljske ozaveščenosti in naraščajočim povpraševanjem po bolj ekoloških gradbenih praksah postajajo nišni gradbeni materiali vse bolj priljubljeni med arhitekti, gradbeniki in lastniki nepremičnin.

Zid iz zbite zemlje vključuje naravne surovine, kot so zemlja, kreda, apno ali gramoz. Tovrstna tehnika gradnje je znana po dobri toplotni izolativnosti in prispeva k boljši energetski učinkovitosti stavb. Konopljin beton je kompozitni gradbeni material, narejen iz konopljinih vlaken, zmešanih z apnom in vodo. Konopljin beton je cenjen zaradi nizkega okoljskega odtisa (veže biogeni ogljik) in dobrih izolacijskih sposobnosti.

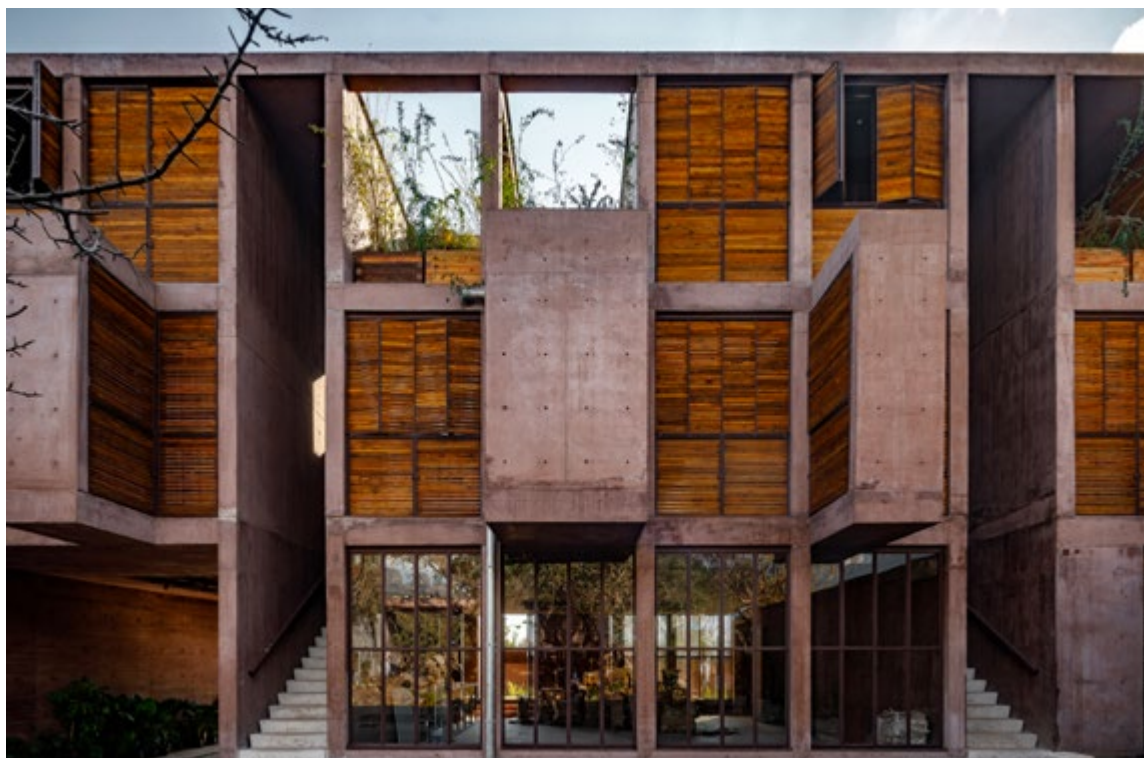
Dotatne informacije o praksah recikliranja in ponovne uporabe različnih gradbenih proizvodov/materialov po koncu njihove življenjske dobe so opisane v dokumentu »Varno uporaba sekundarnih gradbenih materialov - Informacijski paket za proizvajalce«. V tem dokumentu so predstavljeni tudi primeri ravnanja z odpadnimi gradbenimi materiali nastalimi po rušenju objekta.

4.9. Izbrani primeri: Stavbe zgrajene z uporabo krožnih in nizko-ogljčnih gradbenih materialov

Hotel Tepoztlán (Mehika, 2020):

- zidovi in tlak: lokalni kamen,
- vidni beton z naravnimi pigmenti,
- leseni opaž, uporabljen pri gradnji, je bil predelan v pohištvo ali talne obloge.

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



Cheops Observatory Residence / Studio Malka Architecture, Nekropola Giza (Egipt, 2020):

- lokalne gradbene tehnike,
- uporabljeni reciklirani materiali.

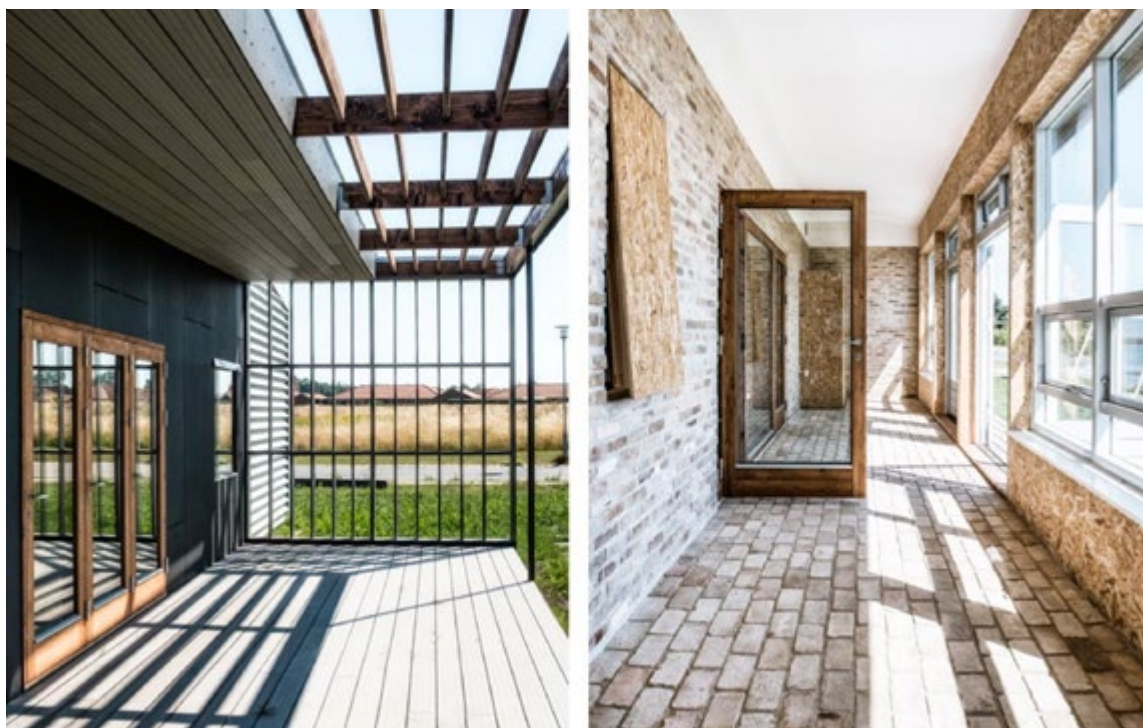
Silka 3: Cheops Observatory Residence [vir: <https://www.designboom.com/architecture/studio-malka-cheops-observatory-pyramid-giza-03-05-2020/>]



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

- hiša zgrajena s poudarkom na recikliranju in predelavi materialov,
- uporabljeni odpadni materiali,
- materiali preoblikovani v gradbene materiale z večjo vrednostjo.

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



5. Analiza življenjskega cikla

Z vrednotenjem okoljskih odtisov posameznih gradbenih materialov ali elementov je mogoče oceniti celotni okoljski odtis stavbe. Sicer pa so okoljski odtisi stavbe povezani z:

- Načrtovanjem in gradnjo stavbe (uporaba materialov in elementov),
- Porabo energije in vode v fazi rabe stavbe,
- Ravnanje s stavbo in njenimi gradniki po koncu njene uporabnosti (primernost materialov in elementov za ponovno uporabo, recikliranje itd.).

Ocena življenjskega cikla (LCA) je metoda za vrednotenje okoljskih vplivov (oz. odtisov) proizvoda ali postopka. Okoljski vplivi se v idealnem primeru vrednotijo skozi celoten življenjski cikel zgradbe ali objekta.

LCA se izvaja v skladu z načeli opredeljenimi v mednarodnih standardih ISO 14040:2006 in ISO 14044:2006, priročniku ILCD in evropskem standardu EN 15804:2012. +A2:2019 (Trajnostnost gradbenih objektov – Okoljske deklaracije za proizvode – Skupna pravila za kategorije proizvodov za gradbene proizvode).

Izvedba analize LCA poteka v štirih korakih:

1. Opredelitev cilja in obsega študije, ter opredelitev funkcionalne/deklarirane enote, sistemskih meja ter vseh predpostavk in omejitev študije LCA.
2. Inventarna analiza: inventar vseh vhodnih in izhodnih snovnih in energetskih tokov v in iz proučevanega sistema, kot so poraba vode, energije in surovin ter opredelitev izpustov v zrak, tla in vodo.
3. Določanje okoljskih vplivov, s ciljem ovrednotiti pomen in obseg potencialnih vplivov na okolje.
4. Interpretacija rezultatov analize LCA, kjer se povzamejo in ovrednotijo ugotovitve.

Sistemske meje so odvisne od zastavljenega cilja in obsega študije LCA. Sistemske meje so običajno definirane kot: “od zibelke do vrat” ali “od zibelke do groba”.

Od zibelke do vrat: sistemske meje se nanašajo na fazo proizvodnje proizvoda, ki vključuje pridobivanje vhodnih surovin, njihov prevoz do tovarne in proizvodnjo končnega proizvoda.

Od zibelke do groba: sistemske meje poleg proizvodne proizvoda vključujejo še vse druge faze življenjskega cikla: fazo vgradnje, fazo rabe in fazo po koncu življenjske dobe (razgradnja, odvoz, predelava oz. odlaganje odpadkov).

Če metodo LCA uporabljamo kot pomoč pri snovanju ekoloških proizvodov, je pomembno vključiti potencial recikliranja proizvodov, to pomeni, da je treba sistemske meje razširiti (t.i. pristop od zibelke do zibelke).

Tabela 3: Faze, vključene v celoten življenjski cikel, upoštevajoč modularni pristop

SISTEMSKE MEJE																
Faza proizvoda			Faza vgradnje		Faza rabe							Faza po koncu življenjske dobe			Koristi in obremenitve izven meja sistema	
Pridobivanje surovin	Transport	Proizvodnja	Transport	Vgradnja	Raba	Vzdrževanje	Popravila	Zamenjava	Obnova	Raba energije med obratovanjem	Raba vode med obratovanjem	Demontaža	Transport	Predelava odpadkov	Odlaganje odpadkov	Ponovna uporaba, obnova, reciklaža
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Sistemske meje po modularni strukturi, kot je opredeljena v standardu EN 15804 (Tabela 2). Opis posameznih modulov je sledeč:

- Faza proizvoda:**
- A1:** pridobivanje in predelava surovin, predelava sekundarnih materialov (npr. postopki priprave materiala na rabo v novem življenjskem ciklu);
 - A2:** prevoz vhodnega materiala od proizvajalca do proizvodnega obrata;
 - A3:** proizvodnja;
- vklučno z zagotavljanjem vseh materialov in energije, s končno predelavo ali odstranjevanjem odpadkov med fazo proizvodnje izdelka.
- Faza vgradnje:**
- A4:** transport do gradbišča
 - A5:** vgradnja v zgradbo
- vklučno z zagotavljanjem vseh materialov, izdelkov in energije ter predelavo odpadkov do konca statusa odpadka ali odlaganjem odpadkov nastalih v fazi vgradnje. Ti informacijski moduli vključujejo tudi vse vplive in vidike, povezane z morebitnimi izgubami v tej fazi gradbenega procesa (tj. proizvodnja, transport in predelava odpadkov ter odlaganje odpadnih materialov).
- Faza rabe:**
- B1:** uporaba ali uporaba nameščenega izdelka;
 - B2:** vzdrževanje;
 - B3:** popravilo;
 - B4:** zamenjava;
 - B5:** obnova;
 - B6:** poraba obratovalne energije (npr. delovanje ogrevalnega sistema in drugih inštaliranih naprav, povezanih z rabo stavbe);
 - B7:** obratovalna poraba vode
- Vklučno z zagotavljanjem vseh materialov, izdelkov in energije ter predelavo odpadkov do konca statusa odpadka ali odlaganjem odpadnih materialov nastalih v fazi rabe. Ti informacijski moduli vključujejo tudi vse vplive in vidike, povezane z morebitnimi izgubami v tej fazi gradbenega postopka (tj. proizvodnja, prevoz in predelava odpadkov ter odlaganje odpadnih materialov).
- Faza po koncu življenjske dobe:**
- C1:** razgradnja, rušenje;
 - C2:** prevoz do predelave odpadkov;
 - C3:** predelava odpadkov za ponovno uporabo, predelavo in/ali recikliranje;
 - C4:** odlaganje
- vklučno z zagotavljanjem vseh materialov in energije, oskrbe z vodo, predelavo odpadkov ali odstranjevanjem stranskih produktov v fazi po izteku življenjske dobe.
- Koristi in obremenitve izven meja sistema:**
- D:** potenciali ponovne uporabe, predelave in/ali recikliranja, izraženi kot okoljski vplivi in koristi.

Kako v metodi LCA obravnavati pricip krožnosti? Vključevanje pricipa krožnosti v metodo LCA vključuje prepoznavanje in upoštevanje okoljskih koristi, povezanih z uporabo in recikliranjem gradbenih proizvodov, v primerjavi s proizvodnjo novih gradbenih proizvodov. Ponovna uporaba lahko pomaga preprečiti okoljske vplive, povezane tako s pridobivanjem surovin kot tudi z izdelavo proizvodov, medtem ko je recikliranje predvsem povezano s preprečevanjem pridobivanja primarnih surovin. Iz tega razloga so okoljske koristi, pripisane ponovni uporabi, pogosto večje od okoljskih koristi pripisanih recikliranju.

V metodi LCA obstaja več metodoloških pristopov za vrednotenje koristi povezanih s ponovno uporabo gradbenih proizvodov/materialov ali elementov. Med uporabniki metode LCA glede tega vprašanja še ni doseženega enotnega konsenza.

V kontekstu načrtovanja za razgradnjo se upošteva dejstvo, da ima vsak gradbeni element ali komponenta vgrajena v stavbo svojo specifično življenjsko dobo. V takšnih primerih bi lahko LCA stavbe ovrednotili z uporabo funkcionalne enote, kjer bi bile emisije v življenjskem ciklu vsake komponente deljene s historično in pričakovano življenjsko dobo te komponente (v letih). Možnost za vrednotenje okoljskih odtisov, povezanih s ponovno uporabo komponente, bi lahko bila uporaba t.i. preostale življenjske dobe (v letih) do izteka pričakovane življenjske dobe (v letih). Tako imenovana preostala življenjska doba komponente se lahko uporabi kot kompenzacijski faktor za izračun LCA stavbe. Ta pristop omogoča bolj poglobljeno razumevanje okoljskih vplivov, povezanih s ponovno uporabo gradbenih elementov/komponent.

5.1. Primeri vrednotenja okoljskih odtisov gradbenih proizvodov

5.1.1. Betoni z uporabo sekundarnih materialov

LCA kot orodje za primerjavo proizvodnje tradicionalnega betona in betona z uporabo sekundarnih materialov:

- tradicionalni beton
- beton z uporabo elektrofiltrskega pepela (uporabljen kot delna zamenjava cementa)
- beton z uporabo livarskega peska (uporabljen kot delna zamenjava naravnega agregata in cementa)
- beton z uporabo jeklarske žindre (uporabljena kot delna zamenjava naravnega agregata)
- beton z uporabo recikliranega agregata (uporabljen kot delna zamenjava naravnega agregata)

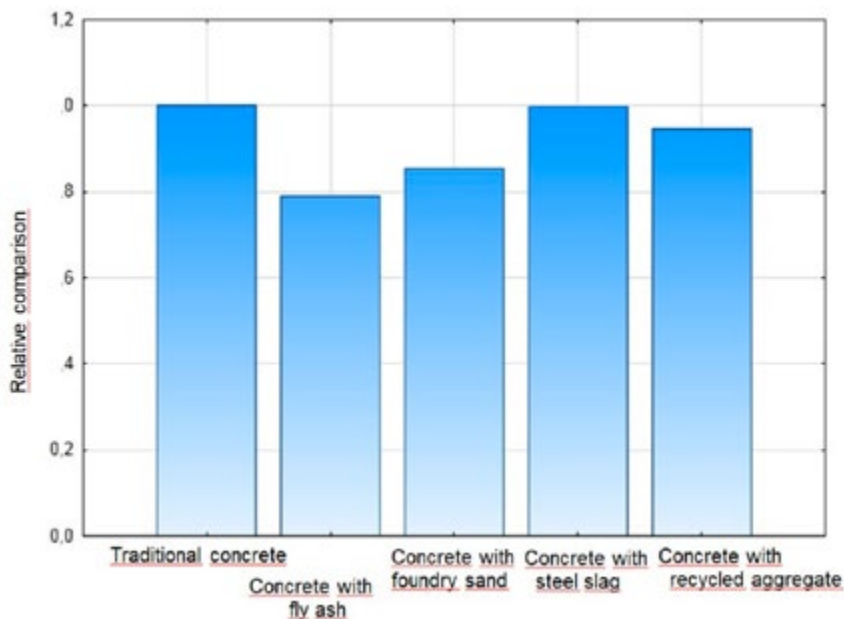
Vse betoni imajo podobne tlačne trdnosti in trajnosti.

Rezultati LCA so naslednji (glejte tudi sliko 2):

- Beton z uporabo elektrofiltrskega pepela:
zmanjšanje ogljičnega odtisa za 21 %
- Beton z uporabo livarskega peska:
zmanjšanje ogljičnega odtisa za 18 %
- Beton z uporabo jeklarske žindre:
brez zmanjšanja ogljičnega odtisa
- Beton z uporabo recikliranega agregata:
zmanjšanje ogljičnega odtisa za 7 %

Podrobnejše informacije so navedene v članku Turk in sodelavci (2015).

Potencial globalnega segrevanja (ogljčni odtis) 1 m³ betona.



5.1.2. Obrabna asfaltna plast

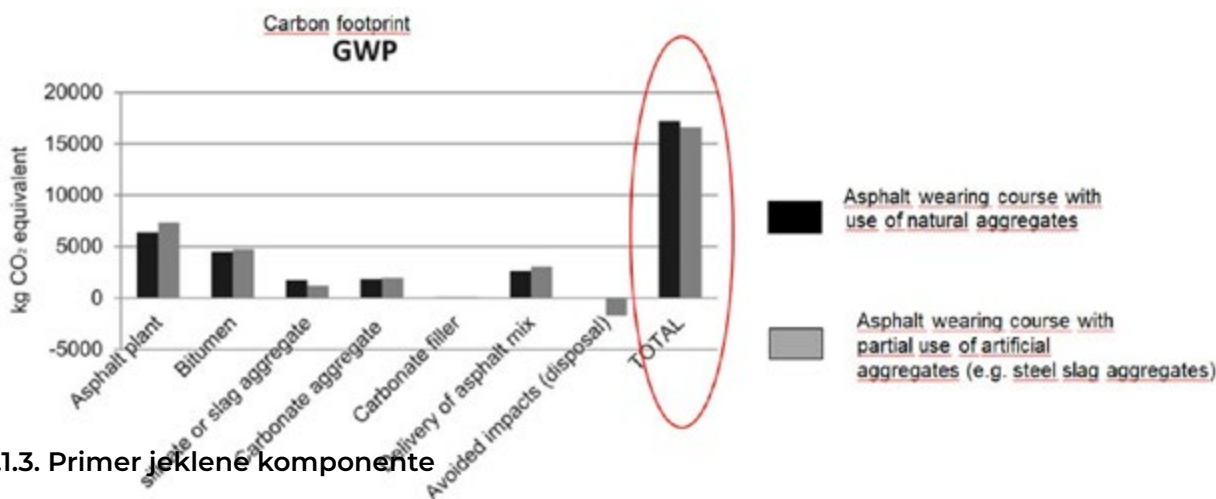
LCA kot orodje za primerjavo dveh scenarijev v primeru proizvodnje obrabne asfaltna plasti:

1. Proizvodnja asfaltna mešanice za obrabno asfaltna plast z uporabo običajnih gradbenih agregatov (karbonatni in silikatni agregati).
2. Proizvodnja asfaltna mešanice za obrabno asfaltna plast z uporabo umetnega agregata (EAF C žlindra) namesto silikatnega agregata.

Rezultati analize LCA kažejo, da uporaba umetnega agregata (jeklarska žlindra) za proizvodnjo asfaltna mešanice za obrabno plast povzroči zmanjšanje ogljičnega odtisa za približno 5% (slika 3).

Podrobnejše informacije so na voljo v članku Mladenovič in sodelavci (2014).

Silka 6: Potencial globalnega segrevanja (ogljčni odtis) 1 m³ tradicionalnih in alternativnih asfaltnih mešanic, namenjenih uporabi za obrabno plast cestišča.



5.1.3. Primer jeklene komponente

Varesa in sodelavci (2019) so izvedli študijo, v kateri so primerjali okoljske vplive v življenjskem ciklu industrijske stavbe. V sistemskih mejah analize LCA so upoštevali rušenje stare stavbe in gradnjo nove industrijske stavbe. Primerjali so okoljske odtise, povezane s ponovno uporabo jeklenih komponent iz porušene stavbe v novi stavbi (en scenarij), z novogradnjo, v kateri se uporabijo nove jeklene konstrukcije (drug scenarij).

Upoštevajoč rezultate LCA znašajo toplogredni izpusti v prvem scenariju 686 kg CO₂ ekv./m², izpusti v drugem scenariju pa znašajo 605 kg CO₂ ekv./m² (v primeru ponovne uporabe jeklenih komponent). Zmanjšanje potenciala globalnega segrevanja (ali ogljičnega odtisa) v življenjski dobi stavbe je torej 12 %, če upoštevamo ponovno uporabo jeklenih komponent.

6. Povzetek in sklep

Gradbeni sektor prispeva približno tretjino vseh globalnih toplogrednih izpustov. Ker so novo-gradnje energetske vse bolj učinkovite (zmanjšana poraba operativne energije), bi morali več pozornosti posvetiti vgrajenim materialom in elementom. Pozornost mora biti na energiji in izpustih, ki so vgrajeni v uporabljene gradbene material/elemente. Gradbeni sektor bi se moral osredotočiti na znižanje okoljskih odtisov gradbenih proizvodov/materialov, na izhodu iz proizvodnih linij, ter tudi na znižanje okoljskih odtisov po koncu življenjske dobe stavb (ustrezno ravnanje z gradbenimi odpadki: ponovna uporaba, recikliranje itd.).

V tej smernici podajamo napotke namenjene odločevalcem in drugim interesentom, kako narediti gradbeni sektor bolj okoljsko trajnosten in bolj usklajen z načeli krožnega gospodarstva. Opisani so pristopi in priporočila za zmanjšanje okoljskega odtisa (zlasti ogljičnega odtisa) gradbenih proizvodov/materialov. Pristopi temeljijo predvsem na vključevanju uporabe bio-osnovanih materialov, materialov z vsebnostjo reciklatov, koristni uporabi odpadnih (sekundarnih) materialov in na načelih krožnega gospodarstva (na primer, ohranjanje surovin, ki sestavljajo proizvode, v uporabi dlje časa, in regeneracija surovin v visokovredne proizvode po koncu življenjske dobe prvotnih proizvodov).

V tej smernici je predstavljen seznam možnih krožnih in nizko-ogljčnih gradbenih materialov. Pri vsakem gradbenem materialu iz seznama je opisana njegova uporaba, krožnost (ravnanje po koncu njegove življenjske dobe) in okoljska trajnostnost. Poudariti je treba, da je seznam poljuben in kot tak nepopolen, ter da predstavlja le primer gradbenih materialov. Odločitev o tem, katere gradbene materiale uporabiti v določenih gradbenih projektih, je odvisna od posameznega primera in je ni možno posplošiti.

V smernici smo na kratko predstavili metodo LCA (analiza življenjskega cikla). Ta metoda predstavlja najbolj primerno orodje za vrednotenje ogljičnega odtisa in drugih okoljskih odtisov gradbenih proizvodov/materialov in stavb. Na podlagi treh praktičnih primerov smo skušali interesentom pomagati pri razumevanju uporabe te metode. Primeri vključujejo primerjavo proizvodnje različnih gradbenih materialov (tradicionalnih in alternativnih z uporabo sekundarnih materialov) ter primerjavo linearnih in krožnih postopkov ravnanja odpadnimi gradbenimi materiali.

7. Seznam literature

Ahn, N., Dodoo, A., Riggio, M., Muszynski, L., Schimleck, L., Puettmann, M., 2022: Circular economy in mass timber construction: State-of-the-art, gaps and pressing research needs. *Journal of Building Engineering* 53, 104562.

Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., El-Zeadani, M., 2020. Clean production and properties of geopolymers concrete; A review. *J. Clean. Prod.* 251, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>

Andabaka, A., 2023: Circular Construction Principles: From Theoretical Perspective to Practical Application in Public Procurement.

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: Life cycle assessment of energy efficient buildings. *Energy Reports* 6, 270-285. DOI:10.1016/j.egy.2020.11.144

Blengini, G.A., Garbarino, E., 2010. Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *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: Use of Recycled Aggregates for Low Carbon and Cost Effective Concrete Construction. *Journal of Cleaner Production* 189, DOI:10.1016/j.jclepro.2018.04.090

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

Carpenter, A.C., Gardner, K.H., 2009. Use of industrial by-products in urban roadway infrastructure. *Argument for increased industrial ecology. J. Ind. Ecol.* 13 (6), 965-977. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00175.x>.

Chappat, M., Bilal, J., 2003. *The environmental road of the future: Life cycle analysis, energy consumption & greenhouse gas emissions*. Colas group.

<http://www.colas.com/FRONT/COLAS/upload/com/pdf/route-future-english.pdf>

Chehovits, J., Galehouse, L., 2010. Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements. First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach CA, USA, 13 to 15 April 2010.

https://www.pavementpreservation.org/icpp/paper/65_2010.pdf

Cheung, 2003. *Use of Recycled Asphalt Pavement — A Practical Approach to Asphalt Recycling*.

cityloops.eu, 2023: *Circular construction in Europe: handbook for local and regional governments* https://cityloops.eu/fileadmin/user_upload/Resources/City-Loops-Circular-Construction-handbook.pdf

Cross, S.A., Chesner, W.H., 2011. Life cycle environmental analysis for the evaluation of pavement rehabilitation options. 90th Annual meeting of the Transportation Research Board, January 23-27, 2001, Washington, D.C.

D'Amico, B., Pomponi, F., Hartet, J., 2021: Global potential for material substitution in building construction: The case of cross laminated timber. *Journal of Cleaner Production* 279, 123487.

D'Amico, B., Pomponi, F., Hart, J., 2021: Global potential for material substitution in building construction: the case of cross laminated timber. *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. Life cycle assessment of completely recyclable concrete. *Materials* 7, 6010–6027. <http://dx.doi.org/10.3390/ma7086010>.

de Graaf, D., Schuitemaker, S., 2022: Circular Buildings: constructing a sustainable future Materials in buildings

Dumée, L.F. Circular Materials and Circular Design—Review on Challenges Towards Sustainable Manufacturing and Recycling. *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. Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* 42, 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

Ellen MacArthur Foundation, 2013: SUN, and McKinsey Center for Business and Environment; Drawing from Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C)

Faleschini, F., De Marzi, P., Pellegrino, D., 2014. Recycled concrete containing EAF slag: environmental assessment through LCA. *Euro. J. Environ. Civil Eng.* 18 (9),1009–1024. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.922505>.

Ferrer Polancos, C.J., 2009: ANNEXURE 4 ECO-FRIENDLY BUILDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES Eco-housing Assessment Criteria -Version II. *ECO Housing - Building a better tomorrow*. Accessible on 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. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *Int. J. Life Cycle Assess.* 12 (5), 282–288.

Fort, J., Černý, R., 2020: Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. *Waste Management* 118 (2020) 510–520

Giustozzi, F., Toraldo, E., Crispino, M., 2012. Recycled airport pavements for achieving environmental sustainability, an Italian case study. *Resources, Conservation and Recycling* 68, 67-75. doi:10.1016/j.resconrec.2012.08.013

Grazieschi, G., 2022: Circularity and Low-Carbon Building Materials in Construction (Overview Article). <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-circularity-and-low-carbon-building-materials> Accessed 6th October 2023.

Gruhle, K., Schiller, G., 2023: Grey energy impact of building material recycling – a new assessment method based on process chains. *Resources, Conservation & Recycling Advances* 18, 200139.

Heijungs, R., Guinée, J.B., 2007. Allocation and “what-if” scenarios in life cycle assessment of waste management systems. *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. An approach to LCSA: the case of concrete recycling. *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 asphalt pavements. *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. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *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: Structural properties and non-destructive evaluation. *Construction and Building Materials* 339 (2022) 127635

Magwood, C., 2019: Opportunities for carbon dioxide removal and storage in building materials. Doctoral thesis, Sustainability Studies M.A. Graduate Program, Trent university, Peterborough, Ontario, Canada.

Marceau, M.L., Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., 2007. Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete. PCA R&D Serial No. 3007, Portland Cement Association 2007.

Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I., 2010. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *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. Environmental evaluation of two scenarios for the selection of materials for asphalt wearing courses. *J. Cleaner Prod.* 87, 683–691. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.013>.

Mroueh, U.M., Wahlström, M., 2002. By-products and recycled materials in earth construction in Finland – an assessment of applicability. *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. *Int. J. Life Cycle Assess.* 14, 621–629. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-009-0105-5>.

Orsini and Marrone, 2019: Approaches for a low-carbon production of building materials: A review. *Journal of Cleaner Production* 241 (2019) 118380.

Ortiz, O., Pasqualino, J.C., Castells, F., 2010. Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste Manage.* 30, 646–654. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.013>.

Pastori, S., Mazzucchelli, E., Wallhagen, M., 2022: Hybrid timber-based structures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 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. Roles of the reference service life (RSL) of buildings and the RSL of building components in the environmental impacts of buildings. *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: Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: 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: Laminated Timber or Reinforced Concrete. *Buildings* 2(4), 245–70.

Rosado, L., Kalmykova, Y., Patrício, Y., 2017: Reprint of: Urban metabolism profiles. An empirical analysis of the material flow characteristics of three metropolitan areas in Sweden. *Journal of Cleaner Production* 163, 254-266.

Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K., 2015. Geopolymer concrete: 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: *The Circular Economy: A User's Guide*. 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. *Infrastructures* 6, 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6020026>

Thenoux, G., Gonzalez, A., Dowling, R., 2007. Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in 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: Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management. With a view to support the feasibility assessment of preparation for re-use and recycling targets for individual material fractions. *JRC Science for policy report*.

Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A., Aljoša, Š., 2015: Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management* 45, 194-205.

Van den Heede, P., De Belie, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: literature review and theoretical calculations. *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: 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: Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment. Lit. Rev. 135, 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.litrev.2017.05.001>.

Weil, M., Jeske, U., Schebek, L., 2006. Close-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. Waste Manage. Res. 24, 197–206. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X06063686>.

World Green Building Council, 2022: Annual Report. https://worldgbc.org/wp-content/uploads/2022/12/WorldGBC-Annual-Report-2022_FINAL-version_LR.pdf

World steel Association. (2023) Sustainability Indicators 2023 report, <https://worldsteel.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: The technical or biological loop? Economic and environmental performance of circular building components.

Zhang, J., Cheng, J.C.P., Lo, I.M.C., 2014. Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong. Int. J. Life Cycle Assess. 19, 745–757. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0689-7>.

Seznam slik

Slika 1: Diagram krožnega gospodarstva. (Vir: Ellen MacArthur Foundation, 2013)

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

Slika 3: Cheops Observatory Residence [vir: <https://www.designboom.com/architecture/studio-malka-cheops-observatory-pyramid-giza-03-05-2020/>]

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

Slika 5: Potencial globalnega segrevanja (ogljčni odtis) 1 m³ betona.

Slika 6: Potencial globalnega segrevanja (ogljčni odtis) 1 m³ tradicionalnih in alternativnih asfaltnih mešanic, namenjenih uporabi za obrabno plast cestišča.

Seznam tabel

Tabela 1: Ogljik vgrajen v različne gradbene materiale (Vir: Calkins, 2009).

Tabela 2: Seznam gradbenih materialov, ki veljajo za krožne in imajo relativno nizko ogljično sled.

Tabela 3: Faze, vključene v celoten življenjski cikel, upoštevajoč modularni pristop



V projektu sodelujejo:



Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

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

Mnenja, ki so izražena v tej publikaciji, so odgovornost avtorja(-ev) in ne izražajo nujno stališča Zveznega ministrstva za gospodarstvo in podnebno politiko (BMWK).

