

Martina Zbašnik–Senegačnik, Ljudmila Koprivec: GRADBENI ODPADKI KOT SUROVINA V TRAJNOSTNEM GRAJENEM OKOLJU

CONSTRUCTION WASTE AS A RESOURCE IN A SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENT

DOI: <https://dx.doi.org/10.15292/IU-CG.2019.07.028-036> ■ UDK: 628.477.6 ■ SUBMITTED: October 2020 / REVISED: November 2020 / PUBLISHED: November 2020

1.02.Pregledni znanstveni članek / Review Article

POVZETEK

Grajeno okolje zahteva čedalje večje količine surovinskih virov, hkrati pa nosi pomemben del odgovornosti za nastajajoče odpadke. Do odpadkov prihaja v celotnem življenjskem ciklusu, čeprav se v začetnih fazah nastajanja gradiv deklarirajo kot industrijski odpadki, ob gradnji, obnovi in rušitvi objektov pa prihaja do gradbenih odpadkov. Gradbeni odpadki, ki so sicer med vsemi najbolj voluminozni, imajo velik potencial v krožnem gospodarstvu. Vračanje odsluženih gradiv in komponent med surovinske vire bo omogočilo zaprt krog življenjskega ciklusa gradiv, brez odpadkov, ki bi končali izven gradbenega sektorja.

Trajnostna načela gradnje vključujejo štiri osnovne strategije – izogibanje odpadkom, ponovno uporabo gradiv in komponent, njihovo nadaljnjo uporabo in recikliranje. Možnost obdelave gradbenih odpadkov in njihovega vračanja v proces gradnje je odvisna od vrste prevladujočih materialov, ki sestavljajo konstrukcijske elemente stavbe in ločljivosti/neločljivosti konstrukcijskih zvez. Arhitekt ima odgovorno nalogo pri zmanjševanju količin gradbenih odpadkov, saj zasnova stavbe postaja ključna pri obvladovanju gradbenih odpadkov. Konstrukcija s potencialom za smotno razgradnjo na koncu življenjske dobe stavbe vključuje več konceptov – izbor gradiv z nizkim potencialom obremenjevanja z gradbenimi odpadki, projektiranje razstavljivih kompozitnih gradiv in konstrukcij ter projektiranje enovitih konstrukcij. V prispevku so evidentirani odpadki, ki nastajajo zaradi grajenega okolja. Predstavljeni so koncepti arhitekturnih zasnov s potencialom zmanjšanja količin gradbenih odpadkov in njihovega vračanja med surovinske vire.

KLJUČNE BESEDE

gradbeni odpadki, krožno gradbeništvo, recikliranje, ponovna uporaba, urbano rudarjenje, digitalni potni list gradiv

ABSTRACT

The built environment requires ever-increasing amounts of raw material resources and at the same time bears the responsibility for the resulting waste. Waste is generated throughout the life cycle. In the initial phases it is referred to as industrial waste, while during construction, reconstruction, and demolition it is called construction waste. Construction waste is most voluminous but it also has a great potential in circular economy that aims at the closed loop cycle where already used construction materials and components are recovered as raw materials.

Sustainable building principles include four basic strategies, waste avoidance, construction materials and components re-use, continued use, and recycling. The possibility of construction waste treatment and its possible recovery in the building process depends on the type of prevailing materials that are contained in building elements as well as on detachability, separability and inseparability of structural joints and components. The architect plays a responsible role in decreasing the volume of construction waste as the conception of a building represents the key factor in sustainable construction waste management. Planning a construction with a good dismantling potential at the end of the building's life cycle includes a number of factors such as the choice of building materials with a low environmental impact, the design of detachable composite materials and structures as well as the design of mono material structures. This article focuses on waste resulting from the built environment and discusses architectural concepts with a potential of reducing the volume of construction waste and its potential recovery as a construction resource.

KEY-WORDS

construction waste, circular economy, recycling, reuse, urban mining, digital material passport

UVODNIK
EDITORIAL
ČLANEK
ARTICLE

RAZPRAVA
DISCUSSION
RECENZIJA
REVIEW
PROJEKT
PROJECT
DELAVNICA
WORKSHOP
NATEČAJ
COMPETITION
PREDSTAVITEV
PRESENTATION
DIPLOMA
MASTER THESIS

1. UVOD

Svet se sooča s čedalje večjim pomanjkanjem surovin, hkrati pa še nikoli v zgodovini ni nastajalo toliko odpadkov kot danes. Gradbeni sektor je velik porabnik naravnih surovinskih virov in je odgovoren za velik delež odpadkov.

Grajeno okolje sestavljajo gradiva, katerih življenjski cikel je sestavljen iz šestih faz – začne se z izplenjevanjem surovin v naravi, konča pa kot gradbeni odpadke na deponijah (Zbašnik-Senegačnik, 1996). Poleg gradbenih odpadkov, ki so voluminozno najbolj vidni, pa gradiva povzročajo tudi industrijske odpadke, ki nastajajo v ostalih fazah življenjskega ciklusa gradiv – pri proizvodnji gradiv in komponent, sredstev za lepljenje, površinsko obdelavo, pri izdelavi orodij za delo z gradivi, do odpadkov prihaja na gradbišču med gradnjo, odpadki nastajajo pri uporabi in vzdrževanju stavbe ... Odpadki, vezani na današnji način bivanja in življenja na planetu, počasi postajajo najpomembnejši problem človeštva in zahtevajo temeljit razmislek in korenite spremembe.

Novi Akcijski načrt EU za krožno gospodarstvo (SRIP, 2020) napoveduje celovito strategijo za trajnostno grajeno okolje, ki bo spodbujala načela krožnega gospodarstva v celotnem življenjskem ciklusu stavb z vključevanjem načel krožnosti za gradiva in komponente, ki sestavljajo stavbo. Po Kibertu (2008) je 50 % celotnih odpadkov, ki jih ustvari gradbena industrija po vsem svetu, posledica odstranitve odsluženih stavb, torej rušenja. Stavbe se namreč odstranijo ob koncu življenjske dobe, ko je možnost ponovne uporabe odsluženega materiala velikokrat nemogoča. Čeprav postaja recikliranje celotne stavbe priljubljeno, je koristnejša uporaba predelanega gradbenega materiala neposredna ponovna uporaba. Ponovna uporaba materialov namreč zahteva minimalno rabo energije v primerjavi z energijo, potrebno za recikliranje materialov (Addis, 2006). Na tem temelji paradigma, da ima razstavljanje konstrukcije stavbe na posamezne elemente zaradi ekonomskih in okoljskih koristi prednost pred rušenjem (Coelho in de Brito, 2011). Gradbeni odpadki, ki ob tem nastanejo, so pripoznani kot surovina za krožno gradbeništvo, v katerem proizvodi po koncu življenjske poti začnejo nove življenjske cikle v enaki, izboljšani ali predelani obliki.

V prispevku so evidentirani odpadki, ki so posledica gradnje, uporabe in odstranjevanja grajenega okolja. Raziskan je potencial zmanjševanja odlaganja gradbenih odpadkov z njihovim vračanjem med surovinske vire in koncepti arhitekturne zasnove, ki to omogočajo.

2. FAZE ŽIVLJENJSKEGA CIKLUSA GRADIV IN NASTAJANJE ODPADKOV

Gradiva so vse okrog nas, saj tvorijo celotno grajeno okolje v katerem živimo, delamo, se šolamo, rekreiramo, zdravimo ... Njihov življenjski cikel se začne veliko pred vgradnjo v stavbo. Sestavlja ga šest faz, vsaka od njih se vrši na različnih lokacijah,

ki so med seboj oddaljene (Zbašnik-Senegačnik, 1996). Na koncu življenjskega ciklusa gradiva končajo kot gradbeni odpadke izven gradbenega sektorja, na deponijah, divji odlagališčih, redko v sežigalnicah, in predstavljajo družbeni in civilizacijski problem (slika 1).

Odpadki ne nastajajo samo ob novogradnji, obnovi ali rušenju, ko se deklarirajo kot gradbeni odpadki. Precejšen del odpadkov, povezanih s stavbami, se uvršča tudi med industrijske odpadke, čeprav nastajajo zaradi potreb po gradivih v gradbenem sektorju. Dejanski odpadki, ki jih povzročajo gradiva v celotnem življenjskem ciklusu, segajo v različne industrijske procese (Ur. l. EU, L370/46, 2014).

2.1 Faza pridobivanja surovin

Vpliv gradiv na okolje se začne z izplenjevanjem surovine iz naravnega okolja. Surovine za gradiva so največkrat neobnovljivi naravni viri (boksit, krom, kobalt, mangan, pa tudi zlato, srebro, svinec, cink, kositer, kamen, ilovica ...). Les in druga rastlinska in živalska gradiva sodijo med obnovljive surovinske vire. V fazi pridobivanja surovin prihaja do naslednjih vrst odpadkov:

- ob fizikalni in kemični predelavi kovinskih mineralnih surovin nastajajo jalovine, odpadki z nevarnimi snovmi, prah in prašni delci itd. (npr. rdeče blato iz proizvodnje glinice), nadalje gramoz, drobir, pesek, glina, mulj (lahko vsebuje tudi nevarne snovi);
- pri obdelavi in predelavi lesa in lesnih polizdelkov, npr. ivernih plošč, nastajajo odpadno lubje in pluta, žaganje, oblanci, odrezki, delci plošč, furnirjev; odpadna sredstva za lepljenje in zaščito lesa lahko vsebujejo nevarne snovi;
- do odpadkov prihaja v kemijskih procesih, v katerih nastajajo sredstva za premaze, barve, emalji, lepila, tesnila, sredstva za površinsko zaščito, npr. organska topila ali druge nevarne snovi, mulji barv in lakov, odpadki iz odstranjevanja barv in lakov, odpadna sredstva za odstranjevanje barv in lakov ...

2.2 Faza proizvodnje gradiv in polizdelkov

V industrijskih procesih v proizvodnji gradiv prihaja do povečanih koncentracij škodljivih vplivov na okolje (emisije, prah, vlakna, škodljive substance, hrup ...). Dodaten negativni vpliv nastane zaradi potreb po energiji zaradi dolgih transportnih poti, povezanih z globalno centralizacijo proizvodnje gradiv. Poleg tega v fazi proizvodnje nastajajo:

- odpadki iz elektrarn in drugih kurilnih naprav (ki zagotavljajo energijo za proizvodnjo) vsebujejo pepel in elektrofiltrski pepel, žlindro, trdne odpadke iz razžvepljevanja dimnih plinov, kotlovski prah ...);
- odpadki iz železarske in jeklarske industrije (žlindra in odpadki iz predelave žlindre, odpadki, ki vsebujejo nevarne snovi, mulji in filtrne pogače ...);

Slika 1: Linearni življenjski cikel gradiv.



- odpadki iz termične metalurgije aluminija, svinca, cinka, bakra, barvnih kovin (žlindre iz taljenja rud, prah in drugi delci, mulj in filtrne pogače, odpadki iz obdelave hladilne vode ...);
- odpadki iz livarn železa, barvnih kovin (žlindre, prah, odpadne uporabljene in neuporabljene livarske forme in jedra);
- odpadki iz proizvodnje stekla in steklarskih izdelkov (delci in prah, odpadni material iz steklenih vlaken, mulj iz poliranja in mletja stekla ...);
- odpadni produkti iz proizvodnje keramičnih izdelkov, opek, ploščic in gradbenih izdelkov (odpadne zmesi, delci in prah, mulj, odpadna keramika, opeka in ploščice po žganju, odpadki iz glaziranja, mulj iz čiščenja odpadne vode ...);
- odpadki iz proizvodnje cementa, apna in sadre;
- odpadki iz kemične obdelave in površinske obdelave ter površinske zaščite kovin in drugih materialov, npr. galvaniziranje, cinkanje, luženje, jedkanje, fosfatiranje ... (kisline, lugji, mulji, tekočine za izpiranje ...);
- odpadki iz oblikovanja ter fizikalne in mehanske površinske obdelave kovin in plastik – npr. opilki in ostružki, prah in delci železa, mineralna in sintetična olja, odpadki iz peskanja ... (odpadna organska topila, hladilna sredstva in potisni plini ...).

2.3 Faza prodaje gradiv, polizdelkov in komponent

Prodaja gradiv se vrši v specializiranih prodajalnah z velikimi skladišči, v tej fazi nastaja:

- odpadna embalaža iz lesa, kovin, plastike, stekla, papirja, kartona in lepenke, kompozitna in mešana embalaža, embalaža iz nevarnih snovi.

2.4 Faza vgradnje

Pri vgradnji gradiva na mesto, kjer bo služilo svojemu namenu, nastaja:

- ostanki gradiv (kosi opeke, malte, mavčno-kartonskih plošč, keramičnih ploščic, parketa, cevi, toplotne izolacije ...)
- odpadna embalaža (papirna in kartonska, plastična, lesena, kovinska, sestavljena (kompozitna) embalaža, steklena, mešana).

Posebej problematični so mešani odpadki, ki nastajajo ob montaži gradiv na gradbišču, med katere spadajo uporabljene embalaže lepil, barv, tesnil ..., tudi zato, ker niso prazne oz. v celoti uporabljene in jih ni mogoče reciklirati. Na gradbiščih delavci pogosto ne ločujejo odpadkov, zato vsi ostanki gradiv, embalaže, tudi poškodovano in uničeno orodje itd., končajo na deponijah kot mešani komunalni odpadki.

Slika 2: Odpadna embalaža pri vgradnji gradiv – (A) možnost sortiranja in recikliranja, (B) zaradi umazanosti posod embalaže ni mogoče reciklirati.



2.5 Faza uporabe

Uporaba je najdaljša faza življenjskega ciklusa gradiva. Gradiva so vgrajena povsod, oblikujejo naše okolje v mestih, naseljih, v stanovanju, na delovnem mestu, v prostorih za rekreacijo, šport itd. V fazi uporabe nastajajo:

- odpadki zaradi vzdrževanja, prenove in obnove stavbe in komponent za njeno delovanje;
- odpadki zaradi proizvodnje energije za delovanje stavb (npr. pepel ...);

v času življenjske dobe stavbe se večkrat zamenja in odvzema na deponijo staro pohištvo in opremo, gospodinjske aparate, svetila, tekstilne obloge ...

2.6 Faza odstranitve

Na koncu življenjske dobe stavbe gradiva in komponente končajo kot:

- gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja objektov (beton, opeka, ploščice, keramika, les, steklo in plastika, kovine in zlitine bitumenske mešanice, premogov katran in izdelki iz katrana);
- zemljine, kamenje in izkopani material;
- izolacijski materiali;
- gradbeni materiali, ki vsebujejo azbest;
- gradbeni materiali na osnovi sadre;
- gradbeni odpadki in ruševine;
- odpadki iz naprav za ravnanje z odpadki (sežigalnic), iz čistilnih naprav ...

Odstanjenih naprav, pohištva in druge opreme se v tej študiji ne obravnava, čeprav imajo kot odpadke prav tako veliko težo.

Dejstvo je torej, da je prav grajeno okolje in vse, kar je povezano z njim, razlog za nastajanje in kopičenje velikih količin odpadkov. V prispevku se osredotočamo na gradbene odpadke – to so odvečni ali poškodovani materiali, ki so posledica gradbenih dejavnosti pri novogradnjah, obnovah in rušenju stavb. Sestava gradbenih odpadkov je odvisna predvsem od prevladujočih gradbenih materialov, ki so na voljo za posamezne objekte. Tehnične smernice o razvrščanju odpadkov klasificirajo gradbene odpadke in odpadke iz rušenja objektov v osem kategorij (Ur. l. EU, C 124, 2018): (1) beton, opeka, ploščice in keramika; (2) les, steklo in plastika; (3) bitumenske mešanice, premogov katran in izdelki iz katrana; (4) kovine in zlitine; (5) zemljina, kamenje in izkopani material; (6) izolacijski materiali in gradbeni materiali, ki





A

vsebujejo azbest; (7) gradbeni material na osnovi sadre; (8) drugi gradbeni odpadki in ruševine. Ustrezno sortirani predstavljajo možnost za vračanje v gradbeni sektor.

3. ZMANJŠEVANJE KOLIČIN ODPADKOV

EU je prevzela vodilno vlogo v trajnostni prihodnosti s pobudo »Resource Efficient Europe« (COM, 2011), ki predvideva novo pot do ukrepov za učinkovito rabo virov. Do leta 2030 postavlja več mejnikov – 65 % recikliranje gospodinjstevskih odpadkov, 75 % recikliranje odpadne embalaže, zmanjšanje odlagališč gradbenih odpadkov na največ 10 % komunalnih odpadkov. V marcu 2020 je bil sprejet novi Akcijski načrt EU za krožno gospodarstvo (SRIP, 2020), ki predvideva premik paradigme linearnega modela gospodarstva »vzemi, izdelaj, uporabi in zavrzi« v bolj trajnostni krožni model »vzemi, izdelaj, uporabi, ponovno uporabi in recikliraj«. Prehod v krožno gospodarstvo je bistvenega pomena za izpolnitev programa za učinkovito rabo virov, vzpostavljenega v okviru strategije Evropa 2020 za pametno, trajnostno in vključujočo rast.

V krožnem gospodarstvu se čim dlje ohranja ekonomska in okoljska vrednost materialov – bodisi s podaljšanjem življenjske dobe izdelkov, ki so iz njih nastali, bodisi z zankanjem nazaj v sistem, da se ponovno uporabijo. Pojem odpadkov v krožnem gospodarstvu ne obstaja več, ker se proizvodi in materiali načeloma ponovno uporabljajo in krožijo v nedogled (Den Hollander, Bakker in Hultink, 2017). V krožnem gospodarstvu odpadki postanejo surovina in začnejo nove življenjske cikle v enaki, izboljšani ali predelani obliki.

Za ohranjanje naravnih surovinskih virov in v prid izogibanju gradbenim odpadkom sledimo štirim osnovnim strategijam, ki so v vrstnem redu navedene glede na stopnjo njihovega vpliva na zmanjševanje odpadkov (Hillebrandt et al. 2019):

- izogibanje odpadkom;
- ponovna uporaba;
- nadaljnja uporaba;
- recikliranje.

3.1 Izogibanje odpadkom

Najbolj čista in vzdržna rešitev je izogibanje odpadkom. To pomeni predvsem izbiro gradiv in tehnologij gradnje, ki po koncu življenjske dobe ne obremenjujejo okolja (npr. naravna gradiva, reciklirana gradiva ...). Vgrajeni sestavni elementi morajo biti čim bolj kakovostni in v fazi uporabe dobro vzdrževani, kar podaljša življenjsko dobo stavbe.



B

Slika 3: Ločevanje gradbenih odpadkov med rušenjem – (A) kovinski in leseni elementi in (B) mineralni odpadki (opeka, kamen, ometi)“.

3.2 Ponovna uporaba

Konstruktivske elemente se lahko ponovno uporabi tako, da ohranijo svoj primarni namen. Pri ponovni uporabi morajo gradbeni materiali zagotoviti določeno stopnjo kvalitete in dolgoročne trajnosti. Primer: visoko kvalitetne materiale kot so les, naravne kamnite plošče, stekleni fasadni paneli, klinker opeka in gramoz se po odstranitvi s stavbe lahko očisti in obnovi ter ponovno uporabi za enak namen na drugem mestu (Hillebrandt et al. 2019).

3.3 Nadaljnja uporaba

Če se že uporabljeno gradivo ali izdelek uporabi za drugačen namen kot je bila njegova primarna funkcija, ga lahko kategoriziramo kot izdelek za nadaljnjo uporabo. Primer nadaljnje uporabe je npr. odstranjena fasadna opeka, ki se lahko uporabi kot del novega tlakovanja (Hillebrandt et al. 2019).

Izvedeni projekti s ponovno in nadaljnjo uporabo izdelkov kažejo na nov doprinos k načrtovanju in oblikovanju trajnostne arhitekture, ki mora zadovoljiti vse bistvene zahteve gradnje, hkrati pa je v svoji uporabi in obliki lahko tudi inovativna in zabavna.

3.4 Recikliranje

Recikliranje je v krožnem gospodarstvu zelo pomembno, saj se po končani uporabi izdelek zopet vrsti v proizvodni proces, namesto da bi ta končal kot odpadke. Če se snovi, ki se pridobijo pri postopku razgradnje izdelka, ponovno uporabijo za nove izdelke z enako stopnjo kvalitete v zaprti zanki, jih lahko kategoriziramo kot reciklirane (Hillebrandt et al. 2019). Primer kvalitetnega recikliranja je npr. recikliranje odsluženega jeklenega nosilca in izdelava novega jeklenega nosilca z drugačno obliko profila. Če ima izdelek iz recikliranih surovin slabše lastnosti kot osnovni izdelek, govorimo o manjvrednostnem recikliranju (angl. downcycling, npr. sintetični materiali, ki pri procesu recikliranja izgubijo kvaliteto). Krožno gospodarstvo spodbuja t.i. večvrednostno recikliranje (ang. upcycling), pri katerem nastane izdelek višje kakovosti kot izhodiščni material.

Gradbena industrija predstavlja prednostni sektor pri izboljšanju recikliranja materialov z namenom učinkovitejše izrabe naravnih virov. Trenutno je najpogostejša uporaba gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja v obliki recikliranega agregata za nasutje pod temeljno ploščo ali za utrjevanje cest in pešpoti, saj prinaša tako okoljske kot ekonomske učinke (Farina et al. 2020). Agregat je ena osnovnih sestavin v gradbeništvu, saj sestavlja 60 do 75 % volumna betona. Reciklirani agregat je (če je ob rušenju pravilno

izbran in predelan) enakovreden naravnemu agregatu, zanj veljajo isti predpisi kot za naravne agregate. V proizvodnji betona ima celo prednost pred naravnim agregatom, saj vsebnost cementa recikliranemu agregatu izboljša hidravlične lastnosti. Znižanje vsebnosti cementa na račun veziva iz recikliranega betona zato lahko zmanjša ogljični odtis betona tudi za 20 % (ZAG, 2014). Dodana vrednost je možnost uporabe recikliranega agregata v proizvodnji samozgoščevalnega betona, ki se je sposoben sam oblikovati, odzračiti (Manzi in Bignozzi, 2020) in samozdravilnega betona, ki ima endogeno sposobnost celjenja razpok, kar precej zmanjša stroške vzdrževanja stavbe (Garcia-González et al. 2020). Reciklirani agregat je lahko tudi sestavni del visoko-kvalitetnih betonov, ki imajo boljše mehanske lastnosti, lažjo obdelovalnost in boljšo obstojnost proti agresivnim kemikalijam v primerjavi s tradicionalnim betonom (Etxeberria, 2020).

Velik delež gradiv v stavbah predstavljajo tudi kovine - zaradi globalne razširjenosti armiranega betona kot gradbenega materiala in naraščajočih količin žic in cevi se ocenjuje, da stavbe vsebujejo vsaj 50 % vseh kovin v uporabi (van Beers in Graedel, 2007). Kovine se, za razliko od ostalih gradiv, reciklirajo že nekaj časa. Klinglmair in Fellner (2010) ugotavljata, da že 30 % bakra, porabljenega v Evropi, in 50 % železa v ZDA izvira iz recikliranih virov. Ključni cilj v svetovni industriji je zato 100 odstotno recikliranje kovin. Ta pričakovanja zvišujejo visoka učinkovitost ločevanja kovin od drugih odpadkov in drugi ukrepi, kot npr. visoke komunalne tarife ali prepoved odlaganja kovin med reciklirane odpadke (Kucukvar, Egilmez in Tatari, 2016). Kovine imajo velike možnosti za recikliranje, saj lahko ohranijo in celo povečajo svojo vrednost pred drugimi gradivi. Reciklirane kovine lahko bistveno zmanjšajo rabo energije v proizvodnem procesu. Recikliranje aluminija zmanjšuje rabo energije za proizvodnjo za 95 %, recikliranje bakra pa za 85 % (Hillebrandt et al. 2019).

3.5 Urbano rudarjenje

Pojem »urbano rudarjenje« opisuje potencial naših mest kot vir surovin. V zadnjem stoletju je poraba materialov narasla vsakih deset let za faktor 10 – trenutno porabi človeštvo letno skoraj 60 Gt (Krausmann et al. 2009). To dramatično povečanje je pripeljalo do kopičenja 792 Gt materialov v stavbah in infrastrukturi (Krausmann et al. 2017). Zaloge materialov v našem grajenem okolju, ki so potencialno primerni za uporabo, je torej enormno, stavbe pa postajajo banke materialov oz. rudniki surovin. Uveljavlja se termin urbano rudarjenje, ki se nanaša na predelavo sestavnih delov in elementov vseh grajenih struktur, vključno s stavbami, infrastrukturo, industrijo, izdelki itd. (Baccini in Brunner, 2012). Količine gradiv v grajenem okolju so pogosto primerljive ali celo višje od naravnih zalog (Cossu in Williams, 2015). Zato je obnavljanje surovinskih virov iz antroposfere atraktivna alternativa izčrpanju naravnih virov, ki sicer povzročata visoke stroške pridobivanja in prevoza primarnih virov ali odvisnost od tistih, ki primarne vire nadzorujejo (Koutamanis, van Reijn in van Bueren, 2018). Urbano rudarjenje sledi načelom krožnega gospodarstva. Rudniki surovin v prihodnosti ne bodo v podzemlju, ampak v naših mestih (Hebel, Wisniewska in Heisel, 2014).

4. VLOGA PROJEKTANTOV PRI OBVLADOVANJU GRADBENIH ODPADKOV

Stavbe predstavljajo količinsko najpomembnejši vir gradbenih odpadkov. Do nedavnega je večina sestavnih delov stavb končala na odpadu med mešanimi odpadki, prepogosto tudi na divjih odlagališčih. Danes se razmere spreminjajo in prihaja do zavedanja, da je nekatera gradiva po odsluženju stavbe mogoče ustrezno razstaviti, obdelati, ponovno uporabiti, reciklirati.

Možnost obdelave gradbenih odpadkov in njihovega vračanja v proces gradnje je odvisna od:

- vrste prevladujočih materialov, ki sestavljajo konstrukcijo stavbe, in
- ločljivosti/neločljivosti konstrukcijskih zvez.

Ključna pri obvladovanju gradbenih odpadkov torej postaja zasnova stavbe. Konstrukcija s potencialom za smotno razgradnjo na koncu življenjske dobe stavbe vključuje več konceptov:

- izbor gradiv z nizkim potencialom obremenjevanja z gradbenimi odpadki,
- projektiranje razstavljivih kompozitnih gradiv in konstrukcij,
- projektiranje enovitih konstrukcij.

4.1 Izbor gradiv z nizkim potencialom obremenjevanja v fazi odstranitve stavbe

Odločanje o izboru materialov sodi poleg oblikovanja v samo bistvo arhitekturnega načrtovanja, saj gradiva materializirajo abstraktni arhitekturni koncept. Arhitekti morajo pri odločitvah zadovoljiti tako umetniško idejo kot tehnične zahteve. Pri izboru torej štejejo vizualne in uporabne vrednosti, pomembne so tudi ekonomske vrednosti (hierarhično zaporedje vrednotenja se lahko spreminja). Zahteve krožnega gradbeništva prinašajo še en kriterij pri izboru gradiv – zasnova mora omogočati vračanje odpadnih elementov med surovinske vire.

Trajnostna zasnova stavbe vključuje upoštevanje negativnih potencialov gradiv. Surovine za gradiva izhajajo iz narave, vendar je pot od surovine do končnega produkta različno dolga, v proizvodnih procesih pa prihaja do nastajanja različnih odpadkov. Tudi na koncu življenjskega ciklusa gradiva bolj ali manj obremenjujejo okolje. Gradiva lahko glede na nastanek razdelimo v tri skupine, ki se razlikujejo tudi po stopnji onesnaževanja na koncu življenjskega ciklusa – naravna gradiva, umetna mineralna gradiva in sintetična gradiva.

4.1.1 Naravna gradiva

Naravna gradiva se pridobijo iz naravnih surovin v elementarni obliki in se nadalje uporabijo brez dodatne obdelave, ki bi spremenila njihove lastnosti. S stališča odpada so neproblematična rastlinska naravna gradiva, torej les, pluta, slama, bambus, kokos, trstika Na koncu življenjskega ciklusa se razgradijo in povrnejo v naravo kot hranila. Ta gradiva so CO₂ nevtralna – na koncu življenjskega ciklusa se sprosti toliko CO₂, kot so ga rastline iz okolja vzele v času rasti. Rastlinska naravna gradiva se obnovijo približno v času življenjske dobe stavbe ali prej. Ker so naravna gradiva (npr. les) teoretično neskončno dosegljiva, je njihova uporaba v gradnji zaželeno. Naravna mineralna gradiva (npr. naravni kamen, ilovica) so nastala z naravnimi procesi in se na koncu življenjskega ciklusa razgradijo. Ne glede na njihov naravni izvor pa je zaradi njihovega dolgega obdobja nastanka dostopnost teh gradiv končna. Možnosti za recikliranje naravnih mineralnih gradiv so omejene, priporoča se njihovo ponovno uporabo. V tem primeru morajo zagotoviti določeno stopnjo kvalitete in dolgoročne trajnosti. Npr. obloga iz naravnega kamna večjih dimenzij se lahko odstrani brez poškodb, s tem pa se poveča možnost ponovne uporabe (Hillebrandt *et al.* 2019).

4.1.2 Umetna mineralna gradiva

Umetna mineralna gradiva izdelata človek s pomočjo visoke vgradne energije ter raznih kemičnih in fizikalnih postopkov. Surovine za ta gradiva so mineralnega izvora, nahajajo se v na-

ravi, vendar pa jih je potrebno za koristno uporabo še predelati. K umetnim mineralnim gradivom štejemo opeko (tudi keramiko in porcelan), kovine, steklo, mavec, apno, cement, beton, malto, anorganska toplotno-izolacijska gradiva.

Reciklabilnost umetnih mineralnih gradiv je omejena. Iz velikega dela mineralnih gradiv se izdelajo agregati, saj je povpraševanje po njih v gradbeništvu veliko. Približno 80 % mineralnih gradiv se manjvrednostno reciklira, preko 15 % mineralnih gradiv se uporablja kot polnila, preostalo se odlaga na odlagališča.

4.1.3 Sintetična gradiva

Sintetična gradiva so iz sintetičnih veziv in polnil ter dodatkov. Vezivo je praviloma polimer, izdelan iz fosilnih snovi (nafta, katran, zemeljski plin ...). V večini sintetičnih snovi je približno 10 – 20 % veziva. Polnila so zelo raznovrstna: praškasta (lesna in kamena moka, kreda, kuhinjska sol, zračni mehurčki ...), vlaknasta (steklasta in azbestna vlakna, azbest ...) ali v obliki listov (papir, tkanine, furnir ...). Dodatki so večinoma kemične snovi (olja, soli, mila ...), ki prinašajo večjo plastičnost, preprečujejo staranje, regulirajo čas strjevanja ali dajejo barvo (pigmenti, organske barve).

Sintetična gradiva nastopajo v mnogih oblikah, največ pa se pri gradnji uporabljajo umetne mase, umetna toplotno-izolacijska gradiva, umetna lepila, kiti, fugirne mase, tesnilne mase ..., kompozitna sintetična gradiva. Lastnosti, zaradi katerih so uporabna pri gradnji, se zelo hitro poslabšajo, sicer pa so lahko izjemno dolgoživa, biološko odporna, v naravi lahko obstanejo do 450 let (Umwelt Bundesamt, 2017). Pri zgorevanju odpadkov iz sintetičnih gradiv obstaja nevarnost toksičnih izpustov (Hillebrandt et al. 2019), kar predstavlja problem pri sežiganju v sežigalnicah. Reciklabilna je le skupina termoplastov (Hegger, Manfred, 2005). Plastike višje kvalitete se lahko reciklirajo večkrat tako, da izdelki dosegajo enako stopnjo kvalitete. Za uspešno recikliranje mora biti sintetično gradivo čisto, brez dodanih lepil ali drugih materialov. Za recikliranje velikega dela plastike se uporablja princip manjvrednostnega recikliranja, saj se njihove mehanske, kemične in toplotnoizolacijske lastnosti v procesu recikliranja večinoma slabšajo (Hillebrandt et al. 2019).

4.2 Projektiranje razstavljenih gradiv in konstrukcij

Stavbe so kompleksen projekt, produkt oblikovalcev, inženirjev in proizvajalcev materialov in komponent. Sestavljene so iz materialov in sestavnih konstrukcijskih elementov s svojimi detajli, ki definirajo konstrukcijo ter njene tehnične in oblikovne karakteristike. Zaradi njihove pomembnosti za družbo in izjemnega učinka na globalno izrabo surovinskih virov je pomemben vsak poskus upoštevanja trajnosti stavb oz. z njimi povezanih gradiv v celotnem življenjskem ciklusu – od pridobivanja surovin in proizvodnje materialov, do oblikovanja, vgradnje, uporabe/delovanja stavbe, obnove/vzdrževanja do odstranitve. Vsaki stavbi se enkrat izteče življenjska doba, takrat nastopi problem odsluženih gradbenih elementov oziroma odpada. Stavba mora biti sestavljena tako, da jo je mogoče po koncu življenjske dobe razstaviti, njene gradbene elemente pa sortirati, obdelati ter ponovno uporabiti ali reciklirati.

4.2.1 Razstavljenost kompozitnih gradiv

V zadnjih desetletjih se vedno znova pojavljajo nova kompozitna gradiva, ki jih sestavlja več snovi. Takih kompozitov po koncu življenjske dobe ni mogoče reciklirati, zato končajo na odpadu. V prihodnosti bo potrebno razviti tehnologijo, s katero bo mogoče osnovne sestavine kompozitnih gradiv zopet ločiti in jih ponovno uporabiti. Tako kompozitno gradivo, ki se

masovno uporablja, je npr. beton. Če bi ga bilo možno razstaviti na pesek in cement, bi bil rešen problem odpada. Problem pri obdelavi gradbenih odpadkov je tudi v premazih, površinskih obdelavah in lepilih, ki jih je običajno težko odstraniti in poslabšajo možnost recikliranja.

4.2.2 Razstavljenost konstrukcij

Razstavljenost konstrukcij na osnovna gradiva bi morala biti dosegljiva z več vidikov. Vsi sestavni deli stavbe nimajo enako dolge življenjske dobe, zato je za podaljševanje uporabnosti stavbe nujno predvideti možnost razstavljanja ključnih konstrukcijskih elementov in njihove zamenjave. V aktualni praksi tudi po koncu življenjske dobe stavbe vitalni konstrukcijski elementi prepogosto končajo med mešanimi odpadki, ker je sestavne elemente nemogoče ločiti in sortirati. S stališča ravnanja z gradbenimi odpadki morajo biti detajli oblikovani tako, da dopuščajo enostavno demontažo, ločevanje in sortiranje konstrukcijskih elementov ter njihovo ponovno uporabo in recikliranje. Razstavljenost stavb je del krožnega gradbeništvu v strategiji krožnega gospodarstva.

4.3 Projektiranje enovitih konstrukcij

Pri enovitih konstrukcijah je uporabljena ena vrsta materiala, kar poenostavi (tudi poceni) demontažo in sortiranje. Tradicionalno in trajnostno gradivo les se vse bolj uveljavlja tudi v enovitih konstrukcijah. Poleg vse večje uporabe križno lepljenih lesenih elementov se je v zadnjih letih vidno povečala uporaba masivnega lesa (Nemčija, Avstrija, Švica). Enovite konstrukcije so butane ilovnate stene, lahko so sestavljene tudi iz prefabriciranih ilovnatih zidakov. Z ustrežno debelino ilovnatega gradiva se poleg nosilnosti dosega dobra zvočna, toplotna izolativnost sten z odlično akumulacijo toplote in uravnavanjem vlažnosti bivalnega prostora. Potencial za izvedbo enovitih konstrukcij je tudi porobetone (Hillebrandt et al. 2019).

4.4 Digitalni potni list materialov – orodje za načrtovanje

Arhitekt že v začetnih fazah načrtovanja vpliva na to, kakšno obremenitev za okolje bo stavba predstavljala po koncu življenjske dobe. Ocena negativnega potenciala gradiv mora biti narejena na začetku projektiranja, kar je ob pomanjkanju informacij na enem mestu težka naloga. Ključno inovacijo na tem področju predstavlja digitalni potni list materialov, s katerim se lahko oceni stopnjo reciklabilnosti stavbe ter soustvarja pomembne ekološke indikatorje stavb že v zgodnji fazi oblikovanja (Honica et al. 2019). Digitalni potni list materialov je nastal v okviru evropskega projekta BAMB (Bamb, 2020a). Za začetek je bilo izdelanih 300 potnih listov materialov in komponent, ki predstavljajo nadgradnjo dosedanjim tehničnim informacijam. Digitalni potni list materialov omogoča neizbrisljivo, varno, zaupno in zanesljivo bazo podatkov. Zbrane so informacije, ki so ključne pri izbiri materialov, izdelkov in komponent in so v pomoč projektantom in drugim deležnikom v procesu gradnje, rušitve ter nadaljnjih odločitvah o ponovni uporabi, predelavi ali recikliranju oz. uničenju v procesu pridobivanja energije (Marinič, 2020). Potni listi gradiv omogočajo krožne poslovne modele s tem, da definirajo gradiva in prikazujejo njihove krožne poti. Digitalni potni list omogoča dobaviteljem, izvajalcem, arhitektom, uporabnikom in prihodnjim uporabnikom pridobivanje informacij preko digitalnih platform, s tem pa pokažejo na možnost umestitve gradiv v kontinuirane zanke uporabe in ponovne uporabe. Trenutno je še veliko izdelkov, ki jih še ni mogoče vključiti v krožno uporabo. Zato platforma digitalnih potnih listov gradiv nudi tudi povratno informacijo, da bi lahko

vsi deležniki v procesu gradnje optimizirali izdelavo, izbor, uporabo gradiv, izdelkov in storitev, primernih za uporabo v krožnem gradbeništvu (Bamb, 2020b). Potni listi gradiv bi v bližnji prihodnosti morali delovati znotraj informacijskega modeliranja stavb (Building Information Modelling - BIM), nabor gradiv pa bi se moral dopolnjevati (Bamb, 2020a).

4.4 Nova paradigma načrtovanja – izzivi na arhitekto

Vsa zgodovina arhitekture je – poenostavljeno rečeno – zgodovina izumljanja gradiv, konstrukcij in prostorskih konceptov v funkciji zadovoljevanja človeških resničnih ali namišljenih potreb. Smo v prelomnem trenutku, ko arhitektura dobiva še eno pomembno funkcijo, ki bo vplivala na kakovost življenja prihodnjih generacij – v načrtovanje in izvedbo grajenega okolja bo morala vključevati načela trajnostnega razvoja. Težiče odločanja arhitekta se danes od zgodovinskega vodila »**kako stavbo narediti**« prenaša na izziv prihodnosti »**kako stavbo odstraniti**«. Vodilo ob tem bi moralo biti predvsem »**kako stavbo na koncu življenjske dobe ustrezno razstaviti**«. Življenjski cikel gradiv, ki ga je do sedaj sestavljalo šest faz (pridobivanje surovin, proizvodnja gradiv in komponent, prodaja, vgradnja, uporaba in odstranitev), danes namreč pridobiva sedmo fazo (ponovna uporaba in/ali recikliranje), linearni proces življenjskega ciklusa (slika 1) pa se spreminja v krožnega (slika 4). Življenjski cikel gradiv bi moral biti v prihodnosti popolnoma zaprt – naš grajeni prostor bi moral biti v prihodnosti brez jemanja naravnih dobrin in odlaganja odpadkov. Arhitekt ima možnost izbire, s tem pa tudi poslanstvo – z arhitekturno in konstrukcijsko zasnovo omogočiti, da stavba po končani življenjski dobi ne bo končala kot odpadke, ampak kot surovinski vir.

Arhitekti lahko prispevamo k zmanjšanju nastajanja gradbenih odpadkov s ponovno uporabo proizvodov ali podaljšanjem njihove življenjske dobe, z izborom materialov, ki imajo potencial za recikliranje, pa tudi z inovativnimi predlogi in iskanjem novih rešitev v fazi načrtovanja ter, nenazadnje, z ozaveščanjem vseh deležnikov o prednostih in izzivih trajnostne gradnje s poudarkom na ustvarjanju zdravega okolja za uporabnike.

5. ZAKLJUČEK

Rast prebivalstva, cvetoče gospodarstvo in hitra urbanizacija so močno pospešili nastajanje trdnih odpadkov po vsem svetu. Pomemben dokument, ki vzpostavlja pravni red na tem področju, je Direktiva o odpadkih (2008/98/ES in 2018/851), ki se osredotoča predvsem na preprečevanje nastajanja odpadkov in vključuje strategije izogibanja nastajanja odpadkov in uporabo odpadkov v verigi surovin. Največji potencial te strategije se odraža prav pri gradbenih odpadkih, ki v Sloveniji količinsko

predstavljajo okrog 60 % vseh nastalih odpadkov (Mladenović in Mauko-Pranjić, 2020). Ta delež se še poveča z upoštevanjem industrijskih odpadkov, ki so vezani na gradiva, saj nastajajo pri pridobivanju surovin, proizvodnji gradiv in komponent, prodaji, torej še preden gradiva in komponente pridejo na gradbišče. Pred družbo je torej velik problem s številnimi izzivi.

V prispevku smo se osredotočili predvsem na gradbene odpadke, ki nastajajo ob novogradnjah, obnovah in rušitvah stavb. V vse te aktivnosti so neposredno ali posredno vključeni tudi arhitekti, ki s svojimi projektnimi odločitvami posežejo na področje obstoječih surovinskih virov, vplivajo pa tudi na možnost razgradnje stavbe, ko odslužena gradiva in komponente postanejo skupen družbeni problem. Ta trenutek je mogoče ugotoviti, da je država sprožila aktivnosti v zvezi s to problematiko in da se razvija iniciativa krožnega gospodarstva, ki ima največji potencial prav na področju gradbeništvu, s tem pa nastaja možnost za obvladovanje gradbenih odpadkov. Premalo se zaenkrat osveščenost odraža med projektanti, izvajalci in investitorji. Premik bi prinesla ustrezna izobraževanja o zasnovi trajnostne stavbe, ki ne vključuje samo njene energijske učinkovitosti, ampak tudi vpliv na okolje v fazi razgradnje po končani življenjski dobi.

Pomanjkljive podatke o možnostih ravnanja s posameznimi gradivi in elementi zapolnjuje digitalni potni list, ki bo dopolnil informacijski model gradnje. Tehnični podatki o lastnostih, sestavi, vzdrževanju ..., konstrukcijskih detajlih ..., bodo dopolnjeni z informacijami o možnostih ponovne uporabe, recikliranja ali končne razgradnje. S tem se bo projektantom olajšalo delo, povečala se bo učinkovitost urbanega rudarjenja, posledično pa zmanjšal pritisk na naravne surovinske vire.

Primeri dobre prakse nakazujejo, da je urbano rudarjenje nov izziv pri načrtovanju stavb, ki vključuje tako ponovno uporabo gradiv in gradbenih elementov kot tudi izbor recikliranih gradiv. Trg se že odziva na novo paradigmo. Spletne platforme kot so nizozemska Oogstkaart (2020), švicarska Salza (2020), nemški Restado (2020) so podjetja, ki omogočajo nakup ali prodajo že uporabljenih izdelkov (Hillebrandt et al. 2019).

Pri nas organizirane podpore projektantom s ponudbo že odsluženih gradiv, komponent in izdelkov v ponovno ali nadaljnjo uporabo, zaenkrat še ni. Zgleden primer urbanega rudarjenja pa je prizidek Osnovne šole Brezovica (2010, arh. Slavko Gabrovšek), ki je nastal na lokaciji odsluženega objekta. Pri rušenju so skrbno ločili uporabna gradiva in konstrukcijske elemente ter jih vgradili v novo stavbo. Ponovno so uporabili lesene lepljene nosilce in jih vgradili v steno zunanjega evakuacijskega stopnišča, 800 m² komaj 6 let stare kakovostne strešne kritine pa na nadstrešnice kolesarnice, strehe knjižnice in zunanjih učilnic. Opeko iz starega objekta so uporabili za predelne stene v novi stavbi. Ostanki keramičnih ploščic so nadaljnjo uporabo našli kot stenska dekoracija, zdrobljena stekla iz starih oken v transparentni predelni steni (slika 5), opečni drobir pa za nasutje ravne strehe. Ta primer dobre prakse še išče posnemovalce.

Več zgledov urbanega rudarjenja lahko najdemo v tujini. Na fasadi Verkehrshaus der Schweiz, Halle für Strassenverkehr v Luzernu (Annette Gigon / Mike Guyer Architekten, 2020) so uporabljeni stari prometni znaki, na večnadstropni stavbi v Seulu pa stara vrata (Choi Jeonghwa, 2020). Pri projektu Upcycle Studios v Kopenhagnu so veliko pozornost namenili principom ponovne uporabe, nadaljnje uporabe in recikliranja izdelkov. Arhitekti so za oblikovanje velikih steklenih površin na fasadi uporabili dvoslojna okna iz stavb, ki so bile renovirane. Masivni les, ki je bil kot odpadni material namenjen sežigu, so v stavbah uporabili kot talne in druge lesene obloge. V proces gradnje

Slika 4: Krožni proces življenjskega ciklusa gradiv je zaprt sistem iz sedmih faz.





A

Slika 5: Urbano rudarjenje pri gradnji prizidka Osnovne šole Brezovica (arh. Slavko Gabrovšek) – (A) stena stopnišča iz starih lesenih lepljenih nosilcev, (B) notranja stena iz odslužene opeke; (C) ostanki keramičnih ploščic sestavljajo dekorativno oblogo stopnišča, (D) stara kritina na nadstrešnicah kolesarnice.



B



C



D

so vključili recikliran agregat, pridobljen iz 1400 ton betonskih odpadkov kopenhagenske podzemne železnice (Lendager Group, 2018). V Kopenhagnu je v gradnji stanovanjski projekt The Resource Rows istih avtorjev, v katerega se vgrajujejo materiali iz zapuščenih hiš. Arhitekti ocenjujejo, da se bo s ponovno uporabo elementov iz zapuščenih hiš ter s postopki recikliranja CO₂ odtis novih stanovanj v fazi gradnje zmanjšal za 70 % (Lendager Group, 2019).

Pričujoči arhitekturni primeri že izvedene dobre prakse na področju ponovne in nadaljnje uporabe gradbenih odpadkov in visokokvalitetnega recikliranja gradiv niso zgolj eksperiment, ampak nadaljevanje trajnostnega načrtovanja arhitekture, ki pa zaradi že uporabljenih ali recikliranih izdelkov ne zmanjšuje arhitekturne vrednosti stavb, temveč jim dodaja novo vlogo in novo priložnost, da soustvarjajo grajeno okolje prihodnosti v skladu s ciljem krožnega gospodarstva – okolje brez odpadkov. Najbrž ni naključje, da ima prenovljena Europa Building v Bruslju, kjer je glavni sedež Evropskega sveta in Sveta EU, fasado iz 3750 restavriranih lesenih okenskih okvirov, zbranih med obnovo ali rušenjem stavb po vsej EU (Samyn and partners, 2017).

Zahvala: Članek je rezultat raziskovalnega dela v okviru raziskovalnega programa P5-0068, ki ga financira ARRS.

LITERATURA IN VIRI

- Addis, B. (2006). *Building with Reclaimed Components and Materials: A Design Handbook for Reuse and Recycling*. London: Earthscan.
- Gigon, A. in Guyer, M. (2020). Annette Gigon / Mike Guyer Architekten. Pridobljeno s <http://www.gigon-guyer.ch/de/bauten/museumsbauten/#g-1159>
- Baccini, P. in Brunner, P. (2012). *Metabolism of the Anthroposphere: Analysis, Evaluation, Design*. Cambridge: MIT Press.
- BAMB. (2020a). Building as material banks. Pridobljeno s <https://www.bamb2020.eu/>
- BAMB (2020b). Materials passports. Pridobljeno s <https://www.bamb2020.eu/topics/materials-passports/>
- Choiyeonghwa (2020). Pridobljeno s http://choiyeonghwa.com/bbs/zboard.php?id=public&page=2&sn1=&divpage=1&sn=off&ss=on&sc=on&select_arrange=headnum&desc=asc&no=72
- Coelho, A. in de Brito, J. (2011). Economic analysis of conventional versus selective demolition – a case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 382–392. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.003>
- COM, 2011. 571. Roadmap to a Resource Efficient Europe. European Commission, Brussels. Pridobljeno s <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0571>
- Cossu, R. in Williams, I.D. (2015). Urban mining: concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, 45, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>
- Den Hollander, M.C., Bakker, C.A. in Hultink, E.J. (2017). Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms. *Journal of Industrial Ecology*, 21 (3), 571–575. <https://doi.org/10.1111/jiec.12610>

- Etxeberria, M. (2020). The suitability of concrete using recycled aggregates (RAs) for high performance concrete. V: F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R., Tuladhar in A. Koutamanis (ur.), *Advances in construction and demolition waste recycling* (str. 253-284). Duxford, Cambridge, Kidlington: Elsevier.
- Farina, I., Colangelo, F., Petrillo, A., Ferraro, A., Moccia, I. in Cioffo, R. (2020). LCA of concrete with construction and demolition waste. V: F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R., Tuladhar in A. Koutamanis (ur.), *Advances in construction and demolition waste recycling* (str. 501-513). Duxford, Cambridge, Kidlington: Elsevier.
- García-González, J., Rodríguez-Robles, D., De Belie, N. in Morán-del Pozo, J.M. in Guerra-Romero, M.I., (2020). Self-healing concrete with recycled aggregates. V: F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R., Tuladhar in A. Koutamanis (ur.), *Advances in construction and demolition waste recycling* (str. 355-383). Duxford, Cambridge, Kidlington: Elsevier.
- Hebel, D., E., Wisniewska, M.H. in Heisel, F. (2014). *Building from waste*. Basel: Birkhäuser.
- Hegger, M. (2005). *Baustoff Atlas*. Basel: Birkhäuser.
- Hillebrandt, A., Riegel-Floors, P., Rosen, A. in Seggewies, J. (2019). *Manual of Recycling: Buildings as Sources of Materials*. München: Edition Detail.
- Honica, M., Kovacic, I., Sibenik, G. in Rechberger, H. (2019). Data and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports. *Journal of Building Engineering*, 23, 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.017>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. in Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Pridobljeno s <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/30317/211329ov.pdf>
- Kibert, C.J. (2008). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*. New York: John Wiley & Sons.
- Klinglmair, M. in Fellner, J. (2010). Urban mining in times of raw material shortage. *Journal of industrial ecology*, 14(4), 666-679. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00257.x>
- Koutamanis, A., van Reijn, B. in van Bueren, E. (2018). Urban mining and buildings: A review of possibilities and limitations. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.024>
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.H., Haberl, H. in Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68(10), 2696-2705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Krausmann, F., Weidenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., ... Haberl, L. (2017). Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(8), 1880-1885. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613773114>
- Kucukvar, M., Egilmez, G. in Tatari, O. (2016). Life cycle assessment and optimization-based decision analysis of construction waste recycling for a LEED-certified university building. *Sustainability*, 8(1), 89. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.024>
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., ... Christensen, T.H. (2014). Review of LCA studies of solid waste management systems – part I: lessons learned and perspectives. *Waste Management*, 34(3), 573-588. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
- Lederer, J., Kleemann, F., Ossberger, M., Rechberger, H. in Fellner, J. (2016). Prospecting and exploring anthropogenic resource deposits: The case study of Vienna's subway network. *Journal of industrial ecology*, 20(6), 1320-1333. <https://doi.org/10.1111/jiec.12395>
- Lendager Group (2018). Upcycle Studios. Pridobljeno s <https://lendager.com/en/architecture/upcycle-studios-en/>
- Lendager Group (2019). The Resource Rows. Pridobljeno s <https://lendager.com/en/architecture/resource-rows/>
- Manzi, S. in Bignozzi, M.C. (2020). Self-compacting concrete with recycled aggregates. V: F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R., Tuladhar in A. Koutamanis (ur.), *Advances in construction and demolition waste recycling* (str. 229-252). Duxford, Cambridge, Kidlington: Elsevier.
- Marinič, D. (2020). Digitalni potni list materialov kot temelj za krožno gradbeništvo. V: J. Volfand (ur.), *Priročnik za krožno gospodarstvo: Prehod v trajnostno gradnjo in življenjski cikel stavbe* (str. 16-21). Celje: Fit Media d.o.o.
- Mladenoivič, A. in Mauko Pranjic, A. (2020). Gradbeni odpadki so kakovosten surovinski tok za gradbeništvo. V: J. Volfand (ur.), *Priročnik za krožno gospodarstvo: Prehod v trajnostno gradnjo in življenjski cikel stavbe* (str. 123-127). Celje: Fit Media d.o.o.
- Moreno, M., De los Rios, C., Rowe, Z. in Charnley, F. (2016). A Conceptual Framework for Circular Design. *Sustainability*, 8(937), str. 1-15. <https://doi.org/10.3390/su8090937>
- Oogstkaart (2020). Pridobljeno s <https://www.oogstkaart.nl/>
- Pacheco-Torgal, F. in Jalali, S. (2011). *Eco-efficient Construction and Building Materials*. London: Springer Verlag.
- Restado (2020). Pridobljeno s <https://restado.de/>
- Salza (2020). Pridobljeno s <https://www.salza.ch/de>
- Samyn and partners (2017). Europa building. Pridobljeno s <https://samynandpartners.com/portfolio/europa-new-headquarters-of-the-council-of-the-european-union/>
- SRIP (2020). Krožno gospodarstvo. Pridobljeno s <https://srip-krožno-gospodarstvo.si/evropska-komisija-sprejela-nov-akcijski-nacrta-za-krožno-gospodarstvo/>
- Umwelt Bundesamt (2017). Verrottet Plastik gar nicht oder nur sehr langsam? Pridobljeno s <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/verrottet-plastik-gar-nicht-nur-sehr-langsam>
- Ur. I. EU, C 124, 9.4.2018. Tehnične smernice o razvrščanju odpadkov.
- Ur. I. EU, L370/46, 30.12.2014. Seznam odpadkov iz člena 7 direktive 2008/98/ES.
- Van Beers, D.T. in Graedel, E. (2007). Spatial characterisation of multi-level in-use copper and zinc stocks in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 15(8-9), 849-861. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.022>
- Villoria-Sáez, P., Porras-Amores, C. in del Río Merino, M. (2020). Estimation of construction and demolition waste. V: F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R., Tuladhar in A. Koutamanis (ur.), *Advances in construction and demolition waste recycling* (str. 13-30). Duxford, Cambridge, Kidlington: Elsevier.
- WWF – World Wide Fund for Nature (2014). Living Planet Report 2014: Species and Spaces, People and Places Gland. Pridobljeno s <https://www.worldwildlife.org/pages/living-planet-report-2014>
- ZAG (2014). Recikliranje odpadkov za potrebe gradbeništva. Pridobljeno s <https://www.zag.si/si/naslovne-teme/recikliranje>
- Zbašnik-Senegačnik, M. (1996). *Negativni vplivi gradiv na človeka in okolje*: doktorska disertacija. Ljubljana: Fakulteta za arhitekturo, Univerza v Ljubljani.