

Sedimenti v vodnih okoljih: geokemična in mineraloška  
karakterizacija, remediacija ter njihova uporabnost kot  
sekundarna surovina

(Projekt ARRS L1-4311, 1.7.2011 do 30.6.2014)

**PRIROČNIK O VREDNOTENJU OKOLJSKIH  
VPLIVOV PRI RECIKLIRANJU SEDIMENTOV IZ VODNIH  
TELES V GRADBENIŠTVU NA PODLAGI LCA ANALIZE**

Izdelali:

dr. Janez Turk, univ. dipl. inž. geol., Zavod za gradbeništvo Slovenije

dr. Alenka Mauko, univ. dipl. inž. geol., Zavod za gradbeništvo Slovenije

doc.dr. Ana Mladenovič, univ. dipl. inž. geol., Zavod za gradbeništvo Slovenije

Mirko Šprinzer, gr. inž., PKG Šprinzer Mirko s. p., Projekti krožnega gospodarstva

---

December 2014

---

## POVZETEK

**Analiza življenjskega cikla (LCA analiza)** je mednarodno uveljavljena metoda za **vrednotenje vplivov na okolje**, povezanih z določenim proizvodom ali procesom. Njeno uporabo podpira tudi Evropska komisija. Praktična uporabnost metode je v dejstvu, da nam služi kot pomoč pri sprejemanju okoljskih odločitev glede uporabe različnih primerljivih proizvodov ali tehnoloških postopkov. Izsledki LCA analiz so zanimivi tako za industrijo kot za potrošnike, saj sta varovanje okolja in racionalna raba snovnih virov dve od najpomembnejših družbenih prioritet. V priročniku je prikazan praktičen primer recikliranja/uporabe alternativnih surovin v industriji betona, kjer smo z LCA analizo ovrednotili proizvodnjo betona s tradicionalnimi surovinami in betona, v katerem je bil uporabljen delež mulja iz vodne akumulacije (nadomestek manjšega dela naravnega agregata).

## ABSTRACT

**Life Cycle Assessment (LCA)** is internationally accepted technique for **assessment of environmental impacts** associated with certain product or process. This technique is promoted also by European Commission. LCA is used in decision making as a tool to improve product design, for example the choice of materials, the selection of technologies, specific design criteria and when considering recycling. The results of LCA are important both for industry and for consumers as environmental protection and rational use of material resources are two of the most important priorities. A practical example of recycling is shown in the manual, where LCA analysis was carried out to evaluate the production of concrete made of traditional materials and concrete, where a small part of the aggregate was replaced by sludge from water accumulation.

## SPLOŠNO O PRIROČNIKU

### Vsebina

Priročnik vsebuje več poglavij, v katerih je predstavljena **LCA analiza kot metoda za preučevanje okoljskih vplivov**. Razložen je princip LCA analize in postopek za njeno izvedbo, poleg tega je predstavljen praktičen primer LCA analize iz področja uporabe materiala iz vodne akumulacije.

Primerjali smo okoljski vpliv dveh različnih scenarijev v zvezi z uporabo dveh receptur betona: prva je sestavljena iz konvencionalnih naravnih surovin, medtem ko je druga izdelana tako, da je bil manjši del drobnozrnatega agregata nadomeščen z muljem iz vodne akumulacije.

Priročnik je predvsem namenjen **gradbenemu sektorju** (projektantom, investitorjem, proizvajalcem gradbenih proizvodov, izvajalcem gradbenih del, nadzornikom gradbišč, inženirskim podjetjem) na eni strani in **imetnikom in zbiralcem odpadkov iz akumulacije** na drugi strani. Po klasifikacijskem seznamu odpadkov sta to skupini:

17 05 05\* - Material, izkopan pri poglobljanju dna z bagranjem, ki vsebuje nevarne snovi in

17 05 06 - Material, izkopan pri poglobljanju dna z bagranjem, ki ni naveden v 17 05 05.

Atmosferski procesi povzročajo erozijo zemeljske skorje, pri čemer nastajajo velike količine sedimentov. Velik del teh se z mesta nastanka transportira s tekočimi vodami in odlaga vzdolž vodotokov, ko voda izgubi svojo transportno moč. Podobni erozijski in sedimentacijski procesi potekajo v stoječih vodah in morju. Pomembne količine sedimentov so tudi posledica človekove dejavnosti; urbanizacije, industrijskih procesov in kmetijske dejavnosti. Po strokovni oceni znaša skupna letna erozija tal v Sloveniji cca 2 milijona m<sup>3</sup>, večina teh količin pa konča v vodnih telesih. Nalaganje teh sedimentov je škodljivo, saj se s tem zmanjšuje funkcionalnost vodnega telesa, ki ima sicer eno ali več funkcij: (a) zaježitev za potrebe pridobivanja električne energije za pregradami hidroenergetskih objektov, (b) luški pomoli, ki za operativnost potrebujejo določeno globino, (c) akumulacijski volumni za HE objekti in v jezerih so zadrževalniki visokih voda ob poplavih in so kot takšni ključni za zagotavljanje poplavne varnosti, poleg tega so to vodni rezervoarji za sušno obdobje, (d) imajo biološko čistilno kapaciteto, (e) zagotavljajo biodiverzitetu v prostoru. Za optimalno funkcioniranje vodnih teles/objektov je torej nujno redno čiščenje sedimentov in s tem vzdrževanje primarnega volumna in stanja akumulacije, ne glede na to, ali gre za naravne ali umetne.

Ocenjuje se, da se v Sloveniji v akumulacijah vodnih teles, ki imajo eno ali več zgoraj navedenih funkcij, nahajajo velike količine nezaželenih sedimentov, po grobi oceni v sladkih vodah vsaj 15 milijonov m<sup>3</sup>. Problem je izrazit predvsem na treh področjih: (I) za pregradami velikih rečnih hidroenergetskih objektov (Drava, Sava in Soča), (II) v polzaprtih ali zaprtih sistemih stoječih voda (jezerih in ribnikih), ki so zaradi svojega namena, morfologije in karakteristike pritokov podvržene močnemu in hitremu zamuljevanju (Blejsko jezero, Šmartinsko jezero), (III) na Obali, predvsem v Luki Koper in na nekaterih drugih podobnih objektih (ocenjuje se, da je na Obali potrebno letno iz morja odstraniti do 0,5 milijonov m<sup>3</sup> sedimentov). Karakteristike teh sedimentov variirajo v količini, petrografski in kemični sestavi (večji del je anorganski, del zaradi erozije humusa tudi organski), zrnavosti, predvsem pa v ekološki inertnosti. Nekateri sedimenti so onesnaženi predvsem s težkimi kovinami (sedimenti za HE Moste na Savi, sediment v Luki Koper), organokositrovimi spojinami, PAH in PCB. V vodnem okolju se težke kovine distribuirajo v raztopini, kot koloidi, v suspenziji in s sedimentom. Težke kovine niso podvržene naravnimi procesom razpadanja, v sedimentu se celo bogatijo, vendar v njem niso fiksirane. Spremenjeni kemični pogoji (pH, OPR, OM, T, slanost), povzročijo, da se del težkih kovin sprosti v vodo in postane razpoložljiv za organizme. Na ta način preko prehranske verige dosežejo tudi človeka. Tudi to je eden od razlogov, zakaj je redno in pravilno čiščenje sedimentov z antropogenim onesnaženjem potrebno.

Vsi opisani tipi sedimentov po načelu "Odpadek je surovina" predstavljajo potencialne surovine, predvsem v gradbeništvu, in sicer iz dveh razlogov: (a) v tej panogi je možno porabiti velike količine sedimentov in (b) z različnimi postopki remediacije je v gradbenih kompozitih možno nevarne snovi trajno imobilizirati. Perspektivno področje so zlasti nizke gradnje, kot nevezane ali hidravlično vezane nosilne plasti, in tudi vezani asfaltni in betonski kompoziti. Zlasti za sedimente, ki so onesnaženi, vgradnja v vezane kompozite (z bitumnom, apnom, cementom) sočasno predstavlja postopek remediacije, ki polutante dolgoročno fiksira v matrico kompozita. Sestava sedimentov iz avtotrofno prizadetih jezer je potencialno perspektivna tudi za predelavo v umetne humusne substrate za ekološko sanacijo na ne-kmetijskih zemljiščih. Zahteva je, da imajo novi kompoziti enako funkcionalnost in trajnost kot konvencionalni kompoziti. Vse rešitve morajo biti tudi cenovno vzdržne in izvedljive v praksi s standardno gradbeno mehanizacijo. Njihove morebitne pomanjkljivosti je možno izboljšati z uporabo nekaterih dodatkov, ki so bili prav tako primarno generirani kot odpadki (EF pepeli) ali z dodatkom novih materialov, zlasti nano-materialov.

Vzpostavlja se koncept krožnega gospodarstva, v katerem se snovne zanke zapirajo, zaradi česar se zmanjšuje količina odpadkov, ki jih je potrebno odlagati. Za energetska in surovinska uvozna odvisna Evropa to predstavlja številne prednosti, kot so manjše onesnaževanje, večja konkurenčnost, zaradi bolj učinkovite rabe virov tudi prihrank naravnih surovin in energije. Na globalni ravni to zagotavlja etično rast, ki upošteva omejitve Zemlje. Tudi na nacionalni ravni je ta paradigma že prepoznana in upoštevana, saj je ena izmed prednostnih področij prav učinkovita raba virov.

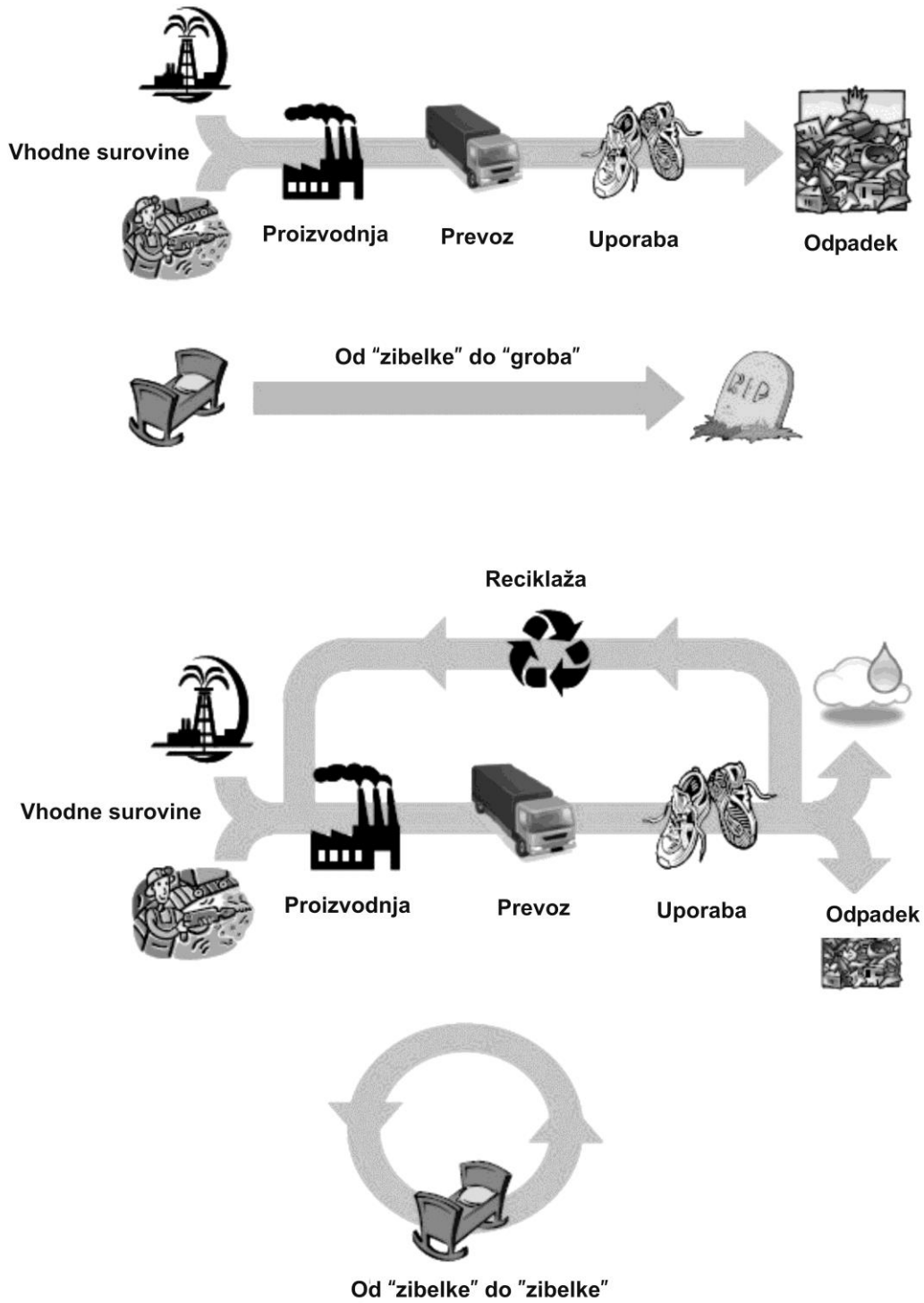
Omenjeni možne prednosti in prihranki so kvantificirani z uporabo LCA in LCCA orodij.

## 2.0 LCA ANALIZA

Učinke pričakovanih prednosti in možnih pomanjkljivosti, ki so posledica recikliranja odpadkov za uporabo v gradbeništvu, je potrebno kvantitativno ovrednotiti. V ta namen se v svetu uporablja več metod, med katerimi se je najbolj uveljavila **analiza življenjskega cikla**, v nadaljevanju **LCA analiza (Life Cycle Assessment analysis)**. **Vplivi recikliranega gradbenega proizvoda na okolje se v idealnem primeru vrednotijo s postopki povezanimi z njegovo proizvodnjo, uporabo in tudi razgradnjo.** V vsakem od preučevanih življenjskih ciklov se uporabljajo surovine, naravne ali reciklirane, ali energetske viri, običajno celo oboje hkrati. Okoljski vplivi so neposredno povezani z uporabo teh surovin in virov. Vplive vrednotimo z merjenjem izpustov v zrak, vodo, prst in s količino nastalega odpadnega materiala.

LCA analiza se je izkazala za uporabno predvsem v industriji, kjer do določenega izdelka pridemo z uporabo različnih tehnologij. Služi nam kot osnova pri sprejemanju odločitev, katero tehnologijo uporabiti, da bodo, v primerjavi z drugo primerljivo tehnologijo, negativni vplivi na okolje manjši. Izsledki LCA analize vse pogosteje zanimajo tudi končne uporabnike (potrošnike), ko se ti odločajo med posameznimi primerljivimi izdelki.

Na sliki 1 je prikazan primer življenjskega cikla proizvoda. Če upoštevamo vse faze, od proizvodnje surovin do končnega odlaganja, potem gre za primer »**od zibelke do groba**«. Upoštevajoč recikliranje, gre za primer »**od zibelke do zibelke**«, kjer se v krožnem gospodarstvu snovni tokovi zapirajo in odlaganja praktično ni.



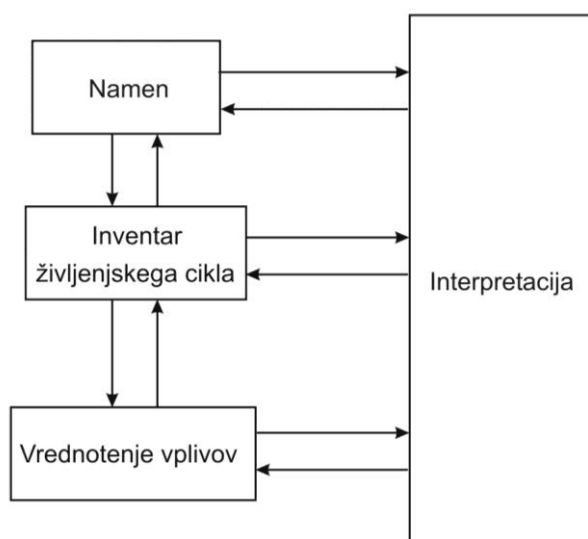
Slika 1: Različne stopnje življenjskega cikla proizvoda (Vir: Lehtinen in sodelavci, 2011)

## 4.0 POSTOPEK LCA ANALIZE

Postopek LCA analize je večstopenjski proces, ki je natančno definiran v mednarodnih standardih ISO, serije 14040 (SIST EN ISO 14040: Ravnanje z okoljem - Ocenjevanje življenjskega cikla). LCA analiza sicer poteka v štirih fazah (glej sliko 2), kjer se:

- v prvi fazi opredeli **namen in obseg študije**,
- v drugi fazi določi **inventar življenjskega cikla**,
- v tretji fazi **ovrednoti vplive in**,
- v četrti fazi **interpretira rezultate**.

Ocena življenjskega cikla



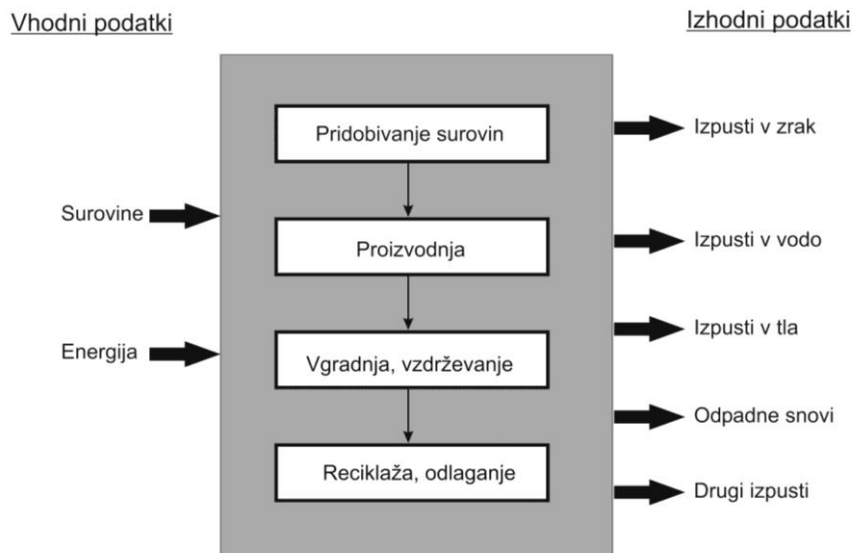
Slika 2: Analiza življenjskega cikla poteka v štirih fazah

### PRVA FAZA: Opredelitev namena in obsega študije LCA analize

V prvi fazi **definiramo namen LCA analize**, oziroma kateri postopek (proizvod) želimo z njo ovrednotiti ali katere postopke (proizvode) primerjati med seboj. Najprej opišemo proizvod (postopek), ki je predmet obravnave, nato določimo **obseg študije**. Slednje storimo tako, da navedemo vse tehnološke postopke, ki jih je potrebno vključiti v analizo. Določiti je potrebno funkcionalno enoto, na katero se bodo nanašali končni rezultati in razlaga. Funkcionalna enota opisuje funkcijo izdelka, ki ga proučujemo. Njen glavni namen je podati referenčno vrednost, na katero se normalizirajo količine vhodnih in izhodnih podatkov. Primer funkcionalne enote je določena količina proizvoda.

## DRUGA FAZA: Določitev inventarja življenjskega cikla

V drugi fazi, imenovani »določitev inventarja življenjskega cikla«, je **potrebno ugotoviti in navesti količine surovin in energijskih virov, ki so potrebni za izvajanje tehnoloških postopkov, opredeljenih v obsegu študije**. Za vsak tehnološki postopek moramo ugotoviti, kateri izpusti se sproščajo v okolje in jih količinsko ovrednotiti. Enostavno povedano, definirati moramo vse snovne in energetske vnose v sistem, ter vse izpuste iz sistema (glej sliko 3).



Slika 3: Stopnje življenjskega cikla z nakazano potrebo po surovinah in energiji ter spremljajočimi izpusti v okolje

## TRETJA FAZA: Vrednotenje vplivov

V tretji fazi **ovrednotimo okoljske vplive** in po želji tudi vplive na zdravje ljudi, kot posledica porabe energije, in surovin (oboje povzroča okoljske izpuste). Vplive vrednotimo z določenimi kazalci, najpogosteje nas zanima vpliv na segrevanje ozračja, na zakisovanje okolja in na zmanjšanje zalog fosilnih goriv itd.

## ČETRТА FAZA: Interpretacija rezultatov

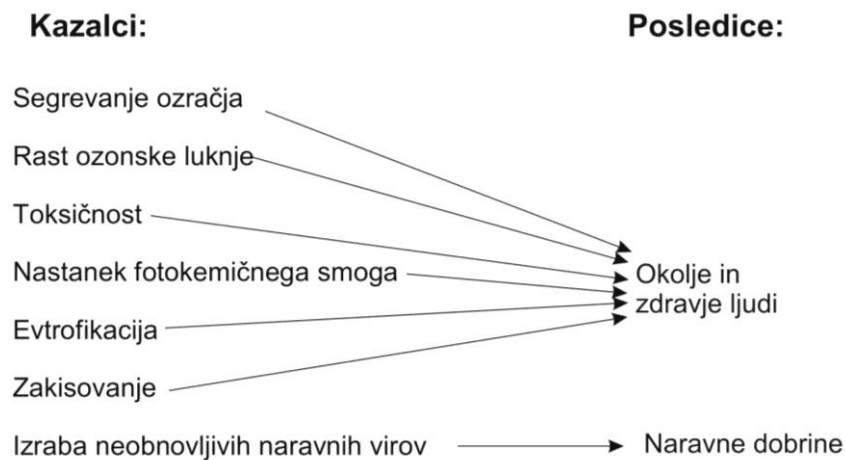
V zadnji fazi interpretiramo pridobljene rezultate (vplive na izbrane okoljske kazalce) v skladu z namenom LCA analize. Na podlagi rezultatov ugotavljamo ustreznost izdelkov in tehnoloških postopkov in jih med sabo primerjamo.

## 5.0 KAZALCI VPLIVOV NA STANJE OKOLJA IN ZDRAVJE LJUDI

Vrednotenje poteka na nivoju vpliva na naravo (stanje okolja), ljudi ter na izrabo neobnovljivih naravnih virov (glej sliko 4). Metodološko gledano gre za iskanje povezav med izdelkom (tehnološkimi postopki) ter vplivi na okolje (tudi vplivi na zdravje ljudi in vplivi na zaloge neobnovljivih naravnih virov).

**Vplive vrednotimo s faktorjem obremenitve, ki predstavlja skupek okoliščin, ki lahko povzročijo vpliv na okolje.**

Zgolj za primer: postopki, ki so povezani z izpusti toplogrednih plinov, vplivajo na segrevanje ozračja. Vrednotenje vplivov nam razjasni, kateri izmed toplogrednih plinov je bolj škodljiv, kakšen je vpliv enega ali drugega plina na segrevanje ozračja in podobno.



Slika 4: Kategorije vplivov se odražajo na stanju okolja, zdravju ljudi in na zalogah naravnih dobrin.

Najpogosteje uporabljamo sledeče **okoljske kazalce**, s katerimi vrednotimo **potencialne vplive na okolje**:

- **Vpliv na segrevanje ozračja in ogljični odtis**

---

Segrevanje ozračja je med drugim neposredno povezano z izpusti toplogrednih plinov v okolje, predvsem ogljikovega dioksida (CO<sub>2</sub>) ki prevladuje, dušikovega oksida (N<sub>2</sub>O), metana (CH<sub>4</sub>), lahkohlapnih organskih komponent in nekaterih drugih plinov. Vsi ti plini vplivajo na Zemljino toplotno ravnovesje, saj njihovo kopičenje v ozračju povzroča **globalno segrevanje**. Dolgoročno se posledice odražajo v obliki podnebnih sprememb, taljenju ledenikov ter posledično v dvigu morske gladine.

V javnosti se pogosto uporablja izraz »**ogljčni odtis**«, ki se nanaša na izpuste toplogrednega ogljikovega dioksida, zaradi česar je »ogljčni odtis« neposredno povezan z vplivom na segrevanje ozračja.

- **Vpliv na rast ozonske luknje**

---

Vpliv vrednotimo z izpusti ogljikovih, klorovih in fluorovih plinov ter ogljikovodikov v ozračje. Ti plini povzročajo naraščanje koncentracije klora in broma v stratosferi in posledično vplivajo na tanjšanje ozonske plasti, kar postopoma vodi do nastanka ozonske luknje. Posledica je povečano ultravijolično (UV) sončno sevanje na zemeljskem površju.

- **Vpliv na nastanek fotokemičnega smoga**

---

Smog nastaja zaradi razgradnje dušikovih oksidov in lahkohlapnih organskih komponent v ozračju ob prisotnosti svetlobe. Smog ima negativen vpliv na fotosintezo rastlin, pri ljudeh in živalih povzroča zdravstvene težave, predvsem bolezni dihal.

- **Vpliv na zakisovanje**

---

Gre predvsem za posledice kislega dežja, ki se odražajo v okolju. Kisli dež je povezan z izpusti žveplovega dioksida in dušikovih oksidov v ozračje. Žveplov dioksid nastaja pri gorenju fosilnih goriv, kot je premog, ki vsebuje veliko žvepla. Dušikove okside v ozračje izpuščajo industrija in izpušni plini avtomobilov. Omenjeni plini



se raztapljajo v deževnici, zaradi česar ta postane kislá. Kisline raztopljene v padavinah se nato kopičijo v površinskih vodah (jezerih, morjih) in v prsti, kar ima negativen vpliv predvsem na biotsko pestrost v vodnih okoljih (pogini rib) in na iglavce.

#### ▪ **Vpliv na evtrofikacijo**

---

Evtrofikacija je proces naraščanja količine biomase v vodi kot posledica povečane koncentracije anorganskih hranil (npr. nitratov in fosfatov). Velika količina hranilnih snovi omogoča hitro razmnoževanje alg, ki nato množično odmirajo. Zaradi bakterijske razgradnje odmrlega organskega materiala se intenzivno porablja kisik. Pomanjkanje kisika povzroča odmrtnje drugih vrst organizmov (ribe). Evtrofikacija je običajno povezana z onesnaženostjo, predvsem z vnosom fosfatov in nitratov v vodno okolje (primer: vnašanje odpadne vode iz kanalizacije in gnojenih kmetijskih površin v naravno okolje).

#### ▪ **Vpliv na izrabo neobnovljivih naravnih virov**

---

Gre za mineralne in fosilne naravne vire (zemeljski plin, nafta itd.), katerih zaloge so količinsko omejene. Izkoriščanje teh virov neposredno vpliva na zmanjšanje svetovnih zalog.

Obstajajo še drugi okoljski kazalci. Vrednotimo lahko tudi **vpliv na zdravje ljudi**, in sicer z izpusti nevarnih snovi in plinov v okolje (vodo, zrak in tla). Vpliv na zdravje ljudi je povezan z vsemi zgoraj navedenimi okoljskimi vplivi.

## **6.0 PRIMER UPORABE LCA ANALIZE PRIMERJAVA ETALONA IN BETONA Z MULJEM**

LCA analiza je primerna za **primerjavo gradbenih proizvodov, ki so izdelani za enak namen uporabe**, a so vsaj deloma zgrajeni iz različnih materialov.

Na primer, pri proizvodnji betona lahko del **naravnih agregatov** nadomestimo z umetnimi agregati (npr. industrijski stranski proizvodi kot sta livarski pesek in jeklarska žlindra) ali z odpadnim materialom (npr. mulj iz vodnih akumulacij). Pomembno je, da sta oba končna izdelka – **tradicionalni in alternativni (reciklirani)** – primerljive kakovosti.

### **6.1 Namen LCA analize**

---

V nadaljevanju podajamo primer uporabe LCA analize pri primerjavi konvencionalnega betona (etalona) in recikliranega/alternativnega betona (z uporabo vodnega mulja). Namen je bil ovrednotiti morebitne okoljske prednosti recikliranega/alternativnega betona v primerjavi s konvencionalnim, pri čemer smo upoštevali procese pridobivanja surovin do proizvodnje mešanic v betonarni (Sliki 5 in 6).

Recepturi etalona in betona z dodanim muljem sta podobni (Tabela 1). Pri slednjem na kubični meter betonske mešanice uporabimo le 32 kg mulja (1,3 % volumske teže betonske mešanice), s čimer zmanjšamo potrebo po naravnem agregatu za vsega skupaj 35 kg (20 kg manj agregata frakcije 0/4, 5 kg manj agregata 4/8 in 10 kg manj agregata 8/16). Količina uporabljenih ostalih surovin (cement, voda, superplastifikator) je enaka v obeh betonskih mešanicah.

**Funkcionalna enota** LCA analize je bila proizvodnja kubičnega metra betonske mešanice (etalon ali alternativni beton z muljem).

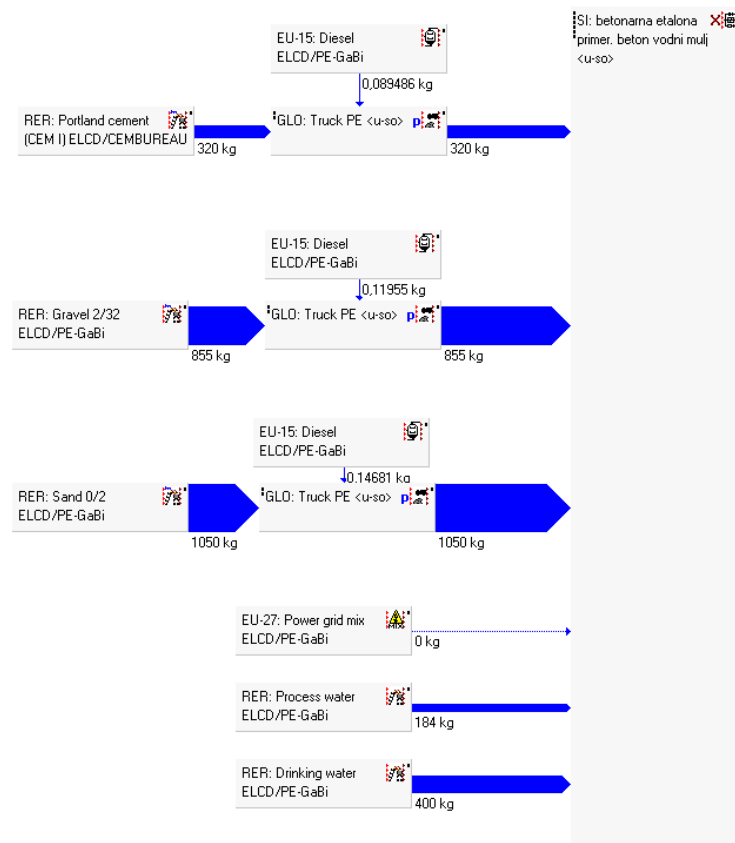
Tabela 1: Sestava betonov za 1 m<sup>3</sup> sveže mešanice

osnovni materiali	%	etalon		beton z muljem	
		kg/m <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>
cement		320	107	320	107
mulj iz HE Moste	10	0	0	32	11,5
voda		184 (v/c = 0,58)	184	184 (v/c = 0,58) (v/c+mulj = 0,52)	184
agregat					
0/4	55	1050	378	1030	372
4/8	15	285	103	280	101
8/16	30	570	206	560	203
superplastifikator	0,6	1,7	1,9	1,7	1,9
pore	2		20		20

## Etalon

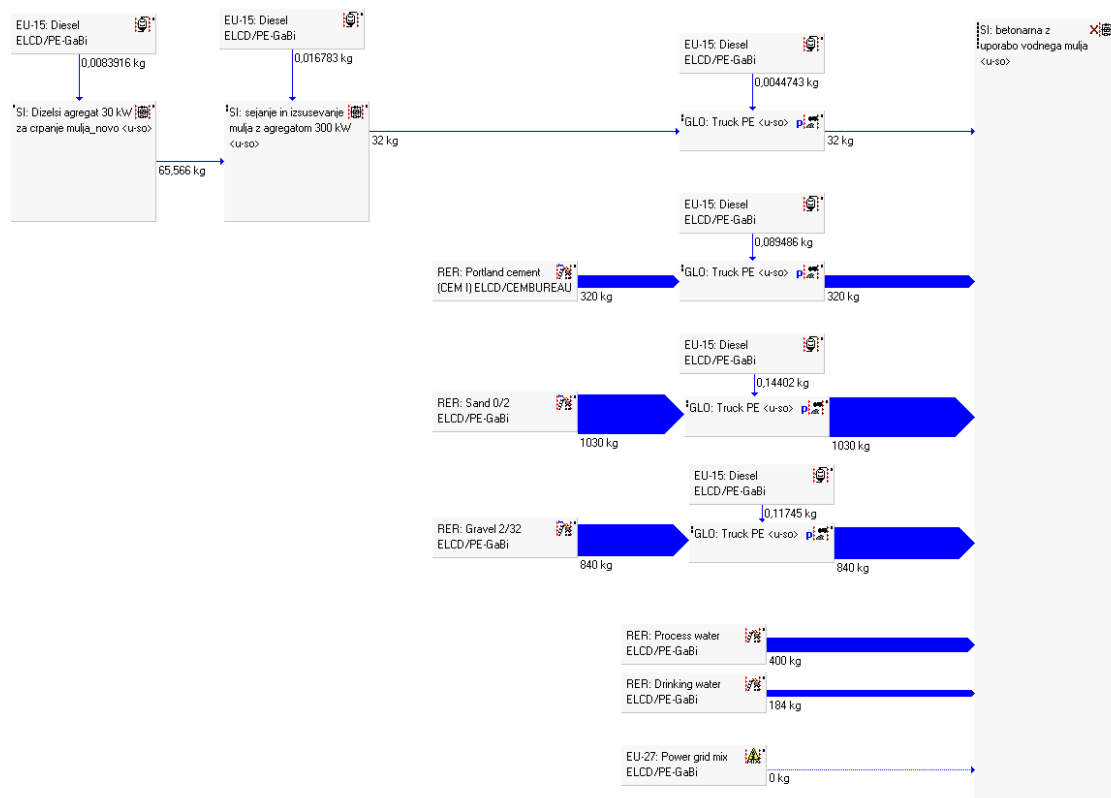
GaBi 4 process plan: Mass [kg]

The names of the basic processes are shown.



Slika 5. Obseg študije za proizvodnjo etalona.

**Beton z muljem**  
 GaBi 4 process plan; Mass [kg]  
 The names of the basic processes are shown.



Slika 6. Obseg študije za proizvodnjo betona z muljem.

## 6.2 Inventar življenjskega cikla

V analizo smo vključili pridobivanje surovin, njihov prevoz do betonarne in proizvodnjo betonske mešanice v betonarni (Sliki 5 in 6). Za vse izračune smo uporabili program GaBi, oziroma podatkovno bazo »professional+extensions«. Za cement (Portlandski cement CEM I) smo uporabili podatke iz povprečne evropske proizvodnje, enako velja za podatke o pridobivanju naravnega agregata. V LCA izračunih smo namesto frakcije 0/4 uporabili podatke za frakcijo 0/2. Naslednja poenostavitev se nanaša na frakciji 4/8 in 8/16. Zaradi pomanjkanja ustreznih podatkov, smo v GaBi-jevi podatkovni bazi uporabili podatke za proizvodnjo frakcije 2/32 (namesto 4/8 in 8/16). Uporabo superplastifikatorja smo zanemarili (v obeh scenarijih je uporabljen v enaki količini 1,7 kg). Za proizvodnjo obeh betonskih mešanic smo predvideli porabo električne energije 14,4 MJ na kubični meter betonske mešanice (podatek iz ene izmed slovenskih betonarn).

V scenariju proizvodnje betona z muljem, smo za izkop mulja (surovina ki deloma nadomešča naravni agregat) uporabili dizelski agregat moči 300 kW, ki porabi okoli 30 litrov nafte na eno uro obratovanja, v tem času pa izvede po izkopu transport okoli 200 m<sup>3</sup> mešanice mulja in vode (največ 10 % suhe snovi v mešanici). Sledi obdelava mulja z vsebnostjo do 10 % suhe snovi: sejanje in dehidracija na vsebnost do 70 % suhe snovi v mulju (po dehidraciji). Tu smo zopet uporabili dizelski agregat moči 300 kW, ki porabi okoli 30 litrov nafte na eno uro obratovanja (kapaciteta 100 m<sup>3</sup>/uro). Podatki za izkop in obdelavo mulja se nanašajo na dejanski primer (akumulacijski bazen pri HE Moste). Izpusti med delovanjem 300 kW dizelskega agregata so podani v Tabeli 2 in so povzeti po standardu (EU emission standard for stage III controlled 130-560 kW diesel engines).

Razdalja prevoza za naravni agregat in vodni mulj kot delni nadomestek naravnega agregata je bila predpostavljena kot enaka (10 km do betonarne).

Tabela 2. Ocenjeni izpusti med delovanjem dizelskega agregata moči 300 kW.

IZPUSTI	KOLIČINA (kg/kWh)
Amonij	0,000236
Ogljikov monoksid	0,413
Prašni delci (PM2.5)	0,0236
Hidrokarbonske komponente	0,7552
Metan	0,0059
Dušikovi oksidi (NO <sub>x</sub> )	0,7552
Dušikov oksid (N <sub>2</sub> O)	0,0413
NM <sub>10</sub> VOC	0,118

### 6.3 Vrednotenje vplivov

LCA analiza je potrdila, da so razlike med proizvodnjama obeh betonov minimalne, oziroma ne presegajo standardne napake LCA izračunov (ta po oceni znaša nekaj odstotkov). Rezultati, oziroma vrednotenje vplivov dveh primerjanih betonskih mešanic je podano v Tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati LCA analize. Primerjava etalona in betona z muljem (upoštevana je uporaba surovin, njihov prevoz in proizvodnja v betonarni).

	<b>Etalon</b>	<b>Beton z muljem</b>	Vrednost betona z muljem v primerjavi z etalom (%)
Izraba mineralnih surovin (kg Sb ekviv.)	0,000483	0,000483	99,999
Izraba fosilnih goriv (MJ)	1202,724	1202,855	100,01
Zakisovanje (kg SO <sub>2</sub> ekviv.)	0,788132	0,787729	99,95
Evtrofikacija (kg fosfati ekviv.)	0,08687	0,086892	100,025
Globalno segrevanje (kg CO <sub>2</sub> ekviv.)	299,4281	299,3529	99,975
Vpliv na zdravje ljudi (kg DCB ekviv.)	8,916008	8,910827	99,942
Rast ozonske luknje (kg R-11 ekviv.)	1,59E-05	1,58E-05	99,894
Nastanek smoga (kg eten ekviv.)	0,085065	0,085148	100,097

## 6.4 Interpretacija rezultatov

---

»Prednost« scenarija, kjer betonu dodajamo vodni mulj je v dejstvu, da zmanjšamo potrebo po pridobivanju naravnega agregata. Posredno torej vplivamo na zmanjšanje izpustov, ki se sproščajo v kamnolomu in na ohranjanje naravnih virov.

V tu opisanem primeru smo z reciklažo nadomestili razmeroma majhno količino naravnega agregata (35 kg od skupaj 1905 kg), zato je bilo pričakovati, da bodo rezultati LCA analize pokazali zelo majhne razlike glede okoljskih vplivov enega ali drugega betona. Črpanje in pridobivanje 32 kg vodnega mulja sta energetska razmeroma potratna postopka, ki sta približno enako obremenjujoča za okolje, kot proizvodnja 35 kg naravnega agregata v kamnolomu. Po drugi strani je količina uporabljenega cementa v obeh betonskih mešanicih enaka. Po splošno znanem dejstvu je proizvodnja cementa kot surovine tisti postopek, ki prispeva večino izpustov v sistem življenjskega cikla betonov. Zgolj za primer, proizvodnja tone Portlandskega cementa je povezana z okoli 900 kg CO<sub>2</sub> izpustov, proizvodnja enake količine naravnega agregata pa povzroča le okoli 3 kg CO<sub>2</sub> izpustov (vir: GaBi).

Iz omenjenih razlogov obe primerjanih betonski mešanici torej izkazujeta primerljiv okoljski odtis (ni izrazitejših razlik, kar se tiče izpustov v okolje in izrabe fosilnih goriv) (Tabela 3).

Beton z vodnim muljem ima vsaj eno prednost, z dodajanjem vodnega mulja zmanjšamo vpliv na izrabo mineralnih surovin (ob predpostavki, da vodni mulj obravnavamo kot odpadni material). Ker pa so zaloge mineralnih surovin velike, njihov prihranek v scenariju z uporabo vodnega mulja ne pride do izraza (Tabela 3). Glede na razmeroma majhne količine mulja uporabljene v betonskih mešanicih, je zanemarljiv prihranek pričakovan. Čeprav rezultati LCA analize niso pokazali jasne koristi reciklaže, je uporaba vodnega mulja v betonih vendarle smiselna, predvsem z vidika uporabe odpadnega materiala, sama LCA analiza pa je omogočila večjo preglednost postopkov, identifikacijo postopkov in materialov v življenjskem ciklu, ki imajo največji vpliv na okolje in možnost odločanja in izboljšanja postopkov in tehnologij na osnovi kvantificiranih dejstev.

## 7.0 SKLEP

Na opisanem primeru smo prikazali uporabo LCA orodja. Analiza življenjskega cikla je v svetu prevladujoča metoda za določanje vplivov na okolje, njena uporaba pa pomembna pri sprejemanju odločitev, ki vplivajo na zmanjšanje izpustov v celotnem življenjskem ciklu, predvsem tistih, ki so neposredno ali posredno povezani z industrijsko dejavnostjo (npr. proizvodnjo), ali pa z ravnanjem z različnimi odpadnimi snovmi (ali materiali).

V Sloveniji se je LCA metoda pričela bolj uveljavljati šele v zadnjih nekaj letih. Projekt **Sedimenti v vodnih okoljih: geokemična in mineraloška karakterizacija, remediacija ter njihova uporabnost kot sekundarna surovina** (L1-4311) se je med drugim nanašal na reciklažo odpadnega mulja iz akumulacijskih vodnih bazenov. Z LCA analizo smo ovrednotili vplive povezane z ravnanjem s tovrstnimi snovmi. Končni namen je zmanjševanje raznovrstnih vplivov na okolje. Čeprav ima LCA metoda določene pomanjkljivosti (npr. določene izpuste je težko vrednotiti, zato se deloma uporabljajo približki in poenostavitve), se s široko uporabo njen pomen in zanesljivost podatkov povečuje.

V tu opisanem konkretnem primeru so LCA izračuni pokazali, da se med postopkom črpanja in pridobivanja 32 kg mulja iz akumulacijskega vodnega bazena v ozračje spusti primerljiva količina škodljivih plinov, kot med pridobivanjem 35 kg naravnega agregata v kamnolomu. Posledično so okoljski vplivi konvencionalnega in recikliranega betonom zelo podobni. Kljub temu lahko trajnostno upravljanje s sedimenti dosežemo samo s holističnim pristopom, ki upošteva različne alternative ravnanja s sedimentom (remediacija, odlaganje, recikliranje...) in pri čemer je lahko primerjalna LCA metoda močno orodje za ocenjevanje okoljskih bremen in s tem kvantificirana osnova za odločevanje glede ustreznih metod ravnanja s sedimenti.