



Izgradnja lizimetrov za preučevanje izpiranja potencialno nevarnih snovi iz gradbenih proizvodov

Construction of lysimeters for researching the leaching of potentially toxic elements from building materials

Janez TURK¹, Janko URBANC², Ana MLADENOVIC¹, Alenka PAVLIN³, Primož OPRČKAL¹, Karmen FIFER BIZJAK¹, Barbara LIKAR¹, Marko BRODNIK¹ & Nina MALI²

¹Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: janez.turk@zag.si

²Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

³TERMIT d.d., Drtija 51, 1251 Moravče, Slovenija

Prejeto / Received 1. 6. 2020; Sprejeto / Accepted 28. 10. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Ključne besede: lizimeter, izlužek, okoljski monitoring, geotehnični zasip, odpadki

Key words: lysimeter, leachate, environmental monitoring, geotechnical fill, waste

Izvleček

Z uporabo recikliranih odpadkov v gradbeništvu nadomeščamo naravne materiale in s tem vzpostavljamo krožno gospodarstvo na lokalnem nivoju. Pomemben vidik je tudi ohranjanje naravnih virov. To je še posebno pereče pri zemeljskih delih (npr. zasipih in nasipih), kjer prihaja do velike porabe materialov. Geotehnični kompoziti iz recikliranih materialov, v primerjavi z naravnimi agregati ali zemljinami, lahko vsebujejo višje celotne koncentracije potencialno nevarnih snovi (težke kovine, klorid, sulfat, fluorid, organska onesnaževala itd.). Pogoj za uporabo takšnih kompozitov je, da so v njih potencialno nevarne snovi imobilizirane in da so zato iz kemijskega vidika trajno inertni. Možni vplivi na okolje, predvsem prenos različnih potencialno nevarnih snovi iz kompozitov v tla oziroma vodonosnik, so običajno ovrednoteni na laboratorijski ravni, medtem ko je njihovo obnašanje v dejanskem okolju slabo proučeno. Zato se pojavljajo zahteve po razvoju občutljivih, zanesljivih in cenovno ter časovno učinkovitih orodij za določitev masnih tokov potencialno nevarnih snovi iz gradbenih proizvodov, na primer geotehničnih kompozitov, pod vplivi različnih okoljskih dejavnikov. V članku predstavljamo postopek vzpostavitve terenskega laboratorija na osnovi sistema "pan" lizimetrov, za zbiranje izcednih voda iz zasipov, ki so bili izdelani iz geotehničnih kompozitov iz recikliranih materialov. Lizimetre smo konstruirali in izvedli tako, da je njihova izgradnja cenovno ugodna, hkrati pa so po svojih dimenzijah dovolj veliki, da reprezentativno odražajo procese v zgrajenih geotehničnih zasipih. Pridobljeni podatki o količini in parametrih izcedne vode bodo služili kot osnova za določanje vodne bilance in za študij imobilizacije potencialno nevarnih snovi v kompozitih. Hkrati bodo uporabljeni kot vhodni podatki za geokemijski numerični model, s katerim bomo simulirali transport potencialno nevarnih snovi, sproščenih iz preučevanih kompozitov, v različnih tipih vodonosnikov (npr. medzrnski in razpoklinski).

Abstract

By using recycled waste in construction, natural materials are being replaced, thus establishing a circular economy at the local level. An important aspect is also the conservation of natural resources. This is especially important in case of earthworks (embankments, backfills), which are large consumers of materials. Compared to natural aggregates and earth, geotechnical composites based on recycled materials can contain a higher total content of potentially toxic elements (heavy metals, chloride, sulphate, fluoride, organic pollutants etc.). The prerequisite for beneficial use of such composites is that the potentially toxic elements are immobilized in the composites, meaning that they are chemically inert. Potential environmental impacts, especially those associated with transfer of potentially toxic elements from new geotechnical composites into soil (aquifer respectively), are usually evaluated on laboratory scale, while their behaviour in real environment is usually poorly investigated. For this reason, there is a demand for the development of sensitive, reliable, and cost and time efficient monitoring tools for determining mass flows of potentially toxic elements from building materials, for example geotechnical composites, which are under the influence of various environmental factors. This paper presents the construction of field laboratory, based on a system of pan lysimeters. The lysimeters are used to collect leachate from geotechnical composites based on recycled materials. They are constructed in a way to be relatively low cost and at the same time large enough to representatively reflect the processes in geotechnical fills. Obtained data on the amount and quality of leachate can be used as a basis for the study of immobilization processes and for water balance. Moreover, this data will be used as input in the geochemical numerical model for the simulation of transport of potentially toxic elements released from geotechnical fills in different types of aquifers (alluvial aquifer with intergranular porosity, aquifer in consolidated rocks with fissure porosity).

Uvod

Pri različnih industrijskih procesih nastajajo velike količine stranskih proizvodov ali odpadkov, ki jih je možno z recikliranjem uporabiti kot sekundarne surovine v gradbeništvu. Zlasti tisti, ki nastajajo v velikih količinah, se v geotehniko oz. tudi širše v gradbeništvu uporabljajo kot reciklirani materiali, ki lahko nadomeščajo naravne surovine, predvsem naravne agregate in zemljine. Prednosti uporabe stranskih proizvodov in odpadkov so predvsem ohranjanje naravnih surovin in običajno manjši okoljski odtis. Pogoja za uporabo stranskih proizvodov in odpadkov sta njihova tehnična ustreznost in okoljska sprejemljivost, kar je možno doseči z ustrezno predelavo, imobilizacijo potencialnih onesnaževal in pravilno vgradnjo (Turk et al., 2015; Mladenović & Mauko Pranjić, 2016; Mladenović 2018; Fifer Bizjak et al., 2019). V primerjavi z materiali naravnega izvora, reciklirani materiali običajno vsebujejo višje celotne koncentracije potencialno nevarnih snovi (npr. težke kovine, klorid, sulfat, fluorid, organska onesnaževala itd.). To dejstvo vpliva na okoljske omejitve glede njihove uporabe. Ob stiku recikliranega materiala z vodo (padavine, podzemna voda, porna voda) lahko pride do sproščanja onesnaževal v okolje, predvsem v tla oziroma vodonosnik (Birgisdóttir et al., 2006; Turk et al., 2014). Po načelih analize tveganja, tak material predstavlja možen vir za sproščanje onesnaževal v okolje. Transportni medij za onesnaženje je voda. Če pride v vodonosnik, predstavlja pot prenosa do sprejemnikov (ljudi in živali), ki jo zaužijejo. Masni tok potencialno nevarnih snovi iz materiala je v tesni povezavi z vodno bilanco oziroma s količino vode, ki v določenem časovnem obdobju prehaja skozi material. Slednje lahko preučimo z uporabo lizimetrov (Mali, 2002; Luthy et al., 2003; von Unold & Fank, 2008).

Z ustreznim postopkom proizvodnje in vgradnje geotehničnih kompozitov iz recikliranih materialov je mogoče doseči imobilizacijo potencialno nevarnih snovi in pridobiti kemično inertne gradbene proizvode (Oprčkal et al., 2020), ki se lahko uporabljajo kot material za zasipe in nasipe (Smolar et al., 2016). Pri razvoju in uporabi teh novih materialov se glavna skrb nanaša na nezadostno poznavanje možnih okoljskih vplivov v teku njihove življenjske dobe (Schwab et al., 2014). Podzemna voda je najbolj ranljivo vodno okolje in eden od najpomembnejših virov pitne vode. Da bi preprečili onesnaženje podzemne vode, se v novejšem času pojavlja zahteva po razvoju občutljivih, zanesljivih in cenovno ter

časovno učinkovitih orodij za spremljanje potencialnih onesnaževal v izcedni in podzemni vodi. Z eksperimentalnim delom, ki temelji na uporabi lizimetrov, lahko določimo vodno bilanco in masni tok potencialno nevarnih snovi v izlužku geotehničnih kompozitov (von Unold & Fank, 2008). Na podlagi rezultatov lizimeterskih poskusov lahko vzpostavimo učinkovit monitoring za določitev možnih dolgoročnih vplivov geotehničnih kompozitov na podzemno vodo in z njim obenem spremljamo učinkovitost imobilizacije onesnaževal.

V tem prispevku predstavljamo postopek vzpostavitve terenskega laboratorija – sistema lizimetrov za zbiranje izcednih voda iz geotehničnih zasipov. Osnovo terenskega laboratorija predstavljajo lizimetri s pripadajočo merilno opremo in zbiralniki izcedne vode. Lizimetre smo konstruirali tako, da je njihova izgradnja cenovno ugodna, hkrati pa so dovolj veliki, da reprezentativno odlikavajo hidrodinamične, hidravlične in izluževalne procese v proučevanih geotehničnih zasipih. Končni cilj raziskave je proučiti dolgoročno učinkovitost imobilizacije potencialno nevarnih snovi v izbranih kompozitih, koncentracijo sproščenih snovi ter njihovo usodo oziroma transport v različnih tipih naravne zemljine (različni vodonosniki). Usodo potencialno nevarnih snovi sproščenih iz kompozitov v naravnem okolju je težko določiti, posledično procesi sorbcije in desorbcije teh snovi v geološki podlagi niso v celoti pojasnjeni. Zato raziskava predstavlja izziv iz znanstvenega in tehničnega vidika.

Pomen lizimetrov

V stroki obstajajo različne metode in pripomočki za preučevanje masnega toka potencialno nevarnih snovi iz zemljin ali geotehničnih zasipov v naravnem okolju. Številne raziskave dinamike prenikajoče vode in z njo povezanega transporta organskih in/ali anorganskih onesnaževal temeljijo na uporabi lizimetrov (Mali et al., 2007; Koroša et al., 2020). Ti omogočajo zbiranje izcedne vode za potrebe ugotavljanja vodne bilance v preučevani zemljini/zasipu in določanja kemijskih parametrov vode (prisotnost in vsebnost onesnaževal) (Hansen et al., 2000; Howell, 2005; von Unold & Fank, 2008; Albright et al., 2012). Raziskave z uporabo lizimetrov predstavljajo vez med laboratorijskimi in terenskimi raziskavami (Singh et al., 2017). Lizimetri lahko zajamejo neprimerno večji volumen materiala, kot preiskava v laboratoriju. Zaradi izpostavljenosti vremenskim pogojem odsevajo dejanske pogoje,

ki vladajo v okolju. Predvsem slednje je njihova glavna prednost v primerjavi z laboratorijskimi izluževalnimi testi (Hansen et al., 2000; Abdou in Flury, 2004).

Lizimetri se uporabljajo na različnih področjih, njihova uporaba je najbolj razširjena v kmetijstvu in raziskavah okolja nasploh (Corwin & Le Mert, 1994; Saporito et al., 2016). Podatki o parametrih izcedne vode, vzorčene v terenskih lizimetrih, lahko predstavljajo osnovo za načrtovanje odlagališč odpadkov (Albright et al., 2013), za uporabo pesticidov in gnojil v kmetijstvu (Corwin & Le Mert, 1994), za uporabo recikliranih materialov v zemeljskih delih itd.

Izgradnja lizimetrov za preučevanje izcednih voda iz geotehničnih kompozitov

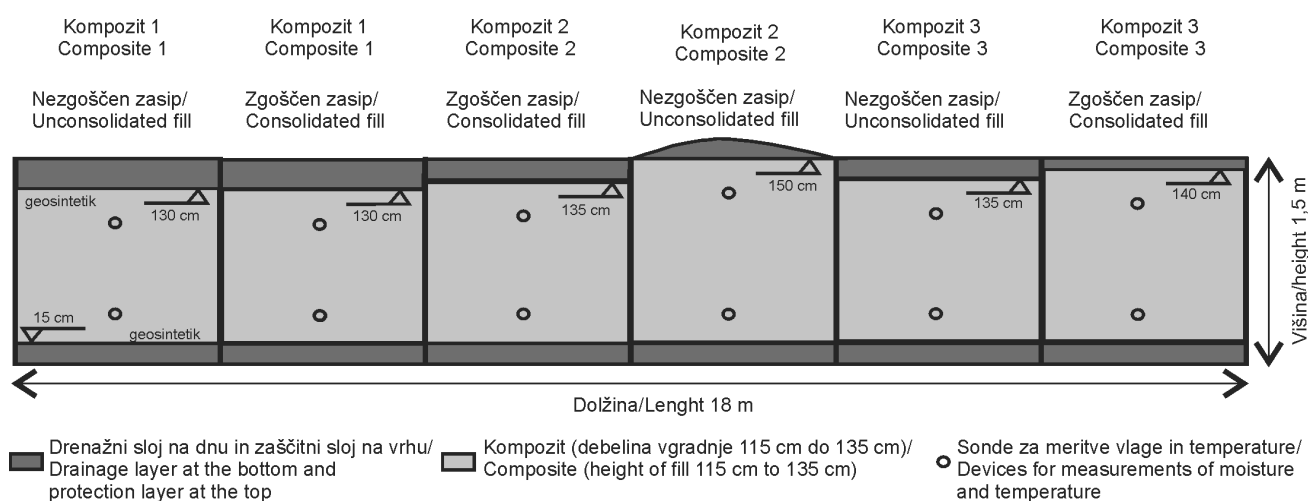
Na testnem polju podjetja TERMIT smo postavili šest lizimetrov, v katere smo vgradili izbrane geotehnične kompozite. Ti kompoziti se uporabljajo za izgradnjo nekonstrukcijskih sanacijskih nasipov ali zasipov. Podjetje TERMIT želi sanirati 1.500.000 m³ veliko degradirano opuščeno rudarsko območje. Sanacija poteka z vgrajevanjem geotehničnih kompozitov iz recikliranih odpadkov (Cerar & Bavec, 2019). Lizimetri so v obliki posod z dimenzijami: dolžina 3 m, širina 3 m in višina 1,5 m. Njihovo ogrodje predstavlja kovinska konstrukcija iz debelostenskih cevi (60 × 60 × 4 mm), na katero smo z vijaki pritrtili opažne plošče debeline 27 mm (sl. 1 in 2). Notranje stranice lesenega opaža smo pred zapolnitvijo lizimetra z geotehničnim kompozitom obložili s čepasto folijo, ki služi kot hidroizolacija.

Na dnu vsakega lizimetra smo vgradili izolacijski sloj iz glinice ter oblikovali odtočni kanal za zbiranje izcedne vode. Glineni sloj smo v celoti prekrili s plastično folijo debeline 0,5 cm. Folijo smo na vseh štirih straneh lizimetra zavahali navzgor za 0,5 m in jo pritrtili na stene lizimetra, s čimer smo preprečili, da bi izcedna voda nenaadzorovano iztekala ob straneh lizimetra (sl. 3).

V odtočni kanal smo eno ob drugi položili dve perforirani cevi iz alkatena (PE 100, fi 3 cm) (sl. 3). Cevi smo speljali skozi lizimeter do nekaj metrov oddaljenega zbiralnika izcedne vode (sl. 2). V ta namen smo tik nad dnom lizimetra prevrtali opažno ploščo, prav tako tudi plastično folijo. Premer vrtalne krone, s katero smo prevrtali folijo, je bil manjši od premera cevi iz alkatena, vendar dovolj velik, da smo cev lahko napeljali skozi folijo. To je pomembno z vidika zagotavljanja vodo-neprepustnosti stika, ki smo ga dodatno zatesnili s silikonskim lepilom. Ena cev je rezervna, če bi med vgradnjo kompozita ali kasneje prišlo do zamašitve cevi, bo na voljo še vedno druga cev za drenažo izcedne vode.

Na pripravljeno dno lizimetrov smo nasuli približno 15 cm debel sloj kremenčevega peska (frakcije 4/8 mm), ki predstavlja drenažni sloj in čezenj položili geosintetični filter (netkani geotekstil, ki se uporablja kot ločilni oziroma zaščitni sloj).

Drenažni sloj je dovolj debel, da v celoti prekrija odtočni kanal, obe drenažni cevi in celotno površino dna posameznega lizimetra. S tem je preprečeno zasičenje z vodo ob spodnji površini kompozita zaradi morebitnega dviga nivoja izcedne vode v drenažni plasti ob intenzivnejšem



Sl. 1. Vzdolžni profil šestih lizimetrov z nakazanimi debelinami drenažnega sloja, vgrajenih geotehničnih kompozitov in zaščitnega sloja. Sloji so ločeni z geosintetikom. Nakazane so tudi lokacije sond.

Fig. 1. Longitudinal profile of six lysimeters with indicated thicknesses of the drainage layer, embedded geotechnical composites and protective layer. The layers are separated by geosynthetics. Probe locations are also indicated.



Sl. 2. Kovinsko ogrodje šestih lizimetrov, postavljeno na utrjen nasip (zgoraj), montiranje opažnih plošč na ogrodje (spodaj levo) in dokončani lizimetri z drenažnimi cevmi speljanimi do zbiralnikov ob vnožju nasipa (spodaj desno).

Fig. 2. Metal framework of six lysimeters, placed on an embankment (upper photos), fitting of formwork panels on the metal framework (bottom left) and completed lysimeters with drainage pipes leading to the reservoirs at the foot of the embankment (bottom right).

toku vode skozi zasip. S tega vidika je pomembna tudi prevodnost drenažne cevi, ki mora sproti odvajati izcedno vodo iz filtrne plasti na dnu lizimetra v zbiralnik izcedne vode. Lizimetre smo postavili na utrjen nasip z namenom, da se lahko izcedna voda preko drenažnih cevi v zbiralnike ob vnožju nasipa pretaka gravitacijsko (sl. 2).

Sledila je vgradnja izbranih geotehničnih kompozitov. Sestava, tehnološki postopek izdelave in pogoji vgradnje kompozitov so bili za izbrani namen uporabe predhodno optimizirani na laboratorijskem nivoju. Kompoziti so v različnih masnih deležih vsebovali reciklirane materiale iz inertnih in nenevarnih odpadkov: papirniški pepel, papirniški mulj, livarsko žlindro in pesek, ogorke in žlindro iz sežiga nenevarnih odpadkov ter digestat iz anaerobne biološke obdelave nenevarnih komunalnih odpadkov. Recikliranim materialom je bil v postopku predelave primešan mulj. Le ta predstavlja glineno-meljni ostanek (Likar et al., 2020), ki nastaja pri pranju

kremenčevega peska v podjetju TERMIT. Recepture so bile optimizirane z namenom doseganja okoljske sprejemljivosti kompozitov oziroma njihove inertnosti. Pucolanske in hidravlične faze, ki jih vsebujejo pepeli, po reakciji z vodo tvorijo nove mineralne faze. Le te in minerali glin, ki sestavljajo separacijski mulj, omogočajo kemijsko in fizikalno imobilizacijo potencialno nevarnih snovi v vezanem kompozitu. Za doseganje imobilizacije in vezave v geotehničnih kompozitih je pri pripravi potrebno upoštevati tudi optimalno vsebnost vlage, ki je predhodno določena s standardnim Proctorjevim postopkom (SIST EN 13286-2:2010/AC:2013). Kompozit z optimalno vsebnostjo vlage je možno vgraditi na način, da dosega maksimalno zgoščenost, ki zagotavlja njegovo mehansko stabilnost in slabo vodoprepustnost. To pa sta pogoja za učinkovito fizikalno imobilizacijo potencialno nevarnih snovi (Oblak et al., 2011; Mladenovič et al., 2017; Oprčkal et al., 2020).



Sl. 3. Priprava vodo neprepustne podlage, oblikovanje odtočnega kanala in montaža drenažnih cevi.
Fig. 3. Preparation of a waterproof base layer, design of a drainage channel and installation of drainage pipes.

Posamezni odpadki so bili pred predelavo skladiščeni na začasnih, ločenih deponijah, kjer so bili v prvi fazi predelave homogenizirani z mešalno žlico. Pred vgradnjo smo iz deponij odvzeli vzorce odpadkov in jim v laboratoriju določili vsebnost vlage in suhe snovi. Količina posameznih komponent v kompozitu je namreč določena na podlagi suhih masnih deležev (Smolar et al., 2016). Pripravili smo mešalni plato, kamor smo z bagrsko tehtalno žlico v ustreznih deležih zaporedno dodajali posamezne komponente. Vse skupaj smo večkrat premešali z mešalno žlico (sl. 4). V fazi homogenizacije kompozita se je po potrebi dodajala voda, z namenom doseči optimalno vsebnost vlage v kompozitu, ki je bila predhodno določena v laboratoriju s standardnim Proctorjevim postopkom (SIST EN 13286-2:2010/AC:2013). Vsebnost vlage v kompozitu se je na terenu preverjala z uporabo izotopske sonde. Homogen in optimalno navlažen kompozit smo nato kot zasip po plasteh vgradili v testno polje (sl. 4) (Likar et al., 2020).

Pripravili smo tri, po sestavi različne geotehnične kompozite, vsakega smo vzporedno vgradili v dva lizimetra na dva načina. Prvi način vgradnje je potekal po slojih oziroma plasteh in predstavlja optimalno oziroma pravilno vgrajevanje kompozita v zasip. Vsak posamezen sloj debeline 30 cm smo zgostili in utrdili z vibracijsko ploščo in nabijalcem (sl. 4), sledilo je nasutje novega sloja in ponovno zgoščevanje ter utrjevanje. Tak način vgradnje kompozita ustreza zahtevi po vsaj 95 % zgoščenosti kompozita, glede na največjo suho gostoto, predhodno določeno v laboratoriju s standardnim Proctorjevim postopkom (SIST EN 13286-2:2010/AC:2013). Drug način vgradnje je predstavljal skrajni primer neupoštevanja osnovnih geotehničnih pristopov za gradnjo zasipa. V tem primeru smo kompozit nasuli v slojih, debelih približno 30 cm in vsak sloj posebej steptali. Takšen neprimeren način vgradnje se odraža v večji poroznosti vgrajenega kompozita, zaradi česar pričakujemo večjo infiltracijo padavinske vode in posledično večji tok

skozi kompozit v zasipu. To ima neposreden vpliv na stopnjo zasičenosti kompozita z vodo (razmerje voda / suha snov) in na izluževanje potencialno nevarnih snovi. Po zgoščanju vsake vgrajene plasti (prvi način vgradnje) smo izvedli kontrolo vgradnje z izotopsko sondo za določitev suhe gostote in vsebnosti vlage (po TSC 06.711:2001) ter nosilnosti s krožno obremenilno ploščo s padajočo lahko utežjo za določitev dinamičnega deformacijskega modula (po TSC 06.720:2003) (Likar et al., 2020).

Lizimetrov nismo zapolnili z materialom do vrha, da ne bi prihajalo do preliivanja površinskega odtoka padavinske vode z zgornje površine kompozita izven zajemnega dela lizimetrov, kar bi lahko predstavlja težavo pri izračunih vodne bilance. Pri kompozitih, ki smo jih zgostili z vibracijsko ploščo in/ali nabijalcem, smo vgradnjo krovne plasti zaključili 10 do 20 cm pod zgornjim robom lizimetra. Debelina kompozitov, ki smo jih vgradili brez zgoščanja je nekoliko večja, ker je bil odmik krovne plasti od roba lizimetra manjši. Ti kompoziti imajo večji koeficient vodoprepust-

nosti, zato je problem zastajanja vode na njihovi površini manjši in zato preliivanja vode zaradi površinskega odtoka preko roba lizimetra ni pričakovati.

Po vrhu vgrajenih kompozitov smo položili drenažni geosintetik in nanj nasuli sloj kremenčevega peska frakcije 4/8 mm v debelini 20-30 cm (sl. 1). Zaključni zaščitni sloj je sicer predviden tudi pri realni vgradnji kompozitov v sanacijski zasip v podjetju TERMIT. S tovrstno zasnovo lizimetra smo preprečili izrazit vpliv osončenosti in vetra na evaporacijo, kar bo potrebno kritično upoštevati pri modelih vodne bilance.

Vzpostavitev opazovanj kemične sestave izcednih vod

Načrt vzpostavitve opazovanj kemične sestave izcednih vod je bil sestavljen iz treh delov (sl. 5). V prvem sklopu smo opravili laboratorijske preskave preučevanih kompozitov. Sledilo je načrtovanje in konstrukcija lizimetrov z montažo opreme. V tretji fazi pa je sledilo izvajanje opazovanj kemične sestave izcednih vod. Na sliki 5



Sl. 4. Mešanje kompozita in njegova vgradnja v lizimetre, zgoščevanje z nabijalcem in vibracijsko ploščo.

Fig. 4. Mixing of the geotechnical composite and its installation into lysimeters, compaction with a rammer and a vibrating plate.

so podrobneje predstavljene aktivnosti vseh treh stopenj z opisom pričakovanih rezultatov. Eden od ciljev izgradnje eksperimentalnega polja je bil pridobivanje vhodnih podatkov za nadaljnjo simulacijo transporta potencialnih onesnaževal (sproščenih iz geotehničnih kompozitov) v vodonosnih plasteh. Zanima nas usoda teh snovi v tipičnem medzrnskem vodonosniku ter primerjava z usodo istih snovi v razpoklinskem vodonosniku.

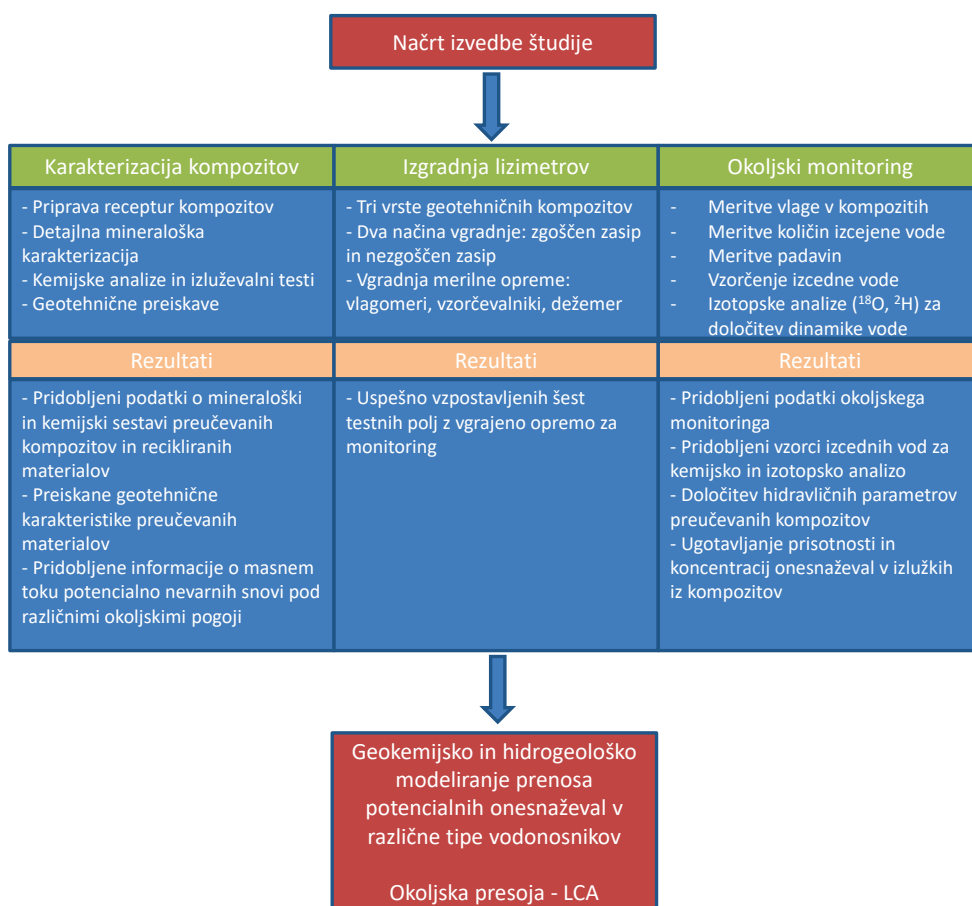
Da bi zagotovili učinkovito spremljanje dinamike izcedne vode smo lizimetre opremili s sondami za meritev vlage in temperature v geotehničnih kompozitih. Zgornjo sondo smo vtisnili 25 cm pod površjem kompozita. Drugo sondo smo v kompozit vtisnili 20 cm nad dnom kompozita (sl. 1). Na podlagi podatkov o naraščanju vlage v dveh točkah v profilu kompozita po vsakem padavinskem dogodku, lahko sklepamo na dinamiko vodnega toka skozi zasip. Namen meritve vlage v kompozitu je spremljati njen vpliv na izluževanje in učinek imobilizacije.

Izcedno vodo zbiramo v plastičnih zbiralnikih, ki so bili skonstruirani ob iztokih iz drenažnih cevi. Sam zbiralnik predstavlja plastičen rezervoar volumna 1000 litrov, ki je namenjen meritvam količin izcedne vode in vzorčenju vode za namen ugotavljanja kemijskih parametrov in

izotopskih analiz. Vzorčenje vode bo potekalo vsaj eno leto in sicer na določene časovne intervale (dva tedna ali en mesec, odvisno od količine padavin).

Ob lizimetrih smo postavili vremensko postajo s termometrom in zbiralnikom vzorcev dežja ter registratorjem intenzivnosti padavin. Najbližja opazovalna postaja Agencije Republike Slovenije za okolje se nahaja v Moravčah, ki je od lokacije postavitve lizimetrov oddaljena 2-3 km. Padavinski podatki, zbrani na vremenski postaji, so pomembni za izračun vodne bilance, torej za ugotavljanje režima infiltracije padavin v proučevane zasipe iz kompozitov. Vzorce padavinske vode iz vremenske postaje in vzorce izcedne vode bomo analizirali glede na izotopsko sestavo kisika in vodika. Določili bomo izotopsko sestavo kisika - ^{18}O in devterija - ^2H v padavinski in izcedni vodi. Glede na vsebnost izotopov kisika - ^{18}O in devterija - ^2H je možno sklepati na hitrost pretakanja prenikajoče vode, oziroma na zadrževalni čas vode v kompozitni matrici (Mali & Urbanc, 2006).

Končni cilj raziskave je, da na podlagi zbranih podatkov izvedemo geokemični in hidrogeološki model (simulacijo) usode in transporta snovi, ki se sproščajo iz preiskovanih geotehničnih



Sl. 5. Načrt izvedbe okoljskega monitoringa in študije.

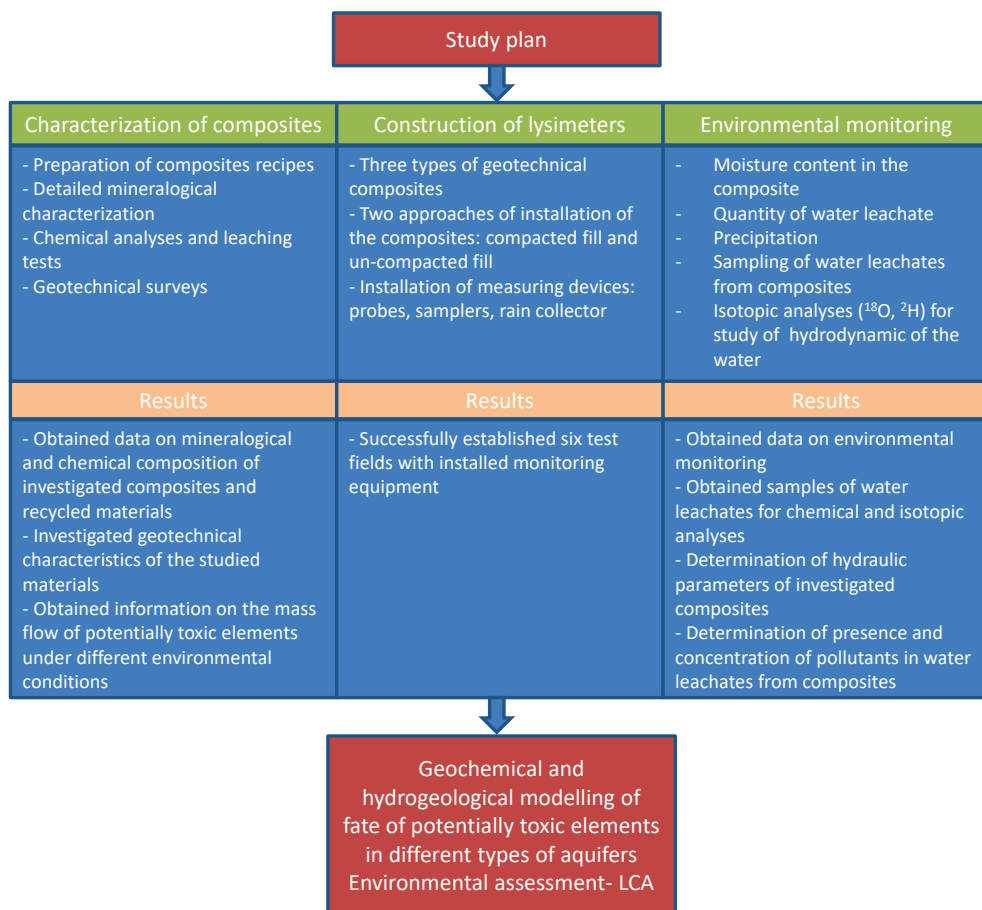


Fig. 5. Environmental monitoring and study plan.

kompozitov (sl. 5). Na podlagi rezultatov bomo lahko izpeljali metodološke novosti za izboljšanje metod ocenjevanja vplivov na okolje. Novosti so zaželeno predvsem pri modeliranju mobilnosti potencialno nevarnih snovi v zemljini (povezano z oceno vnosa potencialno nevarnih snovi v podzemno vodo). Izboljšave metod analize življenjskega cikla (LCA) so zelo pomembne, saj je LCA ena najbolj uveljavljenih metod za ocenjevanje okoljskih obremenitev.

Zaključki

V prispevku smo prikazali način izvedbe terenskega laboratorija za spremljanje izcednih voda iz geotehničnih nasipov iz recikliranih odpadkov. V šestih lizimetrih smo vzpostavili sistem monitoringa izcedne vode iz teh kompozitov. Vzpostavljen sistem je zanesljiv, poleg tega je za investitorja oziroma uporabnika cenovno ugoden in časovno sprejemljiv. Namen predstavljene raziskave je izvajanje meritev pretakanja vode v geotehničnih kompozitih ali drugih gradbenih materialih ter zbiranje vzorcev izcedne vode za analizo kemijskih parametrov. Ti parametri so neposredno povezani z izluževanjem potencialno nevarnih snovi iz gradbenih materialov. Zanima nas tudi vpliv hidroloških pogojev na izluževanje.

Podatki o izluženih potencialno nevarnih snoveh in njihovi koncentraciji v izcedni vodi bodo v prihodnje uporabljeni kot vhodni podatki za geokemijski model. S pomočjo numeričnega modela bomo simulirali masni tok potencialno nevarnih snovi v različnih tipih vodonosnikov. Zanima nas usoda oziroma mobilnost potencialno nevarnih snovi v nezasičeni coni različnih tipov vodonosnikov in vnos teh snovi v zasičeno cono.

Zahvala

Terenski laboratorij z opisanimi lizimetri je bil postavljen v okviru aplikativnega raziskovalnega projekta „Vpliv geotehničnih zasipov iz recikliranih materialov na podzemno vodo“ (L1-9190) sofinanciranega s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Sofinancerji projekta s področja gospodarstva so TERMIT d.d., HMEZAD-TMT d.d., Javno podjetje VOVOD KANALIZACIJA SNAGA d.o.o. in Komunala Metlika d.o.o.

Zahvala gre osebjem iz podjetja TERMIT, ki so pomagali pri postavitvi testnih polj, ter Žigi Bevcu, Juretu Rožiču, Franciju Smrtniku, Mihi Uršiči in Lauri Vovčko z Zavoda za gradbeništvo, ki so sodelovali pri vgradnji kompozitov ali pri laboratorijskih preiskavah.

Literatura

- Abdou, H.M. & Flury, M. 2004: Simulation of water flow and solute transport in free-drainage lysimeters and field soils with heterogeneous structures. *European Journal of Soil Science*, 55/2: 229–241. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2004.00592.x>
- Albright, W.H., Benson, C.H. & Apiwantragoon, P. 2012: Field Hydrology of Landfill Final Covers with Composite Barrier Layers. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139/1:1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000741](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000741)
- Birgisdóttir, H., Pihl, K.A., Bhandar, G., Hauschild, M.Z. & Christensen, T.H. 2006: Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11/5: 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.07.001>
- Cerar, S. & Bavec, Š. 2019: Analiza vpliva vgrajenega sanacijskega materiala na rekultivacijo opuščene peskokopa. *Acta agriculturae Slovenica*, 114/2: 293–311. <https://doi.org/10.14720/aas.2019.114.2.14>
- Corwin, D.L. & Le Mert, R.D. 1994: Construction and evaluation of an inexpensive weighing lysimeter for studying contaminant transport. *Journal of Contaminant Hydrology*, 15/1-2: 107–123. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0169-7722(94)90013-2)
- Fifer Bizjak, K., Šepetavc, J., Mladenovič, A., Likar, B. & Lenart, S. 2019: Uporaba papirniških recikliranih materialov pri izgradnji geotehničnega objekta = The use of recycled materials from paper production in civil engineering: EU projekt Paperchain. In: Prebil Bašin, P., Jamnik, T. & Kličič, S. (eds.): Med krožnim, bio in digitalnim: zbornik povzetkov = Between circular, bio and digital: book of abstracts, 23. dan slovenskega papirništva in 46. mednarodni letni simpozij Društva inženirjev in tehnikov papirništva Slovenije (DITP), 20. –21. november 2019, Postojna, Ljubljana: GZS, ZPPPI, DITP: 53–54.
- Hansen, J.B., Holm, P.E., Hansen, E.A. & Hjelm, O. 2000: Use of lysimeters for characterisation of leaching from soil and mainly inorganic waste materials. Nordtest Technical Report 473.
- Howell, T.A. 2005: Lysimeter. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 2005 <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/lysimeters>
- Koroša, A., Brenčič, M. & Mali, N. 2020: Estimating the transport parameters of propyphenazone, caffeine and carbamazepine by means of a tracer experiment in a coarse-gravel unsaturated zone. *Water research*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115680>
- Likar, B., Brodnik, M. & Smrtnik, F. 2020: Poročilo o rezultatih geomehanskih laboratorijskih preiskav vzorcev kompozita TERSAN in kontrole vgrajevanja. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana: 13 p.
- Luthy, R.H. et al. 2003: Bioavailability of contaminants in soils and sediments, Processes, tools, and applications. Committee on Bioavailability of Contaminants in Soils and Sediments NRC. Washington DC, USA: The National Academies Press: 432 p.
- Mali, N. 2002: Opazovanje transporta vode v nezasičeni coni – primer lizimetra v Selniški dobri. *Geologija*, 45/2: 465–470. <https://doi.org/10.5474/geologija.2002.049>
- Mali, N., Urbanc, J. & Leis, A. 2007: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environmental geology*, 51/8: 1401–1412. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0437-4>
- Mali, N. & Urbanc, J. 2006: Uporaba stabilnih izotopov za študij toka podzemne vode v nezasičeni coni prodnega vodonosnika Selniške Dobre = The use of environmental isotopes in groundwater flow study in the unsaturated zone of the Selniška Dobra coarse gravel aquifer (Slovenia). *Geologija*, 49/2: 371–381. <https://doi.org/10.5474/geologija.2006.026>
- Mladenovič, A. 2018: Uporaba recikliranih odpadkov pri sanaciji površinskih rudniških prostorov. *Mineralne surovine v letu 2017, leto 14, št. 1: 177–180.*
- Mladenovič, A. & Mauko Pranjič, A. 2016: Deponije rudarskih in industrijskih odpadkov so dragoceni vir surovin. *Mineralne surovine v letu 2015, leto 12, št. 1: 158–161.*
- Mladenovič, A., Hamler, S. & Zupančič, N. 2017: Environmental characterisation of sewage sludge/paper ash-based composites in relation to their possible use in civil engineering. *Environmental science and pollution research international*, 24/1: 1030–1041. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7843-2>
- Oblak, T., Ščančar, J., Vahčić, M., Zuliani, T., Mladenovič, A. & Milačič, R. 2011: Environmental impacts of asphalt and cement composites with addition of EAF dust = Okoljski vplivi asfaltnih in cementnih

- kompozitov z dodatkom EOP-prahu. *RMZ - Materials and geoenvironment: periodical for mining, metallurgy and geology*, 58/2: 181-192.
- Oprčkal, P., Mladenovič, A., Zupančič, N., Ščančar, J., Milačič, R. & Zalar Serjun, V. 2020: Remediation of contaminated soil by red mud and paper ash. *Journal of Cleaner Production*, 256: 120440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120440>
- Saporito, L.S., Bryant, R.B. & Kleinman P.J.A. 2016: A Protocol for Collecting and Constructing Soil Core Lysimeters. *Journal of Visualized Experiments*, 112: 53952. <https://doi.org/10.3791/53952>
- Schwab, O., Bayer, P., Juraske, R., Verones, F. & Hellweg, S. 2014: Beyond the material grave: Life Cycle Assessment of leaching from secondary materials in road and earth constructions. *Waste Management*, 34/10: 1884-96. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.022>
- Singh, G., Kaur, G., Williard, K., Schoonover, J. & Kang, J. 2017: Monitoring of Water and Solute Transport in the Vadose Zone: A Review. *Vadose Zone Journal*, 17. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.07.0058>
- Smolar, J., Maček, M. & Petkovšek, A. 2016: Geotechnical and Environmental Characterization of Boiler Slag as Fill Material. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 142/8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001489](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001489)
- Turk, J., Mladenovič, A., Knez, F., Bras, V., Šajna, A., Čopar, A. & Slanc, K. 2014: Tar-containing reclaimed asphalt e Environmental and cost assessments for two treatment scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 81: 201-210.
- Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A. & Šajna, A. 2015: Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management*, 45: 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>
- Unold von, G. & Fank, J. 2008: Modular Design of Field Lysimeters for Specific Application Needs. *Water Air Soil Pollut: Focus*, 8: 233-242. <https://doi.org/10.1007/s11267-007-9172-4>