



Sledilni poskus na odlagališču komunalnih odpadkov Dragonja

Tracer test on the Dragonja landfill

Barbara ČENČUR CURK

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana,
barbara.cencur@geo.ntf.uni-lj.si

Prejeto / Received 13. 1. 2020; Sprejeto / Accepted 5. 11. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Ključne besede: odlagališče, podzemna voda, sledilni poskus, Dragonja

Key words: landfill, groundwater, tracer test, Dragonja

Izvleček

V prispevku so podani rezultati sledilnega poskusa s sledilom uranin na odlagališču nenevarnih odpadkov Dragonja. Namen sledilnega poskusa je bil ugotoviti, kakšna je dinamika prenosa onesnaževal iz odlagališča v podzemno vodo. Odlagališče odpadkov leži na debelejši preperini flišnih kamnin, ki gradijo pobočje hriba. Ob vznožju so meljno-glinasti in delno peščeni aluvialni sedimenti reke Dragonja. Prenos uranina je odvisen od intenzitete in trajanja padavin, potencialne evapotranspiracije, prepustnosti sedimentov, infiltracije padavin v odlagališče odpadkov in zasičenosti flišne preperine. Uranin se je najprej pojavil v vrtini P2, ki je dolvodno od mesta injiciranja v smeri toka vode po preperini. Vrtina P1 ni v smeri direktnega toka in se zato pojavi le rob dispergirane oblaka sledila. Podzemna voda iz flišne preperine se izliva v aluvialno ravnico, koncentracije uranina pa se razredčijo v podzemni vodi. Zaradi tega je v vrtini P5 zaznan počasen dvig in upad koncentracije uranina. Nivoji podzemne vode so zaradi velike evapotranspiracije kljub padavinam upadali vse do jesenskega deževja v oktobru. Sledilni poskus je potrdil heterogenost in kompleksnost geološke zgradbe območja odlagališča.

Abstract

The paper presents the results of a tracer experiment with the uranine tracer at the non-hazardous landfill of Dragonja. The purpose of the tracer test was to determine the dynamics of the potential pollutants from the landfill to the groundwater. The landfill lies on the thicker weathered layer of flysch rock that forms the slope of the hill. At the foot of the hill are silty clay and partly sandy alluvial sediments of the Dragonja River. The transport of uranine depends on the intensity and duration of precipitation, potential evapotranspiration, permeability, precipitation infiltration into the landfill, and saturation of the weathering layer of flysch. Uranine first appeared in the observation well P2, which is located downstream of the injection point, in the direction of water flow. Observation well P1 is not in the direction of direct flow and therefore only the edge of the dispersed tracer plume appeared in P1. The groundwater from the flysch weathered layer drains into the alluvial plain and the uranine concentrations are diluted in the groundwater. In the observation well P5 a slow increase and decrease of the uranium concentration was therefore observed. Due to the high evapotranspiration, the groundwater levels were falling until October, when they began to rise after autumnal precipitation events. The tracer experiment confirmed the heterogeneity and complexity of the geological structure of the landfill site.

Uvod

Odlagališča nenevarnih oziroma nevarnih odpadkov so z začetkom industrijske dobe pa vse do danes postala nuja, saj zbiranje in odlaganje odpadnega materiala na centraliziranih območjih prispeva k zmanjševanju nevarnosti za javno zdravje in varnost (Mor et al., 2006).

V splošnem so stara odlagališča odpadkov nastajala v vrtačah (kras), grapah ali v opuščeni dnevni kopih (na aluvialnih ravninah tudi v gramoznicah), ki so jih zapolnili z odpadki, nato pa odpadke enostavno prekrili s prekrivko in zatravili. V večini primerov so odpadke

odlagali neposredno na spodaj ležeča tla brez tesnjenja ali neprepustne podlage, ki bi preprečila izcednim vodam odtekanje iz odlagališča v podzemno vodo. V 90-ih letih prejšnjega stoletja pa so se zaradi sprejetja stroge zakonodaje odlagališča odpadkov tudi v Sloveniji spremenila v natančno planirana, moderna in tesnjena odlagališča s tehnološkimi sistemi (zbirni centri, mehanska biološka obdelava, sistem izcednih vod, sežig plina). Zakonodaja (Uradni list RS, št. 49/06, 114/09, NPB1 in 53/15; Uradni list RS, št. 10/2014, 54/2015, 36/2016 in 37/2018) s področja odpadkov odlagališčem predpisuje monitoring

okolja v času obratovanja odlagališča ter tudi za obdobje po zaprtju (za zaprto odlagališče za nevarne odpadke ali zaprto odlagališče za nenevarne odpadke najmanj 30 let, za zaprto odlagališče za inertne odpadke pa najmanj 10 let). Prispevek se osredotoča na monitoring podzemne vode. Za izvajanje monitoringa podzemne vode so potrebne vsaj tri opazovalne vrtine, in sicer najmanj eno gorvodno in dve dolvodno glede na prevladujočo smer toka podzemne vode. V kraško-razpoklinjskih vodonosnikih pa so lahko opazovalna mesta tudi izviri. Lokacije opazovalnih mest so določene v hidrogeološki študiji za posamezno odlagališče odpadkov, ki je hidrogeološki del programa obratovalnega monitoringa podzemnih vod. Vendar pa vsa odlagališča nimajo vzpostavljenega optimalnega monitoringa podzemne vode, saj pogosto gorvodnega opazovalnega mesta ni, kot je to tudi v primeru odlagališča Dragonja. Poleg tega so starejša odlagališča odpadkov zelo kompleksna, tako z vidika geološke sestave pod odlagališčem, kot tudi z vidika tehnologije, saj so večinoma najstarejši deli netesnjeni, sledijo novejši deli z delnim tesnjenjem ter najnovejši deli z vsemi tesnilnimi plastmi, kot zahteva zakonodaja. Zaradi navedenega je zato lahko kompleksna tudi sama izvedba hidrogeološkega monitoringa (Ratej & Brenčič, 2005; Prestor & Janža, 2002). odlagališča kot vira onesnaževanja podzemne vode je možna v primeru, da poznamo hidrogeološke značilnosti raziskovanega območja. Sledilni poskusi so se v preteklosti že večkrat uporabljali za določanje vpliva odlagališča na podzemno vodo (Salama et al., 1989; Woodman et al. 2017), vendar je potrebna previdnost pri izbiri sledila, saj lahko organske snovi iz izcedne vode vplivajo na detekcijo fluorescenčnih sledil (Smart, 1985; Ma-

rius et al. 2010). Sledilni poskusi se uporabljajo tudi za določanje transporta onesnaževal znotraj odlagališča v eksperimentalnih kolonah (Rosqvist & Bendz, 1999; Hudson, 2007; Woodman et al., 2015) ali na terenu (Jolly et al., 2011; Caicedo, 2013; Woodman et al., 2014).

Večina sledilnih poskusov v Sloveniji je bila izvedena v kraško-razpoklinjskih vodonosnikih z namenom določiti smeri in značilnosti toka podzemne vode za določitev vpliva odlagališča ter za določitev učinkovitega programa monitoringa kemijskega in količinskega stanja podzemne vode (Čenčur Curk et al., 2007). Sledilni poskusi so bili tako izvedeni za odlagališča Mala gora pri Ribnici (Kogovšek & Petrič, 2006), Sežana (Kogovšek & Petrič, 2007) in Mozelj (Kogovšek & Petrič, 2010).

V prispevku je predstavljen sledilni poskus na odlagališču nenevarnih odpadkov Dragonja, ki je bil izveden z namenom ugotoviti vpliv odlagališča na podzemno vodo ter dinamiko transporta snovi (onesnaževal) iz odlagališča v podzemno vodo glede na hidrogeološke in padavinske razmere.

Odlagališče nenevarnih odpadkov Dragonja

Odlagališče nenevarnih (komunalnih) odpadkov leži na obrobju doline reke Dragonje in sicer na njenem desnem bregu (sl. 1). Od vasi Dragonja je oddaljeno približno 600 metrov. Odlagališče leži na pobočju hriba, ki se spušča v smeri proti jugovzhodu. Večji del okolice odlagališča je gozdnat, le del terena tik ob severozahodu odlagališča predstavljajo terasasto urejene njive. Severno od odlagališča se začne izrazita grapa, ki na zahodni strani odlagališča zavije proti jugu in se konča na ravnici. Na južni strani odlagališča se razprostira ravnica, na kateri so sadovnjaki in njive (sl. 1).



Sl.1. Lokacija odlagališča odpadkov Dragonja (Internet 1).

Fig. 1. Location of the Dragonja landfill (Internet 1).

Odlagališče Dragonja obratuje vse od leta 1964 in obsega stari in novi del. Stari del odlagališča nima ustreznega tesnenja in je na vzhodnem delu odlagališča na flišni podlagi. Deloma so bili urejeni sistemi za odvajanje izcednih in padavinskih vod ter odplinjevalni jaški. Leta 1992 so delno sanirali stari del odlagališča. Izcedne vode so tako speljali v rastlinsko čistilno napravo in pričeli kompaktirati odpadke. V letu 1995 so na zahodnem delu zgradili novi del odlagališča in uredili zbirni center. Dno novega dela odlagališča je tesnjeno z geobentom in PEHD folijo. Urejen je sistem za zbiranje in odvajanje izcednih ter zalednih padavinskih vod. Postavljeni so tudi odplinjevalni jaški z odvajanjem odlagališčnega plina in sežigom na bakli (Ivanuša-Šket et al., 2015). Stari in novi del odlagalnega polja se naslanjata drug na drugega in v naravi nista ločena (Ivanuša-Šket et al., 2017). Leta 2011 so prenehali odlagati odpadke, zato je odlagališče v fazi zapiranja.

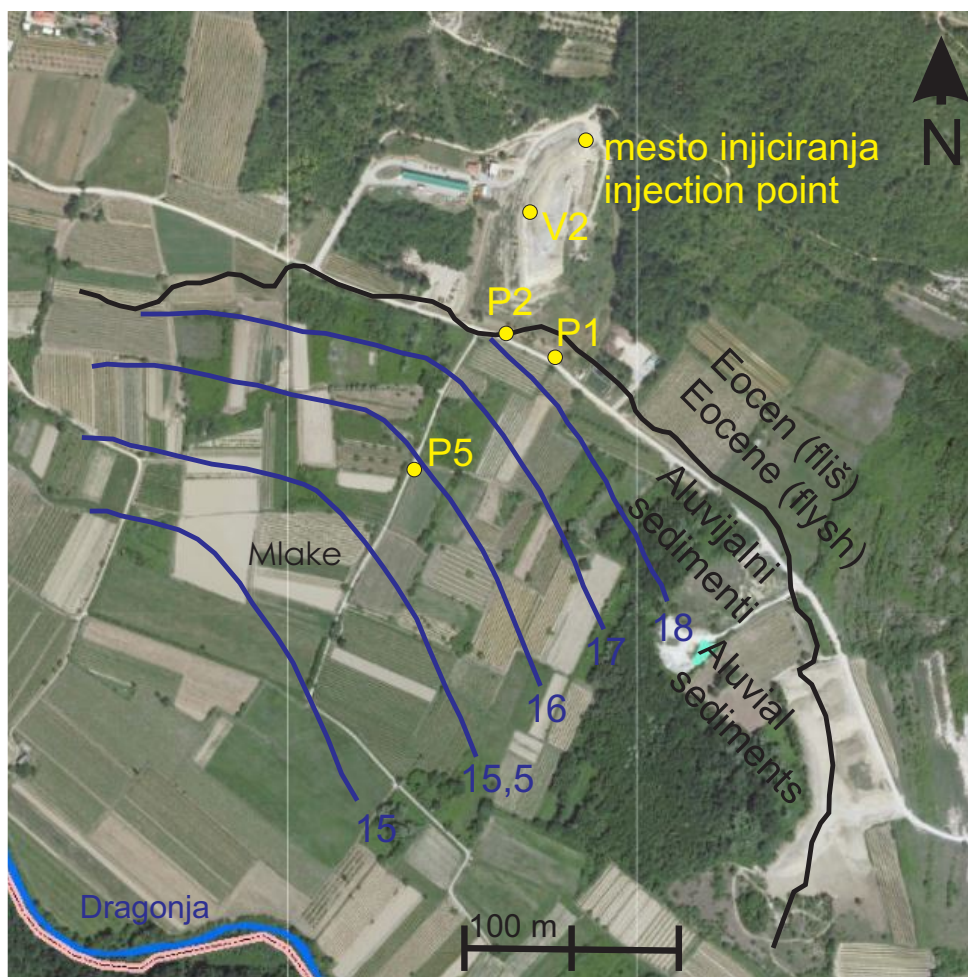
Hidrogeološke značilnosti

Odlagališče leži na eocenskih flišnih kamninah (sl. 2), oziroma na preperini flišnih kamnin. Pobočja gričev namreč prekriva debela plast he-

terogene preperine, katero sestavljajo peščene, glinene in meljne komponente. Na območju odlagališča je ocenjena debelina preperine 7,8 metra (Rogelj, 1992). V dolini Dragonje so aluvialni sedimenti doline reke Dragonje (sl. 2).

Za potrebe monitoringa podzemne vode je bilo leta v okviru hidrogeoloških raziskav izdelanih sedem vrtin in vse so bile opremljene kot piezometri. V času izvajanja sledilnega poskusa so bile v uporabi le tri vrtine in sicer P1, P2 in P5 (sl. 2), ostale pa so bile poškodovane in uničene iz različnih razlogov (med njimi tudi vrtina V2, ki je na sredini odlagalnega polja).

Vrtini P1 in P2 se nahajata med odlagališčem in cesto. Vrtina P1 se nahaja na vznožju starega dela odlagališča, to je med odlagališčem in cesto. Vrtina P2 pa se nahaja na vznožju novega dela. V obeh vrtinah se gladina vode spreminja glede na hidrološke razmere. Globina podzemne vode je od enega do štiri metre pod površjem. Za vrtino P1 ni podatkov o cevitvi, a je verjetno filtrna cev po celotni dolžini, tako kot je v vrtinah P2 in P5 (razen usedalnika na dnu vrtine). Premer vrtin P2 in P5 je 50 mm. Vrtina P5 je od novega dela odlagališča oddaljen približno 70 metrov proti jugu. Nahaja se sredi polja ob dovozni poti in ima



Sl. 2. Ortofoto posnetek (2011; ARSO 2019) odlagališča odpadkov Dragonja z označenimi vzorčevalnimi mesti (P1, P2 in P5), mestom injiciranja, hidroizohipsami (povzeto po Rogelj, 1992 in Ivanuša-Šket et al., 2017) in mejo med Eocenskim flišem ter aluvijalnimi sedimenti (Ivanuša-Šket et al., 2015).

Fig. 2. Areal photo (2011; ARSO 2019) of the Dragonja landfill with locations of the tracer injection point, observation wells (P1, P2 and P5), groundwater level contours (after Rogelj, 1992 and Ivanuša-Šket et al., 2017) and border between Eocene flysch rocks and aluvial sediments (Ivanuša-Šket et al., 2015).

poškodovano ustje. Globina do podzemne vode je od enega do dva metra (Jerebica, 2009). Tabela 1 prikazuje razpone nivojev podzemne vode v obdobju 2005 – 2015 (Ivanuša-Šket et al., 2015).

Tabela 1. Razpon nivojev podzemne vode (v m n.v.) v obdobju 2005 – 2015 (Ivanuša-Šket et al., 2015) ter v obdobju vzorčenja za sledilni poskus (Jerebica, 2009).

Table 1. Range of groundwater levels (in m a.s.l.) in the period 2005 – 2015 (Ivanuša-Šket et al., 2015) and in the sampling period of the tracer test (Jerebica, 2009).

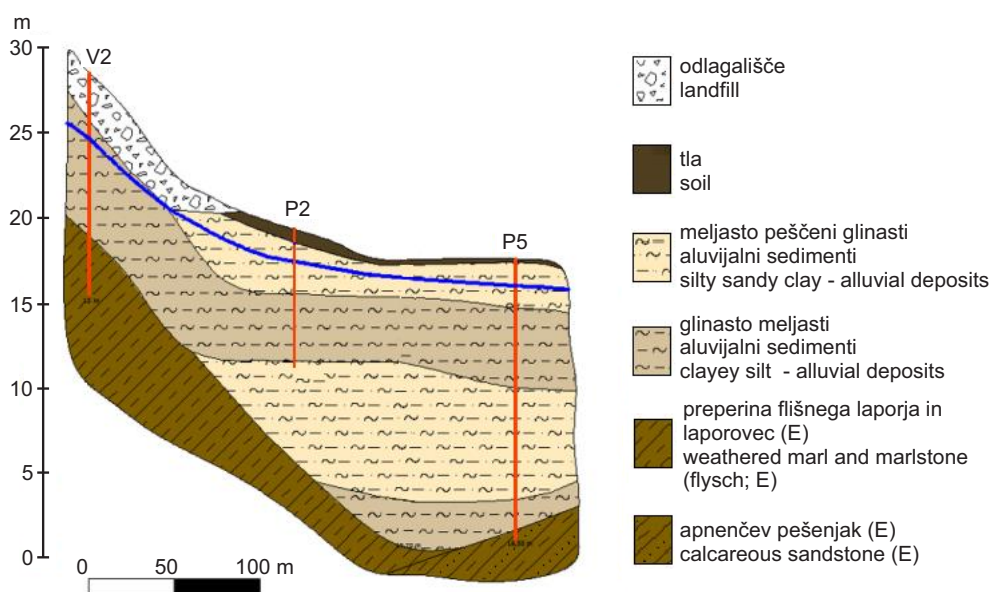
Opazovalna vrtina / Observation well	P1		P2		P5	
Kota površja / surface elevation	n.a.		21,06		17,40	
Obdobje / period	2005-2015	2009	2005-2015	2009	2005-2015	2009
Minimum / minimum	15,03	15,21	15,20	15,60	14,15	14,19
Maksimum / maximum	18,42	17,47	19,02	19,00	16,43	16,33

Med cesto in odlagališčem sta locirani vrtini P1 in P2. V vrtini 2 so klastični lapornati sedimenti v globini 6 metrov. Deluvialni preperinski pokrov na teh klastih se od aluvija reke Dragonje razlikuje po svetlejši barvi in po vsebnosti ostroboh delcev matične kamnine. Maksimalna debelina kvartarnih sedimentov je ocenjena med 20 in 30 metri. Sedimenti v dolini Dragonje so heterogeni in se lokalno spreminjajo. Gre za meljasto – glinaste sedimente rjave barve, ki vsebujejo organske ostanke. Pod naplavinami so temno sive do modre plastične gline. V njih so na določenih mestih prisotni ostanki organskega izvora in posamezni prodniki ali drobcji matičnih klastičnih

ter karbonatnih kamnin. V temnejši glinasti plasti so peščene leče, v katerih je podzemna voda, ki ima vonj po razpadajočem organskem materialu v glini (Rogelj, 1992). Kvartarne naplavine na območju vrtine P5 so debele približno 16 metrov (sl. 3). Pod njimi je flišna serija klastitov z vložki karbonatnih peščenjakov. Podlaga je paleocenski apnenec in se pogreza proti jugozahodu, dviga pa se proti severozahodu (Rogelj, 1992).

Flišni laporovec ima zelo nizko prepustnost. Med posameznimi litološkimi členi fliša so prisotne velike razlike v prepustnosti. Nekoliko hitrejši tok podzemne vode znotraj flišev je možen le v kalkarenitnih in karbonatnih brečah ter peščenjakih (koeficient prepustnosti je med 10^{-5} m/s in 10^{-6} m/s; Rogelj, 1992; Fuks, 2010). Hidravlične lastnosti kvartarnih sedimentov in preperine fliša se lokalno zelo spreminjajo. Ocenjeni koeficient prepustnosti v bolj peščenem delu meljasto glinaste preperine fliša znaša manj kot 10^{-5} m/s, v območju s prevladujočo meljasto in glinasto komponento pa 10^{-7} m/s (Rogelj, 1992). V bolj heterogenem delu slabo prepustnega odprtega medzrnskega vodonosnika v dolini Dragonje se v zgornjem delu prepustnosti gibljejo znotraj dekade 10^{-7} m/s, medtem ko so v spodnjem delu glinaste plasti s prepustnostjo $2,5 \cdot 10^{-8}$ m/s (Rogelj, 1992).

Na območju pobočja hriba, kjer se nahaja samo telo odlagališča, je tok podzemne vode v debelejši preperini flišnih kamnin, po pobočju navzdol v smeri proti jugozahodu. Voda se preceja vzdolž prepustnejših leč peskov in meljev ter posredno napaja tudi vodo v fliših (sl. 3). V flišnih plasteh (brečah ter peščenjakih) je generalna smer toka podzemne vode vezana na vpad plasti, zato se voda najverjetneje pretaka v smeri proti severo-



Sl. 3. Prerez odlagališča z vrtinami (povzeto po Rogelj, 1992 in Ivanuša-Šket et al., 2017).

Fig. 3. Cross-section of the landfill area with boreholes (after Rogelj, 1992 in Ivanuša-Šket et al., 2017).

zahodu. Slabo prepustni hidro dinamsko odprti vodonosnik (rečne naplavine Dragonje) se napaja z vodo s flišnih pobočij iz severa, kot tudi iz vzhoda v gorvodno smeri glede na tok reke Dragonje (Rogelj, 1992). Generalni tok podzemne vode je v smeri od severovzhoda proti jugozahodu (sl. 2, Rogelj, 1992; Fuks, 2010; Ivanuša-Šket et al., 2017).

Odlagališče nima vpliva na reko Dragonjo, zato se monitoring površinske vode ne izvaja (Ivanuša-Šket et al., 2015).

Metodologija izvedbe sledilnega preizkusa na odlagališču Dragonja

Injicirano količino uranina smo določili s formulo (Kass, 1998):

$$M = \alpha \cdot L \cdot A, \quad (1)$$

kjer je L razdalja med točko injiciranja uranina in mestom vzorčenja (0,225 km), α je faktor za uranin, ki znaša 1 ter A je faktor vodonosnika, ki ga preučujemo in obsega vrednosti za medzrnski vodonosnik od 0,1 do 0,5; razpokliski vodonosnik od 0,2 do 4; kraški vodonosnik od 1 do 10. Zaradi kompleksnosti obravnavanega sistema so bile privzete vrednosti A med 3 in 5. Za injiciranje smo se odločili, da bomo uporabili 990 g uranina, saj so prepustnosti zelo majhne, poleg tega je možna prisotnost organskih snovi na katere se uranin adsorbira.

Sledilni poskus se je začel 11. junija 2008. Na ta dan smo na vrhu odlagališča oziroma za starim delom z rovokopačem izkopali jamo dimenzij $2,5 \times 2,5$ metra (sl. 4). Globina jame je na najglobljem delu znašala približno 2,5 metra. Globina do podzemne vode v flišni preprini je bila ocenjena na ca 2 m. V 50 litrih vode smo raztopili 990 gramov uranina, preostalih 10 gramov pa smo shranili za izdelavo umeritvene krivulje. Raztopino



Sl. 4. Injiciranje in spiranje uranina.

Fig. 4. Uranine tracer injection.

uranina smo zlili v izkop in dodali še 600 litrov vode. Ko je barvilo povsem odteklo, smo izkop znova zasuli z izkopanimi odpadki.

Vzorčevanje podzemne vode je potekalo s črpalko v vrtinah P1, P2 in P5 v povprečju enkrat na teden oziroma dva do tri dni po večjem nalivu. Kljub majnim črpalnim količinam so se vrtine zaradi nizkih prepustnosti in plivosti hitro spraznile. Analizo vzorcev (določitev koncentracije uranina) je bila narejena na Inštitutu za raziskovanje krasi v Postojni z luminiscenčnim spektrometrom Perkin Elmer pri ekscitacijskem maksimumu E_{ex} 491 nm in emisijskem maksimumu E_{em} 512 nm z mejo določljivosti $0,005 \text{ mg/m}^3$ ($1 \text{ mg/m}^3 = 1 \text{ ppb}$),

Rezultati in diskusija

Injicirani uranin se je pojavil v vseh treh opazovalnih vrtinah. Na sliki 5 je z rdečo navpično črto označen dan injiciranja uranina, črna vodovodna črta, ki označuje koncentracijo $0,03 \text{ mg/m}^3$, pa predstavlja koncentracijo uranina v vzorcih vode iz opazovalnih vrtin P1 in P2 pred izvedbo sledilnega poskusa. Vzorčevanje je potekalo od junija 2008 do januarja 2009.

Koncentracije uranina v posameznih vrtinah glede na obdobje močno varirajo (sl. 5). Uranin se je najhitreje pojavil v vrtini P2, ki je dolvodno od mesta injiciranja v smeri toka vode po preperini. Prvi pojav uranina je bil zaznan v prvem vzorčenju po injiciranju, vendar se je verjetno pojavil že prej. V vrtini P2 je bila po 30 dneh dosežena tudi najvišja koncentracija uranina v celotnem času vzorčevanja ($0,554 \text{ mg/m}^3$), ki se je pojavila 23 dni po večjih padavinah v sredini junija (18.6.2008; 44,8 mm). Hitrost toka po preperini v času največje koncentracije (dominantna hitrost toka) je tako $7,5 \text{ m/d}$ (tabela 2) oziroma ob upoštevanju datuma padavin celo $9,8 \text{ m/dan}$. V vrtini P2 so opazna največja nihanja koncentracij uranina. Po določenem obdobju padavin koncentracija uranina v vrtini P2 zelo naraste in nato hitro upade, kar nakazuje na relativno hiter tok vode. Voda se do vrtine P2 najverjetneje pretaka po bolj prepustnem območju flišne preperine po t.i. prednostnih poteh.

V vrtini P1 se je sledilo prvič pojavilo 66 dni po injiciranju, najvišja koncentracija pa je bila dosežena po 83 dneh ($0,083 \text{ mg/m}^3$). Hidravlične lastnosti preperine fliša se lokalno zelo spreminjajo, zato je lahko sledilo do vrtine P1 teklo po manj prepustnem območju flišne preperine in je zato tok počasnejši. Predvidevamo, da se je sledilo po prvih padavinah spralo v flišno preperino in potem počasi teklo do vrtine P1. Več padavinskih

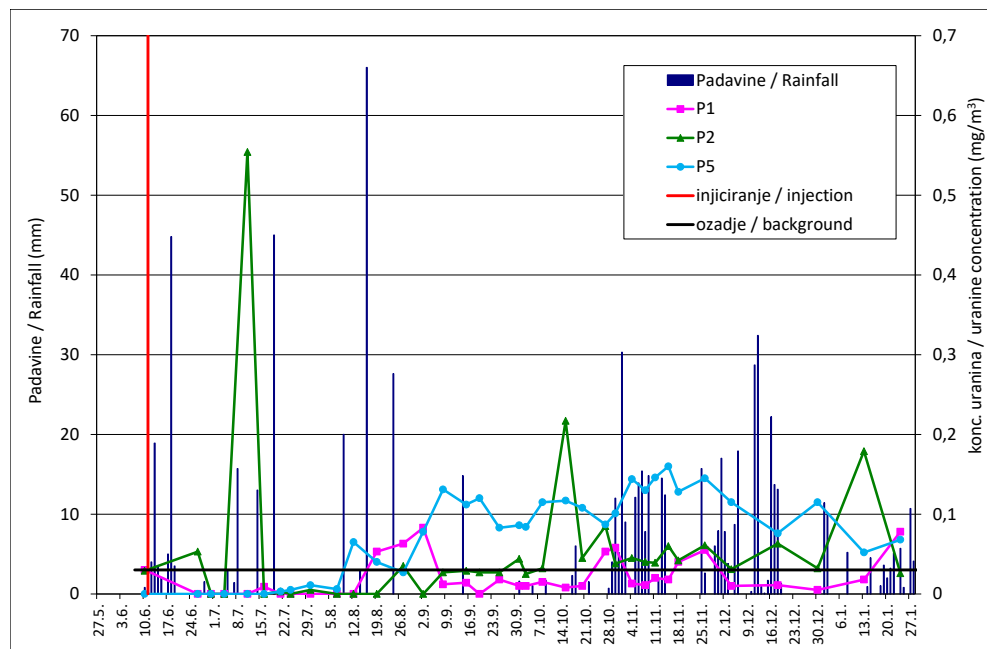
dogodkov sredi avgusta niso bili glavni razlog za takratni pojav sledila, kar potrjuje tudi upadanje gladine podzemne vode v vrtini (sl. 6). V tem času je namreč evapotranspiracija zelo velika. Dominantna hitrost toka je tako 2,7 m/d (tabela 2).

Tabela 2. Izračun navideznih dominantnih hitrosti pretakanja podzemne vode.

Table 2. Estimation of apparent dominant velocities of groundwater flow.

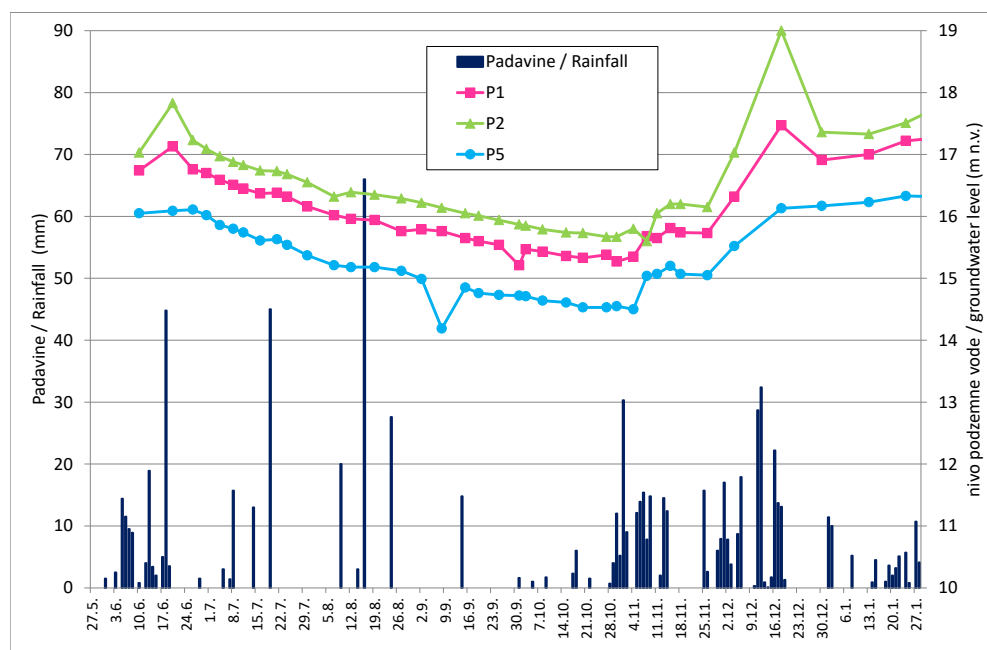
Opazovalna vrtina / obser- vation well	Razdalja / distance (m)	C_{max} (mg/m ³)	t_{dom} (d)	v_{dom} (m/d)
P1	225	0,083	83	2,7
P2	225	0,554	30	7,5
P5	295	0,16	157	1,9

Vrtina P5 je dolvodno od vrtin P1 in P2. Na dinamiko transporta uranina do vrtine P5 imajo pomemben vpliv tako preperina fliša pod odlagališčem kot tudi sedimenti v aluvialnem nanosu reke Dragonje. Tu se uranin razredči v podzemni vodi. Padavine sledilo najprej sperejo skozi odpadke na odlagališču, potem sledilo potuje po preperinski plasti fliša, ko pride do aluvialne ravnice pa skozi plitvo nezasičeno cono sedimentov do podzemne vode. Zaradi tega in zaradi slabše prepustnosti so časi potovanja do vrtine P5 daljši, pojavljanja uranina pa zaradi dušenega vpliva predstavlja široko območje. Poleg tega se uranin v glinastih sedimentih sorbira na organske delce. Koncentracije uranina v P5 so se od



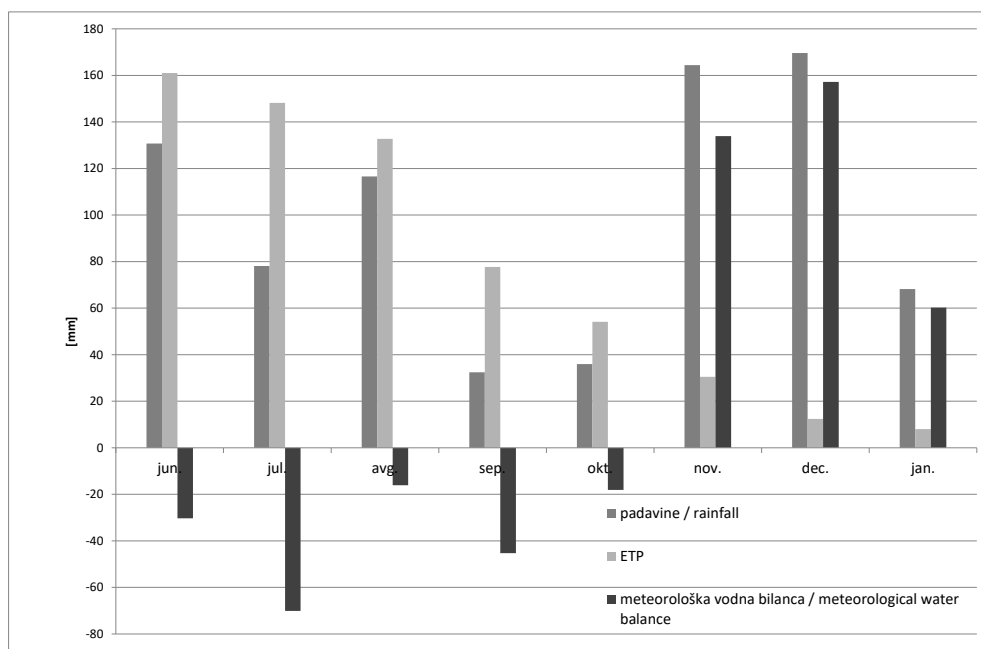
Sl. 5. Količina padavin in koncentracije uranina v vzorcih vode v opazovalnih vrtinah P1, P2 in P5

Fig. 5. Rainfall and uranine concentrations in observation wells P1, P2 and P5.



Sl. 6. Količina padavin in nivoji podzemne vode v vrtinah P1, P2 in P5 v času izvajanja sledilnega poskusa.

Fig. 6. Rainfall and groundwater levels in observation wells P1, P2 in P5 in the time of the tracer experiment.



Sl. 7. Meteorološka vodna bilanca.

Fig. 7. Meteorologic water balance.

avgusta počasi zviševale in se v novembru začele ponovno zniževati. Sledilo se je prvič pojavilo 59 dni po injiciranju, najvišja koncentracija je bila dosežena po 157 dneh ($0,160 \text{ mg/m}^3$). Dominantna hitrost toka je $1,9 \text{ m/d}$ (tabela 2). Na hitrost potovanja in koncentracijo uranina vpliva tudi geološka sestava tal. Aluvialni vodonosnik (sedimenti) ima na različnih globinah različno vodoprepustnost. Na površju, to je do 1 m globine je prepustnost ocenjena na $4,06 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, od 1 m pa do 2 m pa na $1,25 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (Rogelj, 1992). Pod dvema metri pa je prepustnost še manjša ($k=2,56 \cdot 10^{-8}$; Rogelj, 1992). Prepustnost sedimentov je zelo slaba, saj se je po črpanju iz vrtine nivo vode zelo počasi vzposatvil na začetni nivo.

Nivoji podzemne vode so bili pred vsakim vzorčenjem merjeni z ročnim merilcem. Nivoji podzemne vode so v vseh treh piezometrih upadali do konca oktobra, ko so začeli naraščati po jesenskem deževnem obdobju (sl. 6). Večina sledilnega poskusa je tako potekala v sušnem obdobju oz. obdobju minimalnega napajanja. Na nivo podzemne vode in količino padavin, ki se infiltrira skozi odlagališče ali tla do podzemne vode ter posledično koncentracijo uranina v vodi, vpliva evapotranspiracija. Delež infiltrirane vode lahko ocenimo iz meteorološke vodne bilance. Najvišje vrednosti potencialne evapotranspiracije so v mesecu juniju, juliju in avgustu. Potencialna evapotranspiracija je višja kot količina padavin vse do oktobra, torej je vodna bilanca negativna (sl. 7). Vendar vsa padavinska voda ni izhlapela, saj se je del infiltriral v tla/odlagališče, en del pa je zaradi naklona pobočja površinsko odtekel proti spodnjemu delu odlagališča. V tem

času so bile tudi koncentracije uranina v vzorcih vode relativno nizke, narasle so le po obilnejših kratkotrajnih obdobjih padavin. Nato koncentracije uranina narastejo, ko pozno jeseni oziroma v začetku zime (november, december) padejo večje količine padavin.

Zaključki

S sledilnim poskusom smo ugotavljali dinamiko prenosa onesnaževal iz odlagališča odpadkov v podzemno vodo. Odlagališče leži na eocenskih flišnih kamninah, oziroma na preperini flišnih kamnin. Uranin je bil injiciran gorvodno od odlagališča, vzorčevanje pa je potekalo v vrtinah dolvodno od odlagališča. Vrtini P1 in P2 sta med odlagališčem in aluvialno ravnico reke Dragonje, vrtina P5 pa na sami ravnici.

Prenos uranina je odvisen od več faktorjev, in sicer količine padavin, potencialne evapotranspiracije, prepustnosti sedimentov, infiltracije padavin v odlagališče odpadkov in zasičenosti flišne preperine pod odlagališčem. Hidravlične lastnosti preperine fliša se lokalno zelo spreminjajo, kar so potrdili tudi rezultati sledilnega poskusa. Uranin se je najprej pojavil v vrtini P2, ki je dolvodno od mesta injiciranja v smeri toka vode po preperini. V tej vrtini se je koncentracija uranina po določenem obdobju padavin relativno hitro povišala, kar nakazuje na relativno hiter tok podzemne vode. Glede na kasnejši pojav sledila pa je sledilo do vrtine P1 teklo po manj prepustnem območju flišne preperine in je zato tok počasnejši. Predvidevamo, da se je sledilo po prvih padavinah spralo v flišno preperino in potem počasi teklo do vrtine P1. Stari del odlagališča je na vzhodnem

delu, novi pa na zahodnem, naslanjata se drug na drugega in v naravi nista ločena, zato je meja ni čisto jasna. Novi del odlagališča je zahodno, poteka v smeri sever–jug, sledilo pa je najverjetneje teklo po pobočju, ki je v smeri NE–SW, zato domnevamo, da je večino poti sledilo teklo pod starim delom odlagališča. Podzemna voda iz flišne preperine se izliva v aluvialno ravnico, koncentracije uranina pa se razredčijo v podzemni vodi. Zaradi tega je v vrtini P5 zaznan počasen dvig in upad koncentracije uranina.

Nivoji podzemne vode so vse od junija pa do oktobra upadali. V tem času je evapotranspiracija večja od padavin. Nivoji podzemne vode so ponovno narasli šele po daljšem deževnem obdobju v jeseni. Zaradi tega bi bila zanimiva izvedba sledilnega poskusa tudi v jesenskem obdobju.

Pomanjkljivost opisanega sledilnega poskusa je tudi v pomanjkanju podatkov zaradi fizičnega vzorčenja, zato bi bila potrebna izvedba sledilnega poskusa z zveznim merjenjem koncentracije uranina. Ponovna izvedba sledilnega poskusa bi omogočila boljši vpogled v dinamiko podzemne vode, saj je sedaj na voljo veliko več opazovalnih vrtin.

Za učinkovito izvajanje monitoringa podzemne vode bi bilo potrebno izvrtati še eno vrtino gorvodno od odlagališča, s katero bi se določilo naravno ozadje parametrov v podzemni vodi, ki so določeni v programu monitoringa. V preteklosti so že poskusili vzpostaviti gorvodno opazovalno mesto, vendar nikjer ni bilo možno zajeti podzemne vode. Zaradi tega se kot referenčno mesto uporablja vrtina v aluvijalnem vodonosniku, ki ni pod neposrednim vplivom odlagališča, kar pa ni najbolj idelana rešitev, saj so na tem območju nesanirana stara bremena (nelegalna odlagališča), katerih lokacije niso povsem znane.

Viri in literatura

- ARSO 2019: Agencija Republike Slovenije za okolje, Atlas okolja (dostopno 15. december 2019), <http://gis.arso.gov.si/atlasokolja>
- Brenčič, M., Gale, U. & Mali, N. 2003: Konceptualni model toka podzemne vode na območju deponije Dragonja. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije, Oddelek za hidrogeologijo, Ljubljana.
- Caicedo, D. 2013: A study of the structure in solid wastes and some implications for fluid flow in landfills. University of Southampton, Faculty of Engineering and the Environment, Doctoral Thesis, Southampton: 347 p.
- Čenčur Curk, B., Pregl, M., Petrič, M. & Kogovšek, J. 2007: Hidrogeološki monitoring odlagališč na krasu. V: mednarodna konferenca „gospodarjenje z odpadki, okoljska geotehnologija in trajnostni razvoj“: ICWMEGGSD'07 - GZO'07, avgust 28.-30., 2007, Ljubljana, Slovenija. Naravoslovnotehniška fakulteta, oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Ljubljana: 12 p.
- Fuks, T. 2010: Hidrogeološke razmere na vplivnem območju odlagališča odpadkov Dragonja. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 55 p.
- Hudson, A.P. 2007: Evaluation of the vertical and horizontal hydraulic conductivities of household wastes. University of Southampton, School of Civil Engineering and the Environment. Doctoral Thesis. Southampton: 255 p.
- Ivanuša-Šket, H., Glazer, V., Brenčič, M. & Keršmanc, T. 2015: Noveliran program monitoringa podzemnih voda za odlagališče nenevarnih odpadkov Dragonja. Nacionalni laboratorij za zdravje in hrano, Center za okolje in zdravje, Oddelek za okolje in zdravje Maribor, Maribor: 56 p.
- Ivanuša-Šket, H., Glazer, V., Brenčič, M. & Vidmar, I. 2017: Ocena razširjenosti onesnaževal v prostoru, skladno s točko 8.3 programa ukrepov v primeru preseganja opozorilne spremembe parametrov podzemne vode odlagališče nenevarnih odpadkov Dragonja. Nacionalni laboratorij za zdravje in hrano, Center za okolje in zdravje, Oddelek za okolje in zdravje Maribor, Maribor: 100 p.
- Jerebica, D. 2009: Vpliv odlagališča komunalnih odpadkov Dragonja na podzemno vodo. Diplomsko delo. Univerza v Novi Gorici, Nova Gorica: 57 p.
- Jolly, J.M., Beaven, R.P. & Barker, R.D. 2011: Resolution of electrical imaging of fluid movement in landfills. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management, 164/2: 79-96. <https://doi.org/10.1680/warm.2011.164.2.79>
- Kass, W. 1998: Tracing technique in geohydrology. Balkema, Rotterdam: 581 p.
- Kogovšek, J. & Petrič, M. 2006: Tracer test on the mala gora landfill near Ribnica in southeastern Slovenia. Acta carsologica, 35/2: 91-101. <https://doi.org/10.3986/ac.v35i2-3.232>
- Kogovšek, J. & Petrič, M. 2007: Directions and dynamics of flow and transport of contaminants from the landfill near Sežana (SW Slovenia).

- Acta carsologica, 36/3: 413-424. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.531>
- Kogovšek, J. & Petrič, M. 2010: Tracer tests as a tool for planning the monitoring of negative impacts of the Mozelj landfill (SE Slovenia) on karst waters, *Acta carsologica*, 39/2: 301-311. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i2.101>
- Marius, M.S., Stringfellow, A., Smallman, D. & Atkinson, T. 2010: Fluorescent tracers - a tool for landfill investigation and management. In: *Waste 2010, Waste & Resource Management: putting strategy into practice. Proceedings of the Waste 2010 conference. Waste Conference Ltd.*: 10 p.
- Mor, S., Ravindra, K., Dahiya, R.P. & Chandra, A. 2006: Leachate Characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environmental monitoring and assessment* 118, 1-3: 435-456.
- Prestor, J. & Janža, M. 2002: Vpliv Ljubljanskega odlagališča komunalnih odpadkov »Barje« na podzemno vodo. *Geologija*, 45/2: 505-512.
- Ratej, J. & Brenčič, M. 2005: Groundwater monitoring network for landfills establishment - Case study of Slovenia. In: *Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2005*.
- Rogelj, J. 1992: Poročilo o rezultatih hidrogeoloških raziskav za sanacijo odlagališča odpadkov v Dragonji. Ljubljana, Geološki zavod Ljubljana, 18 p.
- Rosqvist, H. & Bendz, D. 1999: An experimental evaluation of the solute transport volume in biodegraded municipal solid waste. *Hydrology and earth system sciences*, 3: 429-438. <https://doi.org/10.5194/hess-3-429-1999>
- Salama, R.B., Davis, G.B. & Barber, C. 1989: Characterizing the hydrogeological variability of a sand aquifer in the region of a domestic waste disposal site. In: *Sahuquillo, A., Andreu, J. & O'Donnell, T. (eds.): Groundwater management: Quantity and quality, IAHS Publication*, 188: 215-226.
- Smart, P. L. 1985: Applications of fluorescent dye tracers in the planning and hydrological appraisal of sanitary landfills. *Q.J. eng. Geol.* 18: 275-286.
- Uradni list RS, št. 49/06, 114/09, NPB1 in 53/15). Pravilnik o obratovalnem monitoringu onesnaževanja podzemne vode. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV7617>
- Uradni list RS, št. 10/2014, 54/2015, 36/2016 in 37/2018. Uredba o odlagališčih odpadkov. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6660>
- Woodman, N., Rees-White, T., Stringfellow, A., Beaven, R.P. & Hudson, A.P. 2014: Investigating the effect of compression on solute transport through degrading municipal solid waste. *Waste Management*, 34/11: 2196-2208 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.022>
- Woodman, N.D., Rees-White, T.C., Stringfellow, A., Beaven, R.P. & Hudson, A.P. 2015: Multiple-tracer tests for contaminant transport process identification in saturated municipal solid waste. *Waste Management*, 38, 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.012>
- Woodman, N.D., Rees-White, T., Beaven, R., Stringfellow, A. & Barker, J. 2017: Doublet tracer tests to determine the contaminant flushing properties of a municipal solid waste landfill. *Journal of Contaminant Hydrology*, 203: 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.05.008>
- Internetni viri:
Internet 1: http://www.geopedia.si/#T105_F450:19807541_x396628_y88985_s13_b4 (2019)