

Vpliv ljubljanskega Odlagališča komunalnih odpadkov »Barje« na podzemno vodo

The Impact of Ljubljana's Waste Deposit »Barje« on Groundwater

Joerg PRESTOR & Mitja JANŽA

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

Ključne besede: Ljubljana, odlagališče Barje, vpliv na podzemno vodo, matematično modeliranje, izcedne vode, oksidacijsko-redukcijski procesi

Key words: Ljubljana, waste deposit Barje, impact on groundwater, mathematical model, leachate, oxidation-reduction process

Povzetek

Javno podjetje Snaga, d.o.o. je v letu 2000 izpeljalo obsežnejše hidrogeološke raziskave vpliva mestnega odlagališča komunalnih odpadkov Barje na podzemno vodo. Izvrtano je bilo 19 vzorčevalno-peizometričnih vrtin, s katerimi je bila vzpostavljena podrobnejša opazovalna mreža za spremljanje kakovosti podzemne vode in dinamike njenega pretakanja. Z vzorčevanjem iz teh vrtin je bilo posneto današnje stanje kakovosti podzemnih vod, s pomočjo matematičnega modela pa so bile ocenjene hitrosti in smeri pretakanja podzemnih vod. Ugotovljen je bil jasen vpliv redukcijskih pogojev v spodaj ležečih plasteh zaradi konsolidacije tal in zmanjšanja njihove prepustnosti, zaprtja površine z odpadki in vpliva izcednih vod iz starega nezatesnjenega dela odlagališča. Zaradi redukcijskih pogojev nastopajo v neposredni okolici odlagališča povišane vsebnosti kemijskih zvrsti, ki so značilne za oksidacijsko redukcijske procese kot so Fe, Mn, NO₃, NH₄, As. Drugi parametri kot so Cr, Cd, druge nevarne snovi, kovine in anorganske snovi ne kažejo širjenja v horizontalni smeri izven območja odlagališča.

Abstract

Ljubljana's waste deposit is situated on rather thick formation of quaternary sediments on the northern margin of Ljubljansko Barje (Ljubljana Moor). The upper part of quaternary sediments consists of high compressive silty and clayey layers till the depth of approx. 33 m. These layers are very heterogeneous and one can only find one continuous clayey gravel layer among them at the depth of 8 m and 4 m thick. Below these layers there is the Upper gravel aquifer and from the depth of 72 m there is the Lower gravel aquifer. The bottom of quaternary sediments is approx. at 140 m depth. The consolidation of highly compressive upper layers and organic compounds from landfill leachate produce the evident impact by reducing conditions in the geological layers below the waste deposit. Though we can detect the reducing conditions also from natural environment in confined layers and rich organic matter content and also from other sources of contamination in the highly urbanized environment. The geometry of the contamination plume was not investigated in detail and also not the redox process dynamics. The advection velocities and actual contamination of groundwater are rather low. Further protection measurements will be designed by the aid of the established monitoring results.

Uvod

Odlagališče komunalnih odpadkov Barje zavzema danes približno 80 Ha površine na južnem obrobju Ljubljane. Dobro polovico te površine predstavlja stari del odlagališča, ki ne obratuje in je danes prekrit ter urejen kot avtosejemska površina. Novi del odlagališča se razprostira južno od starega dela in je danes v polnem teku obratovanja. Trenutno pripravlja Javno podjetje Snaga, d.o.o. nova odlagalna polja na zahodnem delu novega dela, sedaj pa odlaga odpadke s povečevanjem obstoječih odlagalnih polj na zahodni strani novega dela.

Opadki so bili na starem delu odlagališča odloženi na slabo nosilna barjanska tla brez posebnih tesnilnih in drenažnih sistemov. Pri takratni tehnologiji odlaganja so namreč načrtovalci privzeli pretežno glinasto meljna tla kot zelo slabo prepustna ali praktično neprepustna, za tesnilni sloj pa je bil uporabljen elektrofilterski pepel. Pričakovali so, da se bo elektrofilterski pepel močno konsolidiral in ob tem zagotavljal tesnost, ki naj bi bila boljša od glinastega naboja. Hidrogeološke raziskave pri takratni graditvi niso bile primerno vključene. Raziskave, ki so bile nato narejene v kasnejših letih so pokazale, da se na območju odlagališča nekaj metrov pod vrhnjimi glinasto meljastimi plastmi pojavlja zvezna tanjša prva prodna plast. Ugotovljeno je bilo tudi, da se zgornji vodonosnik, ki je razširjen na celotnem območju Barja in se na južnem obrobju Ljubljane stika s savskim prodom, na območju odlagališča začena na globini 30 do 35 m (Mencej, 1990). Prodor onesnaženja v zgornji vodonosnik bi pomenil možnost napredovanja onesnaženja v vodonosnik savskega prodnega zasipa, ki se nadaljuje v vodonosnik Ljubljanskega polja. S tem bi se onesnaženje lahko širilo tudi v smeri proti črpalnišču Hrastje.

Na novem delu odlagališča se je tehnologija odlaganja bistveno spremenila in se izpopolnjuje še naprej, predvsem v smeri zagotavljanja tesnosti deponijskega telesa proti tlom, dreniranja infiltrirane vode iz deponijskega telesa, zmanjševanja gladine vode v deponijskem telesu ter ustreznega odvajanja onesnaženih vod. V tem času je bistveno ugotoviti sedanjo stopnjo kontaminacije tal in podzemne vode, prognozirati razvoj kontaminacije v prihodnjih letih ter zago-

toviti, da predvideno nadaljnje obratovanje ne bo poslabšalo sedanjih razmer. Poleg tega je nujno predvideti ukrepe, ki bodo potrebni tudi po prenehanju obratovanja odlagališča.

Hidrogeološke razmere

Odlagališče Barje leži na kvartarnem zasipu, ki je debel približno 140 m. Spodnji del kvartarnega zasipa sestavljajo pretežno prodnopoščeni nanosi rek, vrhnji del pa poplavnozajezitveni in močvirski nanosi. Podlago kvartarnega zasipa tvorijo dolomitne plasti triasne starosti, ki proti severu tonejo pod tektonsko narinjene permokarbonske klastične kamnine (Mencej, 1989).

V predkvartarni podlagi sta vidni dve izraziti dolini. Vzhodna dolina se nahaja približno na mestu sedanjega toka Ljubljance na območju Rakove jelše, kjer poteka Ljubljanski prelom. Zahodna dolina poteka v smeri jug sever na območju med Ljubljanico in Curnovcem nekoliko zahodno od odlagališča. Na območju Curnovca se zahodna dolina obrne proti vzhodu-severovzhodu in poteka pod novim delom odlagališča Barje proti vzhodni dolini. Omenjeni dolini lahko predstavljata nekdanji strugi Iške, oziroma Ljubljance. V zahodni dolini je po morfologiji podlage razviden tudi pritok z zahodne strani, to je s strani današnjega potoka Curnovca, medtem ko pritok s strani Gradašnice v podlagi ni izrazit.

Celoten kvartarni zasip torej delimo na prodno peščeni zasip in vrhnje plasti. Prodno peščeni zasip je ločen z vmesnimi glinasto meljastimi plastmi skoraj na celotnem območju Barja in tvori dva vodonosnika, ki ju imenujemo spodnji in zgornji prodni vodonosnik Ljubljanskega Barja (Mencej, 1989). Nad prodnopoščanim zasipom sledijo poplavno-zajezitveni sedimenti in posamezni prodno peščeni nanosi lokalnih potokov. To so v navpični in vodoravni smeri zelo heterogene plasti gline, meljne gline, melja, proda, organske gline in šote. Na splošno te plasti imenujemo vrhnje plasti (Prestor, 1988).

Med vrhnjimi plastmi je Mencej odkril prodno plast, ki se pojavlja na celotnem območju odlagališča in jo zato obravnavamo kot zvezno. Mencej je to plast imenoval prva prodna plast med vrhnjimi plastmi. Plast je v povprečju debela od 2 do 4 m in je približno

od 8 do 11 m globoko pod površino tal. Značilno je, da tone od zahoda proti vzhodu v smeri proti sotočju Gradašnice in Malega grabna z Ljubljano. Tako kaže na izvor tega nanosa iz vzhodne smeri, bodisi iz smeri Gradašnice bodisi iz smeri Curnovca.

Shematičen hidrogeološki presek vrhnjih plasti na območju odlagališča Barje je prikazan na sliki 1. Na površini je torej tanka krovna glinasta plast. Ta je debela od 1 do 1.5 m in se debeli proti tipičnemu barjanskemu profilu tal. Pod krovno plastjo sledijo vrhnje plasti do globine od 30 do 33 m. Med vrhnjimi plastmi nastopa prva prodna plast na globini med 8 in 11 m.

Pod vrhnjimi plastmi sledi zgornji vodonosnik (od globine 33 do 43 m), pod njim spodnji vodonosnik od globine približno 70 m naprej in nato predkvartarna dolomitna podlaga (dolomitni vodonosnik) na globini približno 140 m.

Prvo prodno plast sestavljajo prodniki klastičnih kamnin, kar jasno kaže na izvor tega nanosa z zahodnega obrobja Barja, bodisi s strani Gradašnice bodisi Curnovca. Podobno sestavo ima prodni nanos zgornjega dela zgornjega vodonosnika, ki se na območju odlagališča začne na globinah od 30 do 33 m. Spodnji vodonosnik pa je na tem območju sestavljen iz karbonatnega proda, ki izvira s strani Iške. Poleg bistvene razlike v sestavi nanosov, kjer gre za okolje v klastičnih sedimentih in okolje v karbonatnih sedimentih, je značilna tudi pomembna prisotnost organskih snovi, zlasti šote, v vrhnjih plasteh in zgornjem vodonosniku. Zaradi takih razmer je za vrhnje plasti in zgornji vodonosnik značilen razvoj oksidacijsko-redukcijskih procesov. Ti se na širšem območju Barja izražajo z značilnimi povišanimi vsebnostmi železa, manj pa tudi drugih redukcijskih parametrov kot so Mn, NH_4^+ in tudi As.

Vsi omenjeni vodonosniki na obravnavanem območju (dolomitni vodonosnik v podlagi, spodnji vodonosnik, zgornji vodonosnik in prva prodna plast) so po hidrodinamskem tipu zaprti ali polzaprti vodonosniki. Piezometrična gladina je v teh slojih arteška ali subarteška. Približno 500 m zahodno od novega dela odlagališča ob potoku Curnovec je bilo izvrtanih nekaj vrtin in piezometrov, v katerih lahko praktično na istem mestu izmerimo piezometrične gladine podzemne vode v vseh omenjenih vodonosnih slojih. Iz tega so razvidni hidravlični odnosi med po-

sameznimi vodonosnimi sloji v navpični smeri, ki kažejo, da je piezometrična gladina v dolomitnem vodonosniku višja od gladine v spodnjem prodnem vodonosniku. Obe pa sta približno od 4 do 6 m pod koto površine. Zgornji vodonosnik ima že arteški hidrostatični tlak.

Za preiskave vpliva odlagališča na podzemno vodo sta bila podrobneje preiskana prva prodna plast in zgornji vodonosnik. S piezometričnimi vrtinami, ki so bile razporejene okrog odlagališča, smo lahko izrisali podrobnejšo sliko piezometričnih gladin prve prodne plasti in zgornjega vodonosnika na tem območju. Pri tem se je jasno pokazala razlika v smereh tokov podzemne vode v obeh omenjenih slojih. Smer toka v prvi prodni plasti kaže, da se ta plast napaja s smeri Gradašnice, tok podzemne vode pa je usmerjen od zahoda proti vzhodu. V zgornjem vodonosniku je smer toka dokaj podobna, vendar očitno bolj odklonjena v smeri vzhod-severovzhod. Sklepamo, da gradienta podzemne vode v obeh vodonosnih slojih sledita gradientoma samih vodonosnih slojev, to je položaju obeh nanosov prodnega materiala. Nadalje bi lahko sklepali, da starejši nanos (zgornji vodonosnik) izvira bolj iz smeri Curnovca, ki se kaže kot starejša smer nanosa tudi v morfologiji podlage, mlajši nanos (prva prodna plast) pa izvira bolj iz smeri Gradašnice.

S primerjavo obeh piezometričnih gladin smo ugotovili, da je na južnem delu odlagališča (novi del) piezometrična gladina v zgornjem vodonosniku višja od piezometrične gladine v prvi prodni plasti. Na skrajnem jugozahodnem koncu odlagališča je piezometrična gladina v zgornjem vodonosniku približno do 1.5 m višja od piezometrične gladine v prvi prodni plasti. Na območju potoka Curnovca sta obe piezometrični gladini približno izenačeni. Proti severu se piezometrična gladina v zgornjem vodonosniku spusti pod piezometrično gladino prve prodne plasti. Tako je na skrajnem severnem koncu starega odlagališča razlika med piezometričnima gladinama že 4 m.

Tlak podzemne vode v zgornjem vodonosniku je arteški (približno 1 m nad koto površja) na novem delu odlagališča, to je južno od Curnovca, medtem ko se severno od Curnovca spusti pod koto okoliškega površja in je subarteški. Na skrajnem severnem delu odlagališča je približno 5 m pod koto

površja. V prvi prodni plasti je piezometrični tlak do 0.5 m pod površjem na skrajnem jugozahodnem delu odlagališča, na skrajnem severnem delu pa približno do 1 m pod površjem. Iz tega sledi, da so hidravlične razmere glede zaščite pred vplivom z odlagališča bolj ugodne na južnem delu odlagališča, kjer imamo negativni gradient navpične komponente toka.

Dinamika podzemne vode

Za preučevanje vpliva odlagališča Barje na podzemno vodo je bistveno razumevanje dinamike podzemne vode in hidrogeokemijskih procesov, ki se razvijajo ob konsolidaciji plasti pod odlagališčem in prodoru izcedne vode v spodaj ležeče geološke plasti. Dinamika podzemne vode je na tem območju precej zapletena, saj gre za zelo raznoliko sestavo geoloških plasti, veliko heterogenost v navpični in vodoravni smeri, različne smeri napajanja posameznih plasti, raznoliko porazdelitev pornih tlakov v posameznih plasteh, pomembno vlogo površinskih jarkov, ki mestoma drenirajo mestoma napajajo vrhnje plasti in tudi vplive stiskanja močno stisljivih plasti pod telesom odlagališča. Zelo pomembna naloga izvedenih raziskav je bila čim natančnejša ocena osnovnih hidrogeoloških parametrov kot so koeficient prepustnosti (v navpični in vodoravni smeri), efektivna poroznost in koeficient elastičnega vskladiščenja. Za oceno teh parametrov smo izvedli podrobnejša poskusna črpanja z oceno izgub v in ob vodnjaku, uporabili smo granulometrijske analize jedrovanih vzorcev plasti in opravili izračune barometrične učinkovitosti prve prodne plasti ter zgornjega vodonosnika na podlagi zveznih meritev gibanja piezometričnih gladin v nekajmesečnem obdobju.

Analiza granulometrijske sestave vrhnjih plasti nad prvo prodno plastjo je pokazala, da gre v splošnem za menjavanje posameznih tanjših slojev debeline od 1 do 1.5 m, ki imajo vrednosti koeficienta prepustnosti med 10^{-5} m/s in 10^{-8} m/s. Zaradi take slojevitosti sta koficenta prepustnosti v navpični in vodoravni smeri bistveno različna. Kot najustreznejši vrednosti smo za koeficienta prepustnosti v vodoravni smeri izračunali $k_h = 1.72 \cdot 10^{-5}$ m/s in za koeficient prepustnosti v navpični smeri $k_v = 3.42 \cdot 10^{-8}$ m/s.

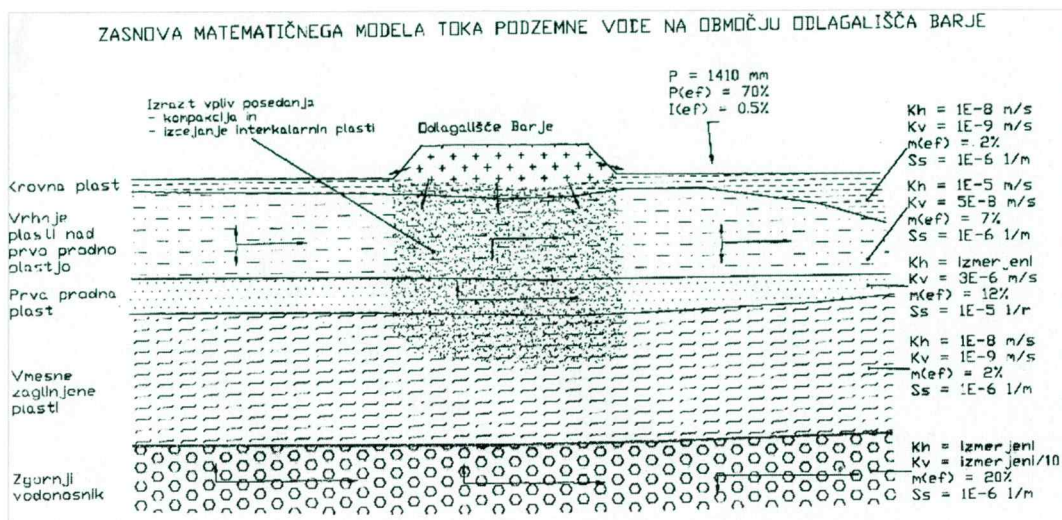
Precej različne vrednosti koeficienta prepustnosti smo dobili tudi na podlagi črpalnih poskusov izvedenih v prvi prodni plasti in zgornjem vodonosniku. Izmerjene in izračunane vrednosti koeficienta prepustnosti v prvi prodni plasti so med $k = 1.31 \cdot 10^{-6}$ m/s in $k = 1.08 \cdot 10^{-4}$ m/s, v zgornjem vodonosniku pa med $k = 4.2 \cdot 10^{-6}$ m/s in $k = 2.7 \cdot 10^{-4}$ m/s.

V izvedeni nalogi smo podrobneje preučili adveksijske pogoje, ki nastopajo v zgornjem delu kvartarnega zasipa pod odlagališčem, to je v vrhnjih plasteh in zgornjem prodnem vodonosniku. Razmere v tem delu so bistvene za razumevanje dogajanja na območju odlagališča. Za trirazsežno preučitev dinamike podzemne vode smo uporabili matematični model, ki smo ga izdelali z orodjem MIKE SHE (DHI). Hidrogeološki parametri, ki smo jih vgradili v matematični model so povzeti na sliki 1.

Že med postopkom umerjanja matematičnega modela se je izkazalo, da imata na dinamiko podzemne vode očiten vpliv zmanjšanje prepustnosti in izcejanje vmesnih močno stisljivih plasti v prvo prodno plast in zgornji vodonosnik. Tudi računska ocena, ki jo lahko opravimo s pomočjo izmerjenih koeficientov stisljivosti, jasno kaže, da je količina izcejanja zaradi kompakcije vsaj v začetnih letih pomembna v primerjavi s celotno količine vode, ki se pretaka skozi prvo prodno plast in vrhnji del zgornjega vodonosnika. Vpliv posedanja in izcejanja smo tako pri umerjanju modela upoštevali z zmanjšanjem koeficienta prepustnosti in prilagajanjem vrednosti učinkovite infiltracije za posamezno plast pod telesom odlagališča.

Rezultati matematičnega modeliranja so pokazali, da je zaradi advekcije potrebno računati z možnostjo širjenja onesnaženja s tokom podzemne vode tako v vodoravni kot tudi navpični smeri. Izračunana hitrost toka v vrhnjih plasteh nad prvo prodno plastjo na mestu vrtine Vd-4pl je 0.069 m/dan, kar pomeni, da bi bila v desetih letih dosežena avdeksijska razdalja 250 m, v petdesetih letih pa 1300 m. V prvi prodni plasti je ta hitrost nekoliko višja (0.093 m/dan), to pomeni v desetih letih avdeksijsko razdaljo 340 m, v petdesetih letih pa 1700 m.

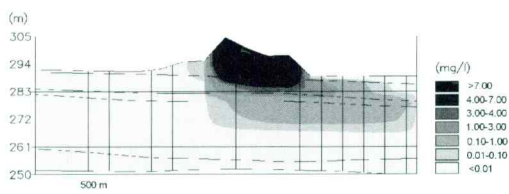
Zaradi občutno slabše navpične komponente prepustnosti, je hitrost navpične komponente hitrosti toka bistveno manjša od vodoravne. Na sliki 2 lahko vidimo modeliran oblak širjenje onesnaženja s tokom podzem-



Slika 1. Shematičen hidrogeološki presek vrhnjih plasti na območju odlagališča Barje

ne vode. Dobro sta vidna razpotežnena oblika oblaka v vodoravni smeri proti vzhodu in bočno širjenje v vrhnjih plasteh nad prvo prodno plastjo zaradi povišane gladine izcedne vode v telesu odlagališča.

Modelirani oblak na sliki 2 prikazuje porazdelitev vsebnosti nekega konzervativnega onesnaževala, ki bi imelo stalen izvor v telesu odlagališča z vsebnostjo 10 mg/l v 50 letih. Na razdalji približno od 30 do 50 m od roba odlagališča v smeri toka podzemne vode bi se v 50 letih konzervativno onesnaževalo v vrhnjih plasteh nad prvo prodno plastjo pojavilo z vsebnostjo 3.2 mg/l in z vsebnostjo 0.4 mg/l v prvi prodni plasti.



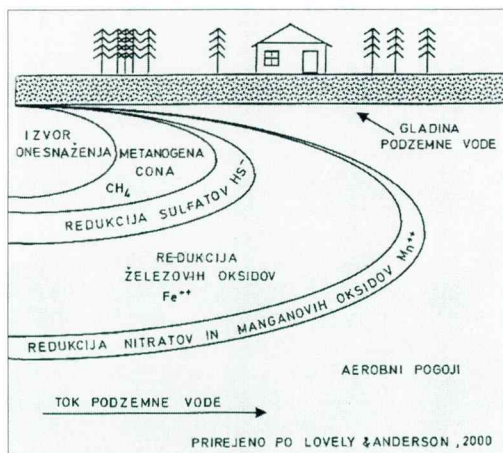
Slika 2. Modelirani oblak širjenja namišljenega onesnaževala z advekcijo (stalni vir onesnaževala z vsebnostjo 10 mg/l na odlagališču, razporeditev v geoloških plasteh pod odlagališčem po 50 letih)

Razvoj hidrogeokemijskih procesov

V geoloških plasteh pod odlagališčem Barje lahko pričakujemo izrazit razvoj oksidacijsko redukcijskih procesov, ki so, kot že

rečeno, na tem območju prisotni že v naravnih pogojih. Za konceptualni model razvoja teh procesov lahko privzamemo model, ki ga prikazuje slika 3. Na tej sliki gre za izvor stalnega izvora onesnaženja z organskimi snovmi ter conarnost redukcijskih pogojev pod vplivom toka podzemne vode s prevladujočo vodoravno komponento.

Enaki pogoji lahko nastanejo s prodrom izcednih vod v vodonosni sloj. V izcednih vodah raztopljene organske snovi porabijo v fazi prodora v vodonosni sloj najprej raztopljeni kisik, nato pa sledi redukcija nitrata in



Slika 3. Konceptualni model conarnosti oksidacijsko-redukcijskih procesov zaradi prodora izcednih vod v tla

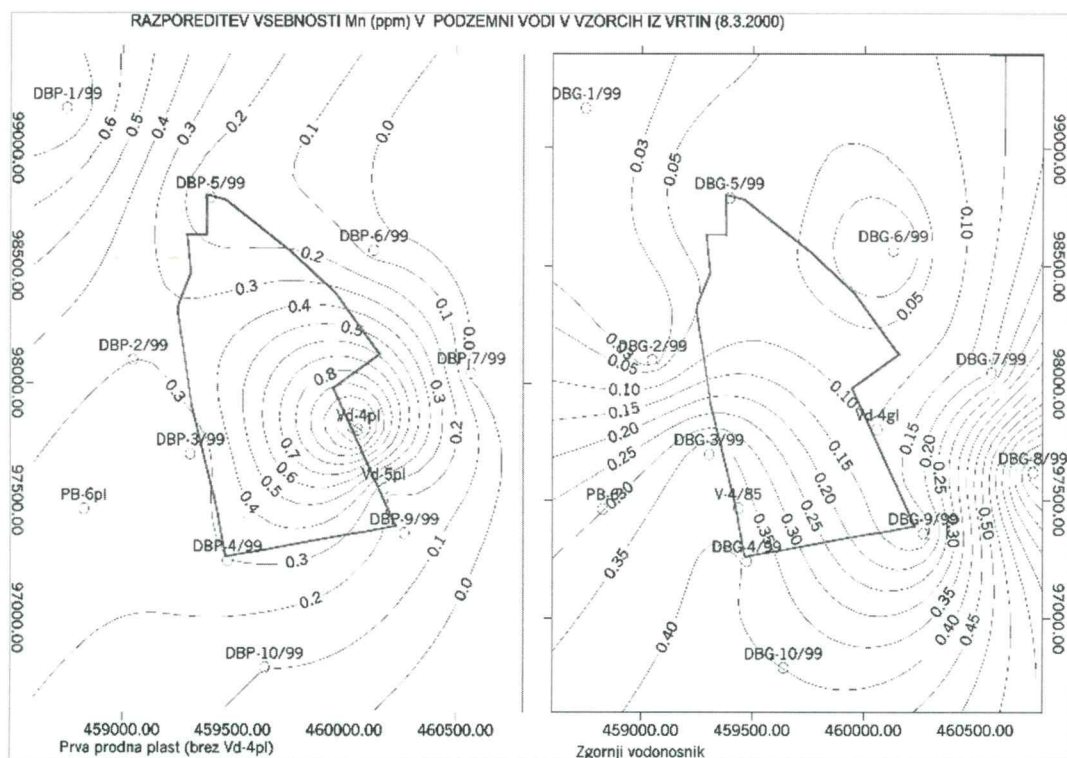
manganovih oksidov. V naslednji fazi sledi redukcija železovih oksidov, pri čemer se sprostijo večje količine železovega iona Fe^{++} . Po porabi železovih oksidov se nadaljuje redukcija sulfatov v sulfide (HS^-) v zadnji fazi pa nastajanje metana. Pri omenjenih procesih ima zelo pomembno vlogo mikrobiološko delovanje.

Pri redukcijskih procesih v primeru vdora izcedne vode v vodonosni sloj lahko nastaja tudi CO_2 , kar pogosto povzroči povečanje raztapljanja karbonatov in alkalitete (Apello & Postma, 1993).

Z vzorčevanji, ki so bila opravljena v vrtinah okrog odlagališča, je bil ugotovljen vpliv redukcijskih pogojev v vrhnjih plasteh nad prvo prodno plastjo, v prvi prodni plasti in v zgornjem vodonosniku. Pri tem se prekrivajo vplivi samega odlagališča, naravni pogoji in vplivi onesnaženj iz drugih virov (imisijsija). Na sliki 4, ki prikazuje vsebnost mangana v podzemni vodi, lahko vidimo v prvi prodni plasti povečane vsebnosti tega elementa na območju odlagališča in tudi na mestu vrtine DBP-1/99, ki je izven vplivnega

območja odlagališča in kaže na nek drug izvor kontaminacije. Zelo povišana vsebnost mangana na mestu vrtine Vd-4pl/91 pa je posledica mešanja vode iz vrhnje plasti nad prvo prodno plastjo in iz prve prodne plasti. Vsebnosti mangana, ki so bile analizirane v vzorcih podzemne vode iz zgornjega vodonosnika, kažejo na povečevanje od severa proti jugu, to je v smeri proti tipičnemu barjanskemu preseku tal z jasno izraženimi redukcijskimi pogoji zaradi naravnih razmer.

Poleg mangana je značilno pojavljanje višjih vsebnosti tudi ostalih redukcijskih parametrov kot so železo, amonij, arzen in sulfidi. Očiten vpliv na vsebnosti teh elementov ima tudi sama prepustnost, oziroma hitrost pretakanja podzemne vode v sloju. Tako so v delih slojev s počasnejšim tokom podzemne vode redukcijski pogoji lahko izrazitejši. Na podlagi matematičnega modeliranja toka podzemne vode domnevamo, da ima izrazit vpliv na dinamiko podzemne vode in hidrogeokemijske pogoje lahko tudi konsolidacija tal pod južno obvoznico.



Slika 4. Vsebnost mangana v podzemni vodi iz prve prodne plasti in zgornjega vodonosnika

V vzorčevani podzemni vodi iz prve prodne plasti in zgornjega vodonosnika na širšem območju odlagališča je značilno pojavljanje redukcijskih elementov, ki običajno tudi presegajo normative za pitne vode. Železo se pojavlja v vsebnostih do 3.1 mg/l, amonij do 3.3 mg/l, mangan do 1.3 mg/l, nitriti do 0.0024 mg/l in arzen do 0.039 mg/l. Drugi elementi kot so kovine Cu, Ni, Cd, Cr⁶⁺, Pb, Zn, Al ter organske snovi kot so policiklični ogljikovodiki, AOX (organske halogenirane adsorbilne spojine), skupne fenolne snovi, pesticidi in druga onesnaženja so pod mejo detekcije ali pod normativi za pitne vode. Kontaminacija z nekaterimi od teh snovi je značilna le v vrhnjih plasteh nad prvo prodno plastjo na ožjem območju odlagališča.

Dinamika hidrogeokemijskih procesov, predvsem oksidacijsko-redukcijskih reakcij v geoloških plasteh na območju odlagališča v tej fazi raziskav ni bila podrobneje raziskana. Izvedeni sta bili dve seriji vzorčevanj, na podlagi katerih je bilo možno podati natančnejši program monitoringa, ki bo zagotavljal nadzor nad razvojem teh procesov. Prav tako smo lahko na podlagi izvedenih raziskav izboljšali vrsto prametrov, ki jih je potrebno vzorčevati za nadzor vpliva odlagališča na podzemno vodo, saj je kemijska analitika pomemben strošek in ni smiselno, da bi na vseh mestih vedno vzorčevali vse parametre.

S časovno serijo nadaljnjih vzorčevanj po programu ni možno ugotoviti izvedeno prognozo širjenja kontaminacije z advekcijo. Po drugi strani bo možno podrobnejše spremljati dinamiko oksidacijsko-redukcijskih procesov. Dejstvo je, da je bilo za preiskavo dveh vodonosnih slojev na vhodni in izhodni strani odlagališča potrebno kar devetnajst opazovalnih vrtin, deset v zgornjem vodonosniku in devet v prvi prodni plasti. Kljub temu, da je na tem območju obstajalo že več starejših vrtin, jih vrsto ni bilo možno enakovredno uporabljati za te raziskave. Vrtine so bile namreč izdelane po metodologiji, ki ne omogoča trajnega in inertnega vzorčevanja, zato je potrebno nekatere od starih vrtin uničiti ter preprečiti njihove morebitne negativne vplive na lokalne hidrogeološke pogoje. Da pa bi lahko ugotovili dejansko geometrijo in conarnost oblaka redukcijskega okolja pod odlagališčem, bi bilo treba izdelati še vrsto dodatnih razmeroma zahtevnih opazovalno-vzorčevalnih vrtin. Seveda je take preiskave smiselno izvajati postopoma gle-

de na ugotovljene rezultate, ki jih bo podal monitoring. Na podlagi rezultatov izvedenih raziskav so bile že izdelane nekatere dopolnilne plitke vrtine, s katerimi je bila potrjena neustrezna izdelava starih vrtin in omogočeno spremljanje prognozirane kontaminacije vrhnjih plasti nad prvo prodno plastjo na vzhodnem robu novega dela odlagališča.

Zaključki

S podrobnejšimi raziskavami vpliva odlagališča Barje v Ljubljani na podzemno vodo v letih 1999 in 2000 je bilo ugotovljeno jasno izraženo redukcijsko okolje v geoloških plasteh pod odlagališčem. Ta vpliv, ki nastaja zaradi same konsolidacije močno stisljivih plasti in izcedne vode, bogate z organskimi snovmi, se prekriva s posledicami naravnega redukcijskega okolja v vrhnjih plasteh, prvi prodni plasti in zgornjem vodonosniku ter s posledicami redukcijskih pogojev, ki nastopajo zaradi imisije onesnaženj iz drugih virov na urbaniziranem območju. Glavne posledice redukcijskega okolja so povečane vsebnosti redukcijskih elementov kot so mangan, železo, nitrit, amonij, sulfid. Ostali parametri onesnaženja (PAO, AOX, kovine,...) so ali pod mejo detekcije ali pod normativi za pitne vode.

Ugotovljeno je bilo, da je adveksijsko širjenje onesnaženja razmeroma počasno. Še posebej so proti širjenju onesnaženja z advekcijo ugodni pogoji na južnem delu odlagališča (novi del), kjer imamo zaradi arteškega tlaka podzemne vode v zgornjem vodonosniku negativni gradient toka v navpični smeri. Na preostalem delu odlagališča je navpični pozitivni gradient razmeroma majhen, prav tako tudi koeficient prepustnosti v navpični smeri.

Z izvedenimi raziskavami ni bilo možno ugotoviti natančnega razvoja conarnosti oksidacijsko-redukcijskih procesov v geoloških plasteh pod odlagališčem. Dinamiko teh procesov bo potrebno slediti na podlagi rezultatov monitoringa ter skladno s temi predvideti nadaljnje potrebne preiskave.

Podjetje Snaga, d.o.o. že izvaja vrsto ukrepov za zmanjšanje možnih vplivov odlagališča na razmere v spodaj ležečih geoloških plasteh. Ti ukrepi so predvsem dreniranje, dobro in učinkovito tesnenje in prekrivanje telesa odlagališča, ureditev površinskih jarkov in pre-

prečevanja vdora izcednih vod v površinske jarke izven odlagališča. Dejstvo, da je najpomembnejši vpliv odlagališča na geološke plasti razvoj oksidacijsko-redukcijskih procesov, pomeni, da bodo, v prihodnosti do konca obratovanja odlagališča in morda še posebej po prenehanju obratovanja, sanacijski ukrepi temeljili na tehnologiji kontrole teh procesov, pri katerih ima zelo pomembno vlogo delovanje mikroorganizmov. Za načrtovanje teh ukrepov je bistveno nadaljnje izvajanje monitoringa, specifičnega za to odlagališče, in izvajanje podrobnejših ciljanih preiskav v skladu z rezultati tega monitoringa.

Literatura

Apello, C.A.J. & Postma, D. 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Balkema, 1993

Lovley, D. R. & Anderson R. T. 2000. Influence of dissimilatory metal reduction on fate organic and metal contaminants in the subsurface. *Hydrogeology Journal*. Volume 8. Number 1. February 2000. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000. Str. 77-88.

Mencej, Z. 1989. Prodni zasipi pod jezerskimi sedimenti Ljubljanskega Barja. *Geologija* 31,32. Geološki zavod Ljubljana. Str. 517-553.

Prestor, J. 1988. Hidrogeološka zgradba kvartarnega zasipa južnega območja Ljubljane. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, FNT VTO Montanistika – Geologija. 46 str.