

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 19	str. 35 - 45	Zagreb, 2007.
----------------------------------	---------	--------------	---------------

UDK 551.49:628.49
UDC 551.49:628.49

Originalni znanstveni rad
Original scientific paper

Jezik/Language: *Hrvatski/Croatian*

UTJECAJ ODLAGALIŠTA OTPADA JAKUŠEVEC-PRUDINEC NA KAKVOĆU PODZEMNE VODE

IMPACT OF THE JAKUŠEVEC-PRUDINEC WASTE DISPOSAL SITE ON GROUNDWATER QUALITY

ZORAN NAKIĆ, MARKO PRCE, KRISTIJAN POSAVEC

Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: odlagalište otpada Jakuševac-Prudinec, podzemna voda, teški metali, indeks zagađenja

Key words: Jakuševac-Prudinec waste disposal site, groundwater, heavy metals, pollution index

Sažetak

U radu su prikazani rezultati istraživanja uzročno-posljedične veze između odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec i zagađenja podzemne vode. Sanacija odlagališta otpada, koja je završena krajem 2003. godine, nije značajnije utjecala na smanjenje zagađenja u podzemnoj vodi. Vrlo visoke vrijednosti indeksa zagađenja na području jugoistočno od odlagališta, pokazuju postupno širenje zagađenja prema Mičevcu. Analiza hidrogeokemijskih značajki na lokaciji odlagališta pokazala je da na području odlagališta Jakuševac-Prudinec postoje snažno izražene lokalne anomalije parcijalnog pritiska CO₂, koje ukazuju na otapanje karbonata i obogaćenje sadržaja hidrogenkarbonata u podzemnoj vodi. Uz rub odlagališta dominira tip podzemne vode koja u svom sastavu sadrži povišene koncentracije amonij-iona (NH₄⁺) i klorida (Cl⁻). Visoke koncentracije teških metala i jake geokemijske veze koje su utvrđene na temelju izračunatih koeficijenata korelacije, pokazuju da u reduktivnoj vodonosnoj sredini dolazi do snažnog oslobađanja teških metala.

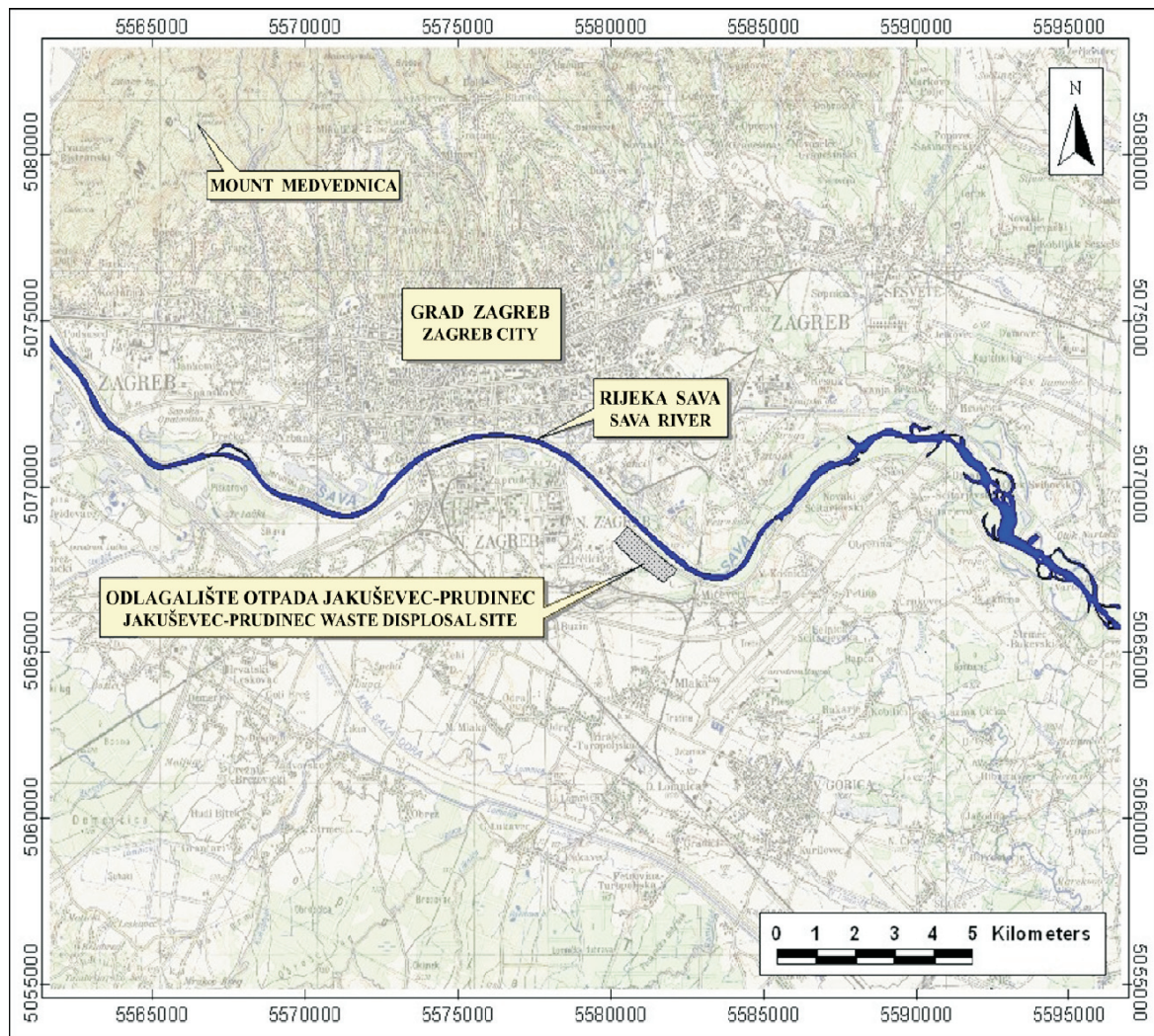
Abstract

The main goal of the research shown in this paper is to investigate the cause and effect relation of the Jakuševac-Prudinec waste disposal site and the groundwater pollution. The recovery of the Jakuševac-Prudinec waste disposal site by the end of 2003 did not have any significant impact on the pollution reduction in groundwater. Very high values of the pollution index defined in the area southeastern from the waste disposal site show spreading of the pollution toward Mičevac village. The analysis of the hydrogeochemical characteristics showed that in the waste disposal site area the local geochemical anomalies of the partial CO₂ pressure exist, indicating that the intensive carbonate dissolution processes and HCO₃⁻ enrichment dominate in this area. Near the border of the waste disposal site groundwater with high ammonium ion (NH₄⁺) and chloride ion (Cl⁻) dominates. The high concentrations of the heavy metals and very strong geochemical bonds determined from the correlation coefficients show that in the reductive aquifer conditions heavy metals strongly release.

Uvod

Odlagalište otpada Jakuševac-Prudinec služi kao odlagalište komunalnog, neopasnog i industrijskog otpada Grada Zagreba i njegove okolice. Udaljeno je 5 km zračne linije od središta Zagreba, a nalazi se na desnoj obali rijeke Save, na udaljenosti od 400 m od naselja Jakuševac (slika 1.). Odlagalište se pruža u smjeru sjeverozapad-jugoistok, duž nasipa rijeke Save, od kojega je odvojeno lokalnom cestom. Nekontrolirano odlaganje otpada

na području današnjeg odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec započelo je 1965. godine, a 1995. godine prostor odlagališta zauzima 80 ha. U tom je razdoblju neprimjereno odloženo 4,5 milijuna m³ otpada, a do 2000. godine volumen odloženog otpada iznosio je 8 milijuna m³. Odlagalište je zbog zanemarivanja problema postalo najveće neuređeno odlagalište otpada u jugoistočnom dijelu Europe. Sanacija neuređene deponije otpada u uređeno sanitarno odlagalište završena je krajem 2003. godine.



Slika 1. Položaj odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec

Figure 1 The location of the Jakuševac-Prudinec waste disposal site

Odlagalište Jakuševac-Prudinec je od 1960. godine do početka devedesetih godina prošlog stoljeća zauzelo i zagađilo gotovo milijun m² tla i ozbiljno ugrozilo kakvoću pitke podzemne vode. Ispitivanja kakvoće podzemne vode na lokaciji odlagališta provodili su Zavod za javno zdravstvo Grada Zagreba i Institut Ruđer Bošković od 1986. do 1998. godine, u cilju praćenja zagađenja na lokacijama pojedinih pijezometara. Osim registriranja vrijednosti pokazatelja kemijskih i bakterioloških analiza većih od MDK za pitke vode, nije provedena interpretacija podataka u cilju analize promjene kakvoće podzemne vode šireg područja odlagališta.

Istraživanje utjecaja odlagališta Jakuševac na podzemne vode provedeno je 2002. godine, u okviru cjelovitog istraživanja kakvoće podzemne vode zagrebačkog vodonosnog sustava (Nakić, 2003). Ovim istraživanjem dokazan je utjecaj odlagališta na podzemne vode te postupno širenje zagađenja prema istoku, što

je potvrđeno pomicanjem granične linije zagađenja od Jakuševca prema Mičevcu, u vrijeme promjenjivih hidrodinamičkih uvjeta u vodonosnom sloju.

U ovom radu prikazani su rezultati daljnjih istraživanja uzročno-posljedične veze između odlagališta otpada Jakuševac i zagađenja podzemne vode. Cilj istraživanja bio je utvrditi stvarno područje utjecaja odlagališta Jakuševac, na temelju novijih podataka o kakvoći podzemne vode na razmatranom području. Stoga su od gradskog poduzeća ZGOS prikupljeni podaci kemijskih analiza za razdoblje od 2000. do 2004. godine, koji pokazuju kakvoću podzemne vode na piezometrima koji se nalaze jugoistočno od odlagališta.

Određivanje hidrogeokemijskih facijesa na istraživanoj lokaciji provedeno je uz pomoć računalnog programa AquaChem (*Waterloo Hydrogeologic, Inc., 1998.-1999.*), koji služi za grafičku i numeričku analizu te modeliranje hidrokemijskih podataka. Za statističku

analizu podataka korišten je računalni program Statistica (Statsoft, 1995.), dok je grafička interpolacija pokazatelja zagađenosti podzemnih voda, pod nazivom *indeks zagađenja*, napravljena uz pomoć računalnog programa Surfer 8 (Golden Software, Inc., 2002.).

Geološke i hidrogeološke značajke lokacije

Područje istraživanja nalazi se u dolini rijeke Save, koja je izgrađena od kvartarnih sedimenata taloženih tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena te holocena (Velić & Durn, 1993.). Na osnovi istraživanja dubinskogeoloških odnosa i litološkog sastava kvartarnih sedimenata na području odlagališta Jakuševac, utvrđeno je da su vodonosni slojevi do dubine od oko 100 m, holocenske i gornjo-pleistocenske starosti, sastavljeni od šljunkovito-pjeskovitih i pjeskovito-šljunkovitih naslaga, s većim udjelom pijeska i gline u dubljim dijelovima kvartarnih naslaga (Velić & Saftić, 1996; Velić et al., 1999.).

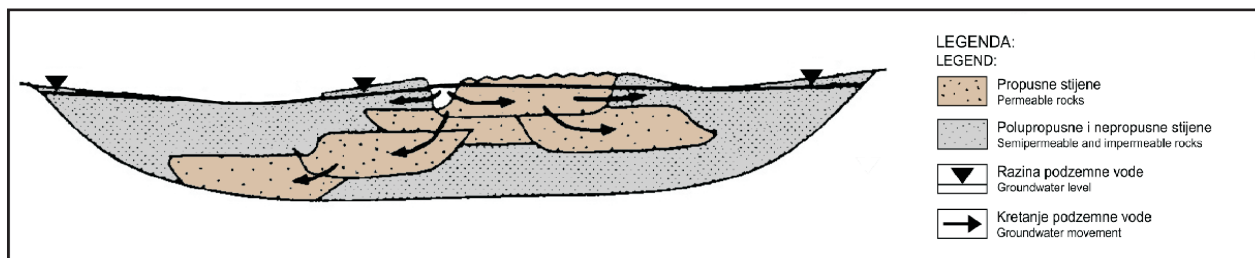
Debljina holocenskog vodonosnika na području odlagališta iznosi od 50 do 60 metara. Naslage su dominantno karbonatnog sastava, što taj vodonosni sloj razlikuje od gornjo-srednje-pleistocenskoga. Između holocenskih i pleistocenskih naslaga nalazi se glinoviti sloj relativno male debljine koji predstavlja vršni dio gornjopleistocenskih sedimenata. Debljina gornjo-srednje pleistocenskog vodonosnog sloja kreće se između 40 i

50 metara, a sastoji se od vertikalne i lateralne izmjene šljunaka, pijesaka i gline, što je posljedica promjena uvjeta taloženja tijekom pleistocena.

Krovinu vodonosnika na površini kvartarnog kompleksa čine humusne holocenske i gornjopliocenske naslage. Izgrađene su od gline, ilovine i pijesaka, a njihove debljine iznose od 1 do 3 m (Nakić, 2003.).

Na području odlagališta Jakuševac-Prudinec prosječna dubina do podzemne vode iznosi od 3 do 8 m.

Odlagalište otpada Jakuševac-Prudinec nalazi se na području starih savskih rukavaca i meandara. Slika 2 prikazuje shematski poprečni presjek taloženja meandrirajuće rijeke, u koje pripada i rijeka Sava, na kojoj se vidi bočna migracija korita. Meandrirajuće rijeke imaju stalan tok kroz duže geološko vrijeme, a glavna su im značajka debele i propusne pješčano-šljunkovite ispune korita. Ovakav raspored propusnih sedimenata utječe na smjer toka podzemne vode, koji se mijenja lateralno i vertikalno. Smjer toka podzemne vode ujedno pokazuje i smjer kretanja onečišćenja. Zbog strukture podzemlja, podzemna voda teče kroz propusne slojeve različitim brzinama, što utječe i na kretanje onečišćenja (Fraser & Davis, 1998.). Brzina i smjer podzemnih voda značajno se mijenja s vodostajem rijeke Save, a unutar vodonosnog sustava postoje slojevi u kojima se voda kreće većom brzinom. Ti slojevi predstavljaju kritične puteve zagađenja.



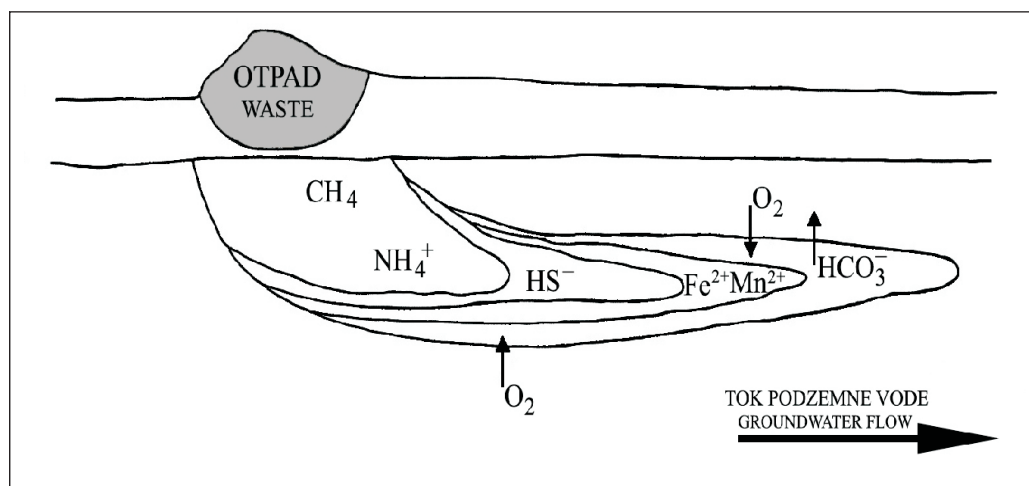
Slika 2. Shematski poprečni presjek taloženja meandrirajuće rijeke (Modificirano prema Galloway & Hobday, 1996.)

Figure 2 Schematic cross section of meandering river deposition (Modified according to Galloway & Hobday, 1996.)

Hidrogeokemijske značajke na lokaciji odlagališta otpada

U vodonosnicima ispod tijela odlagališta i nizvodno od njega uobičajeno se stvaraju geokemijske zone, kao što je prikazano na slici 3. Prema Appelu i Postmi (1994.), raspadanje organskog otpada i različite kemikalije u odlagalištu otpada stvaraju različite otopljene organske spojeve (kisele tvari), koje procjeđivanjem iz tijela odlagališta dospijevaju u oksidni vodonosnik. Utjecaj odlagališta otpada na podzemne vode izražen je kroz formiranje oksidacijsko-redukcijskih zona, s različitim

kemijskim sastavom, zavisno od Eh-pH uvjeta u podzemnoj vodi (Appelo & Postma, 1994.). Ispod tijela odlagališta nalazi se zona geneze metana (CH_4) i amonij iona (NH_4^+), nakon koje slijedi zona redukcije sulfata. Slijedi zona redukcije ferri iona Fe(III) , nakon koje slijedi zona redukcije nitrata i Mn(IV) te na kraju oksidna zona. Jedan od produkata anaerobne razgradnje organske materije je sumporovodik (H_2S), koji migracijom u područje vodonosnika s više kisika vrlo brzo oksidira u ione sulfata. Nizvodno od odlagališta, pri miješanju procjednih tvari i podzemne vode, otopljeni kisik i nitrati prvo će se potrošiti na razgradnju organske materije.



Slika 3. Shematski prikaz geokemijskih zona ispod i nizvodno od odlagališta otpada (Modificirano prema Apello & Postma, 1994.)

Figure 3 Schematic figure of geochemical zones underneath and downstream of the waste disposal site (Modified according to Apello & Postma, 1994.)

Zbog ekstremne potrošnje kisika i povećane kiselosti podzemne vode ispod tijela odlagališta, stvara se povoljno okruženje za pojavu različitih metalnih spojeva i organo-metalnih kompleksa. U reduktivnoj zoni dolazi do otapanja Fe-Mn oksida i hidroksida iz sedimenata, što uzrokuje oslobađanje velikih količina željeza, mangana i drugih adsorpcijski vezanih metala u tragovima, a događa se i redukcija sulfata i nastajanje sulfida (Apello & Postma, 1994). Zagađenjem podzemne vode organskim spojevima iz odlagališta otpada dolazi do stvaranja stabilnih organometalnih kompleksa, što omogućava transport teških metala na velike udaljenosti bez mogućnosti njihovog izdvajanja iz vodene otopine. U aeriranim dijelovima vodonosnika, nazočnost Fe i Mn oksida i hidroksida, kao spojeva velike specifične površine koji adsorbiraju velike količine kationa pri određenim pH i pE vrijednostima, utječe na smanjenu mobilnost teških metala iz odlagališta otpada.

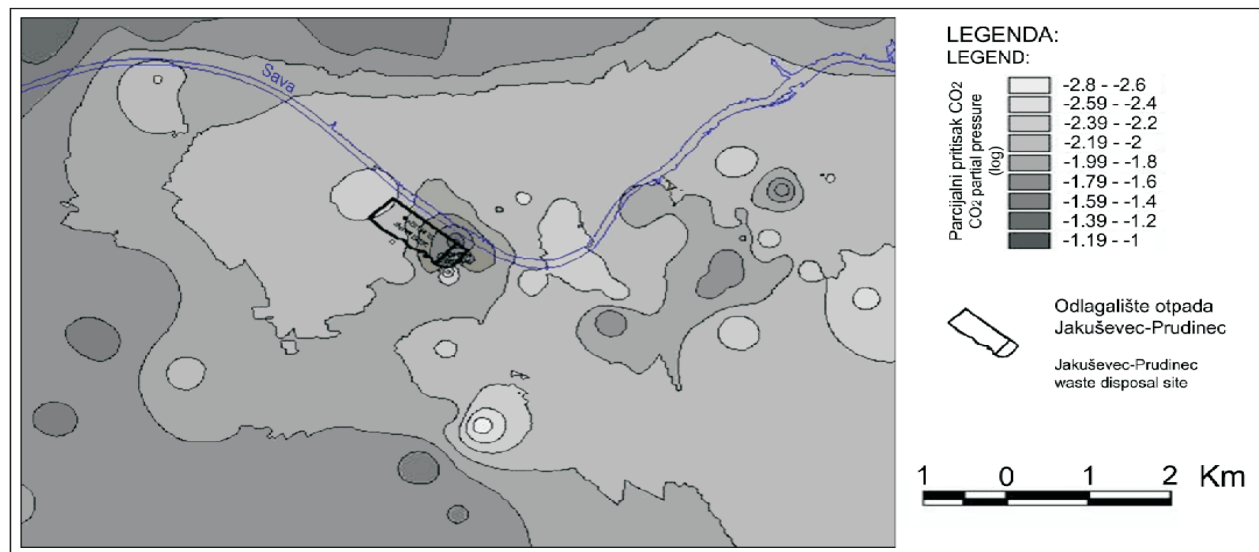
Hidrodinamički i hidrogeokemijski uvjeti u utjecajnom području odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec potencirali su postupno formiranje obrnutih procesa, u kojima se događa oksidacija produkata razgradnje organskog otpada u podzemnoj vodi. Naime, u istraživanjima koja su provedena 2003. godine, utvrđen je pozitivan trend nitrata, kao i relativno visoki sadržaji kisika i sulfata u podzemnoj vodi, što je u suprotnosti s uobičajenim geokemijskim uvjetima u podzemnoj vodi nizvodno od odlagališta (Nakić, 2003.). Rezultati ovih istraživanja su pokazali da je ovaj uski pojas utjecajnog područja odlagališta pod značajnim utjecajem rijeke Save, što dovodi do značajnog priliva vode bogate kisikom u zaobalje. Ovakvo stanje uvjetovat će postupnu oksidaciju reduciranih ionskih formi, što je dobro dokumentirano smanjenjem raspona koncentracija reduciranih formi

dušikovih spojeva te povećanjem nitrata u podzemnoj vodi. Visoki sadržaji organske tvari, koja će još duže vremena ostati u podzemlju, omogućit će promjenu oksidacijsko-redukcijskih uvjeta u određenim ciklusima, što može samo djelomično smanjiti opterećenje teškim metalima u podzemnoj vodi, ali zbog utjecaja Save dolazi do porasta nitrata u podzemnoj vodi nizvodno od odlagališta Jakuševac-Prudinec (Nakić, 2003.).

Raspodjela parcijalnog pritiska CO_2

Razgradnjom organske materije ispod i nizvodno od odlagališta otpada raste koncentracija CO_2 , odnosno koncentracija karbonatne kiseline, koja otapajući pretežito karbonatne minerale povećava pH podzemne vode, dakle vode postaju alkalnije. Ove pojave se u literaturi (Baedecker & Back, 1979. a i b; Apello & Postma, 1994.) tumače stvaranjem zona nizvodno od odlagališta otpada, pod utjecajem visokih sadržaja raznovrsnih organskih komponenata u iscjedku s odlagališta. Organske tvari dovode do stvaranja visokih koncentracija masnih kiselina i otopljenog CO_2 u podzemnoj vodi, što u značajnoj mjeri može utjecati na otapanje karbonata i obogaćenja sadržaja hidrogenkarbonata. Parcijalni pritisak CO_2 jedan je od glavnih faktora u procesima otapanja ili taloženja karbonata. Određuje se iz mjerene vrijednosti pH i hidrogenkarbonata, a u ovom radu je određen uz pomoć programa za geokemijsko modeliranje PHREEQC (Parkhurst et al., 1980.). Za određivanje parcijalnog pritiska CO_2 korišteni su podaci o kakvoći podzemne vode iz plitkog holocenskog vodonosnika.

Na slici 4. prikazana je raspodjela parcijalnog pritiska CO_2 na širem području oko odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec.



Slika 4. Raspodjela parcijalnog pritiska CO₂ na širem području oko odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec

Figure 4 Distribution of the CO₂ partial pressure on wider area around Jakuševac-Prudinec waste disposal site

Na osnovi raspodjele parcijalnog pritiska CO₂ određene su zone koje ukazuju na povećanje ili smanjenje vrijednosti koncentracija otopljenih karbonatnih komponenata te su stoga važan pokazatelj mogućih reakcija u podzemnoj vodi. Raspodjela parcijalnog pritiska CO₂ određena je interpolacijom izolinja, metodom *težinskog usrednjenja inverzne udaljenosti* (eng. *inverse distance weighted averaging*). Generalno gledajući, zapaža se trend smanjenja parcijalnog pritiska CO₂ od zapada prema istoku, izuzev lokalnih anomalija s povišenim vrijednostima, poglavito oko odlagališta Jakuševac-Prudinec, sve do Črnkovca i Kosnice. Ove lokalne anomalije poklapaju se s zonama otapanja karbonata (Nakić, 2003.).

Hidrogeokemijski tip podzemne vode nizvodno od odlagališta Jakuševac-Prudinec

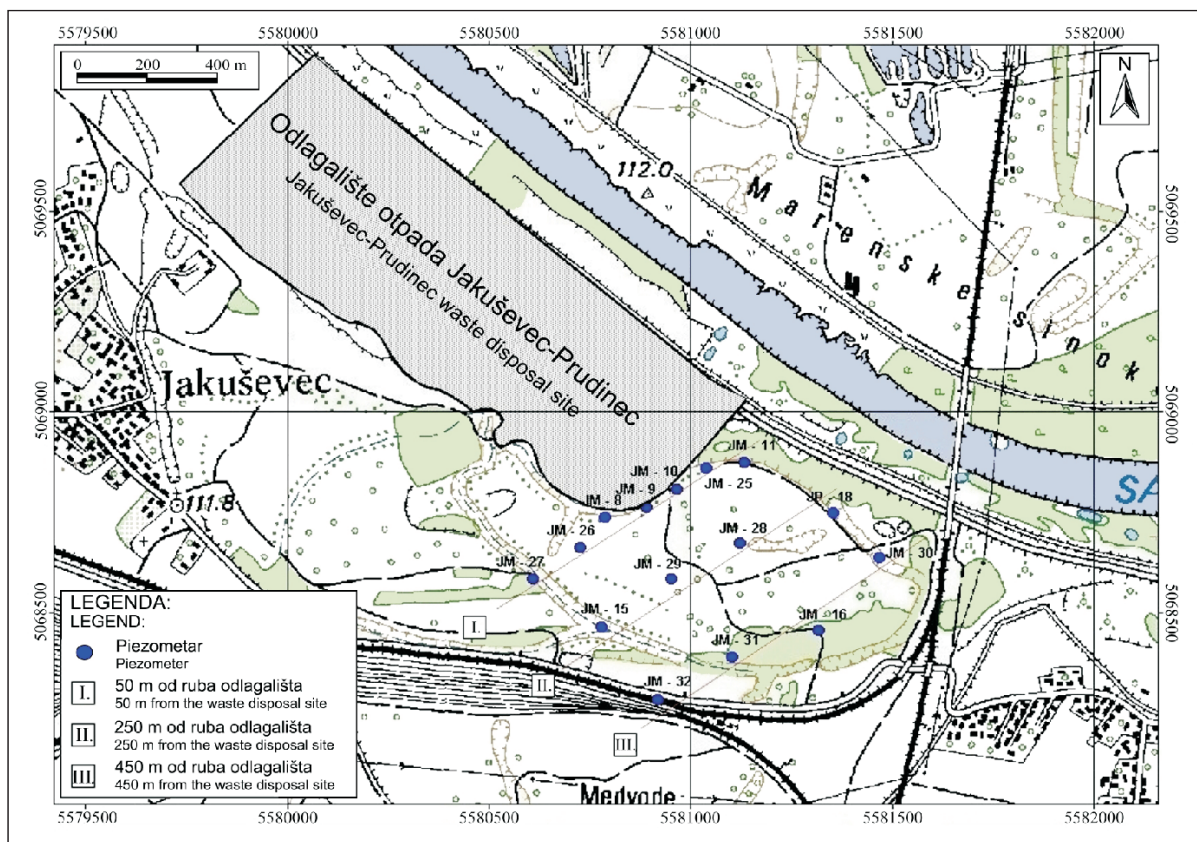
Nizvodno od odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec dolazi do promjena u kemijskom sastavu podzemne vode. Najznačajniji utjecaj događa se neposredno uz jugoistočni rub odlagališta otpada, gdje se mijenja ionski sastav otopljenih tvari u podzemnoj vodi. Zbog toga nastaju različiti hidrogeokemijski facijesi u vodonosniku jugoistočno od odlagališta otpada, koji su dobiveni na temelju izračuna udjela pojedinih kationa i aniona u sastavu podzemne vode. Određivanje hidrogeokemijskih facijesa (odnosno tipova voda) temeljeno je na tradicionalnim, determinističkim metodama, koje klasificiraju podatke na osnovi nekoliko makrokemijskih parametara. U literaturi (Appelo & Postma, 1994.; Hem, 1985.; Martinelli et al., 1998.) ovaj tip klasifikacije primjenjuje se kao prva informacija o hidrogeokemijskim značajkama nekog vodonosnog područja.

U ranijim istraživanjima (Nakić, 2003.), utvrđeno je da je podzemna voda zagrebačkog vodonosnog sustava Ca-Mg-HCO₃ tipa, ali i da postoje veća odstupanja u kemijskom sastavu podzemne vode na lokaciji odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec.

U vrijeme sanacije odlagališta, zabilježeni su visoki sadržaji Na, Cl i NH₄ u podzemnoj vodi ispod radne plohe odlagališta, koji su utjecali na stvaranje Ca-NH₄-Na-HCO₃-Cl i Ca-Na-HCO₃-Cl tipova vode (Nakić, 2003.). Ovi pokazatelji upućuju da su radovi na sanaciji odlagališta u značajnoj mjeri utjecali na promjenu kemijskog sastava podzemne vode.

Analizom hidrogeokemijskih facijesa na temelju podataka iz 2002. godine, utvrđeno je da na lokacijama piezometara koji se nalaze 50 m od ruba odlagališta, dominira tip podzemne vode koja u svom sastavu sadrži amonij-ion (NH₄⁺). Prema Apellu i Postmi (1994.), pojava amonij-iona u značajnoj količini u podzemnoj vodi neposredno uz rub odlagališta upućuje na razvoj geokemijske zone s metanom (CH₄) i amonijevim ionom (NH₄⁺) ispod odlagališta otpada. Na lokacijama piezometara koji se nalaze neposredno uz rub odlagališta zabilježen je Ca-HCO₃-NH₃, odnosno Ca-HCO₃-Cl-NH₃ tip podzemne vode, za vrijeme niskih i visokih vodostaja podzemne vode, (Prce, 2007.).

Na temelju novijih podataka iz 2004. godine, napravljen je Piperov dijagram, koji pokazuje makrokemijski sastav podzemne vode na lokaciji odlagališta za vrijeme niskih i visokih vodostaja. Podaci o koncentracijama teških metala dobiveni su s lokacija devet piezometara udaljenih 50, 250 i 450 metara od ruba odlagališta. To su piezometri: JM-26, JM-9, JM-25; JM-15, JM-29, JM-28; JM-32, JM-31 i JM-16 (slika 5.).

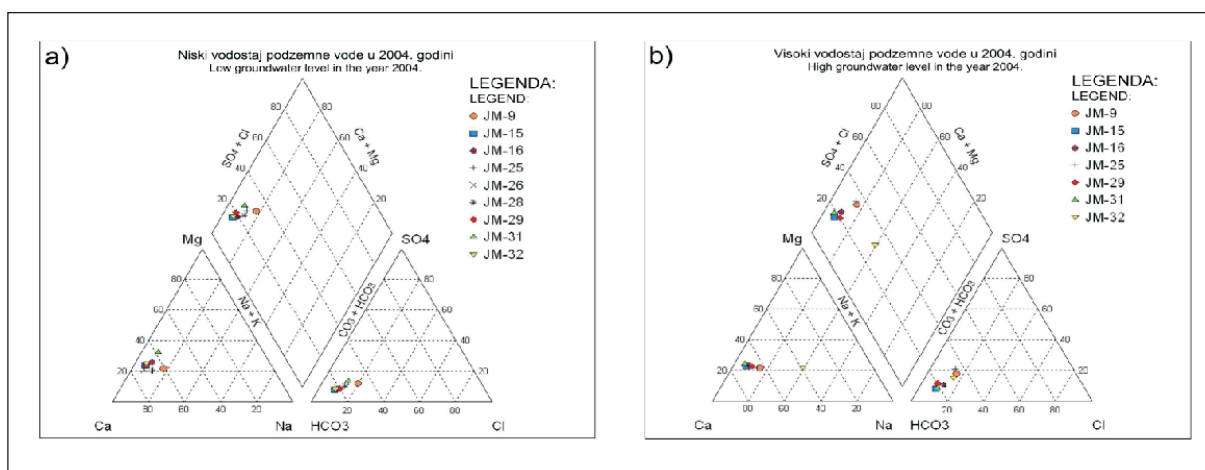


Slika 5. Piezometri jugoistočno od odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec

Figure 5 Piezometers southeast of the Jakuševac-Prudinec waste disposal site

Iz Piperovog dijagrama prikazanog na slici 6.a i iz tablice 1, vidljivo je da je podzemna voda na lokaciji odlagališta, u vrijeme niskih vodostaja, uglavnom Ca-Mg-HCO₃ tipa. Jedino je na lokaciji piezometra JM-32 zabilježen Ca-Na-Mg-HCO₃ tip podzemne vode.

od 20% u ukupnom sastavu podzemne vode. U vrijeme visokih vodostaja (slika 6.b, tablica 1) također prevladava Ca-Mg-HCO₃ tip podzemne vode. Jedino je na lokaciji piezometra JM-32 zabilježen Ca-Na-Mg-HCO₃ tip podzemne vode.



Slika 6. Piperov dijagram ionskog sastava podzemne vode za vrijeme niskih (a) i visokih (b) voda u 2004. godini

Figure 6 The Piper diagram of groundwater ionic composition in times of low (a) and high (b) groundwater level in the year 2004

Tablica 1. Tip podzemne vode na lokacijama piezometrima nizvodno od odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec za vrijeme niskih i visokih vodostaja podzemne vode u 2004. godini

Table 1 The groundwater type at the piezometer locations downstream of the Jakuševac-Prudinec waste disposal site in times of low and high groundwater levels in the year 2004.

Piezometar Piezometer	Niski vodostaj podzemne vode (2004.) Low groundwater level (2004.)	Visoki vodostaj podzemne vode (2004.) High groundwater level (2004.)
JM-26	Ca-Mg-HCO ₃	/
JM-9	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
JM-25	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
JM-15	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
JM-29	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
JM-28	Ca-HCO ₃	/
JM-32	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃
JM-31	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
JM-16	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Fe-HCO ₃

Analiza zagađenja podzemne vode iz piezometara nizvodno od odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec

Analiza zagađenja podzemne vode teškim metalima na lokaciji odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec provedena je na temelju podataka iz piezometara koji se nalaze jugoistočno od odlagališta (slika 5.). Piezometri su raspoređeni u tri pojasa na različitim udaljenostima od ruba odlagališta, a ocjena utjecaja odlagališta otpada na kakvoću podzemne vode napravljena je na temelju dostupnih podataka iz sljedećih piezometara: JM-8, JM-9, JM-10 (I. pojas); JM-15, JM-29, JM-28 (II. pojas); JM-32, JM-31 i JM-16 (III. pojas). Analize uzoraka podzemne vode preuzete su iz baze podataka ZGOS-a, odnosno iz godišnjih izvješća o mjeranju indikatora zagađenja u 2003. i 2004. godini.

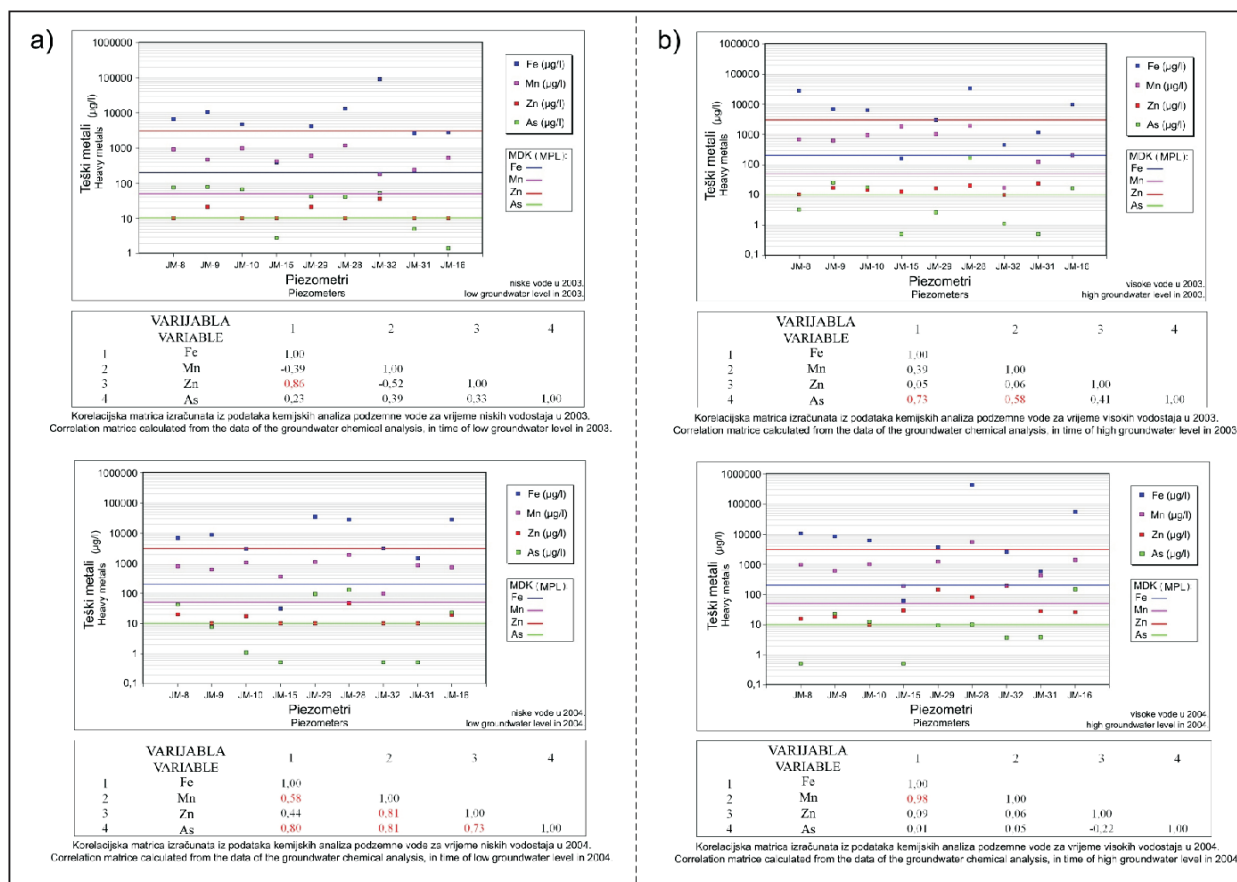
Na slici 7. prikazane su koncentracije Fe, Mn, Zn i As za vrijeme a) niskih i b) visokih vodostaja podzemne vode u 2003. i 2004. godini.

Za vrijeme niskih vodostaja (slika 7.a.) zabilježene su iznimno visoke vrijednosti željeza, mangana i arsena (prelaze propisani MDK), dok sadržaj cinka u podzemnoj vodi nije prelazio MDK za pitku vodu. Visoki ujednačeni sadržaji željeza i mangana na lokacijama piezometara, koji se nalaze 50 metara od ruba odlagališta, ukazuju na jak utjecaj odlagališta otpada na podzemnu vodu. Utvrđeni koeficijent korelacije cinka i željeza od 0,86, u vrijeme niskih voda u 2003. godini, ukazuje na njihovu izrazito jaku vezu, što se vidi po trendu rasta i pada njihovih koncentracija na lokacijama piezometara. U 2004. godini utvrđeni su visoki koeficijenti korelacije arsena sa željezom (0,80), manganom (0,81) i cinkom (0,73). Koeficijent

korelacije od 0,81 ukazuje na geokemijsku vezu cinka s manganom, dok koeficijent korelacije od 0,58 ukazuje na geokemijsku vezu mangana i željeza. Jake geokemijske veze između metala posljedica su oslobađanja velikih količina željeza, mangana i drugih metala u tragovima, koji su adsorpcijski vezani na manganske i željezne okside i hidrokside, u reduktivnoj vodonosnoj sredini.

Za vrijeme visokih vodostaja koncentracije teških metala prelaze propisani MDK (slika 7.b.). Na većim udaljenostima od ruba odlagališta (250 i 450 m) zapažaju se niže koncentracije metala na piezometrima koji se nalaze južno od odlagališta. To upućuje na veću mobilnost teških metala prema jugoistoku, u odnosu na južni dio promatranog područja, u vrijeme visokih vodostaja. Za vrijeme visokih vodostaja u 2003. godini utvrđeni su visoki koeficijenti korelacije između As i Fe (0,73) te As i Mn (0,58), što ukazuje na jaku vezu arsena sa željezom i manganom, odnosno ukazuje na vezanje arsena na manganske i željezne okside i hidrokside. Vrlo visoki koeficijent korelacije između željeza i mangana (0,98) u 2004. godini ukazuje na njihovu izrazito jaku geokemijsku vezu. Koncentracije željeza i mangana pokazuju jednaki trend rasta i pada na lokacijama piezometara.

Iz slike 7 vidljivo je da su najviše vrijednosti teških metala, u koncentracijama višim od MDK, zabilježene na lokacijama piezometara koji se nalaze 50 metara od ruba odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec, što je dokaz konstantnog procjeđivanja teških metala iz tijela odlagališta u podzemnu vodu. Na ostalim lokacijama piezometara (250 i 450 m od ruba odlagališta) koncentracije su niže i znatno promjenjivije, što ovisi o promjeni hidrodinamičkih uvjeta u podzemlju.



Slika 7. Koncentracije teških metala za vrijeme a) niskih i b) visokih vodostaja podzemne vode u 2003. i 2004. na lokacijama piezometara nizvodno od odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec, MDK- maksimalno dopuštena koncentracija

Figure 7 Heavy metal concentrations in times of a) low and b) high groundwater levels in 2003. and 2004. at the piezometer locations downstream of the Jakuševac-Prudinec waste disposal site, MPL- maximum permissible level

U radu je primijenjen indeks zagađenja (Cd), koji kvantificira zagađenje podzemne vode teškim metalima. Indeks zagađenja je pokazatelj zagađenosti voda na pojedinačnim lokacijama piezometara i objedinjava parametre kakvoće vode koji prelaze MDK vrijednosti propisane "Uredbom o klasifikaciji voda" (NN 77/98) i "Uredbom o opasnim tvarima u vodama" (NN 78/98) (Nakić, 2003). Finski i slovački Institut za geološka istraživanja su prvi koji su primijenili *indeks zagađenja* u pilot projektima provedenim u te dvije zemlje (Backman et al. 1998.). Pokazao se vrlo korisnim u izradi karata zagađenja. Osnovna značajka tog pokazatelja je da uzima u obzir:

- broj parametara koji prelaze maksimalno dozvoljene vrijednosti i
- veličinu vrijednosti pojedinih parametara koje prelaze granične vrijednosti za I vrstu pojedinih komponenata (prema Uredbi o klasifikaciji voda, N.N. 77/98 i Uredbi o opasnim tvarima u vodama, N.N. 78/98) (Nakić, 2003).

Formula za izračunavanje indeksa zagađenja je sljedeća (Backman et al. 1998.):

$$Cd = \sum_{i=1}^n C_{fi} \quad (1)$$

$$C_{fi} = C_{Ai} / C_{Ni} - 1$$

- C_{fi} – faktor zagađenja za i-tu komponentu
 C_{Ai} – analitička vrijednost i-te komponente
 C_{Ni} – MDK vrijednost i-te komponente

Za izračunavanje indeksa zagađenja i izradu karata raspodjele zagađenja odabrano je 9 piezometara (JM-8, JM-9, JM-10; JM-15, JM-29, JM-28; JM-32, JM-31, JM-16), koji su raspoređeni u tri reda na udaljenostima od 50, 250 i 450 metara od ruba odlagališta (slika 5.). Za pokazatelje zagađenja uzete su vrijednosti teških metala: Fe, Mn, As, Pb, Cr i Zn, koje prelaze MDK na spomenutim lokacijama piezometara. Interpolacijom vrijednosti indeksa zagađenja izrađene su 2 karte, koje pokazuju

kakvoću podzemne vode nizvodno od odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec (slika 8.).

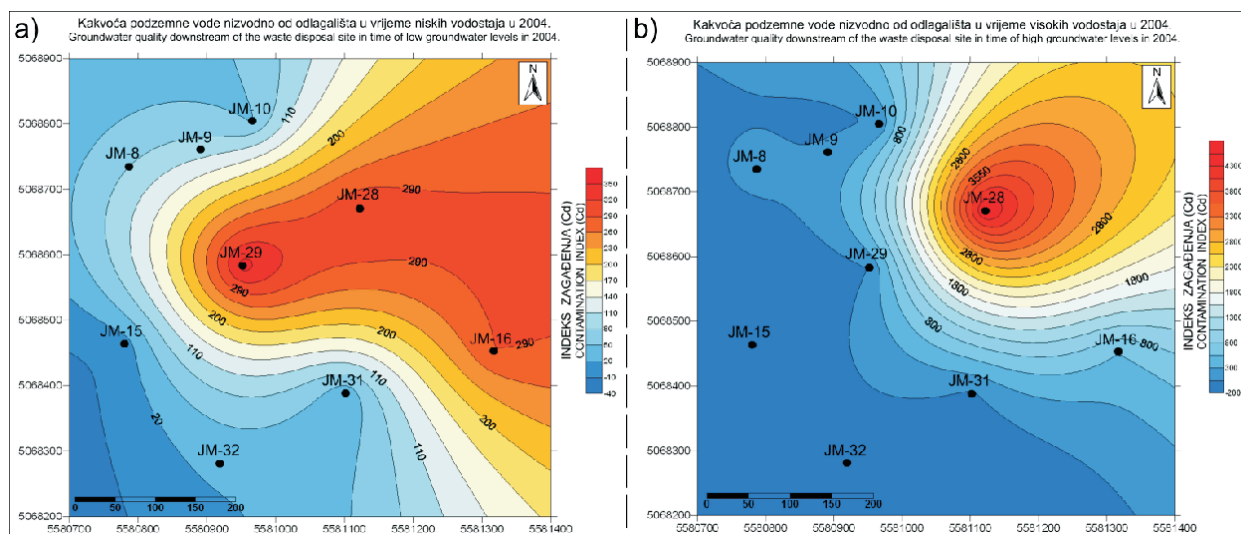
Karte na slici 8. pokazuju raspodjelu i kretanje oblaka zagađenja, tj. kakvoću podzemne vode ovisno o promatranom razdoblju i koncentracijama teških metala (tablica 2.). Piezometri udaljeni 50 metara od ruba odlagališta (JM-8, JM-9, JM-10) imali su visoke

vrijednosti indeksa zagađenja tijekom niskog i visokog vodostaja, što je dokaz stalnog izvora zagađenja iz odlagališta i kretanja, tj. raspodjele zagađenja podzemnom vodom. Najviše vrijednosti indeksa zagađenja dobivene su na lokacijama piezometara: JM-29, JM-28 i JM-16, što ukazuje na kretanje oblaka zagađenja od sjeverozapada prema jugoistoku (slika 8.a) i b)).

Tablica 2. Vrijednosti indeksa zagađenja na pojedinim lokacijama piezometara u 2004. godini za vrijeme niskih i visokih vodostaja podzemne vode

Table 2 Pollution index value on the piezometer locations in 2004. in time of low and high groundwater levels

2004. godina, niski vodostaj podzemne vode									
2004., low groundwater level									
Piezometar Piezometer	JM-8	JM-9	JM-10	JM-15	JM-29	JM-29	JM-32	JM-31	JM-16
Indeks zagađenja (Cd) Pollution index (Cd)	80	96,12	48,18	6,04	363,23	314,14	30,72	28,82	289,3
2004. GODINA, VISOKI VODOSTAJ PODZEMNE VODE									
2004., HIGH GROUNDWATER LEVEL									
Piezometar Piezometer	JM-8	JM-9	JM-10	JM-15	JM-29	JM-29	JM-32	JM-31	JM-16
Indeks zagađenja (Cd) Pollution index (Cd)	119,5	93,82	78,74	2,86	60,72	4611,43	30,2	12,28	563,76

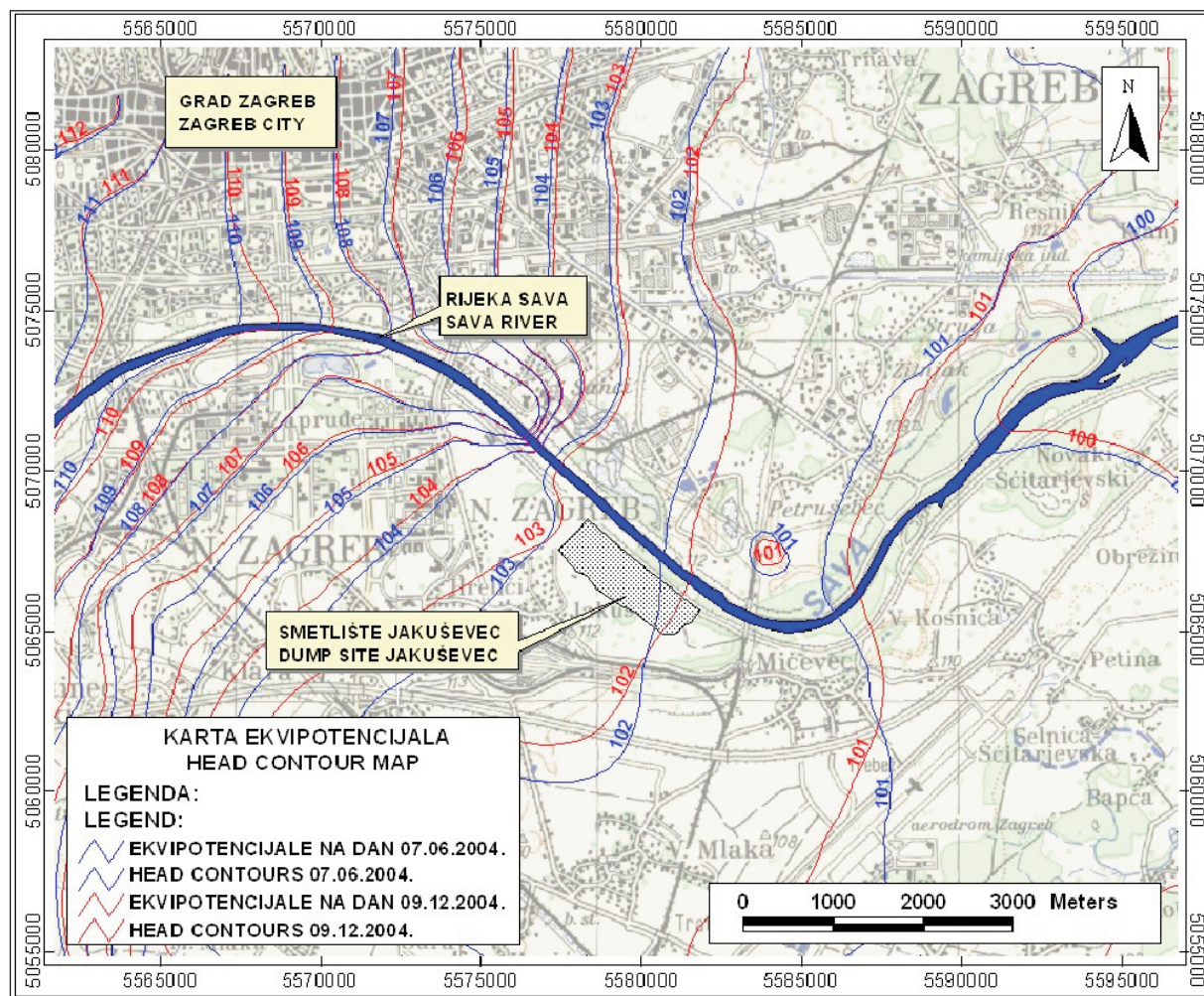


Slika 8. Karte interpolacije indeksa zagađenja (Cd) na lokacijama piezometara nizvodno od odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec, u vrijeme a) niskih i b) visokih vodostaja podzemne vode u 2004. godini

Figure 8 Interpolation map of the pollution index (Cd) on the piezometer locations downstream of the Jakuševac-Prudinec waste disposal site, in time of a) low and b) high groundwater levels in 2004.

U vrijeme visokih vodostaja, željezo i mangan čine najveći udio u zagađenju podzemnih voda, jer se ispod tijela odlagališta i nizvodno od njega stvaraju geokemijske reduktivne zone, koje nastaju zbog procijeđivanja otopljenih organskih spojeva iz tijela odlagališta, što uzrokuje otapanje Fe-Mn oksida i hidroksida te povećanje koncentracija željeza i mangana u podzemnoj

vodi. Ako se karte indeksa zagađenja usporede s kartom ekvipotencijala podzemne vode u vrijeme niskih i visokih vodostaja u 2004. (slika 9.), vidljivo je da je kretanje oblaka zagađenja identično smjeru tečenja podzemne vode u promatranom razdoblju. To ukazuje na mobilnost zagađenja iz odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec prema jugoistoku.



Slika 9. Karta ekvipotencijala podzemne vode u vrijeme niskih i visokih vodostaja u 2004.

Figure 9 Head contours map for the low and high groundwater levels in 2004.

Analize teških metala iz uzoraka podzemne vode u 2003. i 2004. godini ne pokazuju trend smanjenja njihovih koncentracija, iako je sanacija odlagališta završena 2003. godine, kada je u rad pušten ICS (interventni crpni sustav). ICS se sastoji od četiri zdenca koji crpe zagađenu podzemnu vodu, a smješteni su uz rub odlagališta otpada. Procjedne vode iz tijela odlagališta, koje su zagađivale podzemlje, sada se pomoću drenažnog sustava ICS kontrolirano crpe i zatvorenim sustavom odvođe na uređaj za pročišćavanje. ICS nije i ne može biti dugoročno rješenje, jer se takvim načinom sanacije zagađenje zadržava ispod tijela odlagališta. Ova vrsta sanacije, koja je poznata i kao aktivna metoda sanacije, uspješna je za kontrolu izvora zagađenja te za čišćenje oblaka zagađenja, koji se širi nizvodno od izvora zagađenja, međutim s ovom metodom nije moguće u potpunosti odstraniti zagađenje, a naročito uljnu fazu, koja je adsorbirana na stijenskom matriksu. Prema tome, opasnost od ponovnog zagađivanja podzemnih voda postoji od trenutka prestanka crpljenja

i tretiranja podzemne vode. Zagađeno tlo i vodonosni slojevi ispod tijela odlagališta Jakuševac-Prudinec predstavljaju sekundarne izvore zagađenja, koji se ne mogu očistiti ovim interventnim sustavom. Jako zagađeni slojevi tla i vodonosnika, koji se nalaze neposredno ispod tijela odlagališta, nisu uklonjeni sanacijom te još uvijek predstavljaju aktivne izvore zagađenja podzemne vode.

Zaključak

Sanacija odlagališta otpada, koja je završena krajem 2003. godine, nije značajnije utjecala na smanjenje vrijednosti teških metala u podzemnoj vodi u 2004. godini. Utvrđene su vrlo visoke vrijednosti indeksa zagađenja na lokacijama piezometara koji se nalaze jugoistočno od odlagališta, što pokazuje štetan utjecaj odlagališta na podzemne vode i postupno širenje zagađenja prema Mičevcu. Sanacijom odlagališta i provođenjem interventnog crpnog sustava, spriječeno je daljnje

zagađivanje podzemnih voda, međutim jako zagađeno tlo i vodonosni slojevi, koji se nalaze neposredno ispod tijela odlagališta, nisu uklonjeni sanacijom te još uvijek predstavljaju aktivne izvore zagađivanja podzemne vode.

Analiza indikatora zagađivanja podzemne vode pomogla je u utvrđivanju zakonitosti promjena geokemijskih zona, koje nastaju ispod odlagališta otpada i raspodjele zagađivanja nizvodno od odlagališta. Utvrđeno je da na području odlagališta Jakuševac-Prudinec postoje snažno izražene lokalne anomalije parcijalnog pritiska CO₂, koje uzrokuju otapanje karbonata i obogaćenje sadržaja hidrogenkarbonata, što je potvrđeno i mjerenjima u utjecajnoj zoni odlagališta. Uz navedeno, analizom hidrogeokemijskih facijesa na lokacijama uz odlagalište utvrđeno je da uz rub odlagališta dominira tip podzemne vode koja u svom sastavu sadrži povišene koncentracije amonij-iona (NH₄⁺) i klorida (Cl⁻). Visoke koncentracije željeza i mangana te drugih teških metala, kao i utvrđene jake geokemijske veze između pojedinih metala, pokazuju da u reduktivnoj vodonosnoj sredini dolazi do oslobađanja velikih količina teških metala, koji su adsorpcijski vezani na manganske i željezne okside i hidrokside.

Received: 22.09.2007.

Accepted: 24.10.2007.

Literatura

- Appelo, C.A.J. & Postma, D. (1994.): Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, 536 pp, Rotterdam.
- Backman, B., Bodiš, D., Lahermo, P., Rapant, S., Tarvainen, T. (1998): Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia, *Environ Geol.*, 63 (1-2), 55-64.
- Baedecker, M.J. & Back, W. (1979.a): Modern marine sediments as a natural analog to the chemically stressed environment of a landfill, *J. Hydrol.* 43, 393-414.
- Baedecker, M.J. & Back, W. (1979.b): Hydrogeological processes and chemical reactions at a landfill. *Ground Water* 17, 429-437.
- Fraser, G. S. & Davis, J. M. (1998.): *Hydrogeologic Models of Sedimentary Aquifers*. Society for Sedimentary Geology, Tulsa, Oklahoma, USA, 188 pp. Galloway, W. E. & Hobday, D. K. (1996.): *Terrigenous Clastic depositional Systems*. II. izdanje: Berlin, Springer Verlag, 489 pp.
- Hem, J.D. (1985.): Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S.G.S., Water Supply Paper 2254.
- Martinelli, G., Minissale, A. & Verruchi, C. (1998.): Geochemistry of heavily exploited aquifers in the Emilia-Romagna region (Po Valley, northern Italy), *Environ. Geol.* 36 (3-4), 195-205.
- Nakić, Z. (2003.): Uzroci i posljedice promjene kakvoće podzemne vode na zagrebačkom području. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu. 165 pp.
- Parkhurst, D.K., Thorenston, D.C. & Plummer, N.L. (1980): PHREEQE – a computer program for geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water Resource Investigations 80-96, 210 pp.
- Prce, M. (2007.): Utjecaj odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec na tlo i podzemnu vodu. Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu. 74 pp.
- Velić, J. & Durn, G. (1993.): Alternating lacustrine-marsh sedimentation and subareal exposure phases during quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia. *Geol. Croatica*, 46/1, 71-90, Zagreb.
- Velić, J. & Saftić, B. (1996.): Dubinskogeološki odnosi područja smetlišta "Jakuševac"- čimbenik sanacije. Zbornik radova IV. Međunarodnog simpozija Gospodarenje otpadom, 197-205, Zagreb.
- Velić, J., Saftić, B. & Malvić, T. (1999.): Lithologic composition and stratigraphy of quaternary sediments in the area of the "Jakuševac" waste depository (Zagreb, northern Croatia). *Geol. Croatica*, 52/2, 119-130, Zagreb.