




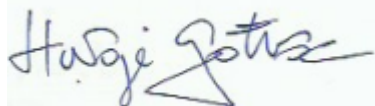
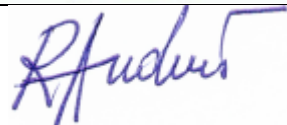



**Studija ocjene stanja voda i tla na neposrednom  
utjecajnom području odlagališta otpada  
Piškornica**

**EKOINVEST**

Siječanj, 2019.

<b>Naručitelj</b>	Piškornica - sanacijsko odlagalište d.o.o., Matije Gupca 12, Koprivnički Ivanec	
<b>Ovlaštenik</b>	Eko Invest d.o.o., Draškovićeva 50, 10 000 Zagreb	
<b>Voditelj izrade</b>	Nenad Mikulić, dipl. ing. kem. teh, dipl. ing. građ.	
<b>EKO INVEST d.o.o. – stručnjaci s ovlaštenjem MZOE</b>	Dr. sc. Nenad Mikulić, dipl. ing. kem. teh., dipl. ing. građ.	
	Vesna Marčec Popović, prof. biol. i kem.	
	Marina Stenek, dipl. ing. biol., univ. spec. tech.	
<b>EKO INVEST d.o.o. – stručni suradnici</b>	Matea Kalčićek, mag. oecol.	
	Ivan Mikolčević, mag. geogr.	
<b>Vanjski suradnici</b>	Hrvoje Gotovac, izv. prof. dr. sc.	
	Roko Andričević, prof. dr. sc.	
	Slobodan Galjanić, mr. sc. dipl. ing. kem. tech.	

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	5
2. POSTOJEĆE STANJE NA ODLAGALIŠTU OTPADA S KRATKIM PREGLEDOM TIJEKA SANACIJE .....	6
3. KARAKTERISTIKE ŠIREG PODRUČJA LOKACIJE PIŠKORNICA .....	9
3.1. Hidrološke karakteristike šireg područja lokacije Piškornica.....	9
3.2. Karakteristike meteorologije i klime.....	10
3.3. Osnovne karakteristike površinskih voda .....	11
3.4. Osnovne karakteristike podzemnih voda .....	13
3.5. Bioekološke karakteristike područja.....	14
3.5.1 Fauna .....	16
3.5.2 Zaštićena područja .....	16
3.5.3 Ekološka mreža.....	18
3.5.4 Krajobrazne karakteristike .....	20
4. ANALIZA PODZEMNIH I POVRŠINSKIH VODA .....	21
4.1. ANALIZA PROMATRANIH PARAMETARA.....	22
4.1.1. PODZEMNE VODE .....	22
4.1.2. POVRŠINSKE VODE .....	29
4.2. STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA MJERENJA.....	35
4.2.1. Uvod.....	35
4.2.2. Statistička analiza .....	35
4.2.3. Metode statističke analize.....	35
4.2.4. Rezultati statističke analize .....	38
4.2.5. Zaključci statističke analize.....	44
5. NUMERIČKI MODEL TOKA PODZEMNE VODE I PRONOSA ZAGAĐENJA .....	46
5.1. Uvod.....	46
5.2. Matematički model procjeđivanja.....	47
5.2.1. Darcy-ev zakon .....	47
5.2.2. Formulacija potencijalne funkcije .....	47
5.2.3. Formulacija strujne funkcije.....	49
5.2.4. Rubni uvjeti .....	50
5.3. Numerički model procjeđivanja.....	51
5.3.1. Varijaciona formulacija problema .....	51
5.3.2. Izoparametarska preslikavanja.....	54
5.3.3. Numerička integracija .....	59
5.3.4. Hidrodinamička disperzija .....	61
5.3.5. Advektivno-disperzivna jednadžba .....	64
5.3.6. Random walk particle tracking metoda .....	65

6. REGIONALNI MODEL TEČENJA NA PODRUČJU PIŠKORNICA .....	66
6.1. Opis područja/domene .....	66
6.2. Opis mreže konačnih elemenata .....	67
6.3. Hidrogeološke karakteristike .....	68
6.3.1. Opis rubnih uvjeta .....	71
6.3.2. Crpilište Ivanščak .....	71
6.3.3. Scenarij crpljenja - S1 .....	72
6.3.4. Scenarij crpljenja – S2.....	73
6.3.5. Scenarij crpljenja – S3.....	76
6.3.6. Scenarij crpljenja – S4.....	77
6.3.7. Scenarij crpljenja – S5.....	76
7. ANALIZA PRONOSA ZAGAĐENJA NA PODRUČJU ODLAGALIŠTA PIŠKORNICA .....	77
7.1. Uvod.....	77
7.2. Ulazni podaci.....	79
7.3. Analiza pronosa oblaka zagađenja za scenarij tečenja S1-S3 .....	80
7.4. Analiza pronosa oblaka zagađenja za scenarij tečenja S4 .....	82
7.5. Analiza pronosa oblaka zagađenja za scenarij tečenja S5 .....	85
7.6. Vertikalno širenje oblaka .....	87
7.7. Zaključak .....	87
8. MONITORING PROGRAM POVRŠINSKIH I PODZEMNIH VODA ŠIREG PODRUČJA LOKACIJE PIŠKORNICA	89
8.1. Prijedlog dodatnog mjerenja ekološkog i kemijskog stanja površinskih voda.....	92
8.2. Prijedlog dodatnog mjerenja (monitoringa) podzemnih voda .....	93
9. GEOLOŠKE I PEDOLOŠKE KARAKTERISTIKE PODRUČJA .....	97
9.1. Geološke karakteristike .....	97
9.2. Pedološke karakteristike .....	97
9.3. Izvještaj o uzorkovanju sedimenata.....	99
9.3.1. Uvod.....	99
9.3.2. Metodologija .....	99
9.3.3. Rezultati.....	101
9.3.4. Interpretacija rezultata koncentracija elemenata u uzorcima .....	102
9.3.5. Ocjena kvalitete tla .....	103
9.4. Prijedlog geokemijskih mjerenja tala na lokaciji Piškornica .....	104
10. SAŽETAK STUDIJE.....	106
11. LITERATURA.....	110

## 1. UVOD

Odlagalište otpada Piškornica nalazi se na području općine Koprivnički Ivanec, sjeverno od grada Koprivnice. Sama lokacija na kojoj se nalazi odlagalište otpada Piškornica je definirana Prostornim planom općine Koprivnički Ivanec kao izdvojeno građevinsko područje Piškornica (III. Izmjene i dopune Prostornog plana uređenja Općine Koprivnički Ivanec). Na područje odlagališta otpada Piškornica je predviđeno odlaganje otpada s područja Općine Koprivnički Ivanec te Grada Koprivnice (Službeni glasnik Koprivničko-križevačke županije br. 9/05, 9/07, 4/09, 9/11). Samo odlagalište otpada se nalazi na udaljenosti od oko 8 km zračne udaljenosti od centra grada Koprivnice, dok je najbliže naselje Pustakovec udaljeno oko 1 km zračne udaljenosti te naselje Koprivnički Ivanec koje je udaljeno oko 2 km zračne udaljenosti.

Odlaganje otpada (industrijskog i komunalnog) organizirano se na ovoj lokaciji odlaže od 1982 godine. U početku se otpad odlagao na tlo, a 1991. godine izrađeno je prvo idejno rješenje sanacije odlagališta u okviru kojega je planiran nastavak rada kao sanitarnog odlagališta. Desetak godina kasnije (2001) izrađeno je novo „Idejno rješenje odlagališta otpada I. kategorije na lokaciji Piškornica – Koprivnica“ (IPZ Uniprojekt MCF, Zagreb), a u ožujku 2001. godine prihvaćena je Studija utjecaja na okoliš. Lokacijska i građevinska dozvola za sanaciju i konačno uređenje odlagališta Piškornica izdane su 2004. godine. Sanacija odlagališta započela je 2005. godine te se provodila u više faza tijekom godina, od 2016. godine tvrtka Piškornica-sanacijsko odlagalište d.o.o. (PSO) postala je novi operater odlagališta. S ciljem praćenja kakvoće podzemnih voda u neposrednoj okolici odlagališta još je 1991. godine izvedeno 5 piezometara te odlagalište otpada Piškornica posjeduje Rješenje o okolišnoj dozvoli izdano od strane Ministarstva zaštite okoliša i energetike.

Danas se praćenje kakvoće podzemne vode u piezometrima PK2, PK3, PK4 i PK5 te kakvoće vode u vodotoku Gliboki (uzvodno i nizvodno od odlagališta) provodi četiri puta godišnje, u skladu sa zahtjevima iz Okolišne dozvole. Mjerenje razina podzemne vode također se provodi u skladu s okolišnom dozvolom, dva puta godišnje (svakih 6 mjeseci). Osim praćenja kakvoće podzemnih voda i potoka Gliboki, prati se i kakvoća emisije u vode prema posebnom propisu - Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN br. 80/13, 43/14, 27/15 i 3/16).

Svrha predmetne studije je analizirati stanje površinskih i podzemnih voda u širem području odlagališta Piškornica. Posebno će se izraditi model toka podzemne vode i pronosa zagađenja s ciljem analize mogućeg utjecaja odlagališta na crpilište Ivanščak pod različitim režimima crpljenja, a sve u cilju unaprjeđenja stanja okoliša i smanjenja negativnih utjecaja na okoliš.

Temeljem analize rezultata modeliranja toka i pronosa predložiti će se dodatno praćenje stanja okoliša u skladu s novim spoznajama o mogućim utjecajima. Tako definirano praćenje stanja okoliša omogućiti će analizu i definiranje utjecaja budućeg Regionalnog centra za gospodarenjem okoliša čija se izgradnja očekuje za 4-5 godina.

## 2. POSTOJEĆE STANJE NA ODLAGALIŠTU OTPADA S KRATKIM PREGLEDOM TIJEKA SANACIJE

Postojeće odlagalište otpada Piškornica, sukladno lokacijskoj dozvoli zauzima ukupnu površinu od oko 10,5 ha, od čega površina odlagališta unutar ograde iznosi oko 10 ha te se otpad odlaže na površinu od oko 6,7ha. Odlaganje otpada na ovoj lokaciji je započelo 1982. godine te se od tada kontinuirano odlaže komunalni i industrijski otpad, na tada neuređenu plohu u sklopu koje nije bio izveden brtveni sustav niti drenažni sustav za odvodnju procjednih voda. U prošlosti se, izvan današnje ograde odlagališta, bez ikakvog nadzora, odlagao otpad u tekućem stanju, poglavito nusprodukti rada pivovare (mulj s biološkog pročišćivača voda i kiselgur) te muljevi iz tvornice obrade drva i papirne ambalaže. S obzirom da se odlagalište otpada Piškornica nalazi na klastičnim, pretežno aluvijalnim naslagama s manjim gornjim slojem glinovito-praškastog materijala s humusom, odlaganje ovakvog otpada samo u prethodno iskopane jarke (pri čemu je uklonjen gornji vodonepropusni sloj gline) omogućilo je procjeđivanje onečišćenja u podzemlje. Sukladno Studiji utjecaja na okoliš uređenje postojećeg odlagališta komunalnog otpada Piškornica – Koprivnica (IPZ Uniprojekt, 2000. godina) procijenjeno je kako je na odlagalište Piškornica u razdoblju od 1982. do 2000. godine odloženo oko 75 500 tona komunalnog otpada i oko 147 500 tona industrijskog otpada. Procijenjena ukupna količina otpada od oko 223 000 tona (oko 245 000 m<sup>3</sup>) odlagala se okvirno na 7 hektara prostora, prosječne dubine oko 3,5 m.

Sanacija odlagališta otpada Piškornica započela je 2000. godine izradom Studije utjecaja na okoliš i ishođenjem potrebne dokumentacije za početak sanacije. Sam početak uređenja i sanacije odlagališta otpada Piškornica započeo je 2005. godine pri čemu je sanacija predviđena na način da se na plohamo izvodi donji brtveni sloj i sustav za sakupljanje procjednih voda te se potom, na takvu uređenu podlogu, izvodi premještanje postojećeg, odnosno starog otpada. Na iste uređene plohe se svakodnevno odlaže i novo-pristigli otpad. Sanacija se provodi kroz više godina u tri faze te je ukratko opisana u nastavku.

Prva faza, koja je započela 2005. godine sa čišćenjem terena i ploha te izvedbom drugih pripremnih radova poput izvedbe zemljanog nasipa na plohi 1, izvedbom obodnog kanala s kontrolnim ispustom i ispustom u potok Gliboki, ogradom oko odlagališta, objektima ulazne zone i prebacivanjem otpada na privremenu plohu unutar odlagališta, podrazumijeva premještanje postojećeg, odnosno starog otpada na novouređene plohe. Iste godine (2005.) je započeta gradnja sjevernog nasipa i ugradnja brtvenog sloja na plohi 1. U 2006. godini je slijedio nastavak gradnje brtvenog sloja i izgradnja zapadnog i istočnog nasipa do granica s plohom 2. Izgrađena je laguna za procjedne vode, obodna cesta i kanal za odvodnju oborinskih voda te je uspostavljen sustav odvodnje oborinskih voda s Plohe 1 na koju je postavljen i drenažni sloj. Došlo je do premještanja starog otpada s područja plohe 2 na plohu 1 te radova na uređenju dna plohe 2 koji su obuhvaćali izradu brtvenog sustava i sustava za odvodnju procjednih voda. Nakon izvedbe plohe 2 došlo je do premještanja starog otpada s plohe 3 te punjenja plohe 2 otpadom. 2009. godine je krenula sanacija plohe 3 s izvedbom donjeg brtvenog sloja i drenažnog sloja.

Fazom 1 je predviđeno kako će se sav postojeći otpad, premjestiti na plohe 1 do 3 s predviđenim volumenom od oko 460 000 m<sup>3</sup> prije početka odlaganja otpada na plohu 4. Paralelno sa završetkom odlaganja otpada na plohe 1-3 predviđa se početak postavljanja brtvenog i drenažnog sustava plohe 4.

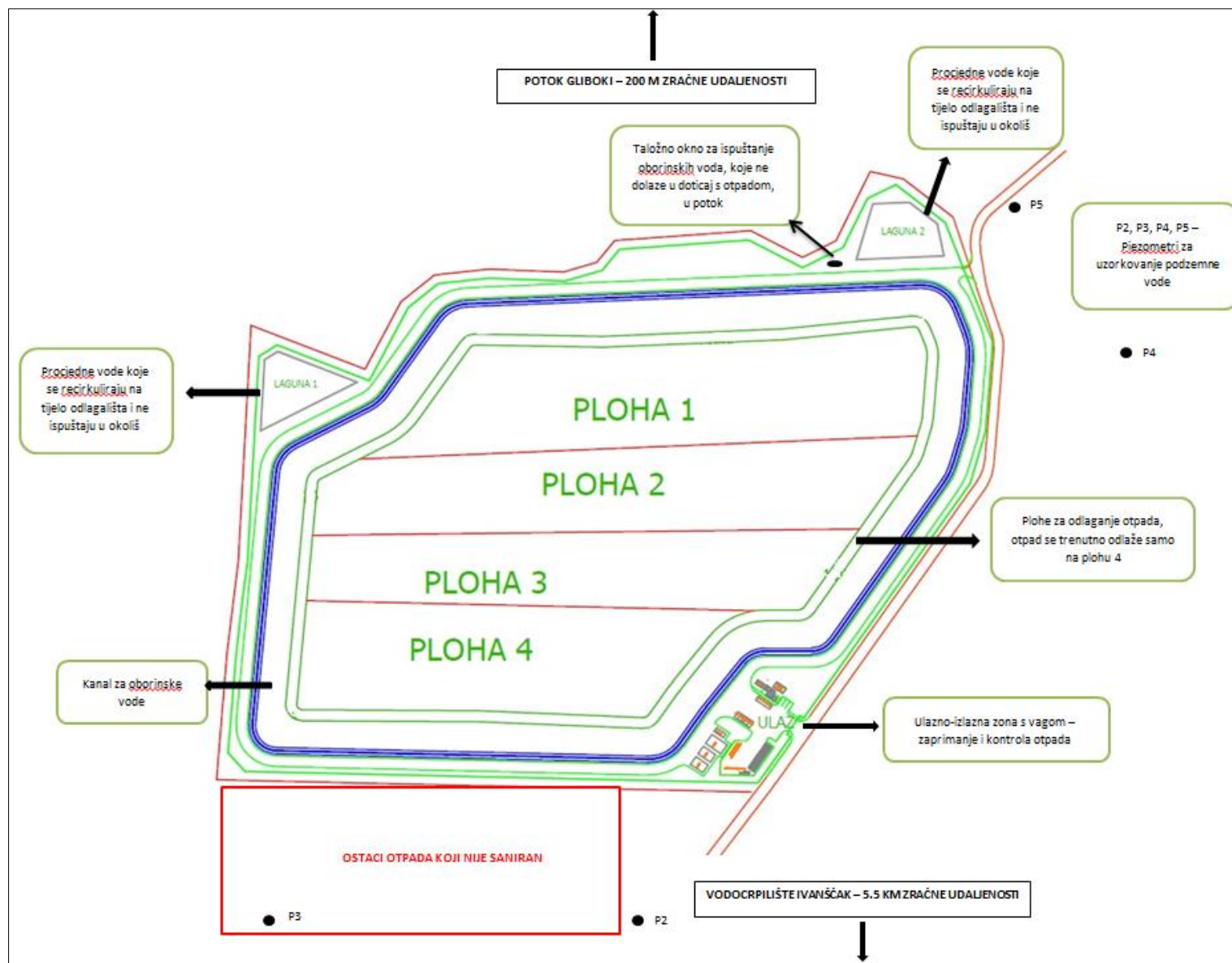
Druga faza, previđa samo prihvatanje novog otpada, pri čemu će se otpad odlagati na uređenu plohu 4 do kote od oko 155 m n.n. nakon čega će se otpad odlagati na sve plohe do maksimalnih projektiranih kota. Odlaganje otpada na plohu 4 je započeto u siječnju 2018. godine. Sukladno glavnom projektu sanacije, na odlagalište otpada Piškornica predviđeno je odlaganje neobrađenog komunalnog otpada do 2023. godine s predviđenim volumenom otpada po zatvaranju odlagališta od oko 805.000 m<sup>3</sup>.

Treća faza podrazumijeva konačno prekrivanje odlagališta otpada, odnosno izvedbu završnog prekrivnog sustava uz izvedbu svih pripadajućih dijelova (sustav odvodnje oborinskih voda i sustav biofiltera, cjevovoda, plinskih zdenaca i ispusta kondenzata na dijelovima gdje je završen prekrivni sustav).

Danas je na odlagalištu otpada Piškornica izvedena sanacija ploha 1,2 i 3 te se otpad od 2018. godine odlaže na plohu 4 na sanitaran način, odnosno u potpunosti su izrađeni brtveni slojevi, drenažni sustav, sustav procjednih voda i dr. U sklopu sanacije, na odlagalištu otpada Piškornica u potpunosti su izrađeni temeljni brtveni sustavi ploha, sustav upravljanja procjednim vodama, sustav za sakupljanje i odvodnju procjene vode, dvije lagune za sakupljanje procjednih voda, kanal za odvodnju oborinskih voda i sustav za recirkulaciju procjednih voda, dok je za sustav za otplinjavanje u tijeku postupak ocjene o potrebi procjene utjecaja na okoliš.

U trenutnoj situaciji je ostalo nesansirano oko 100 000 m<sup>3</sup> otpada izvan granica odlagališta (izvan današnje ograde) južno od tijela odlagališta (vidljivo na slici ispod (Slika 1)).

Na lokaciji današnjeg odlagališta otpada Piškornica planirana je izgradnja Regionalnog centra za gospodarenje otpadom sjeverozapadne Hrvatske (RCGO) površine 43,6 ha i predviđenog vijeka trajanja od 30 godina u kojem je predviđena obrada i zbrinjavanje komunalnog i neopasnog proizvodnog otpada s područja 4 županije: Koprivničko-križevačke, Krapinsko-zagorske, Međimurske i Varaždinske županije.

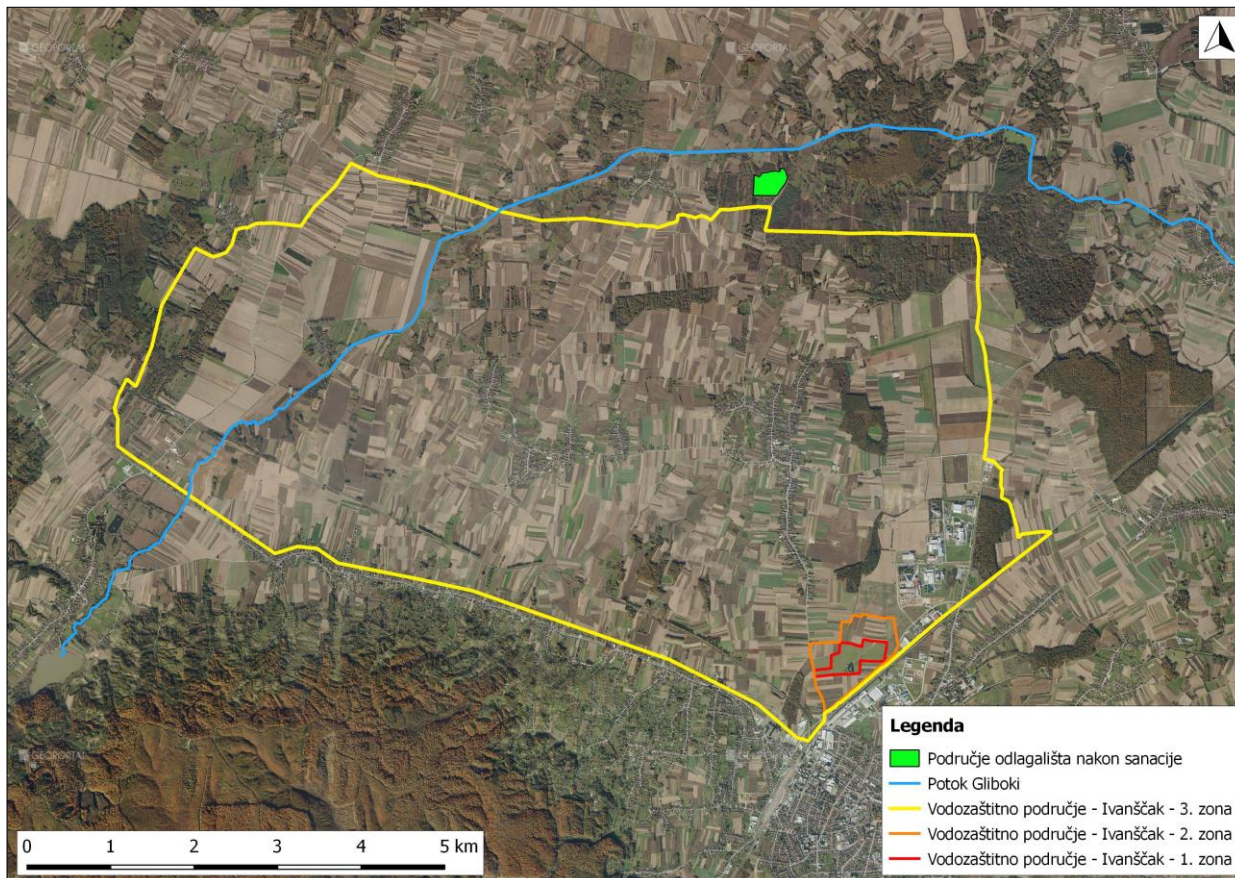


Slika 1. Tlocrt odlagališta otpada Piškornica



### 3. KARAKTERISTIKE ŠIREG PODRUČJA LOKACIJE PIŠKORNICA

Područje lokacije odlagališta otpada Piškornica nalazi se nizvodno od vodozaštitnog područja crpilišta Ivanščak, dok se sjeverno od odlagališta nalazi potok Gliboki na udaljenosti od oko 250 metara. Ovaj potok pripada Dravskom porječju te se u Dravu ulijeva kod naselja Torčec. Odlagalište Piškornica nalazi se južno od potoka Gliboki i nije smješteno unutar granica vodozaštitne zone crpilišta Ivanščak. Odlagalište Piškornica povezano je cestom dugom 3 km do županijske ceste Koprivnica – Đelekovec (Slika 2.).



Slika 2. Šire područje odlagališta Piškornica

#### 3.1. Hidrološke karakteristike šireg područja lokacije Piškornica

Šire područje lokacije Piškornica pripada niskom panonskom i peripanonskom prostoru i prema svjetski prihvaćenim kriterijima klasificiranja klime (W. Köppen) ima umjereno toplu kišnu klimu (tip C). Sve vode na širem području lokacije Piškornica dio su sliva Crnog mora, jednog od dva (sliv Jadranskog mora) glavna slivna područja Republike Hrvatske.

Raspored površinskih i podzemnih voda, kao i njihove međusobne veze, određeni su morfološkim i hidrogeološkim značajkama šireg područja lokacije Piškornica. Područje koprivničke Podravine pripada zapadnom dijelu Dravskog bazena koji se nalazi u dodirnom prostoru između centralnog i južnog dijela Panonskog bazena (Dujčić & Urumović, 2007). Uglavnom većina istražnih radova i terenskih ispitivanja morfoloških i hidrogeoloških karakteristika šireg područja koprivničke Podravine nalaze se u stručnim radovima rađenima za potrebe INA-Naftaplina, projektiranja hidroelektrana na Dravi (Cvijanović et al., 1979; Prelogović et al., 1987) i opsežna hidrogeološka istraživanja provedena za potrebe vodoopskrbe Koprivnice i okolnih naselja (Geotehnika 1973-77).

### 3.2. Karakteristike meteorologije i klime

Sama lokacija odlagališta otpada Piškornica nalazi se u Koprivničko-križevačkoj županiji za koju je karakteristično prijelazno područje umjereno semihumidne u stepskoaridnu panonsku klimatsku zonu, gdje se osim utjecaja opće cirkulacije karakteristične za ove geografske širine, osjeća jak modifikatorski utjecaj niske Panonske nizine i velikog planinskog sustava Alpa i Dinarida. Prema Köppenovoj klasifikaciji klime na području Koprivničko-križevačke županije prevladava umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom (Cfb) sa slijedećim klimatskim karakteristikama:

- najniža srednja mjesečna temperatura zraka iznosi između - 3 i 18°C
- srednja temperatura najtoplijeg mjeseca je manja od 22°C.
- barem 6 mjeseci u godini apsolutna temperatura padne ispod 0°C.
- prosječna godišnja količina padalina se kreće između 850 i 900 mm
- vjetrovitost je promjenjiva, a karakteristični za ovo područje su slabi vjetrovi i tišina, dok su jaki vjetrovi rijetkost.

Na području županije padaline se kontinuirano javljaju kroz cijelu godinu s primjetnim smanjenjem količina padalina idući od zapada prema istoku. U srednjem godišnjem hodu oborine postoje dva podjednaka maksimuma: kasno jesenski s oko 93 mm (studeni) i ljetni s oko 100 mm (lipanj, srpanj). Na području Županije blagi vjetrovi prisutni su tijekom cijele godine. Najčešće pušu sjeverozapadnjak, jugozapadnjak i sjevernjak. Zimi prevladava sjevernjak, a istočnjak je jači u proljetnim mjesecima. Ljeti prevladava jugozapadni vjetar, koji je topao i dovodi do povećanja vlage u zraku te najčešće prethodi kiši. Tijekom čitave godine, a osobito u jesen, puše zapadnjak, a maksimalna vlažnost zraka javlja se u studenom i prosincu, dok je minimalna u travnju i svibnju. Prosječna godišnja relativna vlaga iznosi 82 %, a magle se najčešće pojavljuju u jesenskim i zimski mjesecima.

Najbliža meteorološka stanica je u Koprivnici koja je udaljena oko 7 km od lokacije Piškornica. Prosječna godišnja temperatura zraka iznosi 10<sup>0</sup> C, a kreće se od -0,4<sup>0</sup> C u siječnju do 20<sup>0</sup> C u srpnju koji je ujedno i najtopliji mjesec. S vidljivom godišnjom amplitudom od 20,4 C potvrđuju se kontinentalne karakteristike područja.

Minimalne i maksimalne temperature u širem području lokacije Piškornica su registrirane u slučajevima jakih anticiklonalnih strujanja zraka sa sjevera i sjeveroistoka u okviru sibirske anticiklone (minimalna temperature -26,1<sup>0</sup> C na dan 16.02.1956.) i jugozapadnog strujanja zraka sa subtropskim zračnim masama koje uvjetuju maksimalne temperature preko 35<sup>0</sup> C.

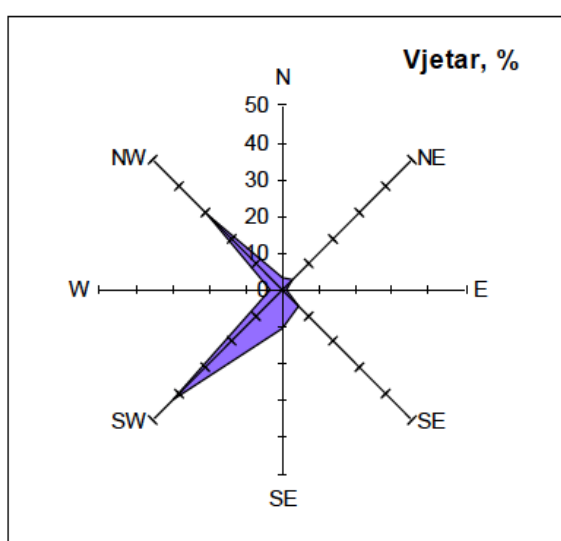
Oborine su za šire područje lokacije Piškornica relativno povoljno raspoređene godišnje s manje padalina zimi, dok najviše padalina ima u rano ljeto. To su tipične karakteristike panonske klime. Većina jačih oborina u rano ljeto nastupa u obliku kratkotrajnih intenzivnih pljuskova. Tijekom travnja, svibnja, lipnja i srpnja oborine se kreću od 60 do 80 mm/m<sup>2</sup>, od siječnja do travnja oko 50 mm/m<sup>2</sup> i u studenom i prosincu oko 80 mm/m<sup>2</sup>. Ukupne godišnje oborine se kreću oko 800 mm/m<sup>2</sup> na meteorološkoj postaji Koprivnica.

Osnovne karakteristike ovog tipa klime su velike fluktuacije u različitim parametrima i česta moguća odstupanja od režima oborina. Ovakva prirodna varijabilnost može uzrokovati pojave suše ili značajnog viška oborina što će se još više pojačavati u budućnosti pod utjecajem globalnih klimatskih promjena.

Upravo ovakva područja s kontinentalnim karakteristikama klime su lokacije gdje se mogu očekivati značajnije posljedice ubrzanja hidrološkog ciklusa uslijed klimatskih promjena.

Osim kiše u širem području lokacije Piškornica snijeg je karakteristična padalina za hladni dio godine i najčešće se javlja u prosincu, siječnju i veljači. Iz podataka meteorološke stanice Koprivnica prosječno ima oko 40 dana sa snježnim pokrivačem. Broj ledenih dana koji se javljaju uglavnom u siječnju i veljači ima 10, s minimalnom temperaturom oko  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Ruža vjetrova pokazuje da je najznačajniji vjetar jugozapadni koji je zastupljen 42% dok su ostali vjetrovi manje značajni. Ove karakteristike također ukazuju na kontinentalnu klimu panonske ravnice gdje nedostatak značajnijih reljefnih oblika ne stvara cirkulaciju zračnih masa (Slika 3.).



Smjer vjetra	Udio (%)
N	3,4
NE	3,9
E	0,9
SE	6,6
S	10,6
SW	42,1
W	3,1
NW	29,3
tišina	0,1

Slika 3. Ruža vjetrova s razdiobom smjerova vjetrova u Koprivnici (SUO-Piškornica, 2001).

### 3.3. Osnovne karakteristike površinskih voda

Područje Koprivničko-križevačke županije pripada slivovima rijeka Drave (oko 65%) i Save (oko 35%). Najznačajniji vodotok šireg područja lokacije Piškornica je rijeka Drava, koja teče tangencijalno na predmetno područje u dužini od cca 50 km. Uslijed izgradnje hidroenergetskih objekata, načina upravljanja i značajnih iskopavanja šljunka, korito rijeke Drave je jako promjenjivo i u prošlom stoljeću rijeka je tekla južno od Legrada, a danas teče sjeverno od naselja.

Najznačajnije pritoke rijeke Drave u promatranom području su Gliboki potok, Koprivnička rijeka, Bistra, Komarnica i južnije Zdelja, Rogstrug i Čivićevac. Kako Drava izvire u Alpama rijeka ima fluvijalno-glacijalni režim toka s najvećim protocima u mjesecu lipnju.

Premda se radi o nizinskom kraju, rijeka Drava ima značajnu brzinu toka koja se kreće između 0,7 – 2 m/s, sa srednjim protokom od  $560\text{ m}^3/\text{s}$  dok je protoka s vjerojatnosti od 1 % (stogodišnja voda) procijenjena na  $2700\text{ m}^3/\text{s}$ . Ova izrazita fluktuacija protoke te prosječni pad korita od 0,5 cm/km s velikom brzinom toka rezultira erozijskim potencijalom, meandriranjem riječnog toka te značajnim pronosom vučenog i suspendiranog nanosa.

Izrazita dinamika rijeke Drave i lateralni utjecaj velikih voda u slivu posljedično ima i znatni utjecaj na visinu podzemnih voda. Temperature ispod nule su relativno česte i šire područje lokacije Piškornica ima leda u prosjeku svake druge godine.

Šire područje lokacije Piškornica ima razvijenu hidrografsku mrežu sastavljenu od desnih pritoka rijeke Drave, prokopanih kanala, jezerskih površina i podzemne vode koja je u izravno povezana s površinskim vodotocima. Za odlagalište otpada Piškornica najznačajniji je potok Gliboki koji teče nekih 250 m sjeverno od lokacije. Osim Gliboki potoka, u širem slivnom području nalazi se potok Koprivnica, Vir, Lendava, Odženica i Rog Strug sa rasponom srednjih protoka od 0,05 – 4,5 m<sup>3</sup>/s. Šire slivno područje desnih pritoka rijeke Drave procjenjuje se na 3000 km<sup>2</sup>.

Po količini protoke najznačajniji su potoci Gliboki i Koprivnica, koji imaju značajne podslivove te protiču kroz područja sa sve izrazitijim prostornim razvojem, što ih čini ranjivim na moguća zagađenja.

Gliboki potok se ulijeva u Dravu kod naselja Komatnica i nalazi se na nadmorskoj visini od 120 m.n.m. kod ušća te 484 m.n.m. kod izvora u Kalničkom gorju. U gornjim dijelovima svoga toka Gliboki potok je bujičnog karaktera te za vrijeme mjerenja protoke Gliboki potoka na mjernoj postaji Mlačine daje prosječnu vrijednost od 0,73 m<sup>3</sup>/s dok se na ušću u Dravu Gliboki potok prosječno drenira s dvostrukim protokom od 1,46 m<sup>3</sup>/s.

Razgranata kanalska mreža s potocima nalazi se u direktnom kontaktu s podzemnom vodom i predstavlja važni resurs za vodoopskrbu i poljoprivredu. Industrijski i urbani razvoj okolnih naselja direktno utječe na način održavanja i kontrolu zagađenja na kanalskoj mreži i potocima.

Posebnu pozornost treba posvetiti umjetnim jezerskim površinama koje su primarno nastale eksploatacijom šljunka i zajedno s kanalima i navedenim potocima čine hidrografsku mrežu šireg područja lokacije Piškornica. Ove stajaće vode koje su prvenstveno nastale antropogenim djelovanjem predstavljaju vrlo ranjiva vodna tijela koja su lako podložna procesima eutrofikacije i mogu indirektno biti i izvor onečišćenja podzemnih voda.

Prostorni plan grada Koprivnice utvrdio je vodozaštitna područja za crpilište Ivanščak kao i potencijalnih vodocrpilišta Lipovac, Sigetec i Bukovec. Zone sanitarne zaštite utvrđene su prema stupnju opasnosti od zagađivanja i drugih štetnih utjecaja koji mogu nepovoljno djelovati na kvalitetu vode za piće ili utjecati na izdašnost izvorišta. Zone sanitarne zaštite se definiraju:

I zona - Područje izvorišta

II zona - Uže vodozaštitno područje

III zona - Šire vodozaštitno područje

III zona se definira kao područje između granice preljevnog područja do vanjske granice II zone. U slučaju da je udaljenost veća od 2 km tada se III zona dijeli na A i B zone. Važno je napomenuti da se u zonama I, II i IIIA zabranjuje formiranje odlagališta otpada, dok u zoni IIIB ono nije zabranjeno.

### 3.4. Osnovne karakteristike podzemnih voda

Šire područje lokacije Piškornica nalazi se u središnjem dijelu doline rijeke Drave podjednako udaljeno od Drave na sjeveru i obronaka Bilogore na jugu. Dokumentacija i stručni elaborati vezano za hidrogeologiju promatranog područja i analize podzemnih voda sadržano je u nekoliko stručnih radova od strane Geotehnike (1989), Rudarsko-geološko naftnog fakulteta (Dujčić & Urumović, 2007), Hrvatsko geološkog instituta (HGI, 2014) te Studije utjecaja na okoliš (IPZ, 2000).

U svim raspoloživim dokumentima vidljivo je da su osnovne hidrogeološke značajke posljedica geološke građe panonskog područja i hidroloških osobina koje vladaju u Panonskoj nizini.

Osnova podzemnih formacija su kvartarne naslage koje predstavljaju značajan vodonosni potencijal. U širem području lokacije Piškornica mogu se izdvojiti slabopropusna krovina prvog vodonosnog sloja koju čini tanki površinski sloj humusa i pjeskovito - prašinsto - glinoviti materijali. Prvi vodonosni sloj je debljine od više desetaka metara, a u zoni odlagališta debeo je oko 50 m (Geotehnika, 1989).

Ispod prvog vodonosnika nalaze se proslojci slabopropusne gline i zbog nedostatka podataka teško da se može nazvati akvitard jer samo u području gdje mu je debljina veća i prostiranje šire može se prihvatiti kao sloj koji odvaja gornji i donji vodonosnik. Međutim promatrajući šire područje lokacije Piškornica, donji vodonosnik ima hidrauličku povezanost s gornjim vodonosnikom.

Podinu cijelog vodonosnog kompleksa čine sastojci gline i lapora s ne definiranom debljinom. Cijeli gornji vodonosni kompleks je različite debljine koja se kreće od 40 do 70 m.

Vodopropusne naslage u širem području lokacije Piškornica saturirane su vodom koja dolazi primarno infiltracijom iz rijeke Drave (čije je korito direktno urezano u prvi vodonosnik) te procjeđivanjem i perkolacijom oborinskih voda s površine terena. Na taj način oscilacije u vodostaju rijeke Drave hidraulički direktno utječu na formiranje vodnog lica u vodonosniku. Kako je slabopropusna krovina gornjeg vodonosnika razmjerno tanka, većina procjeđivanja kroz krovinu odvija se vertikalno bez značajnijeg horizontalnog toka što je poglavito izraženo uz rijeku Dravu.

Padaline koje na godišnjoj razini se kreću oko  $800 \text{ mm/m}^2$  prihranjuju gornji vodonosnik poglavito u području uz rijeku Dravu. HGI (2014) u sklopu svog istraživanja procjenjuje da prihranjivanje vodonosnika infiltracijom padalina iznosi 25% godišnjih padalina ili oko  $200 \text{ mm/m}^2$ . Eksploatacija podzemne vode, evapotranspiracija i dreniranje u površinske tokove predstavlja najvažniji izvor gubitaka podzemnih voda.

Ako se pretpostavi površina Dravskog vodonosnika unutar Koprivničko-križevačke županije od  $700 \text{ km}^2$  rezultira da je godišnje prihranjivanje oko  $140 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{god}$  naspram  $6,5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{god}$  javne eksploatacijske količine. S obzirom na malu količinu vode koja se danas eksploatira (manje od 5% godišnjeg prihranjivanja), proizlazi da se koristi mali dio obnovljivih zaliha (HGI, 2014) te daje puno prostora povećanju javne vodoopskrbe kako za stanovništvo tako i za razvoj industrije.

Razina podzemnih voda u promatranom području direktno ovisi o klimatskim prilikama i protoci rijeke Drave. U većini prisutnih piezometara dubina do podzemne vode iznosi 2-5 m s godišnjom oscilacijom oko 2 metra (SUO-Pišcornica, 2000).

Na temelju različitih dostupnih stručnih elaborata i prethodnog istraživanja može se pretpostaviti da je prevladavajući generalni smjer gibanja podzemnih voda od sjeverozapada prema jugoistoku (Urumović et al., 1996).

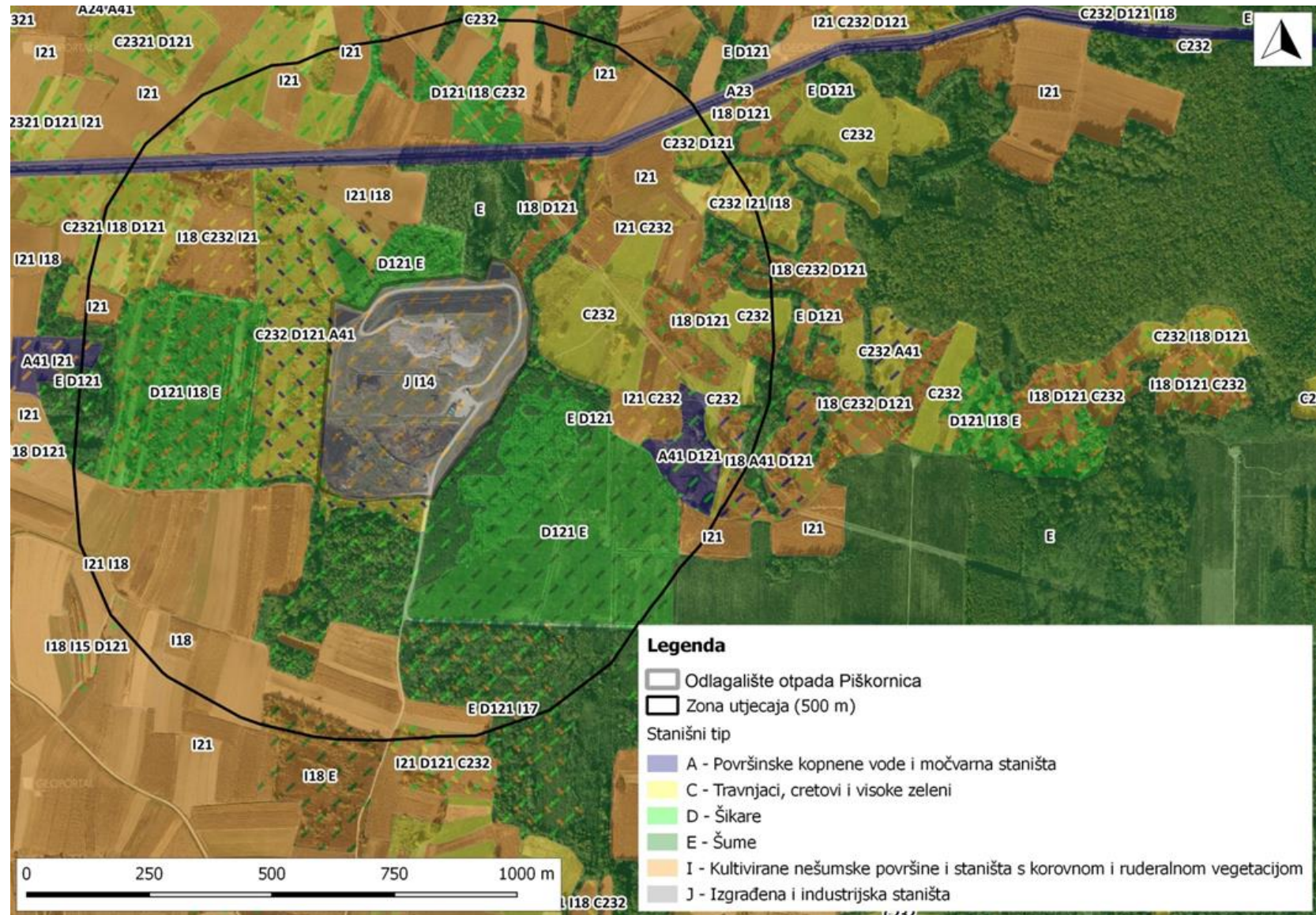
U slijedećim poglavljima predstaviti će se numerički model toka podzemne vode i pronosa zagađenja te prikazati scenarij mogućeg širenja zagađenja s odlagališta otpada Piškornica s posebnim osvrtom na moguće utjecaje na crpilište Ivanščak uz različite režime rada crpilišta.

Plitki vodonosnici imaju svoje prednosti i mane. Jednostavno i ekonomično crpljenje podzemne vode i mogućnost brze distribucije često je suprotstavljeno velikoj ranjivosti plitkih vodonosnika. Posebni program mjera koji sadrži monitoring program mora se provoditi poglavito u ovakvim primjerima kada imamo na širem području Koprivnice važno crpilište Ivanščak i odlagalište otpada Piškornica.

Suživot crpilišta i odlagališta je neminovan i dužnost je svih relevantnih institucija kako na lokalnoj, tako i nacionalnoj razini pomoći pravilnim upravljanjem i održavanjem. U zadnjem poglavlju predložit će se monitoring program u cilju rane detekcije mogućeg zagađenja vodnih tijela te prevencija bilo kojih nepovoljnih situacija koje bi narušile kvalitetu resursa podzemne vode.

### **3.5. Bioekološke karakteristike područja**

Područje same lokacije odlagališta prema karti kopnenih nešumskih staništa RH (2016) pripada antropogenom stanišnom tipu J/I.1.4. (Izgrađena i industrijska staništa/Ruderalne zajednice kontinentalnih krajeva), dok se u neposrednoj blizini odlagališta (unutar 500 m) nalaze stanišni tipovi u različitim kombinacijama: D.1.2.1/E (Mezofilne živice i šikare kontinentalnih, izuzetno primorskih krajeva/Šume), E (šume), C.2.3.2. (Mezofilne livade košanice Srednje Europe), E/D.1.2.1./I.1.7. (Šume/Mezofilne živice i šikare kontinentalnih, izuzetno primorskih krajeva/Zajednice nitrofilnih, higrofilnih i skiofilnih staništa), C.2.3.2/D.1.2.1/A.4.1. (Mezofilne livade košanice Srednje Europe/Mezofilne živice i šikare kontinentalnih, izuzetno primorskih krajeva/Tršćaci, rogozici, visoki šiljevi i visoki šaševi), D.1.2.1./I.1.8./E (Mezofilne živice i šikare kontinentalnih, izuzetno primorskih krajeva, Zapuštene poljoprivredne površine/Šume), I.1.8. (Zapuštene poljoprivredne površine), I.1.2.1./I.1.8. (Mozaici kultiviranih površina/Zapuštene poljoprivredne površine), I.1.8./C.2.3.2./I.2.1. (Zapuštene poljoprivredne površine/Mezofilne livade košanice Srednje Europe/Mozaici kultiviranih površina), I.2.1./C.2.3.2. (Mozaici kultiviranih površina/Mezofilne livade košanice Srednje Europe), I.2.1. (Mozaici kultiviranih površina), I.1.8./D.1.2.1. (Zapuštene poljoprivredne površine/Mezofilne živice i šikare kontinentalnih, izuzetno primorskih krajeva), A.4.1./D.1.2.1. (Tršćaci, rogozici, visoki šiljevi i visoki šaševi/Mezofilne živice i šikare kontinentalnih, izuzetno primorskih krajeva), D.1.2.1/I.1.8/C.2.3.2. (Mezofilne živice i šikare kontinentalnih, izuzetno primorskih krajeva/Zapuštene poljoprivredne površine/Mezofilne livade košanice Srednje Europe). Stanišni tipovi na širem području lokacije otpada Piškornica su prikazani na slici ispod (Slika 4.).



Slika 4. Stanišni tipovi na širem području odlagališta otpada Piškornica

Izvor: Bioportal, DWG

Kako je vidljivo iz prethodne slike u neposrednoj blizini lokacije odlagališta Piškornica dominiraju travnjačke zajednice i to mezofilne livade košanice Srednje Europe, šikare (mezofilne živice i šikare kontinentalnih, izuzetno primorskih krajeva), šume i kultivirane nešumske površine i staništa s korovnom i ruderalnom vegetacijom (mozaici kultiviranih površina i zapuštene poljoprivredne površine).

Sukladno karti staništa iz 2004. godine, od šumskih zajednica koje ovdje dolaze razvijene su mješovite hrastovo-grabove i čiste grabove šume (E.3.1.) (Sveza *Erythronio-Carpinion* (Horvat 1958) Marinček in Mucina et al. 1993). Ove šume pripadaju redu FAGETALIA SYLVATICAE Pawl. in Pawl. et al. 1928. te čine mezofilne i neutrofilne šume planarnog i bežuljkastog područja, koje se javljaju izvan dohvata poplavnih voda. Ove šume čine visinski prijelaz između nizinskih poplavnih šuma i brdskih bukovih šuma. U gornjoj šumskoj etaži dominiraju lužnjak ili kitnjak, a u podstojnoj etaži obični grab (koji u degradacijskim stadijima može biti i dominantna vrsta drveća). Šumske zajednice u neposrednoj blizini lokacije nisu cjelovite, već su razvijene u obliku šumaraka i manjih gajeva. Dodatno, u blizini zahvata se nalazi plantaža klonova kanadskih topola s razvijenom populacijom alohtonog invazivnog korova velike zlatice (*Solidago gigantea* Ait.). Na samoj lokaciji te u njenoj neposrednoj blizini se ne nalaze botanički značajna područja.

Prema Prilogu II Pravilnika o popisu stanišnih tipova, karti staništa te ugroženim i rijetkim stanišnim tipovima (NN 88/14) od stanišnih tipova koji se nalaze u neposrednoj blizini odlagališta otpada, stanišni tipovi A.4.1. Tršćaci, rogozici, visoki šiljevi i visoki šaševi, C.2.3. Mezofilne livade Srednje Europe te E.3.1. Mješovite hrastovo-grabove i čiste grabove šume se nalaze na Popisu ugroženih i rijetkih stanišnih tipova od nacionalnog i europskog značaja zastupljenih na području Republike Hrvatske.

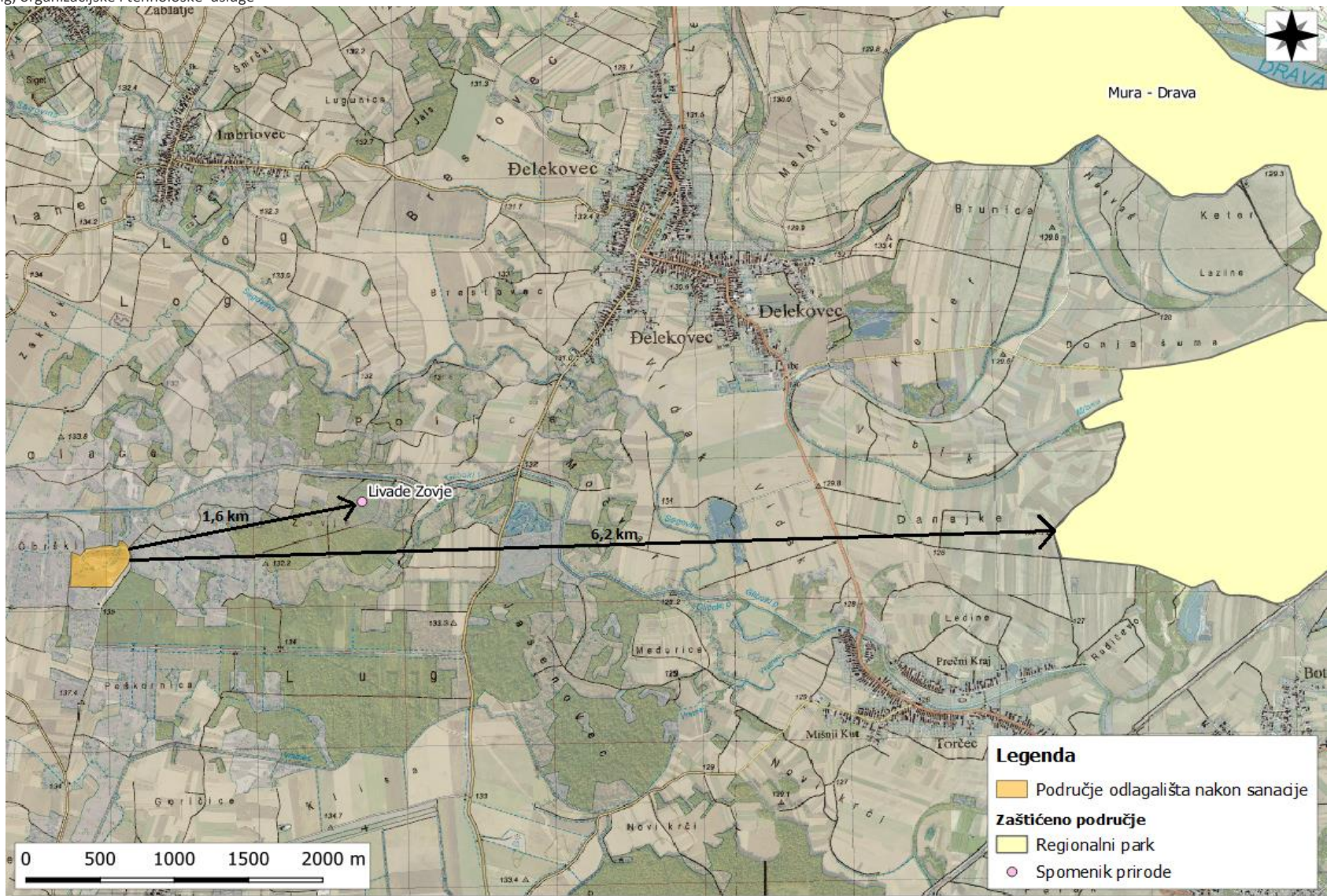
### 3.5.1 Fauna

Na širem području odlagališta nisu provedena sustavna istraživanja faune, no s obzirom na samu lokaciju odlagališta otpada Piškornica, možemo zaključiti kako je na širem području zahvata prisutna tipična srednjoeuropska fauna. Kao tipični predstavnici ove faune izdvajaju se manji sisavci poput ježa, krtice, kune, vjeverice, poljskog i šumskog miša i zeca te lovna divljač poput lisice, divlje svinje, srne, jelena. Šire područje lokacije pripada kontinentalno – gorskoj „herpetološkoj“ regiji za koju je karakteristična veća raznolikost vodozemaca, u odnosu na gmazove. Od gmazova nalazimo tipične vrste poput bjelouške, sljepića, livadne gušterice i drugih, dok od vodozemaca nalazimo zelene žabe, šumsku smeđu žabu i druge. Na području također su zastupljene vrste iz razreda kukaca, od kojih se izdvajaju strogo zaštićene vrste veliki livadni plavac i zagasiti livadni plavac, čije je stanište na području ekološke mreže POVS HR2000672 Zovje.

### 3.5.2 Zaštićena područja

Na samom odlagalištu ili u blizini odlagališta se ne nalaze zaštićena područja temeljem Zakona o zaštiti prirode (80/13, 15/18). Najbliže zakonom zaštićeno područje Spomenika prirode „Mali zoološki lokalitet livade Zovje“ na udaljenosti od 1621 m. Drugo najbliže zaštićeno područje je Regionalnog parka Mura-Drava na udaljenosti od 6255 m. Položaj odlagališta otpada Piškornica u odnosu na zaštićena područja je prikazan na slici ispod (Slika 5).





Slika 5. Odnos lokacije odlagališta otpada Piškornica u odnosu na zaštićena područja

Izvor: Bioportal, DWG

### 3.5.3 Ekološka mreža

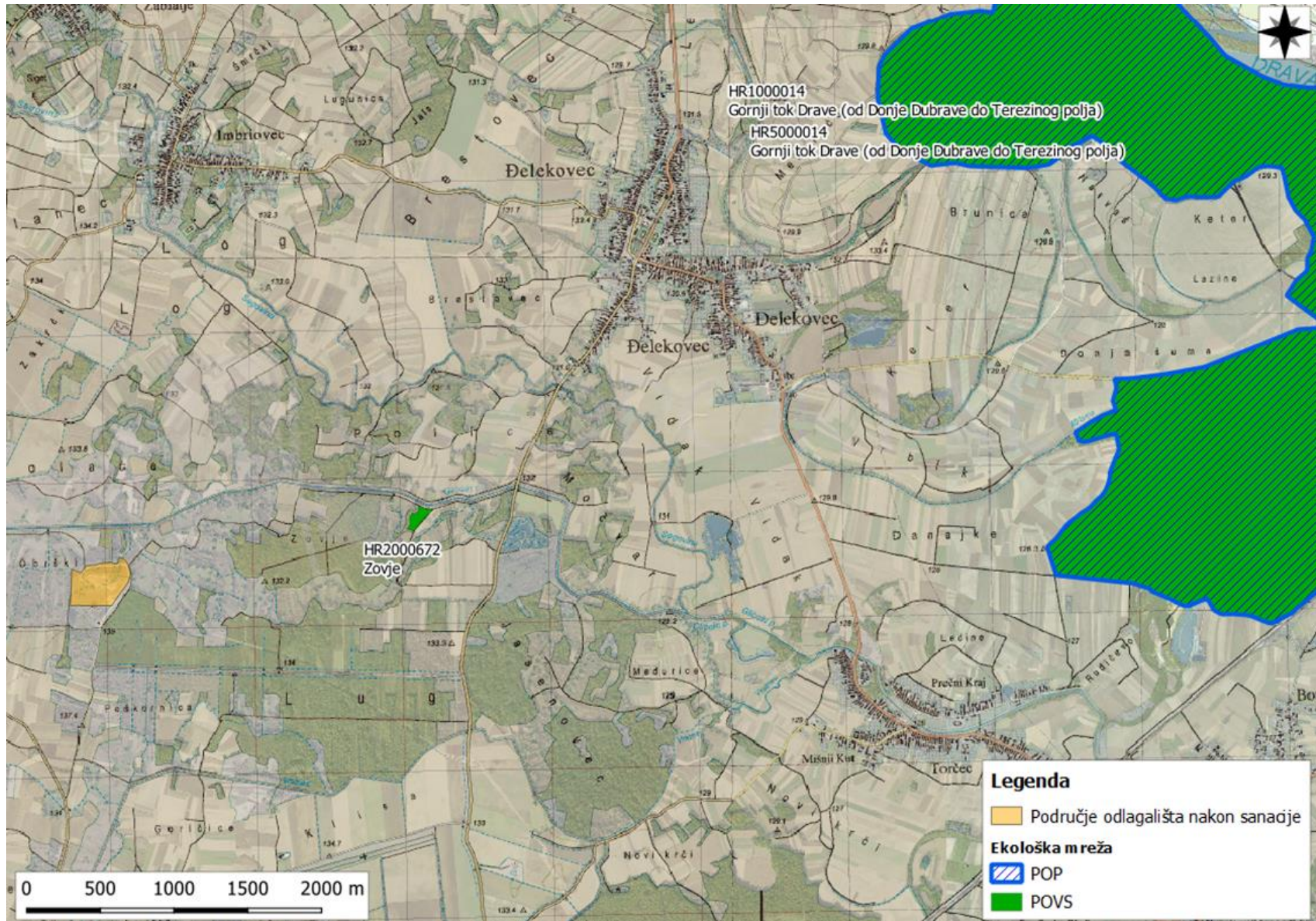
Ekološka mreža Republike Hrvatske, proglašena Uredbom o ekološkoj mreži (NN 124/2013) te izmijenjena Uredbom o izmjenama Uredbe o ekološkoj mreži (NN 105/15), predstavlja područja ekološke mreže Europske unije Natura 2000.

Ekološkom mrežom proglašena su:

- područja značajna za očuvanje i ostvarivanje povoljnog stanja divljih vrsta ptica od interesa za Europsku uniju, kao i njihovih staništa, te područja značajna za očuvanje migratornih vrsta ptica, a osobito močvarna područja od međunarodne važnosti (Područja očuvanja značajna za ptice – POP)
- područja značajna za očuvanje i ostvarivanje povoljnog stanja drugih divljih vrsta i njihovih staništa, kao i prirodnih stanišnih tipova od interesa za Europsku uniju (Područja očuvanja značajna za vrste i stanišne tipove – POVS).

Odlagalište otpada Piškornica se ne nalazi na području ekološke mreže Natura 2000. Najbliže područje ekološke mreže je POVS HR2000672 Zovje koje se nalaze na udaljenosti od 1880 m.

Položaj odlagališta otpada Piškornica u odnosu na područja ekološke mreže je prikazan na slici ispod (Slika 6.).



Slika 6. Odnos lokacije odlagališta otpada Piškornica u odnosu na područje Ekološke mreže, Izvor: Bioportal, DWG

#### 3.5.4 Krajobrazne karakteristike

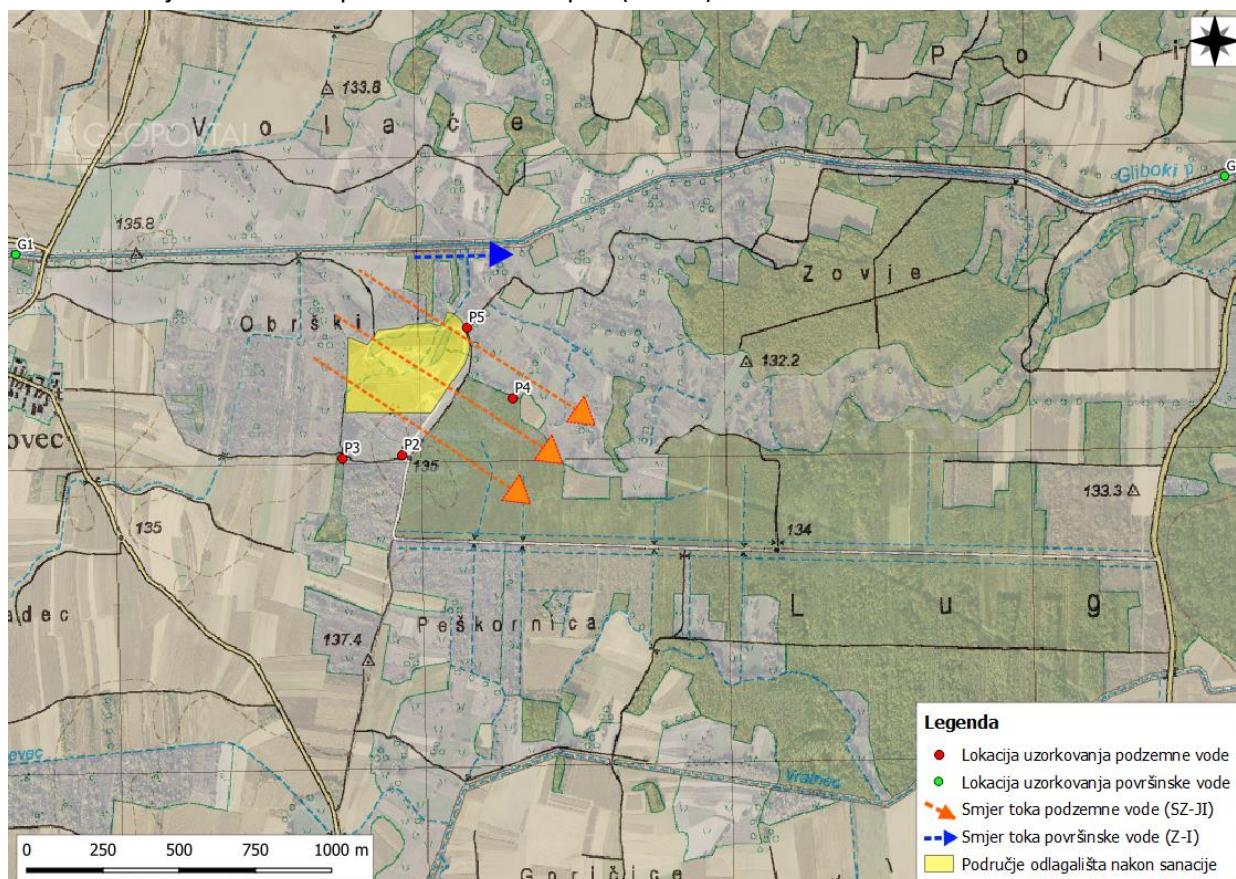
Prema Strategiji prostornog uređenja Republike Hrvatske (2017.) s obzirom na prirodna obilježja, krajobraz je podijeljen na šesnaest krajobraznih jedinica. Sukladno ovoj krajobraznoj regionalizaciji (Bralić, 1995.) područje Koprivničko-križevačke županije se najvećim dijelom, uključujući i područje odlagališta Piškornica, nalazi unutar krajobrazne jedinice „Bilogorsko-moslavački prostor“. Osnovna obilježja ovog prostora čini agrarni krajolik razvijen na nizinskom području livada uz vodotoke te valovit krajobraz padina prekrivenih šumskom vegetacijom. Na području se izmjenjuju plohe poljoprivrednih površina, antropogeni linijski elementi poput prometnica i pruga, volumeni naselja, elementi vodenih površina te šumski prostori.

Šire područje odlagališta otpada Piškornica pripada području Koprivničko-đurđevačke Podravine koju odlikuje karakterističan nizinski, kultivirani krajobraz kojeg karakteriziraju poljoprivredne površine. Samo odlagalište otpada Piškornica predstavlja antropogeni, odnosno u potpunosti izmijenjen krajobraz. Uz lokaciju odlagališta nalazimo mozaike obradivih površina jasnih linija razgraničenja i heterogenih značajki. Obradive površine dominiraju u prostoru, dok se neposredno uz lokaciju odlagališta sa jugoistočne i južne strane te u manjoj mjeri i zapadne strane nalaze manja prirodna područja koja povezuju kultivirana područja. Ova prirodna područja su najvećim dijelom potezi drveća ili manje šumske sastojine. Sa južne strane odlagališta je prometnica koja čini značajan linijski element na užem području lokacije.

Na širem području lokacije nema značajnih krajobraza sukladno Zakonu o zaštiti prirode (NN 80/13, 15/18).

#### 4. ANALIZA PODZEMNIH I POVRŠINSKIH VODA

Kako bi se dobio uvid u stanje kakvoće podzemnih i površinskih voda na području i u bližoj okolini odlagališta otpada Piškornica u nastavku je dan pregled rezultata ispitivanja provedenih u vremenskom periodu prije i za vrijeme sanacije, do 2012. godine te nakon provedene sanacije, do 2018. godine s ciljem procjene utjecaja odlagališta otpada na kakvoću voda. Vrijeme same sanacije koja je trajala od 2005. do 2013. promatrano je kao vrijeme prije sanacije. Lokacije piezometara, kao i točke uzorkovanja na vodnom tijelu Gliboki su prikazane na slici ispod (Slika 7).



Slika 7 Lokacije piezometara i točke uzorkovanja na vodnom tijelu Gliboki s označenim smjerovima toka podzemne i površinske vode na području odlagališta otpada Piškornica

Podaci obrađeni u ovom poglavlju obuhvaćaju rezultate provedenih ispitivanja uzoraka vode iz piezometara (P2, P3, P4 i P5) s uključenim analiziranim parametrima elektrovodljivosti, KPK, BPK i željeza te ispitivanja uzoraka površinskih voda sa najbližeg vodnog tijela Gliboki koji se nalazi sjeverno od samog odlagališta otpada Piškornica. Vodno tijelo Gliboki je uzorkovano na dvije lokacije, uzvodno od lokacije odlagališta, na mostu Pustakovcu (G1) koji je uzet kao kontrolni uzorak i nizvodno od samog odlagališta otpada, na mostu Đelekovcu (G2) koji je pod mogućim utjecajem odlagališta otpada. Za vodno tijelo Gliboki obrađeni su parametri elektrovodljivosti, KPK, BPK, bakra i cinka.

Za obradu kako na piezometrima tako i na potoku Gliboki uzeti su oni parametri koji imaju najduži vremenski niz ispitivanja i koji obuhvaća period prije (za vrijeme) i nakon sanacije. Za analizu podzemnih i površinskih voda su odabrani oni teški metali koji su imali najduži vremenski period mjerenja monitorinzima kako bi statistička analiza mogla biti utemeljena.

Dodatno, kako bi se utvrdile moguće razlike u kvaliteti podzemnih i površinskih voda na području odlagališta otpada Piškornica te u blizini same lokacije odlagališta u različitim fazama rada odlagališta otpada Piškornica (period prije i nakon sanacije (do 2018. godine) provedena je statistička analiza podataka sa obrađenim parametrima navedenim u prethodnom paragrafu.

Kao polazišta u analizi su uzete pretpostavke da su sva ispitivanja provedena u istom referentnom laboratoriju, uz primjenu iste metodologije za sve analizirane parametre te da je tok podzemnih voda usmjeren od sjeverozapada prema jugoistoku (prikazano strelicama na slici iznad (Slika 7).

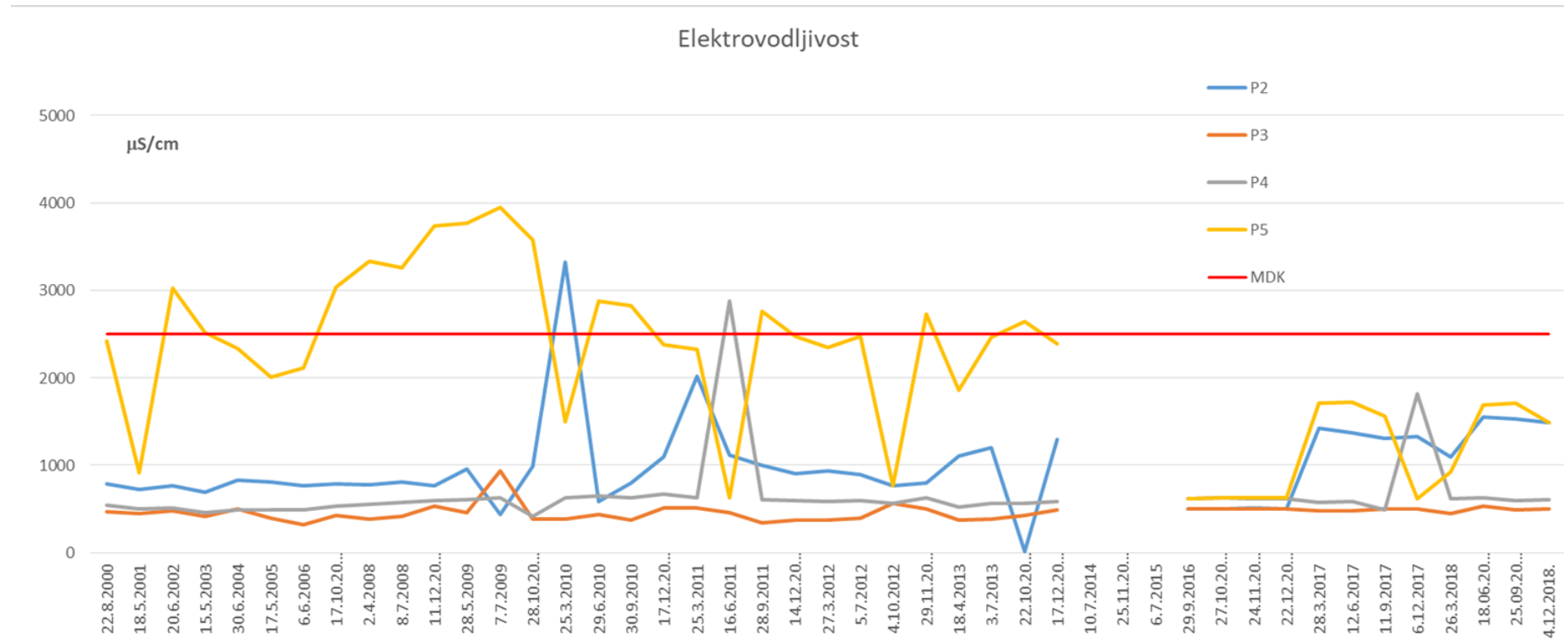
#### **4.1. ANALIZA PROMATRANIH PARAMETARA**

##### **4.1.1. PODZEMNE VODE**

###### **4.1.1. Elektrovodljivost**

Elektrovodljivost predstavlja sposobnost vode da provodi električnu energiju, što ovisi o ukupnoj koncentraciji otopljenih iona u vodi, njihovoj pokretljivosti, valenciji te temperaturi mjerenja te je jedan od temeljnih fizikalno-kemijskih pokazatelja kakvoća vode sukladno zakonskim odredbama. Elektrovodljivost je veća ukoliko dođe do otpadanja anorganskih spojeva, čije otopine većinom dobro provode struju, dok je kod organskih spojeva situacija obrnuta, odnosno prisutna je slaba elektrovodljivost s obzirom da su organski spojevi uglavnom loši vodiči.

Radom odlagališta otpada moguć je kontakt vode sa otpadom što posljedično može dovesti do pronosa različitih anorganskih i organskih tvari u podzemlje, odnosno podzemne vode. Povećana elektrovodljivost upućuje na onečišćenje i prisutnost soli, odnosno aniona i kationa koji nastaju kao posljedica otapanja topivih tvari iz otpada te procjeđivanja vode spovećanim koncentracijama iona do podzemlja. Sukladno navedenom, povećana elektrovodljivost u podzemnim vodama piezometara može se dovesti u vezu s djelovanjem odlagališta otpada. Trendovi kretanja elektrovodljivosti na piezometrima P2, P3, P4 i P5 su prikazani su na (Slika 8). Iz navedenog je vidljivo kako su najveće vrijednosti elektrovodljivosti zabilježene na piezometru P5, dok su za ostale piezometre vrijednosti elektrovodljivosti ispod maksimalnih dopuštenih koncentracija (2500  $\mu\text{s/cm}$ ) propisanih Uredbom o standardu kakvoće voda (NN 73/13, 151/14, 78/15, 61/16) i Okolišnoj dozvoli. Također je primjetan trend smanjenja vrijednosti elektrovodljivosti ispod maksimalnih dopuštenih koncentracija i na piezometru P5 u proteklih nekoliko godina (od kraja 2016. godine) što upućuje na smanjeni utjecaj procjednih voda, odnosno učinkovitost izvedene sanacije odlagališta.



Slika 8 Trendovi kretanja elektrovodljivosti na piezometrima P2, P3, P4 i P5 od 2000. do 2018. godine

#### **4.1.2. KPK i BPK<sub>5</sub>**

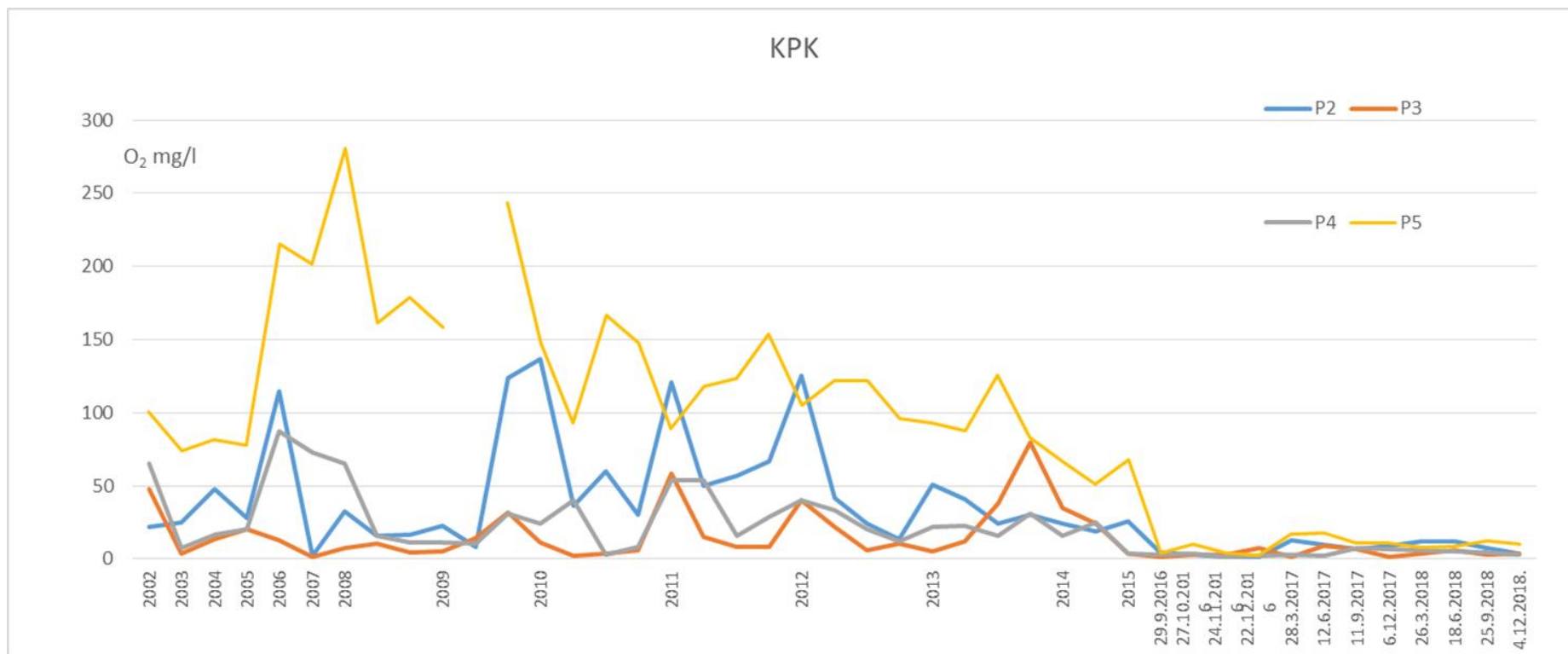
Na odlagalištu otpada dolazi do oksidacijsko-redukcijskih procesa koji uključuju organske i anorganske tvari. KPK, odnosno kemijska potrošnja kisika je jedan od osnovnih kemijskih pokazatelja kakvoće voda te označava količinu, odnosno masu utrošenog kisika koji je potreban da se razgrade tvari u 1 L vode (mg O<sub>2</sub>/L).

Biokemijska potrošnja kisika (BPK) je veličina koja označava količinu kisika (izraženu u mg/L) potrebnu da se razgradi (stabilizira) organska tvar u 1 L otpadne vode pomoću aerobnih bakterija, pri konstantnoj temperaturi od 20°C, tijekom 5 dana (BPK<sub>5</sub>) u kojima su biokemijski procesi najintenzivniji. Biokemijska potrošnja kisika ovisi o nizu parametara poput o vrsti otpadne tvari i biokemijske razgradnje, vrsti i broju organizama koji se nalaze u vodi, koncentraciji kisika, temperaturi i dr. U ovom kontekstu, biokemijska potrošnja kisika podrazumijeva kapacitet potrošnje kisika za razgradnju organskih tvari u otpadnim vodama, uz djelovanje bakterija.

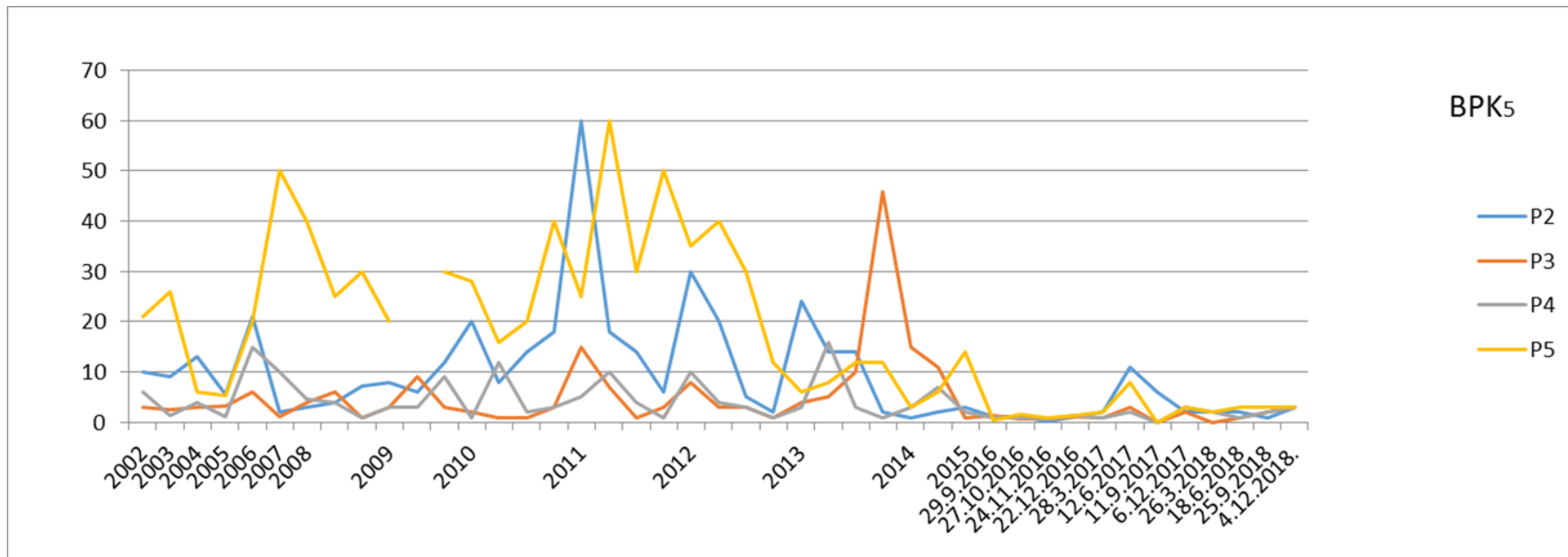
KPK i BPK vrijednosti upućuju na onečišćenje vode te prema koncentracijama otopljenog kisika možemo odrediti kakvoću vode. Na slikama ispod (Slika 8 i Slika 9) prikazani su trendovi kretanja BPK<sub>5</sub> i KPK.

Iz navedenih slika je vidljivo kako su koncentracije KPK najviše na piezometru P5 te piezometru P2. Također su vidljivi generalni trendovi smanjenja koncentracija KPK i BPK<sub>5</sub> na svim piezometrima, poglavito nakon 2012 godine.





Slika 9 Trendovi kretanja KPK na piezometrima P2, P3, P4 i P5 od 2002. do 2018. godine

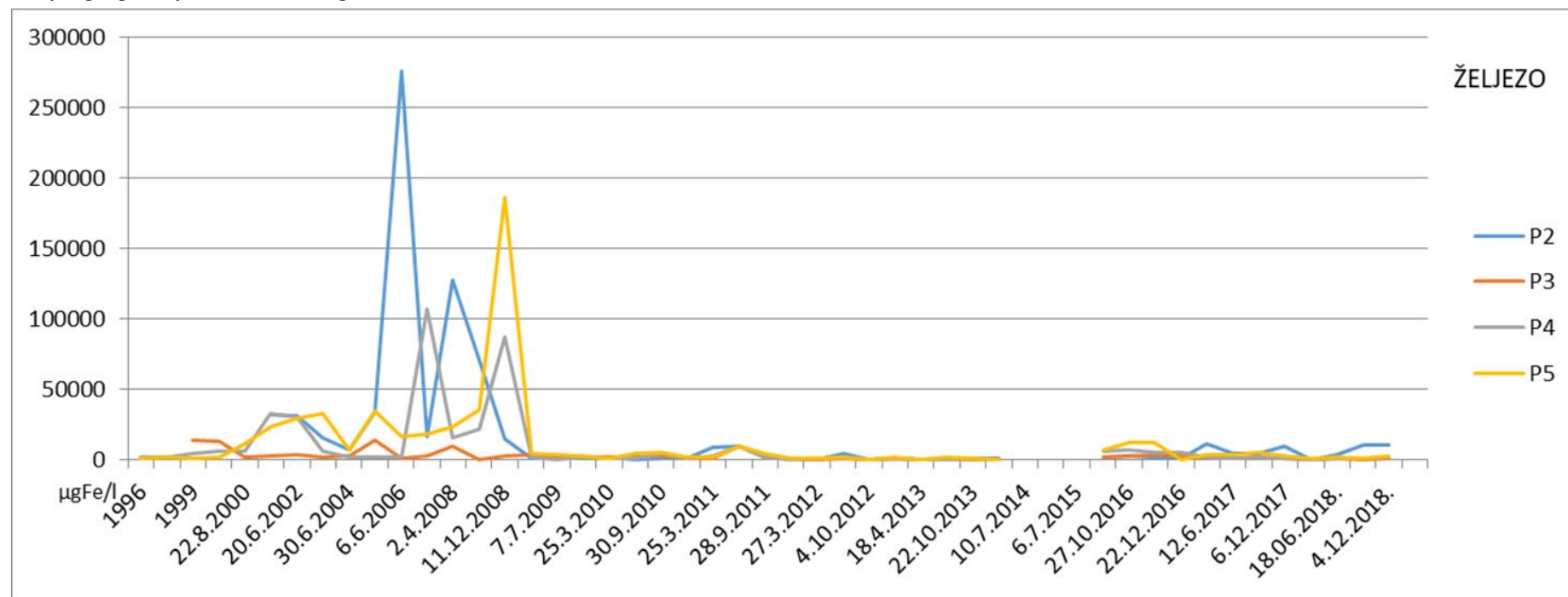


Slika 10 Trendovi kretanja BPK<sub>5</sub> na piezometrima P2, P3, P4 i P5 od 2002. do 2018. godine.

#### 4.1.3. Željezo

Željezo je važan mikroelement za ljude, no u prekomjernim dozama djeluje štetno na ljudsko tijelo. Povećane koncentracije željeza u vodi negativno djeluju na organoleptička svojstva vode te izazivaju замуćenje vodnog stupca. Koncentracije željeza iznad MDK mogu vodu učiniti neprikladnom za neke primjene te je stoga željezo jedan od glavnih metala koji je uključen u analizi vode. Teški metali mogu biti prisutni u procjednim vodama, a njihove koncentracije osim o sastavu otpada, također ovise i o fazi razgradnje. Najčešći oblik željeza koji se javlja u podzemnim vodama je u obliku  $Fe^{2+}$  koji formiraju organske molekule. Sukladno navedenom, koncentracije željeza su u direktnoj vezi s prisutnošću organske tvari na samom odlagalištu otpada. Organska tvar koja procjednom vodom dolazi s odlagališta otpada u podzemne vode stvara anaerobne uvjete koji omogućuju otpadanje željeza i mangana, uzrokujući pogoršanje kvalitete podzemne vode. Ovdje je potrebno napomenuti kako su aluvijalni nanosi (šljunkovito-pjeskovite naslage) rijeke Drave bogate solima željeza i mangana. Trendovi kretanja koncentracija željeza su prikazani na slici ispod (Slika 11).

Iz prikaza je vidljiv trend pada koncentracija željeza od 2009. godine na svim piezometrima.



Slika 11 Trendovi kretanja željeza na piezometrima P2, P3, P4 i P5 od 1991. do 2018. godine.

#### 4.1.2. POVRŠINSKE VODE

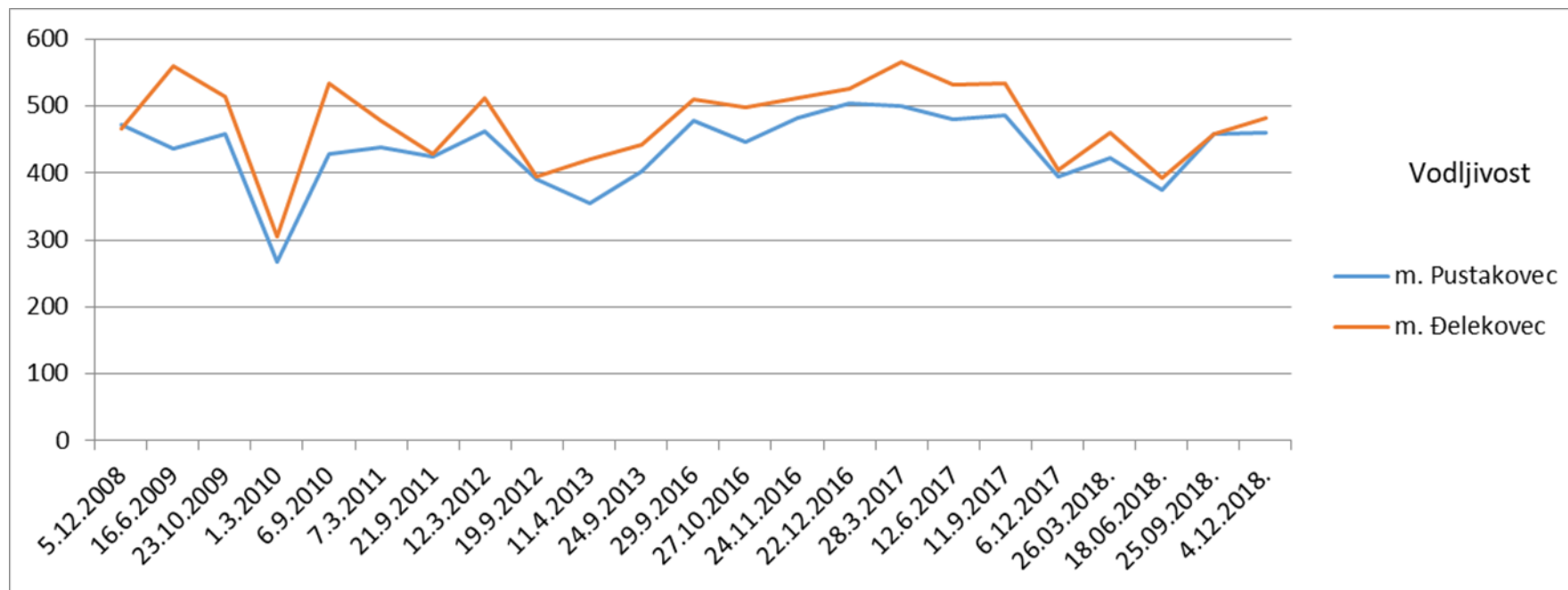
Jednako kao i za praćenje kakvoće površinskih voda, za praćenje kakvoće vodotoka najbližeg površinskog vodnog tijela - Gliboki odabrani su parametri koji imaju najdužu povijest ispitivanja te su stoga odabrani parametri elektrovodljivosti, KPK, BPK5 te teških metala bakra i cinka. Na slikama (Slika 12) prikazani su trendovi koncentracija elektrovodljivosti, KPK, BPK5, bakra i cinka.

Bakar je sastavni dio Zemljine kore te u tlu pojavljuje u obliku sulfida. Bakar u tlu najčešće dolazi vezan na Fe-Mn oksihidrokside,  $MnO_2$  i organsku tvar te mu je mobilnost niska u neutralnoj i alkalnoj sredini, a najveća pri pH 5,5. Pojava bakra u prirodnim vodama može biti i rezultat geokemijskog sastava slojeva vodonosnika, na što najčešće upućuju niske koncentracije bakra. Mobilnost bakra u tlu ovisi i o koncentracijama organskog uljika te je u tlu srednje mobilan, osim u uvjetima pH nižih od 5 i viših od 7. Danas se bakar upotrebljava u različitim industrijskim djelatnostima, pri uklanjanju merkaptana u preradi nafte, u poljoprivredi (fungicidi i to naročito u vinogradarstvu te iz organskih i mineralnih gnojiva), a u vodu također mogu ući i kao posljedica korozije vodoopskrbne mreže. Bakar je kao teški metal prisutan na odlagalištu otpada kao dio sastavni dio otpada, npr. plastike, ali iz mulja iz uređaja za obradu otpadnih voda.

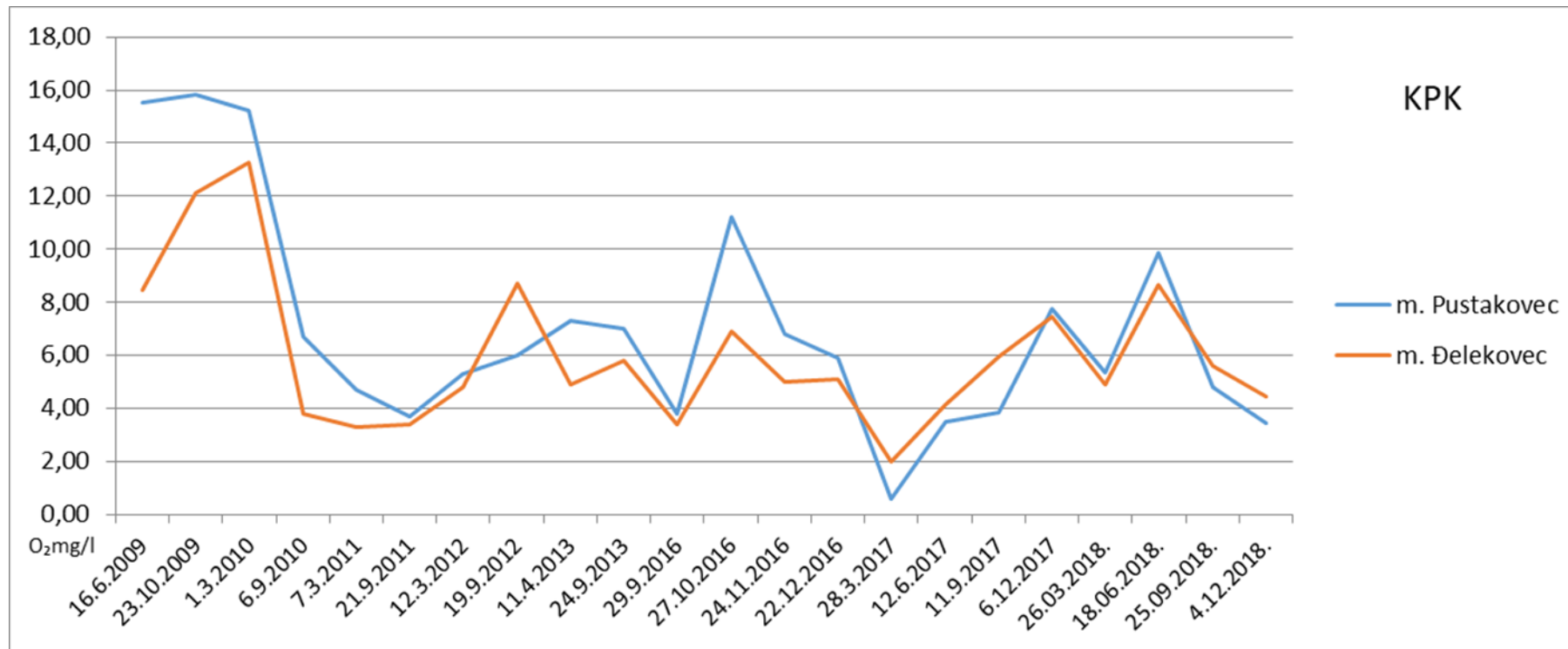
Cink je prirodno prisutan u malim koncentracijama u mnogim stijenama i tlu, najčešće u rudama sa sulfidima i u manjoj mjeri karbonatima. U tlima može biti apsorbiran na čestice minerala gline, Fe-Mn oksihidrokside, magnezijeve i kalcijeve karbonate te koloide u otopinama u tlu. Biogeni je element. Antropogeni izvori cinka u tlu najčešće su posljedica rada industrije, odlagališta otpada, pesticida, otpadnih voda, fosfatnih gnojiva i drugo. Mobilnost cinka u tlu je veća kod nižih pH vrijednosti. Povišene koncentracije cinka u vodama se mogu javiti kao posljedica korozije cjevovoda i armatura te uslijed poljoprivredne aktivnosti, gdje se cink u obliku cinkovog karbamata koristi kao pesticid (Elinder, 1986).

Promatrajući trendove i podatke ne može se donijeti zaključak da su uočljiva onečišćenja na nizvodnom profilu (Most Đelekovec) u odnosu na referentni uzvodni profil (Most Pustakovec).

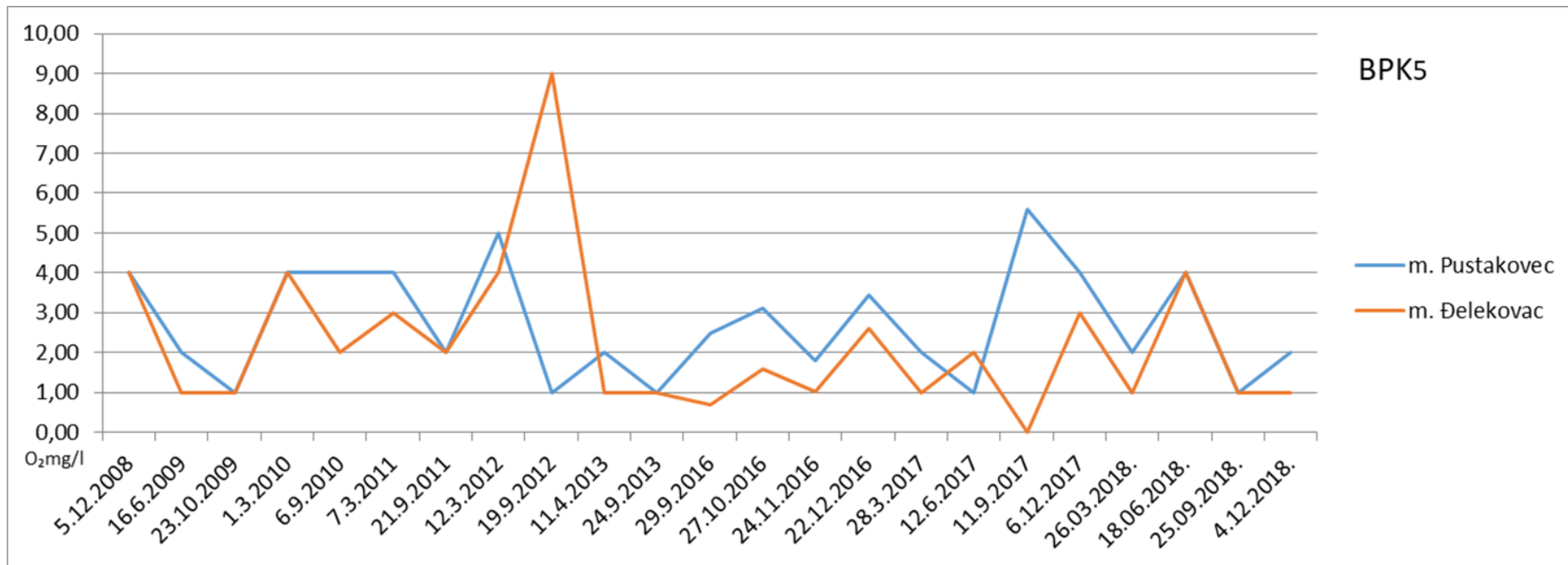
Pojedini podaci s izrazito povećanim vrijednostima nisu karakteristični za utjecaj procjednih voda odlagališta već upućuju na povremeno onečišćenje iz raspršenih izvora. To se npr. odnosi na vrijednost cinka izmjerenu na datum 12.06.2017. godine te 4.12.2018. godine.



Slika 12 Trendovi kretanja elektrovodljivosti površinskih voda uzorkovanih uzvodno (G1) i nizvodno (G2) od odlagališta otpada od 2008. do 2018. Godine

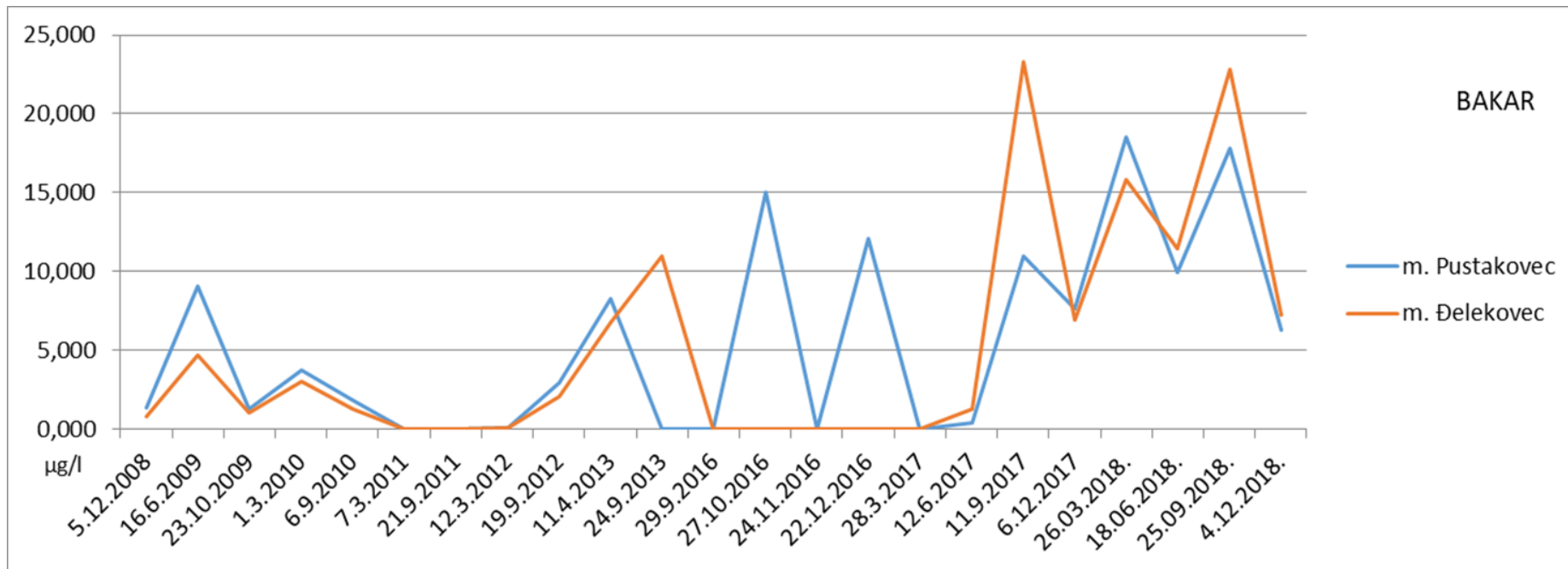


Slika 13 Trendovi kretanja KPK površinskih voda uzorkovanih uzvodno (G1) i nizvodno (G2) od odlagališta otpada od 2008. do 2018. godine

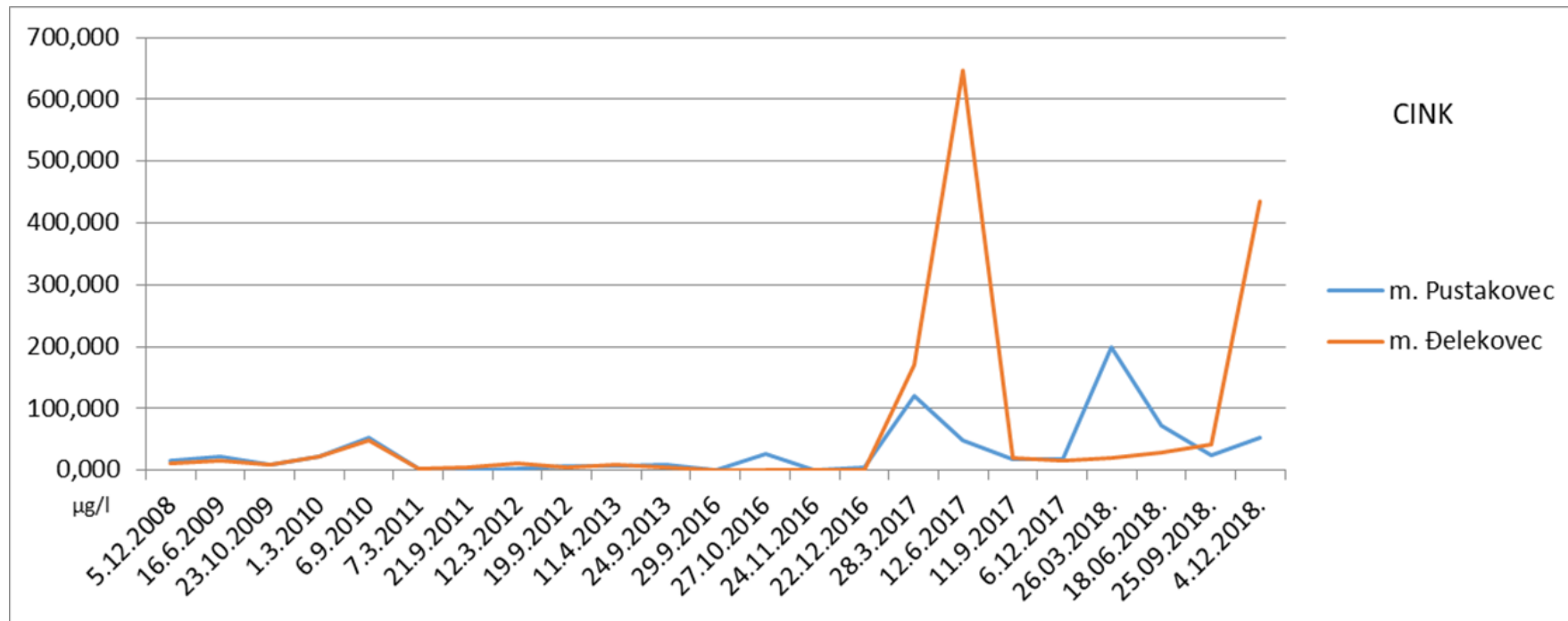


Slika 14 Trendovi kretanja BPK<sub>5</sub> površinskih voda uzorkovanih uzvodno (G1) i nizvodno (G2) od odlagališta otpada od 2008. do 2018. godine





Slika 15 Trendovi kretanja bakra u površinskim vodama uzorkovanih uzvodno (G1) i nizvodno (G2) od odlagališta otpada od 2008. do 2018. godine



Slika 16 Trendovi kretanja cinka u površinskim vodama uzorkovanih uzvodno (G1) i nizvodno (G2) od odlagališta otpada od 2008. do 2018. godine

## 4.2. STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA MJERENJA

### 4.2.1. Uvod

Kako bi se utvrdile moguće razlike u kvaliteti podzemnih i površinskih voda nastale uslijed rada odlagališta otpada Piškornica prije (V1) i nakon dovršetka sanacije (V2), statističkom analizom su obrađeni rezultati provedenih ispitivanja na uzorcima podzemnih voda iz piezometara (P2, P3, P4 i P5) na lokaciji odlagališta Piškornica i na uzorcima površinskih voda iz vodotoka Gliboki uzetih uzvodno (G1) i nizvodno (G2) od odlagališta otpada. Prilikom statističke analize, kao polazna pretpostavka uzeto je da su sva ispitivanja provedena u istom referentnom laboratoriju te da su svi parametri analizirani primjenom iste metodologije.

Cilj statističke analize je da se uz primjerenu pouzdanost procijeni djelotvornost sanacije odlagališta otpada Piškornica, koja je sukladno projektnom zadatku ugovora, provedena u razdoblju od 2005. do 2012. godine.

### 4.2.2. Statistička analiza

Statističkoj analizi podvrgnuti su rezultati ispitivanja uzoraka obrađenih od strane Zavoda za javno zdravstvo Koprivničko-križevačke županije. Sukladno Izvještaju radne skupine za odlagalište otpada Piškornica o monitoringu površinskih i podzemnih voda (2018.), laboratorijska ispitivanja su provedena u razdoblju 2000.-2018., kako je navedeno u tablici ispod (Tablica 1).

Tablica 1 Vremensko razdoblje provedenih istraživanja

Vremensko razdoblje	Provedena ispitivanja
2000. – 2018. godina	Ispitivanja podzemnih voda iz piezometara (P2, P3, P4, P5) na lokaciji odlagališta otpada
2008. – 2018. s prekidom u 2014. i 2015. godini	Ispitivanja površinske vode iz vodotoka Gliboki na lokaciji uzvodno i nizvodno od odlagališta otpada (G1, G2)

Statistički su obrađeni rezultati ispitivanja sljedećih uzoraka:

- 1) podzemne vode uzorkovane iz piezometara na lokacijama oko odlagališta otpada (P2, P3, P4 i P5) i to za sljedeće značajke kakvoće vode: KPK, BPK, elektrovodljivost i Fe.
- 2) površinske vode vodotoka Gliboki uzetih uzvodno (lokacija G1) i nizvodno (lokacija G2) od odlagališta otpada i to za sljedeće značajke kakvoće vode: KPK, BPK, elektrovodljivost, Cu i Zn.

Primjenom odgovarajućih statističkih metoda uspoređene su, za sve promatrane značajke kakvoće, i za sve lokacije (P2, P3, P4, P5, G1 i G2), srednje vrijednosti rezultata ispitivanja provedenih prije dovršetka sanacije tj. do kraja 2012. god (V1) s onim rezultatima ispitivanja provedenih nakon završetka sanacije tj. od 2013. do 2018. god. (V2).

### 4.2.3. Metode statističke analize

#### 4.2.3.1. T-test

T-test je statistički postupak koji se koristi za testiranje signifikantnosti (zamjetnosti) razlike između aritmetičkih sredina ( $X_{1S}$  i  $X_{2S}$ ) dva statistička uzorka veličine  $N_1$  odnosno  $N_2$  (broj opažanja u pojedinom statističkom uzorku).

Postavlja se hipoteza  $H_0$  da je  $X_{1S} = X_{2S}$  tj.:

$$H_0: X_{1S} - X_{2S} = 0$$

$$H_a: X_{1S} - X_{2S} \neq 0 \quad \text{alternativna hipoteza}$$

Iz rezultata ispitivanja (opažanja) izračunava se vrijednost slučajne varijable  $t$ . Izračunata vrijednost uspoređuje se s  $t_{krit.}$  koja se nalazi u tablicama raspodjele Studentove t-varijable za odgovarajući broj stupnjeva slobode (DF) i za odabranu razinu signifikantnosti ( $\alpha$ ). Najčešće se koristi razina signifikantnosti  $\alpha=0,05$  (95 %-tna pouzdanost). U nastavku se daje primjer primjene t-testa kod usporedbe srednjih vrijednosti za KPK dobivenih na lokaciji piezometra P2 prije dovršetka sanacije (V1) i nakon provedene sanacije (V2) (Tablica 2).

Tablica 2 Primjer provedbe t-testa (KPK, P2, V1/V2)

	Variable 1(V1)	Variable 2(V2)
Mean	50,89	17,47
Variance	1751,043	228,698
Observations	24	15
Hypothesized Mean Difference	0	
df	31	
t Stat	3,558	
P(T<=t) one-tail	0,000613	
t Critical one-tail	1,695519	
P(T<=t) two-tail	0,001226	
t Critical two-tail	2,039513	

Budući da je  $t \text{ Stat} (3,558) > t \text{ Crit} (2,039)$  ne prihvaća se hipoteza  $H_0$  da ne postoje razlike između srednjih vrijednosti promatranih varijabli, već se prihvaća alternativna hipoteza  $H_a$ , tj. da je  $V1 > V2$ . Znači, uz vjerojatnost pogreške od  $\alpha=0,05$  (95 %-tna pouzdanost), možemo zaključiti da je nakon provedene sanacije na lokaciji piezometra P2 došlo do signifikantnog smanjenja vrijednosti za KPK.

#### 4.2.3.2. Analiza varijance

Analiza varijance (ANOVA) je tehnika kojom se mogu testirati razlike između većeg broja srednjih vrijednosti odjednom.

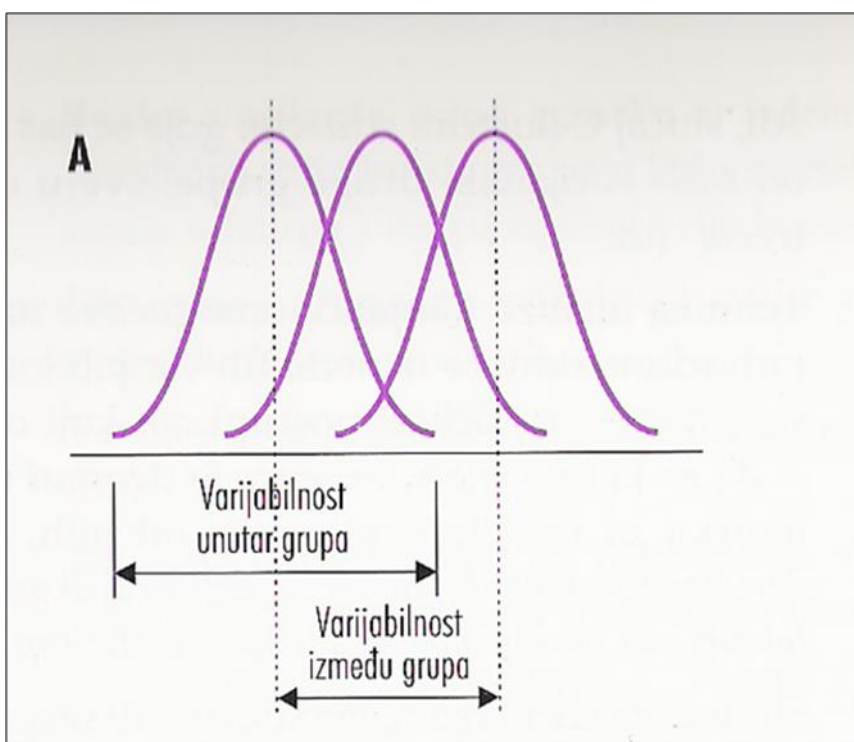
$$H_0: X_{1S} = X_{2S} = X_{3S} = \dots = X_{NS}, \text{ tj. nema razlika između srednjih vrijednosti,}$$

$$H_a: \text{ postoje razlike između srednjih vrijednosti, tj. barem je jedna veća/manja od ostalih.}$$

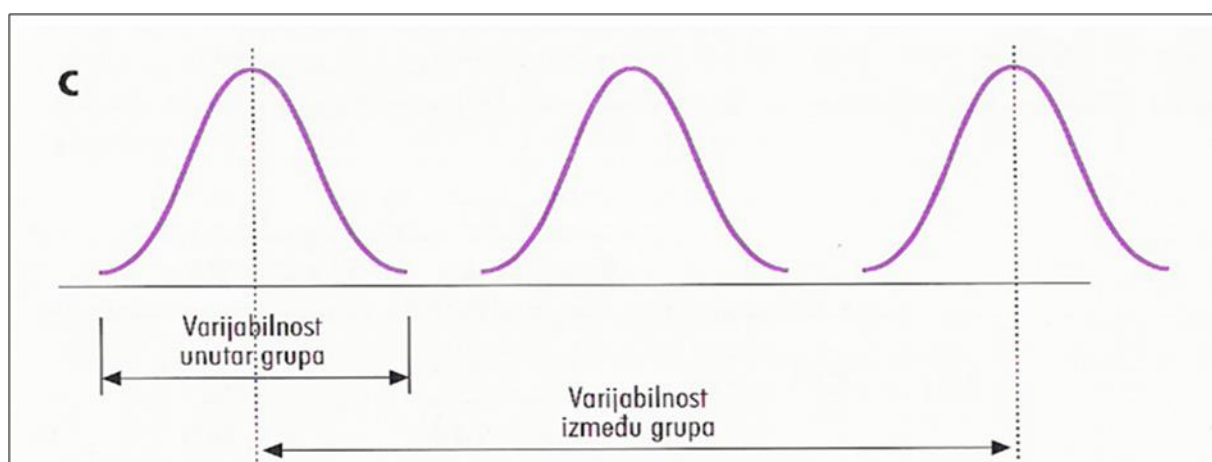
Provedba analize varijance temelji se na proračunu i ocjeni odnosa varijabilnosti unutar grupa (slučajna greška) i varijabilnosti između grupa (utjecaj promatranog faktora).

Ukoliko je varijabilnost između grupa manja od varijabilnosti unutar grupa, zaključuje se da je utjecaj promatranog faktora manji od slučajne greške i prihvaća se hipoteza  $H_0$ .

Slika 17). U protivnom, ako je varijabilnost između grupa veća od varijabilnosti unutar grupa, prihvaća se hipoteza  $H_a$  i zaključuje da su razlike signifikantne, odnosno da nisu slučajne već da su posljedica djelovanja promatranog faktora (Slika 18).



Slika 17 Varijabilnost između grupa < varijabilnosti unutar grupa, Izvor: Čuljak, 2011.



Slika 18 Varijabilnost između grupa > varijabilnosti unutar grupa, Izvor: Čuljak, 2011.

Metodološki prvo se izračunavaju sume kvadrata odstupanja pojedinačnih vrijednosti od odgovarajućih srednjih vrijednosti ( $SS_{ukup}$ ,  $SS_{unutar}$ ,  $SS_{između}$ ) a zatim varijance  $s^2_{ukup}$ ,  $s^2_{unutar}$  i  $s^2_{između}$  na način da se odgovarajuće sume kvadrata (SS) podijele s pripadajućim brojem stupnjeva slobode (DF).

Nakon toga se izračunava vrijednost od  $F = s_{između}^2 / s_{unutar}^2$  i uspoređuje s  $F_{krit}$  koja se nalazi u tablicama raspodjele slučajne varijable F za odgovarajući broj stupnjeva slobode i odabranu 95 %-tnu razinu signifikantnosti ( $\alpha = 0,05$ ).

U nastavku se daje primjer provedene analize varijance kod usporedbe srednjih vrijednosti za KPK dobivenih prije dovršetka sanacije odlagališta (V1) za sve lokacije piezometara (P2, P3, P4, P5) (Tablica 3).

Tablica 3 Primjer provedbe analize varijance (KPK, V1,P2 /P3/P4/P5)

Groups	Count	Sum	Average	Variance		
Column 1 (P2)	24	1221,38	50,89	1751,0426		
Column 2 (P3)	24	363,55	15,15	222,45279		
Column 3 (P4)	24	747,15	31,13	560,82877		
Column 4 (P5)	23	3258,77	141,69	3004,9011		
ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	223617,3	3	74539,1099	54,52739	2,9024E-20	2,7047034
Within Groups	124397,3	91	1367,003088			
Total	348014,6	94				

Budući da je  $F (54,527) > F_{crit} (2,707)$  ne prihvaća se hipoteza  $H_0$  da ne postoje razlike između srednjih vrijednosti promatranih varijabli, već se prihvaća alternativna hipoteza  $H_a$ , tj. da je vrijednost od KPK na lokaciji P5 (141,69) signifikantno (zamjetno) veća od vrijednosti KPK na ostale tri lokacije (P2, P3, P4), uz vjerojatnost pogreške od  $\alpha=0,05$ .

#### 4.2.4. Rezultati statističke analize

##### 4.2.4.1. Podzemne vode

Rezultati provedenih t-testova koji se odnose na vrijednosti promatranih značajki kakvoće (KPK, BPK, elektrovodljivost, i Fe) prikazani su u tablici ispod (Tablica 4).

Tablica 4 Signifikatnost razlika između vrijednosti izmjerenih prije (V1) i nakon (V2) dovršene sanacije odlagališta na lokacijama P2 do P5 (t-test, razina signifikantnosti 95 %), N=broj mjerenja)

Značajka	Piezometar	V1 (prije san.)	V2 (nakon san.)	t-eksp.	Napomena
KPK	P2	50,89 (N=24)	17,47 (N=15)	3,56	V1>V2
	P3	15,15 (N=24)	15,4 (N=15)	0,04	V1=V2
	P4	31,13 (N=24)	11,05 (N=15)	3,65	V1>V2
	P5	141,69 (N=23)	43,48 (N=15)	5,93	V1>V2
BPK	P2	13,16 (N=24)	5,64 (N=15)	2,44	V1>V2
	P3	3,88 (N=24)	6,76 (N=15)	1,15	V1=V2
	P4	4,91 (N=24)	2,96 (N=15)	1,47	V1=V2

	P5	28,67 (N=23)	5,22 (N=15)	7,55	V1>V2
VODLJIV.	P2	949 (N=27)	923 (N=12)	0,15	V1=V2
	P3	515 (N=25)	472 (N=12)	1,13	V1=V2
	P4	649 (N=26)	682 (N=12)	0,24	V1=V2
	P5	2330 (N=27)	1454 (N=12)	2,45	V1>V2
	Fe	P2	25191,2 (N=27)	3548,5 (N=12)	1,96
	P3	2993,3 (N=26)	1579,2 (N=12)	1,995	V1=V2
	P4	11676,6 (N=27)	2682,8 (N=12)	2,02	V1=V2
	P5	15292,7 (N=27)	4354,3 (N=12)	1,77	V1=V2

Testiranjem signifikantnosti razlika među srednjim vrijednostima za rezultate ispitivanja na lokacijama piezometara P2 do P 5 provedenim prije (V1) i nakon (V2) dovršetka sanacije odlagališta, moguće je zaključiti o utjecaju promatranog faktora (sanacija odlagališta) na kakvoću podzemnih voda.

#### 4.2.4.1.1. KPK

Rezultati t-testa za KPK (Tablica 4) pokazuju da je nakon provedene sanacije na lokacijama P2, P4 i P5 došlo do signifikantnog (zamjetnog) smanjenja vrijednosti za tu značajku kakvoće. Jasnija slika o utjecaju provedene sanacije na vrijednosti za KPK dobije iz rezultata provedene analize varijance (ANOVA) prikazanih u tablicama ispod (Tablica 5 i Tablica 6).

Tablica 5 Analiza varijance za vrijednosti značajke KPK na lokacijama P2 do P5 prije dovršene sanacije

Grupa	N	Suma	Sr. vrijednost	Varianca		
P2	24	1221,38	50,89	1751,0426		
P3	24	363,55	15,15	222,45279		
P4	24	747,15	31,13	560,82877		
<b>P5</b>	23	3258,77	<b>141,69</b>	3004,9011		
ANOVA						
Izvor varijacija	SS	df	MS	F	P-vrijednost	F krit
Između grupa	223617,3	3	74539,1099	54,52739	2,9024E-20	2,7047034
Unutar grupa	124397,3	91	1367,003088			
Ukupno	348014,6	94				

F>Fkrit – razlike su signifikantne

Tablica 6 Analiza varijance za vrijednosti značajke KPK na lokacijama P2 do P5 nakon dovršene sanacije

Grupa	N	Suma	Sr. vrijednost	Varianca		
P2	15	262,12	17,47	228,69796		
P3	15	231,02	15,4	461,80418		
P4	15	165,76	11,05	102,61599		
<b>P5</b>	15	652,18	<b>43,47</b>	1670,9321		
ANOVA						
Izvor varijacija	SS	df	MS	F	P-vrijednost	F krit
Između grupa	9677,305	3	3225,768293	5,2365301	0,00294979	2,7694309
Unutar grupa	34496,7	56	616,0125538			

Ukupno	44174,01	59				
--------	----------	----	--	--	--	--

F>Fkrit – razlike su signifikantne

Iz prikazanih rezultata za zaključuje se da su vrijednosti za KPK na lokaciji P5 signifikantno veće od onih na ostalim lokacijama (P2 do P4), uz napomenu su razlike među lokacijama za vrijednosti izmjerene nakon provedene sanacije odlagališta manje od razlika za vrijednosti izmjerene prije provedene sanacije.

#### 4.2.4.1.2. BPK

Rezultati t-testa (Tablica 4.) pokazuju da na lokacijama P2 i P5 postoji signifikantno smanjenje vrijednosti BPK nakon provedene sanacije, dok na ostale dvije lokacije nije utvrđen signifikantan utjecaj tog faktora na rezultate za BPK.

Tablica 7 Analiza varijance za vrijednosti značajke BPK na lokacijama P2 do P5 prije dovršene sanacije

Grupa	N	Suma	Sr. vrijednost	Varianca		
P2	24	315,78	13,16	150,47068		
P3	24	93,14	3,88	10,6910775		
P4	24	117,92	4,91	15,8043362		
<b>P5</b>	23	659,3	<b>28,67</b>	188,232372		
ANOVA						
Izvor varijacija	SS	df	MS	F	P-vrijednost	F krit
Između grupa	9184,92479	3	3061,641597	33,9298635	8,2323E-15	2,7047034
Unutar grupa	8211,332341	91	90,23442133			
Ukupno	17396,25713	94				

F>Fkrit - razlike signifikantne

Tablica 8 Analiza varijance za vrijednosti značajke BPK na lokacijama P2 do P5 nakon dovršene sanacije

Grupa	N	Suma	Sr. vrijednost	Varianca		
P2	15	84,68	5,65	48,3586695		
P3	15	101,79	6,79	137,944311		
P4	15	44,79	2,99	15,8066829		
<b>P5</b>	15	78,26	<b>5,22</b>	21,6572067		
ANOVA						
Izvor varijacija	SS	df	MS	F	P-vrijednost	F krit
Između grupa	114,1347067	3	38,04490222	0,68008105	0,56792265	2,7694309
Unutar grupa	3132,736187	56	55,94171762			
Ukupno	3246,870893	59				

F>Fkrit - razlike signifikantne

Analiza varijance (Tablica 7.) pokazuje da postoje signifikantne razlike među srednjim vrijednostima BPK za pojedine lokacije prije provedene sanacije odlagališta i to zbog visokih vrijednosti za BPK na lokaciji P5. S druge strane, nakon što je provedena sanacija odlagališta zamjetno se smanjila vrijednost za BPK na lokaciji P5 (Tablica 4.) pa rezultati analize varijance (Tablica 8) pokazuju da nema signifikantnih razlika među srednjim vrijednostima za BPK.



#### 4.2.4.1.3. Elektrovodljivost

Iz tablice ranije (Tablica 4) vidljivo je da je do signifikantnih promjena zbog djelovanja promatranog faktora (sanacija odlagališta) došlo samo za vrijednosti izmjerene na lokaciji P5.

Tablica 9 Analiza varijance za vrijednosti značajke elektrovodljivost na lokacijama P2 do P5 prije dovršene sanacije

Grupa	N	Suma	Sr. vrijednost	Varianca		
P2	27	25634	949	300803,558		
P3	25	11746	469	20255,5567		
P4	26	17543	675	212927,885		
<b>P5</b>	27	70411	<b>2608</b>	851862,849		
ANOVA						
Izvor varijacija	SS	df	MS	F	P-vrijednost	F krit
Između grupa	75705676,59	3	25235225,53	71,2368207	7,9242E-25	2,694618
Unutar grupa	35778657,07	101	354244,1294			
Ukupno	111484333,7	104				

F>Fkrit - razlike signifikantne

Tablica 10 Analiza varijance za vrijednosti značajke elektrovodljivost na lokacijama P2 do P5 nakon dovršene sanacije

Grupa	N	Suma	Sr. vrijednost	Varianca		
P2	12	11069,64	922	231559,153		
P3	12	5656	471	2322,06061		
P4	12	8180	682	128086,242		
<b>P5</b>	12	17453	<b>1454</b>	642147,902		
ANOVA						
Izvor varijacija	SS	df	MS	F	P-vrijednost	F krit
Između grupa	6456939,922	3	2152313,307	8,57396829	0,0001354	2,816466
Unutar grupa	11045268,93	44	251028,8393			
Ukupno	17502208,85	47				

F>Fkrit - razlike signifikantne

Analiza varijance (Tablica 9 i Tablica 10.) pokazuje da su vrijednosti za elektrovodljivost na lokaciji P5 usprkos njihovom smanjenju nakon provedene sanacije, još uvijek veće u odnosu na vrijednosti izmjerene na ostalim lokacijama (P2 do P4).

#### 4.2.4.1.4. Željezo

Iz podataka prikazanih u tablici ranije (Tablica 4.) ne može se donijeti zaključak o postojanju signifikantnih razlika među vrijednostima izmjerenim prije i nakon dovršetka sanacije odlagališta, i to za sve lokacije piezometara (P2, P3, P4 i P5).

Tablica 11 Analiza varijance za vrijednosti značajke Fe na lokacijama P2 do P5 prije dovršene sanacije

Grupa	N	Suma	Sr. vrijednost	Varianca		
P2	27	680161,7	25191,17	3260654256		
P3	26	75665,83	2910,22	10407941,35		

P4	27	347085,4	12855,01	677272322,4		
P5	27	467869,9	<b>17328,51</b>	1272623131		
ANOVA						
<i>Izvor varijacija</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>F krit</i>
Između grupa	6864127674	3	2288042558	1,736245384	0,1642135	2,69284113
Unutar grupa	1,35734E+11	103	1317810592			
Ukupno	1,42599E+11	106				

F<Fkrit - razlike nisu signifikantne

Tablica 12 Analiza varijance za vrijednosti značajke Fe na lokacijama P2 do P5 nakon dovršene sanacije

<i>Grupa</i>	<i>N</i>	<i>Suma</i>	<i>Sr. vrijednost</i>	<i>Varianca</i>		
P2	12	42581,78	3548,48	13917295,45		
P3	12	18950,5	1579,21	1317403,687		
P4	12	32193,72	2682,81	6140002,668		
P5	12	52251,7	<b>4354,31</b>	18983249,1		
ANOVA						
<i>Izvor varijacija</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>F krit</i>
Između grupa	50969414,52	3	16989804,84	1,683911542	0,18424486	2,81646582
Unutar grupa	443937460	44	10089487,73			
Ukupno	494906874,5	47				

F<Fkrit - razlike nisu signifikantne

Podaci za analizu varijance prikazani u tablicama iznad (Tablica 11 i Tablica 12) pokazuju da nema signifikantnih razlika među srednjim vrijednostima rezultatima ispitivanja dobivenih na lokacijama piezometara P2 do P5. Visoke vrijednosti za varijance ukazuju na to da postoji veliko rasipanje pojedinačnih rezultata iz kojih se računa srednja vrijednost.

#### 4.2.4.2. Površinske vode

Rezultati provedenih t-testova za srednje vrijednosti značajki KPK, BPK, elektrovodljivost, Cu i Zn dobivenih ispitivanjem uzorka površinske vode vodotoka Gliboki prikazani su u tablicama ispod (Tablica 13 i Tablica 14 ).

Tablica 13 Signifikantnost razlika između vrijednosti izmjerenih prije (V1) i nakon (V2) dovršene sanacije odlagališta na lokacijama potoka Gliboki G1 (uzvodno) i G2 (nizvodno) (t-test, razina signifikantnosti 95 %) N = broj mjerenja))

Značajka	Lokacija	V1 (prije san.) N=9	V2 (nakon san.) (N=13)	t-eksp.	Napomena
KPK	G1	10,1	5,97	1,97	V1=V2
	G2	8,76	5,37	1,67	V1=V2
BPK	G1	3	2,58	0,68	V1=V2
	G2	3,33	1,53	2,07	V1>V2
VODLJIV.	G1	420	445	1,05	V1=V2
	G2	466	481	0,54	V1=V2

Cu	G1	2,25	7,74	2,2	V1<V2
	G2	1,43	7,63	2,11	V1<V2
Zn	G1	15,26	42,64	1,36	V1=V2
	G2	14,65	73,61	0,98	V1=V2

Tablica 14 Signifikantnost razlika između vrijednosti izmjerenih na lokacijama potoka Gliboki G1 (uzvodno) i G2 (nizvodno) prije (V1) i nakon (V2) dovršene sanacije odlagališta (t-test, razina signifikantnosti 95 %)

Značajka	Uzorkovano	G1	G2	t-eksp.	Napomena
KPK	V1 (prije san.) (N=9)	10,1	8,76	0,48	G1=G2
	V2 (nakon san.) (N=13)	5,97	5,37	0,65	G1=G2
BPK	V1 (prije san.) (N=9)	3	3,33	0,68	G1=G2
	V2 (nakon san.) (N=13)	2,58	1,53	2,12	G1>G2
VODLJIV.	V1 (prije san.) (N=9)	420	466	1,37	G1=G2
	V2 (nakon san.) (N=13)	445	481	1,77	G1=G2
Cu	V1 (prije san.) (N=9)	2,25	1,43	0,74	G1=G2
	V2 (nakon san.) (N=13)	7,74	7,63	0,03	G1=G2
Zn	V1 (prije san.) (N=9)	15,26	14,65	0,08	G1=G2
	V2 (nakon san.) (N=13)	42,64	73,61	0,6	G1=G2

Iz rezultata prikazanih u tablici ranije (Tablica 13.) uočljivo je da za promatrane parametre kakvoće nisu ustanovljene signifikantne razlike za vrijednosti dobivene ispitivanjem prije i nakon provedene sanacije, uz dvije iznimke:

- a) na lokaciji G2 (nizvodno) postoji signifikantno smanjenje vrijednosti parametra BPK nakon provedene sanacije
- b) uočljiv je signifikantan porast vrijednosti za udio Cu na uzorcima ispitanim nakon provedene sanacije odlagališta i to uzvodno (G1) i nizvodno (G2) od odlagališta.

Mogući uzrok povećanog udjela Cu su poljoprivredne aktivnosti na tom području, što potencijalno utječe i na rezultate ispitivanja. Iz podataka prikazanih u tablici iznad (Tablica 14) zaključuje se da lokacija uzorkovanja (G1 uzvodno, G2 nizvodno) ne utječe signifikantno na vrijednosti parametara kakvoće i to neovisno o vremenu provedbe ispitivanja (V1 prije sanacije, V2 nakon sanacije).

Na temelju rezultata provedene statističke analize za izmjerene vrijednosti promatranih značajki kakvoće zaključuje se da utjecaj odlagališta otpada Piškornica na kakvoću površinske vode vodotoka Gliboki nije zamjetan.

#### 4.2.5. Zaključci statističke analize

- I. Rezultati ispitivanja oborinskih, podzemnih, procjednih i površinskih voda provedeni u ožujku, lipnju i rujnu 2018. godine ne pokazuju značajnija odstupanja u vrijednostima i trendovima u odnosu na povijesne nizove ispitivanja.
- II. Statistički su obrađeni i prikazani trendovi rezultati ispitivanja uzoraka za:
  - podzemne vode uzorkovane iz piezometara na lokacijama oko odlagališta otpada (P2, P3, P4 i P5) i to za sljedeće značajke kakvoće vode: KPK, BPK, elektrovodljivost i Fe te
  - površinske vode vodotoka Gliboki uzetih uzvodno (lokacija G1) i nizvodno (lokacija G2) od odlagališta otpada i to za sljedeće značajke kakvoće vode: KPK, BPK, elektrovodljivost, Cu i Zn

Cilj statističke analize i analize trendova bio je da se uz primjerenu pouzdanost procijeni djelotvornost sanacije odlagališta otpada Piškornica koja je sukladno projektnom zadatku ugovora provedena u razdoblju od 2005. do 2012. godine.

- III. Na temelju rezultata statističke analize zaključuje se:

- Podzemne vode

Za vrijednosti udjela Fe za niti jednu lokaciju piezometra (P2 do P5) nisu utvrđene signifikantne razlike među rezultatima ispitivanja provedenih prije dovršetka sanacije (V1) i rezultata ispitivanja udjela Fe za rezultate dobivene nakon provedene sanacije (V2). Osim toga, nema signifikantnih razlika među srednjim vrijednostima rezultata ispitivanja dobivenih na lokacijama piezometara P2 do P4 u odnosu na vrijednosti na lokaciji piezometra P5. Visoke vrijednosti za varijance ukazuju na to da postoji veliko rasipanje pojedinačnih rezultata ispitivanja udjela Fe iz kojih se računa srednja vrijednost.

Iz provedene statističke analize zaključuje se kako je provedenom sanacijom odlagališta otpada Piškornica došlo do signifikantnog smanjenja vrijednosti za KPK, BPK i elektrovodljivost na lokaciji piezometra P5 i u nešto manjoj mjeri na lokacijama P2 (za vrijednosti od KPK, BPK) i P4 (za vrijednosti od KPK). Iz prikazanih rezultata za zaključuje se da su vrijednosti za KPK i elektrovodljivost na lokaciji P5 signifikantno veće od onih na ostalim lokacijama (P2 do P4), uz napomenu su razlike među lokacijama za vrijednosti izmjerene nakon provedene sanacije odlagališta manje od razlika za vrijednosti izmjerene prije provedene sanacije.

Na temelju provedene analize rezultata laboratorijskih ispitivanja zaključuje se da je provedena sanacija odlagališta rezultirala značajnom pozitivnom promjenom stanja podzemnih voda u okolišu odlagališta u odnosu na vrijednosti za KPK, BPK i elektrovodljivost, dok se rezultati ispitivanja udjela Fe nisu signifikantno promijenili nakon provedene sanacije odlagališta.

Najveće promjene vrijednosti promatranih značajki kakvoće vode nakon provedene sanacije odlagališta utvrđene su na lokaciji P5, koja se nalazi pokraj sjeveroistočnog dijela odlagališta, dok na lokaciji piezometra P3, koji se nalazi pokraj jugozapadnog dijela odlagališta, nisu utvrđene signifikantne promjene vrijednosti promatranih značajki kakvoće vode nakon provedene sanacije odlagališta.

- Površinske vode

Na temelju rezultata provedene statističke analize za izmjerene vrijednosti promatranih značajki kakvoće KPK; BPK; elektrovodljivost, Cu i Zn zaključuje se da utjecaj odlagališta otpada Piškornica na kakvoću površinske vode vodotoka Gliboki nije zamjetan, što je u skladu sa zaključcima iz dokumenta (1), uz napomenu da je mogući uzrok povećanja udjela Cu nakon provedene sanacije na tom području uzrokovan utjecajem poljoprivrednih aktivnosti na rezultate ispitivanja.

- IV. Kod određenog broja parametara vrijednosti njihovog možebitnog udjela su konstantno ispod granica detekcije (ugljikovodici; kod površinskih voda benzen, toluen, etil-benzen, o-m-p-ksilen, stiren a kod podzemnih voda krom VI te također benzen, toluen, etil-benzen, o-m-p-ksilen, stiren. Ukoliko se takovi trendovi nastave bit će opravdano razmotriti daljnju potrebu njihovog praćenja trošenja financijskih sredstava.

## 5. NUMERIČKI MODEL TOKA PODZEMNE VODE I PRONOSA ZAGAĐENJA

### 5.1. Uvod

U ovoj studiji će se koristiti program Fi (Gotovac, 2002; Jović, 1993; Urumović, 2003) za numeričko modeliranje tečenja podzemne vode i pronosa zagađenja na širem području odlagališta Piškornica. Ovo je program za elektronično računalo napisan u jeziku Fortran, a koristi se za numeričku analizu stacionarnog procjeđivanja kroz dvodimenzionalni porozni medij metodom konačnih elemenata. U današnje vrijeme numeričko modeliranje je veoma popularno i rašireno, poglavito zbog sve većeg korištenja računala u inženjerskom radu. Najveća vrijednost numeričkog modeliranja je njegova generalnost, mogućnost opisivanja proizvoljne geometrije, heterogenog poroznog medija, različitih rubnih uvjeta i opterećenja. S druge strane numeričke metode omogućavaju rješavanje različitih kompleksnih problema na istoj ili neznatno modificiranoj programskoj shemi, ali zbog toga traže i odgovarajuće znanje kako numerike, tako i fizikalne pojave koja se modelira.

U ovom programskom rješenju koriste se dvije formulacije: potencijalna i strujna. Za diskretizaciju geometrije područja koriste se osmočvorni konačni elementi. Hidraulička propusnost je zadana punim tenzorom propusnosti koji je konstantan na elementu, ali varijabilan po području. To omogućava promatranje stacionarnog tečenja kroz heterogeni akvifer ili vodonosnik (svaki element može imati različit tenzor propusnosti). Prisilni rubni uvjeti zadaju su u obliku specificirane piezometarske visine (potencijala) ili strujne funkcije. Uključene su točke crpljenja i prihranjivanja kao koncentrirani dotoci u čvorove mreže, distribuirano opterećenje ili produkcija traženog polja po području (konstatno na elementu) i fluksevi po rubnim stranicama elemenata koji se promatraju kao jednodimenzionalni elementi i odvojeno se zadavaju. Tako zadani fluksevi predstavljaju prirodne rubne uvjete. Sustav jednažbi se rješava frontalnim postupkom s već ugrađenim predfrontom koji uključuje inicijalizaciju zadnjeg pojavljivanja čvora u listi veze s negativnim predznakom.

Za formulaciju potencijalne funkcije zadaju se opterećenje i rubni fluksevi, te se može iterativnim putem (maksimalni broj iteracija je 25) riješiti i razina vodnog lica u vodonosniku sa slobodnim vodnim licem i vrelnom plohom. U tom slučaju dolazi do sukcesivne promjene geometrije na elementima koji sadrže čvorove na vodnom licu u svakom iterativnom koraku. Za formulaciju strujne funkcije ne zadaje se opterećenje jer ta formulacija ne može uključiti nikakve promjene unutar domene. Također se ne može riješiti problem slobodnog vodnog lica. U rubnim čvorovima u kojima nije zadan rubni uvjet, automatski se smatra da u tom čvoru nema fluksa, odnosno da se radi o nepropusnom dijelu granice.

## 5.2. Matematički model procjeđivanja

### 5.2.1. Darcy-ev zakon

Darcy-ev zakon procjeđivanja kroz porozni medij u punom matričnom obliku je definiran ovim izrazom:

$$q_i(x) = -K_{ij}(x) \frac{\partial h(x)}{\partial x_j} \quad (5.1)$$

gdje je  $q$  Darcy – eva brzina ili specifično istjecanje [L/T],  $h$  je piezometarska visina [L],  $x$  je prostorna koordinata ( $x, y, z$ ) ili ( $x_1, x_2, x_3$ ), a  $K$  [L/T] je simetričan tenzor hidrauličke propusnosti:

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{12} & K_{22} & K_{23} \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

gdje je  $k_{ij}$  – komponenta tenzora hidrauličke propusnosti koja karakterizira propusnost sredine u  $i$ -tom koordinatnom smjeru zbog toka u  $j$ -tom koordinatnom smjeru.

Darcy-ev zakon na ovaj način definira srednje istjecanje kroz cijeli odabrani presjek. Tečenje podzemne vode karakterizira tok kroz porozni medij koji ima dvije faze: čvrstu i pornu fazu. Pošto se tok odvija samo kroz povezani sustav porne faze stvarna brzina toka je:

$$v_i = \frac{q_i}{n} \quad (5.3)$$

gdje je  $v$  [L/T] stvarna brzina toka,  $q$  [L/T] je Darcy-eva brzina ili specifično istjecanje i  $n$  [-] je poroznost.

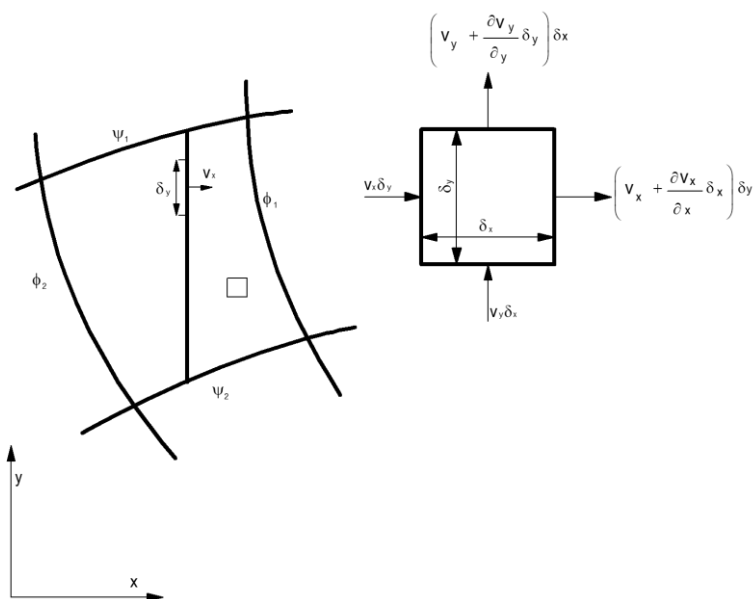
### 5.2.2. Formulacija potencijalne funkcije

Tok podzemne vode mora zadovoljavati osnovni zakon održanja mase koji se izvodi iz promatranja elementarnog volumena. Naime, zakon održanja ili kontinuiteta kaže da količina vode u jedinici vremena koja je ušla u elementarni volumen mora biti jednaka količini koja je izašla u slučaju da nemamo nikakvih izvora ili ponora, odnosno gubitaka mase unutar samog volumena.

ULAZ=IZLAZ

$$v_x dy + v_y dx = \left( v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) dx + \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dy \quad (5.4)$$

$$\left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) dx dy = 0 \quad (5.5)$$



Slika 19. Tok kroz elementarni volumen

Da bi gornji izraz (5.5) bio valjan, mora biti:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad dx, dy \neq 0 \quad (5.6)$$

Ako se Darcy-ev zakon supstituira u (5.6), dobiva se stacionarna jednačba kontinuiteta:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (5.7)$$

Ovo je kvaziharmonijska jednačba koja kaže da je promjena volumena u jedinici vremena jednaka nuli, odnosno, nema nikakvih izvora ni ponora. Ako se uključi mogućnost crpljenja ili prihranjivanja, onda (5.7) postaje:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (5.8)$$

gdje je Q količina crpljenja ili prihranjivanja u jedinici vremena po jediničnom volumenu medija, odnosno Q je gustoća toka u jedinici vremena.

Potencijalna funkcija  $\Phi(x,y)$  definirana je na sljedeći način:



$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad ; \quad q_y = -K_{yx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (5.9)$$

tako da vrijedi:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} \quad ; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$\Phi(x, y) = h(x, y) + C$$

što znači da se funkcija potencijala i piezometarske visine razlikuju samo za konstantu, dakle linije jednakih piezometarskih visina su ujedno i linije jednakih potencijala, tzv. ekvipotencijala. Sada izraz (5.8) postaje:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (5.10)$$

### 5.2.3. Formulacija strujne funkcije

Strujna funkcija se definira kao:

$$q_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad ; \quad q_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (5.11)$$

pa u skladu s Darcy-evim zakonom slijedi:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} = K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (5.12)$$

U matičnom obliku gornji izraz (5.12) je:

$$\begin{bmatrix} -K_{xx} & -K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{bmatrix} \quad ; \quad Ab = f \quad (5.13)$$

gdje je matrica A formalno jednaka modificiranom tenzoru propusnosti tako da je prvom retku promijenjen predznak, a vektori b i f su vektori gradijenata potencijalne i strujne funkcije, respektivno. Očito da matrica A djeluje kao operator koji preslikava vektor gradijenata potencijalne funkcije u vektor gradijenata strujne funkcije. Supstitucijom (5.12) u (5.8) dobije se:

$$-\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} + Q = 0$$

što pokazuje da u ovoj formulaciji uvijek mora biti  $Q = 0$  i da se ne mogu rješavati problemi s crpljenjem i/ili prihranjivanjem. Ako se piezometarska visina zamijeni potencijalom, onda iz (5.13) slijedi:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \left[ \frac{K_{yy}}{\det A} \frac{\partial \Psi}{\partial y} - \frac{K_{yx}}{\det A} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] ; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \left[ \frac{K_{xy}}{\det A} \frac{\partial \Psi}{\partial y} - \frac{K_{xx}}{\det A} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] \quad (5.14)$$

$$\det A = -K_{xx} K_{yy} + K_{xy} K_{yx} \quad (5.15)$$

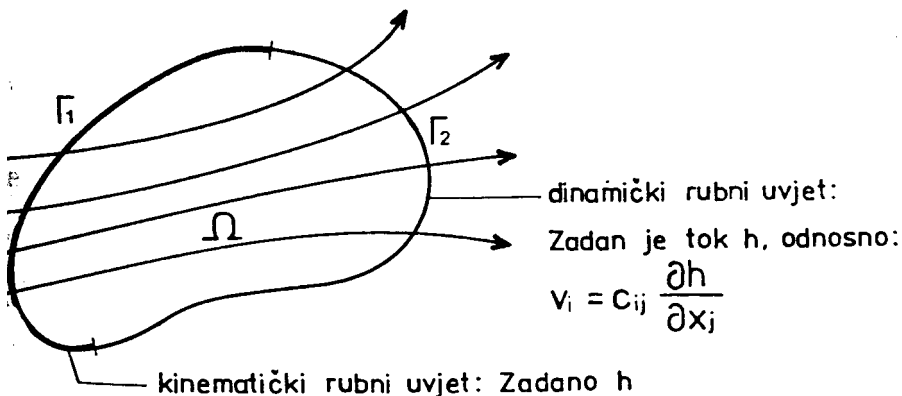
Derivirajući prvi član izraza (5.14) po  $y$  i drugi član po  $x$ , te izjednačivši ta dva člana, dobije se konačni oblik kvaziharmonijske jednačbe za formulaciju strujne funkcije:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K_{xx}}{\det A} \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{K_{xy}}{\det A} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\frac{K_{yx}}{\det A} \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{K_{yy}}{\det A} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) = 0 \quad (5.16)$$

Formalno, obje formulacije imaju isti oblik, osim što kod strujne funkcije moramo modificirati tenzor hidrauličke propusnosti  $K_{ij} = (-1)^{i+j} [K_{ij} / \det A]$ . Linije jednakih vrijednosti strujne funkcije  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \dots$  su strujnice. Može se pokazati da se u svakoj točki strujnice tangenta poklapa s vektorom brzine. Zbog toga strujnice pokazuju trajektorije gibanja čestica jer su to krivulje (plohe) kroz koje nema toka. Tok podzemne vode definiran je između dvije strujnice:  $q = \Psi_1 - \Psi_2$

#### 5.2.4. Rubni uvjeti

Generalno, kinematički ili prisilni rubni uvjeti se zadaju kao poznate vrijednosti intenzivnog polja, a predstavljaju poznate vrijednosti potencijalne ili strujne funkcije na rubu. Dinamički ili prirodni rubni uvjeti sa zadaju preko derivacije intenzivnog polja, a fizikalno predstavljaju tok unutrašnjeg ekstenzivnog polja u smjeru vanjske normale na granici promatranog volumena, odnosno promjenu potencijalne ili strujne funkcije u zadanom smjeru.



Slika 20. Prikaz rubnih uvjeta

Pošto je problem stacionaran, nema početnih uvjeta. Rubni uvjeti se definiraju na sljedeći način za formulaciju potencijalne formulacije: Na dijelu granice (rubu) gdje je poznata piezometarska visina ili potencijal  $\Phi$  zadaje se prisilni ili Dirichletov rubni uvjet  $\Phi = \Phi_R$ , i ovaj rubni uvjet mora biti zadan makar u jednoj točki, jer bi u protivnom cjelokupno rješenje bilo pomaknuto za neku nepoznatu konstantu ili kruti pomak.

Na drugom dijelu granice zadaje se prirodni ili dinamički (Cauchy) rubni uvjet:

$$(K_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial \Phi}{\partial y})n_x + (K_{yx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial y})n_y + q = 0 \quad (5.17)$$

gdje su  $n_x$  i  $n_y$  kosinusi kuta između osi  $x$ ,  $y$  i vanjske normale na rubu, respektivno, dok je  $q$  zadani flux na rubu. Ovdje se razlikuje osim ovog generalnog dinamičkog rubnog uvjeta i specifičan slučaj kada je  $q=0$ , tada je fluks kroz granicu jednak nuli što znači da je zapravo riječ o nepropusnoj granici (Neumannov prirodni rubni uvjet).

U formulaciji strujne funkcije prisilni rubni uvjet se kao i prije zadaje u točkama ruba u kojima je poznata vrijednost strujne funkcije. Dinamički rubni uvjet predstavlja fluks kroz granicu i u ovoj formulaciji dovoljno je zadati dvije krajnje vrijednosti strujne funkcije  $\Psi_1$  i  $\Psi_2$  da bi se definirao fluks –  $q$  kroz taj dio granice. Bilo koja od te dvije vrijednosti se proizvoljno odabere jer fluks –  $q$  ovisi samo o njihovoj razlici, a ne o njihovim apsolutnim vrijednostima.

U slučaju da je fluks nepoznat tada ovom formulacijom ne možemo jednoznačno riješiti problem, nego problem prvo riješimo s potencijalnom formulacijom i tada s poznatim fluksom  $q$  nađemo distribuciju strujnica u području. Na taj način dobijemo kompletnu strujnu mrežu i rješenje problema toka podzemne vode.

Također, dinamički rubni uvjet se može zadati na isti način kao i u potencijalnoj formulaciji. No, u praksi veoma rijetko se dolazi do takve potrebe jer promjena strujne funkcije u smjeru vanjske normale implicira da tlak na rubu nema hidrostatičku raspodjelu, a takve raspodjele nisu najčešće poznate, pa se izbjegava i njihovo korištenje.

### 5.3. Numerički model procjeđivanja

#### 5.3.1. Varijaciona formulacija problema

Polazeći od matematičkog modela potencijalnog strujanja može se prijeći na varijacionu formulaciju koja u praktičnoj primjeni ima niz prednosti. Pod varijacionom formulacijom podrazumijeva se veoma široki spektar korištenja varijacionog računa, te fizikalnih karakteristika i posebnosti konkretnog problema. Ovdje će se ograničiti na Galjerkinovu nejaku formulaciju.

Neka je zadano otvoreno područje  $\Omega$ , ograničeno granicom  $\Gamma$  za koju vrijedi:

$$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \quad \Gamma_1 \cap \Gamma_2 = \emptyset$$

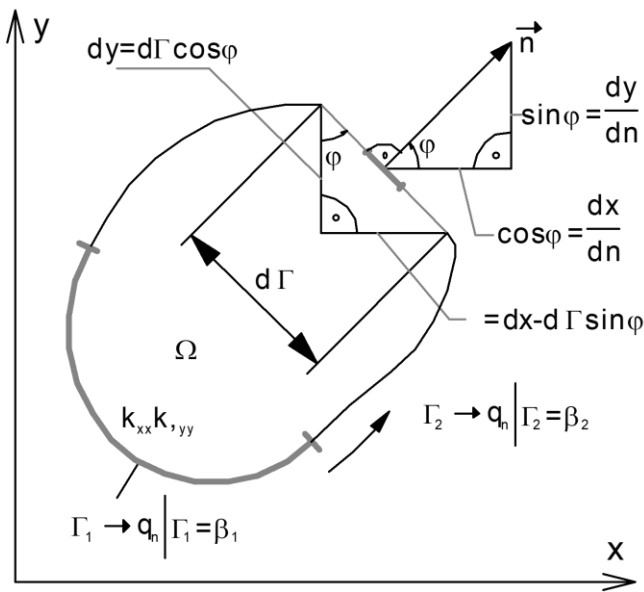
Na dijelu granice  $\Gamma_1$  zadan je kinematički rubni uvjet, odnosno poznato je rješenje  $\Phi|_{\Gamma_1} = \beta_1$ , a na dijelu granice  $\Gamma_2$  zadan je protok kroz granicu u obliku:

$$q_u / \Gamma_2 = ((K_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial \Phi}{\partial y}) n_x + (K_{yx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial y}) n_y)_{\Gamma_2} = [q]_{\Gamma_2} \quad (5.18)$$

Područje i rubni uvjeti prikazani su na slici 3.3. Polazeći od diferencijalne jednadžbe kvazipotencijalnog strujanja (5.10) ili (5.16) i rubnih uvjeta prikazanih na slici niže (Slika 21) te koristeći Galjerkinovu nejaku formulaciju, slijedi:

$$\int_{\Omega} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) + Q \right] w d\Omega = 0 \quad (5.19)$$

gdje je  $u$  neko općenito intenzivno polje, u ovom programskom rješenju to može biti polje potencijalne ili strujne funkcije.



**Slika 21.** Područje i elementi granice područja

Koristeći Green – Gauss – Ostrogradski poučak i pravilo parcijalne integracije može se smanjiti stupanj derivacije intenzivnog polja što je inače velika prednost nejakih formulacija:

$$\int_{\Gamma} w K_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} n_i d\Gamma - \int_{\Omega} K_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} \frac{\partial w}{\partial x_i} d\Omega + \int_{\Omega} w Q d\Omega = 0 \quad (5.20)$$

Približno rješenje je dano u sljedećem obliku:

$$u = u_r N_r(x) \quad ; \quad r = 1, 2, 3, \dots, m \quad (5.21)$$

gdje su  $N_r$  bazne funkcije, a  $u_r$  nepoznati parametri koji predstavljaju vrijednosti traženog intezivnog polja u čvorovima mreže konačnih elemenata. Kod Galjerkinove formulacije test funkcije su jednake baznim funkcijama:

$$w_s = N_s(x) \quad ; \quad s = 1,2,3,\dots,m \quad (5.22)$$

Matrica i vektor desne strane sustava se dobiju uvrštenjem (5.18), (5.21) i (5.22) u izraz (5.20):

$$u_r \int_{\Omega} K_{ij} \frac{\partial N_r}{\partial x_j} \frac{\partial N_s}{\partial x_i} d\Omega = \int_{\Omega} Q N_s d\Omega + \int_{\Gamma_1} N_s K_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} n_i d\Gamma_1 + \int_{\Gamma_2} N_s q d\Gamma_2 \quad (5.23)$$

$$D_{rs} u_r = F_s + Q_s + X_s \quad (5.24)$$

gdje je:

$$D_{rs} = \int_{\Omega} K_{ij} \frac{\partial N_r}{\partial x_j} \frac{\partial N_s}{\partial x_i} d\Omega - \text{matrica provođenja,}$$

$$F_s = \int_{\Omega} Q N_s d\Omega \quad ; \quad Q_s = \int_{\Gamma_2} N_s q d\Gamma_2 - \text{vektori vanjskog opterećenja i rubnog dotoka na dijelu granice}$$

s prirodnim rubnim uvjetom,

$$X_s = \int_{\Gamma_1} N_s K_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} n_i d\Gamma_1 = \int_{\Gamma_1} N_s k_{ij} \frac{\partial (u_r N_r)}{\partial x_j} n_i d\Gamma_1 - \text{vektor reakcija ili rubnih dotoka na dijelu}$$

granice s prisilnim rubnim uvjetom.

Na svakom konačnom elementu formalno vrijedi zapis (5.24) jer Galjerkinova formulacija vrijedi za cijelu domenu, ali također i za svaki njen pojedini dio, odnosno konačni element. Matrica provođenja na svakom konačnom elementu čini lokalnu matricu tog konačnog elementa. Vektori na desnoj strani (5.24) čine lokalni vektor desne strane konačnog elementa. Asembliranjem (slaganjem) globalne matrice po svim konačnim elementima i njegovim lokalnim matricama i vektorima kreiramo diskretni sustav (5.24) sa  $m$  jednadžbi i isto toliko nepoznanica. Vektori na desnoj strani izraza (5.24) predstavljaju koncentrirane protoke u čvorovima konačnog elementa. Njihov predznak ovisi o tome da li je tok usmjeren prema čvoru (pozitivan predznak) ili od čvora (negativan predznak), odnosno da li masa ulazi ili izlazi iz čvora. Ovo programsko rješenje dopušta da se koncentrirani protok može zadati u bilo kojem čvoru. Taj protok u tom slučaju ima interpretaciju crpljenja ili prihranjivanja. Rubni dotok na dijelu granice s prirodnim rubnim uvjetom može se zadati pomoću koncentriranih protoka ili fluksa –  $q$ . Ponovno je bitno upozoriti na predznak fluksa. Fluks –  $q$  je pozitivan ako je usmjeren suprotno od smjera vanjske normale jer tada podzemna voda ulazi u područje. Prihvaćanje takve konvencije predznaka omogućeno je izrazima (5.18) i (5.24).

Sustav (5.24) nije regularan jer mu nedostaju rubni uvjeti. Prisilni rubni uvjeti se uvode tako da se za sve čvorove ruba  $\Gamma_1$  pripadajuće jednadžbe “zapamte” i zamijene s novim jednadžbama iz kojih se direktno mogu izračunati vrijednosti funkcije rješenja u tim čvorovima. Prirodni rubni uvjeti zadaju se direktno preko vrijednosti fluksa –  $q$ . U rubnim čvorovima u kojima nije specificiran rubni uvjet smatra se da je automatski zadan fluks –  $q$  koji je jednak nuli. U preostalim jednadžbama koje su ostale nepromijenjene vektor reakcija je jednak nuli zbog svojstava odabranih test funkcija koje ne kidaju kinematičke veze i

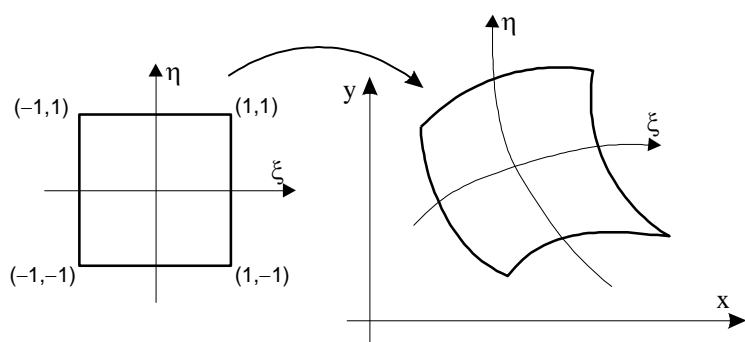
poništavaju se na rubu  $\Gamma_1$ , pa vektor reakcija  $X$  ne ulazi u sustav (5.24) koji nakon uvrštenja svih rubnih uvjeta postaje regularan i riješi se po nepoznicama  $u_r$ . Nakon toga iz "zapamćenih" jednadžbi jednostavno se mogu izračunati reakcije ili rubni dotoci u čvorovima u kojima je zadan prisilni rubni uvjet. Na kraju, uvjet ravnoteže protoka na cijelom području mora i dalje vrijediti, pa zbroj protoka  $Q$ ,  $F$  i  $X$  mora biti jednak nuli.

U formulaciji potencijalne funkcije ovo programsko rješenje omogućava analizu problema sa slobodnim vodnim licem i vrelnom plohom kada nema prihranjivanja kišom ili evapotranspiracije, dakle kada je vodno lice nepropusna granica i slobodna strujnica u prostoru. Na vodnom licu i vrelnoj plohi tlak mora biti jednak atmosferskom ( $p=0$ ), pa iz tog proizlazi uvjet da je  $h = y$ . Problem se rješava iterativno tako da se pretpostavi neko vodno lice, izračuna se raspodjela potencijala i u sljedećem koraku se pretpostavi novo vodno lice u skladu s izračunatim potencijalom tako da se zadovolji uvjet  $h = y$ . Tada se ponovo ciklički ponavlja proces, računa se opet raspodjela potencijala i korigira se vodno lice sve dok razlika u svim čvorovima vodnog lica između pretpostavljenog i izračunatog položaja ne bude manja od neke unaprijed određene tolerance. Ovakav pristup je valjan za probleme s propusnijim poroznim medijim (npr. šljunci, pijesci). Za slabije propusne materijale (lapor, glina) sile uzdizanja iznad vodnog lica nisu zanemarive i u proračun se mora uključiti tečenje u nesaturiranoj zoni. Također, ovaj problem zahtijeva promjenjivu geometriju. U ovom programu se mijenja samo geometrija elemenata koji sadrže čvorove vodnog lica. Zbog toga valja biti jako oprezan pri odabiru početne konfiguracije područja jer može doći do preklapanja nekih elemenata.

### 5.3.2. Izoparametarska preslikavanja

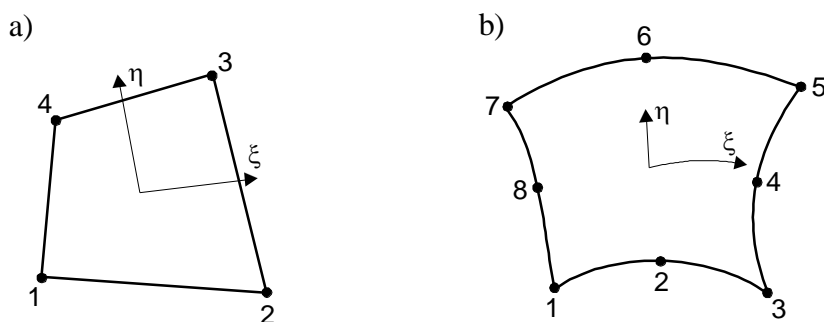
Prvi korak u numeričkoj analizi nekog dvodimenzionalnog problema je podjela kontinuuma na konačne elemente. Kada se izabere oblik i broj čvorova konačnog elementa, treba definirati preslikavanje bezdimenzionalnog konačnog elementa s odabranim brojem čvorova u stvarni krivocrtni element s istim brojem čvorova. Pri tome se za preslikavanje geometrije ne moraju izabrati iste bazne funkcije kao i za opisivanje približnog rješenja. Kada se za opisivanje geometrije područja koriste polinomi nižeg stupnja nego za prikazivanje polja potencijala, takva se formulacija naziva subparametarska. Ako se prikazivanje geometrije vrši polinomima višeg stupnja, formulacija se naziva nadparametarska. Formulacija u kojoj se iste bazne funkcije koriste i za opisivanje geometrije elementa i za funkcionalno prikazivanje potencijala, naziva se izoparametarska formulacija.

Generiranje mreže konačnih elemenata najpovoljnije je provesti pomoću kvadrilateralnih (četverostranih) elemenata. Prvi korak u izoparametarskoj formulaciji je definiranje bezdimenzionalnog koordinatnog sustava  $(\xi, \eta)$  s ishodištem u središtu elementa. Na ovaj način su bezdimenzionalne koordinate četiri ugaone točke uvijek  $+1$  ili  $-1$ , vidi crtež 5.1. Sljedeći korak je odabiranje baznih funkcija  $\mathbf{N} = [N_1, \dots, N_i, \dots, N_n]$  pomoću kojih se vrši preslikavanje jediničnog kvadrilateralnog elementa u realno područje definirano koordinatnim sustavom  $(x, y)$ , te izražavanje tih funkcija preko bezdimenzionalnih koordinata  $\xi, \eta$ .



Slika 22. Preslikavanje jediničnog elementa

Ovdje će se razmatrati tip kvadrilateralnog elemenata koji se zasniva na izoparametarskoj formulaciji: 8 – čvorni izoparametarski kvadrilateralni element (Serendipity) s krivocrtanim stranicama i kvadratnim prikazom polja potencijala unutar elementa (Slika 23. b).



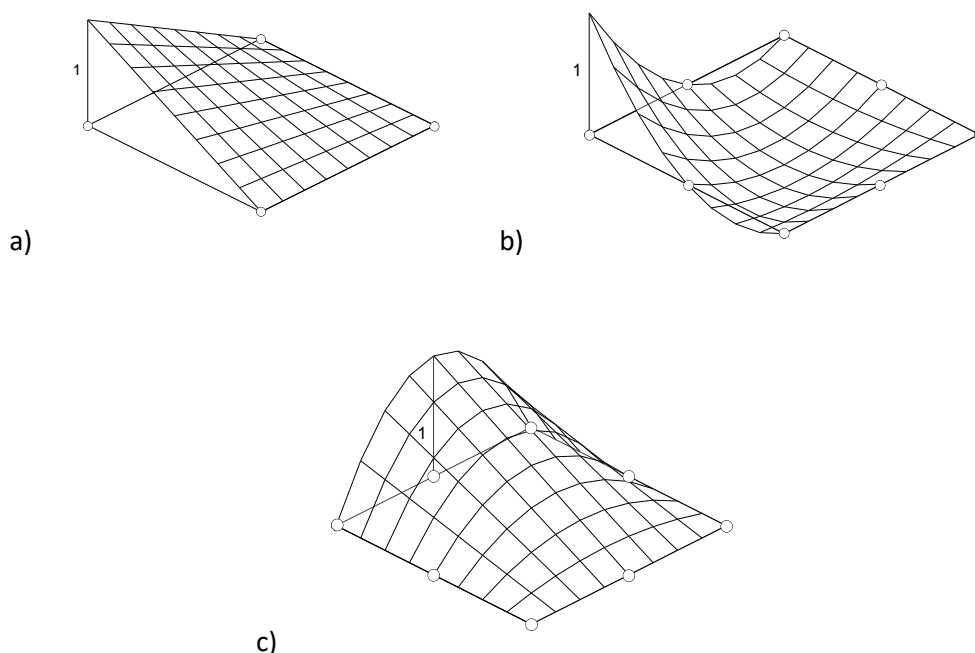
Slika 23. Izoparametarski kvadrilateralni element: a) 4 – čvorni, b) 8 – čvorni

Bazne funkcije 8 – čvornog konačnog elementa i njihove derivacije su prikazane u tablici niže (Tablica 15). Na crtežu niže (Slika 24a) prikazani su oblici baznih funkcija 4 – čvornog elementa, a na crtežu niže (Slika 24 b i c) su oblici baznih funkcija 8-čvornog elementa za čvorove na vrhovima i za čvorove na srediinama stranica.

Tablica 15. Bazne funkcije i njihove derivacije

Čvor	Lokalne koordinate čvora		Bazne funkcije	Derivacije baznih funkcija	
	$\xi_i$	$\eta_i$		$\partial N_i / \partial \xi$	$\partial N_i / \partial \eta$
i	$\xi_i$	$\eta_i$	$N_i(\xi, \eta)$	$\partial N_i / \partial \xi$	$\partial N_i / \partial \eta$
1	-1	-1	$-\frac{1}{4} \cdot (1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \xi + \eta)$	$\frac{1}{4} \cdot (2\xi + \eta) \cdot (1 - \eta)$	$\frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (\xi + 2\eta)$
2	0	-1	$\frac{1}{2} \cdot (1 - \xi^2)(1 - \eta)$	$-\xi \cdot (1 - \eta)$	$-\frac{1}{2} \cdot (1 - \xi^2)$
3	1	-1	$\frac{1}{4} \cdot (1 + \xi)(1 - \eta)(-1 + \xi - \eta)$	$\frac{1}{4} \cdot (2\xi - \eta) \cdot (1 - \eta)$	$-\frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (\xi - 2\eta)$
4	1	0	$\frac{1}{2} \cdot (1 + \xi)(1 - \eta^2)$	$\frac{1}{2} \cdot (1 - \eta^2)$	$-(1 + \xi) \cdot \eta$

5	1	1	$\frac{1}{4} \cdot (1 + \xi)(1 + \eta)(-1 + \xi + \eta)$	$\frac{1}{4} \cdot (2\xi + \eta) \cdot (1 + \eta)$	$\frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (\xi + 2\eta)$
6	0	1	$\frac{1}{2} \cdot (1 - \xi^2)(1 + \eta)$	$-\xi \cdot (1 + \eta)$	$\frac{1}{2} \cdot (1 - \xi^2)$
7	-1	1	$\frac{1}{4} \cdot (1 - \xi)(1 + \eta)(-1 - \xi + \eta)$	$\frac{1}{4} \cdot (2\xi - \eta) \cdot (1 + \eta)$	$-\frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (\xi - 2\eta)$
8	-1	0	$\frac{1}{2} \cdot (1 - \xi)(1 - \eta^2)$	$-\frac{1}{2} \cdot (1 - \eta^2)$	$-(1 - \xi) \cdot \eta$



Slika 24. Bazne funkcije izoparametarskih konačnih elemenata a) 4 – čvornog; b) i c) 8 – čvornog

Svaka od ovih baznih funkcija ima jediničnu vrijednost u čvoru kojemu je pridružena, a u preostalim čvorovima elementa ima vrijednost jednaku nuli. Bazne funkcije konačnog elementa imaju i svojstvo da je njihov zbroj u bilo kojoj točki unutar elementa također jednak jedinici. Kao što se vidi, izrazi za bazne funkcije strogo ovise o orijentaciji lokalnih koordinatnih smjerova  $\xi$  i  $\eta$ . Varijable  $\xi$  i  $\eta$  su krivocrtne koordinate pa se njihov smjer mijenja s položajem elementa u realnoj ravnini. Međutim, njihovi opći smjerovi su uvijek poznati u odnosu na stranice elementa. Uvažavaju se slijedeće zavisnosti između redoslijeda numeriranja čvorova elementa i lokalnih osi  $\xi$  i  $\eta$ :

a) čvorovi elementa se označavaju u pozitivnom smjeru obilaska elementa (suprotno od kazaljke na satu) počevši od bilo kojeg ugaonog čvora.

b) pozitivan smjer osi  $\xi$  je tada definiran, za 8 – čvorni konačni element, pomicanjem duž stranice elementa počevši od prvog čvora prema drugom i trećem (slika 5.5).



c) pozitivan smjer osi  $\eta$  je definiran pomicanjem duž stranice elementa počevši od trećeg čvora prema četvrtom i petom (vidi sliku 5.5.).

Vrijednosti koordinata  $x(\xi, \eta)$  i  $y(\xi, \eta)$  u bilo kojoj točki  $(\xi, \eta)$  konačnog elementa izražavaju se pomoću baznih funkcija i koordinata čvornih točaka elementa kao

$$\begin{aligned} x(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) \cdot x_i \\ y(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) \cdot y_i \end{aligned} \quad (5.25)$$

gdje su  $(x_i, y_i)$  koordinate čvora  $i$ ,  $N_i$  je bazna funkcija pridružena čvoru  $i$  prema Tablica 15, a  $n$  je broj čvorova konačnog elementa. Nepoznata funkcija rješenja  $u$  (u našem slučaju strujna ili potencijalna funkcija) na svakom konačnom elementu izražava se pomoću  $n$  parametara  $u_i$  koji su pridruženi vrijednostima ove funkcije u čvornim točkama u obliku:

$$u(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) \cdot u_i \quad (5.26)$$

Analogno, derivacije neke funkcije  $f(\xi, \eta)$  po smjerovima  $\xi$  i  $\eta$  dobivaju se kao:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \xi}(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \cdot f_i \\ \frac{\partial f}{\partial \eta}(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \cdot f_i \end{aligned} \quad (5.27)$$

gdje  $f(\xi, \eta)$  mogu biti koordinate točaka  $x(\xi, \eta)$ ,  $y(\xi, \eta)$  ili komponente vektora  $u(\xi, \eta)$ . Za konstruiranje matrice elementa prema (5.24), treba odrediti hidrauličke gradijente koji se dobiju deriviranjem potencijala po  $x$  i  $y$  smjeru. Međutim, u formulaciji pomoću MKE, (izraz 5.26), funkcija rješenja  $u$  je funkcija koordinata  $\xi$  i  $\eta$ . Dakle, mora se naći veza između derivacija po  $x$  i  $y$  smjeru i derivacija po smjerovima  $\xi$  i  $\eta$ . To se vrši pomoću pravila deriviranja složene funkcije:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \xi} &= \frac{\partial x}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} &= \frac{\partial x}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial f}{\partial y} \end{aligned} \quad (5.28)$$

odnosno u matričnom obliku:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \mathbf{J} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (5.29)$$

gdje je  $\mathbf{J}$  matrica prvih derivacija dimenzija  $2 \times 2$ , a zove se matrica preslikavanja ili Jacobijeva matrica (Jacobiana), i može se napisati koristeći prethodne izraze u obliku:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \cdot x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \cdot y_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \cdot x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \cdot y_i \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Kartezijeve derivacije funkcije  $f(\xi, \eta)$  se prema tome određuju kao

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{pmatrix} \quad (5.31)$$

gdje je  $\mathbf{J}^{-1}$  inverzna matrica preslikavanja

$$\mathbf{J}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det \mathbf{J}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial \eta} & -\frac{\partial y}{\partial \xi} \\ -\frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \xi} \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

Dakle, da bi se mogle odrediti Kartezijeve derivacije, determinanta Jacobiane mora biti različita od nule odnosno sustav čvorova konačnog elementa mora biti takav da matrica  $\mathbf{J}$  ne bude singularna. Invertiranje Jacobianove matrice osjetljivo je na neke tipove distorzije elementa u odnosu na osnovni pravokutni oblik, te na položaj čvornih točaka duž stranica. Kod bikvadratičnih elemenata najbolje je postaviti čvorove na stranicama u sredini duljine luka između pripadajućih ugaonih čvorova. Kartezijeve derivacije baznih funkcija određuju se korištenjem pravila deriviranja složene funkcije:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial x} &= \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} &= \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{aligned} \quad (5.33)$$

Derivacije  $\frac{\partial \xi}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial \eta}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial \xi}{\partial y}$  i  $\frac{\partial \eta}{\partial y}$  izračunavaju se iz inverzne Jacobijanove matrice  $\mathbf{J}^{-1}$

Diferencijalni element površine  $dx \, dy$  se u svim integracijama zamjenjuje sa

$$dx dy = \det \mathbf{J} d\xi d\eta \quad (5.34)$$

gdje  $\det \mathbf{J}$  označava determinantu Jacobiane  $J$ . Također, granice integracije postaju  $-1$  i  $+1$ . Očigledno je da određivanje matrice elementa postaje prilično komplicirano čak i za jednostavnije elemente. Eksplicitno određivanje matrice provođenja i vektora desne strane izraza (5.7) nije općenito izvedivo, pa se koeficijenti ove matrice i vektora desne strane moraju izračunavati numeričkom integracijom.

### 5.3.3. Numerička integracija

U metodi konačnih elemenata podintegralne funkcije općenito nisu jednostavne, te se koriste postupci numeričke integracije. Zbog jednostavne implementacije i visoke točnosti integrali se izračunavaju pomoću Gauss-Legendre-ove kvadrature formule. Gaussova kvadratura formula u jednoj dimenziji ima oblik:

$$I_n = \int_{-1}^{+1} f(t) dt = \sum_{i=1}^n W_i f(t_i) \quad (5.35)$$

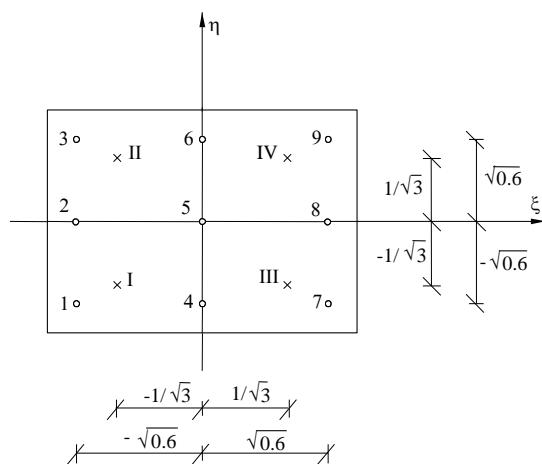
gdje je  $f(t)$  zadana funkcija, koeficijenti  $W_i$  se nazivaju težinski faktori,  $t_i$  je koordinata  $i$ -te integracijske točke, a  $n$  je ukupni broj integracijskih točaka. Dakle, raspolaže se s  $2n$  konstanti  $(t_i, W_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Polinom stupnja  $(2n - 1)$  određen je s  $2n$  koeficijenata, pa se prema tome s  $n$  integracijskih točaka pomoću kvadrature formule (5.36) može točno integrirati polinom stupnja  $(2n - 1)$ . Ako je podintegralna funkcija  $f(t)$  polinom stupnja većeg od  $(2n - 1)$ , ili ako nije polinom, tada se pomoću (5.36) dobiju približne vrijednosti integrala. Koordinate Gaussovih integracijskih točaka podudaraju se s položajem nultočaka Legendre-ovih ortogonalnih polinoma. U tablici niže (Tablica 16) dani su položaji Gaussovih točaka na odsječku  $[-1, 1]$  i pripadajući težinski koeficijenti do stupnja integracije  $n = 4$ .

Numerička integracija na kvadrilateralnom konačnom elementu provodi se također prema Gaussovoj kvadraturnoj formuli korištenjem svojstva Kartesijevog produkta:

$$I_{n,m} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} f(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n W_i W_j f(\xi_i, \eta_j) \quad (5.37)$$

Tablica 16. Gauss-Legendre-ova numerička integracija

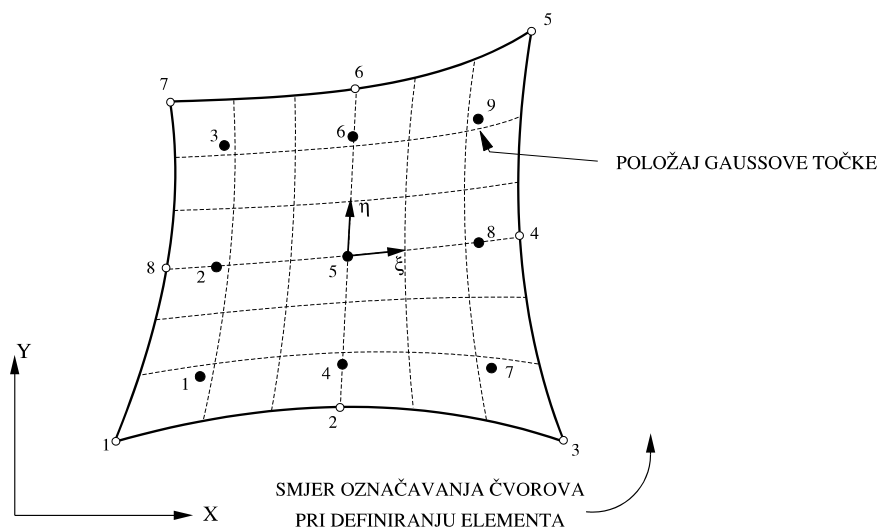
n	i	$t_i$	$W_i$
1	I	0.0	2.0
2	I	$-1/\sqrt{3}$	1.0
	II	$+1/\sqrt{3}$	1.0
3	I	$-\sqrt{0.6}$	5/9
	II	0.0	8/9
	III	$+\sqrt{0.6}$	5/9
4	I	$-\sqrt{(3+\sqrt{4.8})/7}$	$(1-\sqrt{5/54})/2$
	II	$-\sqrt{(3-\sqrt{4.8})/7}$	$(1+\sqrt{5/54})/2$
	III	$\sqrt{(3-\sqrt{4.8})/7}$	$(1+\sqrt{5/54})/2$
	IV	$\sqrt{(3+\sqrt{4.8})/7}$	$(1-\sqrt{5/54})/2$



Slika 25. Raspored Gaussovih integracijskih točaka

gdje su  $(\xi_i, \eta_j)$  koordinate Gaussovih točaka kao uređenih parova po koordinatnim osima  $\xi$  i  $\eta$ ,  $f(\xi_i, \eta_j)$  su vrijednosti podintegralne funkcije u Gaussovima točkama, a  $W_i$  i  $W_j$  su integracijski težinski faktori za Gaussove točke. Broj Gaussovih točaka po pojedinim koordinatnim osima ne mora biti jednak, a odabire se prema očekivanom stupnju polinoma koji bi točno aproksimirao podintegralnu funkciju po pojedinom smjeru. Na slici iznad (Slika 25.) prikazan je primjer rasporeda Gaussovih točaka na kvadrilateralnom elementu i to za integracijsko pravilo  $2 \times 2$  s rimskim brojevima, odnosno za integracijsko pravilo  $3 \times 3$  s arapskim brojevima. Svakom uređenom paru indeksa  $(i, j)$  pridružen je jedinstven indeks Gaussove točke. Raspored točaka je dogovoran i kada se odabere treba ga se

pridržavati. Npr., za 8 – čvorni konačni element i Gaussovo integracijsko pravilo 3×3 usvojen je raspored integracijskih točaka prema slici ispod (Slika 26.).



Slika 26. Raspored Gaussovih integracijskih točaka za 8 – čvorni konačni elementa

#### 5.3.4. Hidrodinamička disperzija

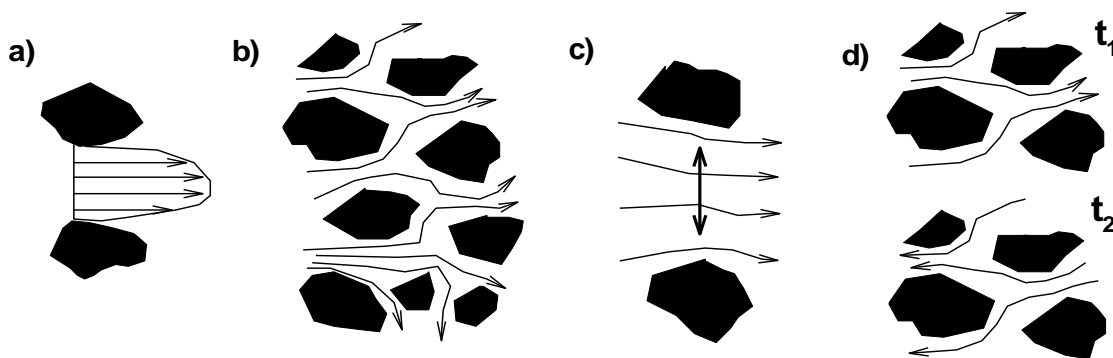
Hidrodinamička disperzija predstavlja općenito proces miješanja u poroznom mediju. Npr. kada se ubaci neki traser, onda se intuitivno može predočiti da se traser širi sve više i pri tom razrjeđuje. Da bi se ova na prvi pogled logična pojava širenja trasera mogla objasniti na fizikalno korektan način, potrebno je tečenje promatrati drukčije nego je to rađeno u Darcy – evom osrednjenom zakonu. Naime, neophodno je uvesti pojam skale na kojoj se promatra tečenje. Općenito se skala kreće od mikroskopske do neke velike makro – skale. Mikroskopska skala je jednaka veličini REV – a (reprezentativnog elementarnog volumena), tj. skale na kojoj mjerene veličine (npr. propusnost i poroznost) prestaju pokazivati fluktuacijska svojstva (Slika 27.). Uzima se da ta mikroskopska skala mora obuhvatiti volumen koji će osigurati da proces osrednjavanja daje jednu reprezentativnu vrijednost. Zbog prirodne heterogenosti poroznog medija na svim skalama javljaju se varijacije brzina po veličini i smjeru što predstavlja osnovni mehanizam miješanja. Na mikroskopskoj skali varijacije brzina u svakoj pori se javljaju zbog neravnomjerne distribucije brzina jer je brzina najveća u sredini pore, a jednaka nuli na površini zrna (Slika 27.a). Također, zbog različite površine pora javlja se razlika brzina u različitim porama te zbog općenito nepravilnog oblika pornog sustava strujnice fluktuiraju oko smjera srednje brzine (Slika 27.b) (Bear, 1979). Osim prostorne fluktuacije brzina treba uključiti i utjecaj vremenske promjenjivosti tečenja (Slika 27.d) (Holzbecher, 1998). Na slici ispod (Slika 27.) su prikazani svi navedeni razlozi varijacije brzina na mikroskopskoj skali. Proces miješanja uzrokovan varijacijom brzina na mikroskopskoj skali se zove mehanička disperzija.

Na većim skalama koje se obično zovu makroskopske skale proces miješanja je uzrokovan nehomogenošću poroznog medija što se ogleda u varijaciji permeabiliteta koji indirektno zbog postojanja tečenja stvara varijaciju brzina na svim skalama većim od mikroskopske skale. Paralelno s tim događa se proces molekularne difuzije koji predstavlja dodatni mehanizam miješanja te je determiniran gradijentom koncentracije (Slika 27.c). Proces miješanja koji uključuje oba spomenuta mehanizma, mehaničku disperziju i molekularnu difuziju, je hidrodinamička disperzija.

Matematički opis hidrodinamičke disperzije u općem heterogenom anizotropnom poroznom mediju je veoma kompleksan. Fluksevi koji nastaju zbog miješanja na svim skalama mogu se prikazati klasičnim postupkom osrednjavanja:

$$\overline{Cq} = \overline{(C + C')(\mathbf{q} + \mathbf{q}')} = \overline{C}\overline{\mathbf{q}} + \overline{C'}\overline{\mathbf{q}'} \quad (5.38)$$

gdje su protok i koncentracija prikazani kao zbroj srednje vrijednosti i fluktuacija oko srednje vrijednosti. Dva člana su ispuštena jer je osrednjavanje fluktuacija jednako nuli. Prvi član na desnoj strani predstavlja prenosnu ili advektivnu komponentu pronosa, dok drugi član definira dodatni disperzivni fluks na nekoj većoj makroskopskoj skali. Taj dodatni fluks (ne postoji na mikroskopskoj skali) se javlja zbog prijelaza s manje na veću skalu i prezentira gubitak informacija koji je nastao pri tom prijelazu.



Slika 27. Hidrodinamička disperzija na mikroskopskoj skali

Disperzivni fluks je jednak kovarijanci koncentracije i brzine te je definiran njihovim varijacijama, a prikazuje se po analogiji s Fickovim zakonom (Bear, 1979) po kojemu fluks ovisi o gradijentu koncentracije:

$$\overline{C' \mathbf{q}'} = -\mathbf{D} \cdot \nabla C \quad (5.39)$$

gdje je  $\mathbf{D}$  tenzor mehaničke disperzije koji je ovisan o brzini. Izraz (5.39) je aproksimacija disperzivnog fluksa i tenzor mehaničke disperzije mijenja svoje vrijednosti s promjenom skale. Međutim, u analizama toka i pronosa s promjenjivom gustoćom najčešće se promatra tzv. makrodisperzija definirana na nekoj relativno velikoj makroskopskoj skali. U praksi je veoma teško pravilno interpretirati elemente tenzora disperzije. Bear i Bachmat (1967) su eksperimentalno utvrdili tenzor disperzije:

$$D_{ij} = a_{ijkm} \frac{v_k v_m}{v} f(Pe, \delta_D) \quad (5.40)$$

gdje je  $a_{ijkm}$  [ $L^2/T$ ] tenzor četvrtog reda geometrijske disperzije,  $Pe$  [-] je Pecletov broj koji je jednak  $Lv/D^*$  i prikazuje odnos advektivne i difuzne komponente na mikroskopskoj skali, gdje je  $L$  [L] karakteristična duljina pora, a  $D^*$  [ $L^2/T$ ] koeficijent molekularne difuzije, dok je  $\delta_D$  omjer karakteristične duljine pornog kanala i njegovog hidrauličkog radijusa. Funkcija  $f(Pe, \delta_D)$  opisuje efekt molekularne difuzije u tenzoru disperzije. Osim ovog efekta molekularna difuzija nezavisno od postojanja brzine definira fluks koji je definiran osnovnim Fickovim zakonom:

$$\overline{\mathbf{J}_m} = -\mathbf{D}_m \cdot \nabla C \quad (5.41)$$

gdje je  $\mathbf{D}_m$  tenzor molekularne difuzije. U podzemlju se utjecaj molekularne disperzije obično može zanemariti. Izuzetak su zone s malim brzinama u kojima je ovaj utjecaj neophodno uključiti zbog pravilne fizikalne interpretacije procesa miješanja. Tenzor hidrodinamičke disperzije je jednak zbroju tenzora mehaničke disperzije i molekularne difuzije:

$$\mathbf{D}_H = \mathbf{D} + \mathbf{D}_m \quad (5.42)$$

Tenzor hidrodinamičke disperzije povezuje utjecaj geometrije poroznog medija, brzine i molekularne difuzije. Utjecaj geometrije se prije svega ogleda u simetričnom tenzoru geometrijske disperzije koji općenito ima jako složenu strukturu. Zbog toga se gotovo uvijek radi s tenzorom koji je definiran za izotropni medij, a koji određivanje tenzora geometrijske disperzije svede na određivanje dvaju koeficijenata: longitudinalne disperzije,  $\alpha_L$  [L] i transverzalne disperzije,  $\alpha_T$  [L]:

$$a_{ijkm} = \alpha_T \delta_{ij} \delta_{km} + \frac{\alpha_L - \alpha_T}{2} (\delta_{ik} \delta_{jm} + \delta_{im} \delta_{jk}) \quad (5.43)$$

Dakle, za izotropni porozni medij tenzor hidrodinamičke disperzije ima oblik:

$$D_{Hij} = D^* \delta_{ij} + \alpha_T v \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \cdot \frac{v_i v_j}{v} \quad (5.44)$$

gdje je  $\delta_{ij}$  Kroneckerov delta simbol. Određivanja koeficijenata disperzije je u načelu veoma teško i Welthy i Gelhar (1992) dali su vrijednosti koeficijenata disperzije za određena istraživanja područja. Koeficijent transverzalne disperzije je manje poznat i obično je prilično manji od koeficijenta longitudinalne disperzije. Obično se odnos  $\alpha_L / \alpha_T$  kreće u rasponu od 5 do 24 (Bear, 1979). Novija istraživanja pokazuju da je taj omjer mnogo veći, od 10 do 1000. Tenzor mehaničke disperzije je ovisan o brzini i u slučaju nepostojanja brzine jednak je nuli. S druge strane, jedna od glavnih osiju tenzora disperzije se poklapa sa smjerom vektora brzine. U tom slučaju tenzor mehaničke disperzije izgleda ovako:

$$D = \begin{bmatrix} \alpha_L v & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T v & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_T v \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

### 5.3.5. Advektivno-disperzivna jednadžba

Jednadžba kontinuiteta za fazu, primjenom zakonom održanja mase za fazu na pripadajućem kontrolnom volumenu:

$$\frac{\partial(n\rho C)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C \mathbf{q}) - \nabla \cdot (n \mathbf{D}_H \cdot \nabla (\rho C)) = C Q_P + C^* Q_R \quad (5.46)$$

gdje je  $C^*$  - maseni udio ili masena koncentracija [M/M] injektiranog fluida ili prihranjivanja. Prvi član predstavlja vremensku promjenu mase faze, drugi član pokazuje promjenu mase faze zbog promjene ili divergencije advektivnog fluksa faze na granici ili rubu kontrolnog volumena, treći član pokazuje promjenu mase faze zbog promjene ili divergencije sume disperzivnog i difuznog fluksa faze na granici ili rubu kontrolnog volumena, dok desna strana uključuje utjecaj crpljenja i prihranjivanja kao vanjskog djelovanja unutar volumena.

Prvi član lijeve strane se nadalje razvija:

$$\frac{\partial(n\rho C)}{\partial t} = C \frac{\partial(n\rho)}{\partial t} + n\rho \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5.47)$$

Drugi član postaje:

$$\nabla \cdot (\rho C \mathbf{q}) = C \nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) + \rho \mathbf{q} \cdot \nabla C \quad (5.48)$$

Treći član u (5.48)  $n \mathbf{D}_H \cdot \nabla (\rho C)$  se može razdijeliti na dva faktora:  $\rho n \mathbf{D}_H \cdot \nabla C$  i  $C n \mathbf{D}_H \cdot \nabla \rho$ . Gotovo uobičajena aproksimacija (npr. Voss, 1984; Ackerer i dr., 1999) koja se uvodi je da se drugi faktor zanemari jer je veličina manjeg reda u odnosu na drugi član lijeve strane jednadžbe (5.48). U približnom smislu ta dva člana se npr. u smjeru vektora brzine  $s$  zanemarenjem molekularne difuzije i transverzalne disperzije mogu usporediti na slijedeći način:  $\rho v \gg \alpha_L v \Delta \rho / \Delta L_p$  gdje je  $\Delta L_p$  karakteristična duljina na kojoj je došlo do promjene gustoće u smjeru vektora brzine. Konačni oblik jednadžbe kontinuiteta za fazu predstavlja advekcijsko-disperzijsku jednadžbu u kojoj je  $C$  – koncentracije neke supstance (faze, tj. zagađenja, soli ili dr.) glavna nepoznanica:

$$n\rho \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \mathbf{q} \cdot \nabla C - \nabla \cdot (\rho n \mathbf{D}_H \cdot \nabla C) = (C^* - C) Q_R \quad (5.49)$$



### 5.3.6. Random walk particle tracking metoda

Jednadžba 5.49 pogodna za modeliranje pronosa zagađenja u području odlagališta može se prikazati u slijedećem jednostavnijem obliku gdje je glavna ulazna varijabla polje brzina :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (cv) - \nabla \cdot (D\nabla c) = 0 \quad (5.50)$$

Klasična Lagrangianova metoda za rješavanje (5.50) je random walk particle tracking metoda, koja prikazuje oblak zagađenja kao niz čestica koje imaju svoju masu [npr. LaBolle et al, 1996; Park et al., 2008] te je uvedena u program Fi (Gotovac, 2002). Svaka čestica putuje s advektivnim i disperzivnim korakom:

$$x_p(t + \Delta t) = x_p(t) + v_x^*(x, y)\Delta t + Z_1\sqrt{2D_{xx}\Delta t} + Z_2\sqrt{2D_{xy}\Delta t} \quad (5.51a)$$

$$y_p(t + \Delta t) = y_p(t) + v_y^*(x, y)\Delta t + Z_1\sqrt{2D_{yx}\Delta t} + Z_2\sqrt{2D_{yy}\Delta t} \quad (5.51b)$$

Gdje su  $Z_i$ ,  $i=1,2$  dva niza slučajnih brojeva definirana sa normalnom Gaussovom razdiobom  $N(0,1)$ . Modificirano polje brzina je:

$$v_x^*(x, y) = v_x(x, y) + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} \quad (5.52a)$$

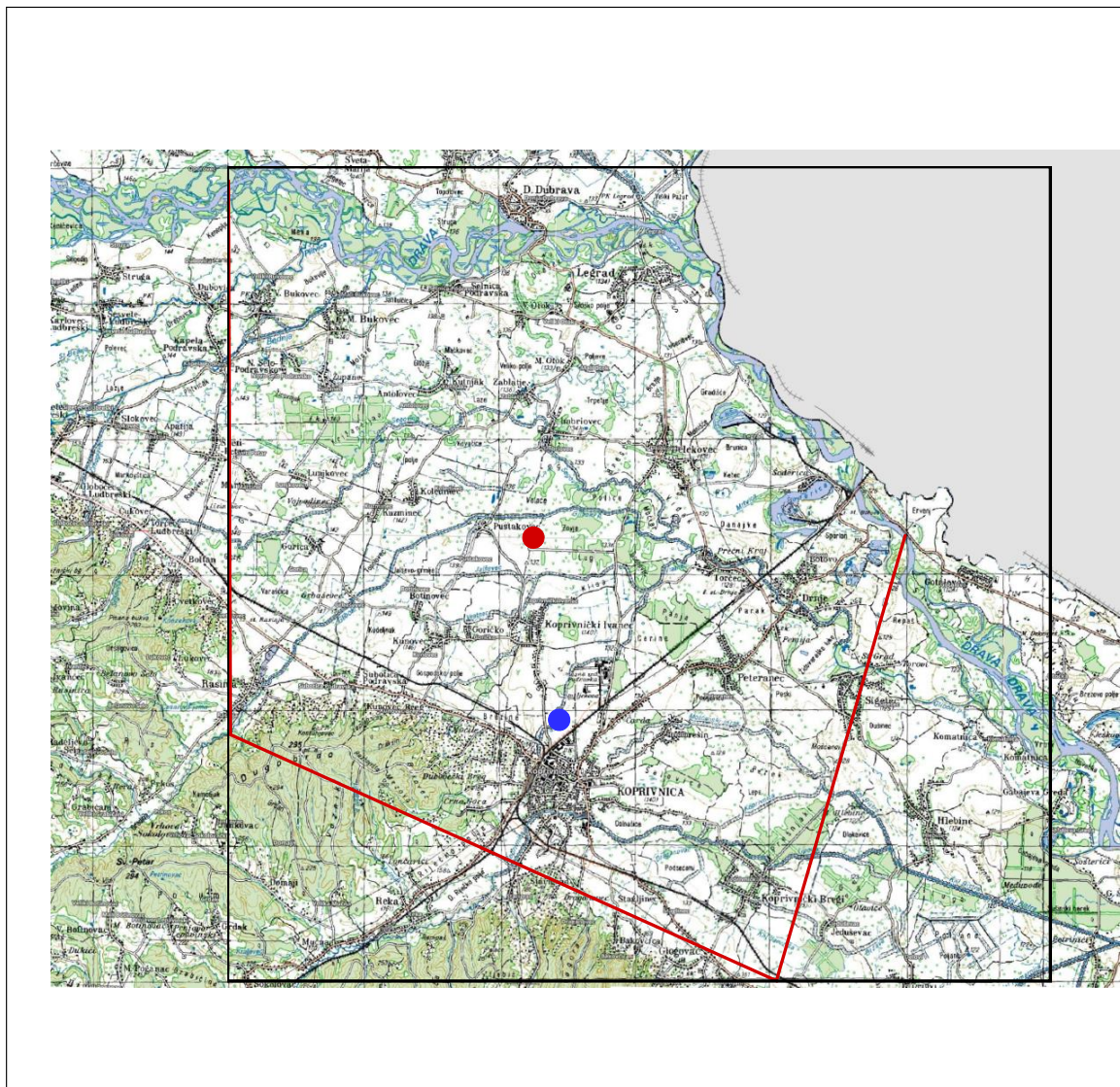
$$v_y^*(x, y) = v_y(x, y) + \frac{\partial D_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} \quad (5.52b)$$

Očigledno, za izvođenje metode treba imati točnu aproksimaciju brzina i njenih derivacija da bi se mogao opisati tenzor disperzije. Položaj čestica se na kraju prevodi u koncentraciju interpolacijom u mrežu konačnih elemenata koristeći ranije prikazane bazne funkcije osmočvornog konačnog elementa (Gotovac, 2002).

## 6. REGIONALNI MODEL TEČENJA NA PODRUČJU PIŠKORNICA

### 6.1. Opis područja/domene

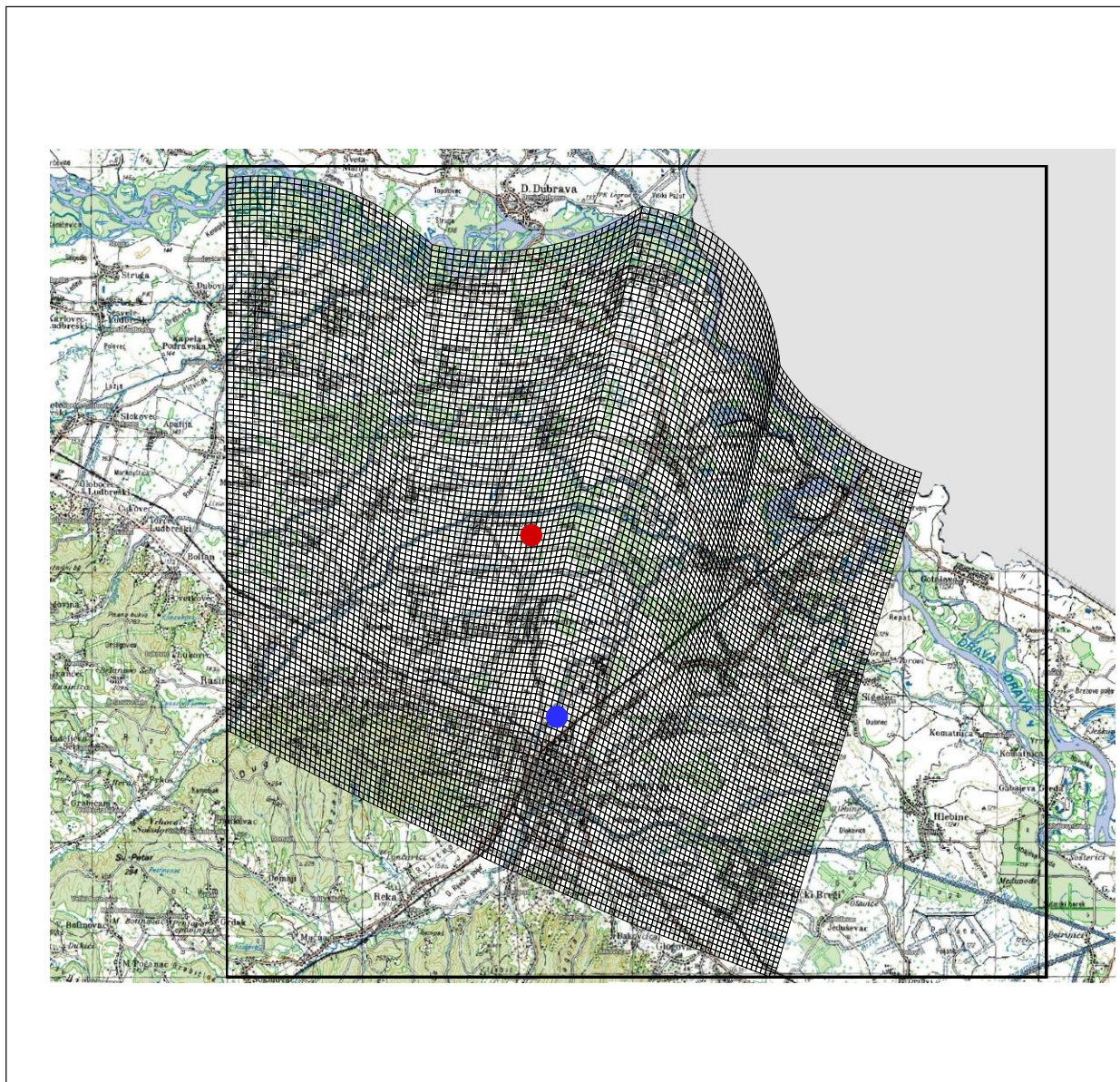
Kao što je ranije navedeno, vodno područje Koprivničko-križevačke županije podijeljeno je na dva slivna dijela: sliv rijeke Save i Drave. Promatrano područje odlagališta Piškornica (crveni krug, Slika 28.) se nalazi na području sliva rijeke Drave te je određeno rijekom Dravom, potokom Gliboki, Koprivničkom rijekom/Bistrom i vodotokom Čivićevac.



Slika 28. Prikaz domene regionalnog modela tečenja na području odlagališta Piškornica (crveni krug – odlagalište, plavi krug - crpilište Ivanščak, crvene linije – rub domene)

Važnu hidrodinamičku ulogu ima crpilište Ivanščak te je označeno plavim krugom na slici iznad (Slika 28.). Dakle, na slici je prikazano područje regionalnog modela sa svim navedenim elementima. Domena je određena isključivo činjenicom pripadnosti slivu rijeke Drave koja determinira hidrodinamičku sliku područja. Domena je s gornje sjeverne strane definirana s rijekom Dravom. Ostale tri granice označene crvenom bojom su odabrane dovoljno daleko od područja odlagališta – Piškornice i crpilišta Ivanščak kako ne bi utjecali na određivanje hidrodinamike strujanja na odabranom području. Domena zauzima približno 400 km<sup>2</sup> (20kmx20km). U pozadini slike je grid veličine 4 km u svakom smjeru.

## 6.2. Opis mreže konačnih elemenata



Slika 29. Prikaz mreže konačnih elemenata regionalnog modela tečenja na području odlagališta Piškornica

Domena područja regionalnog modela tečenja na području Piškornica diskretizirana je mrežom 2-D osmočvornih konačnih elemenata koristeći program Fi. S obzirom na relativno veliku domenu od približno 400 km<sup>2</sup> (20km\*20km) korišteno je 12000 konačnih elemenata s podjelom od 120 odsječaka u smjeru tečenja i 100 odsječaka okomito na smjer tečenja. Prosječna veličina elementa iznosi 166 m u smjeru tečenja i 200 m okomito na smjer tečenja. Ukupan broj čvorova mreže konačnih elemenata je 19000. Na slici iznad (Slika 29.) prikazana je mreža konačnih elemenata za regionalni model tečenja.

### 6.3. Hidrogeološke karakteristike

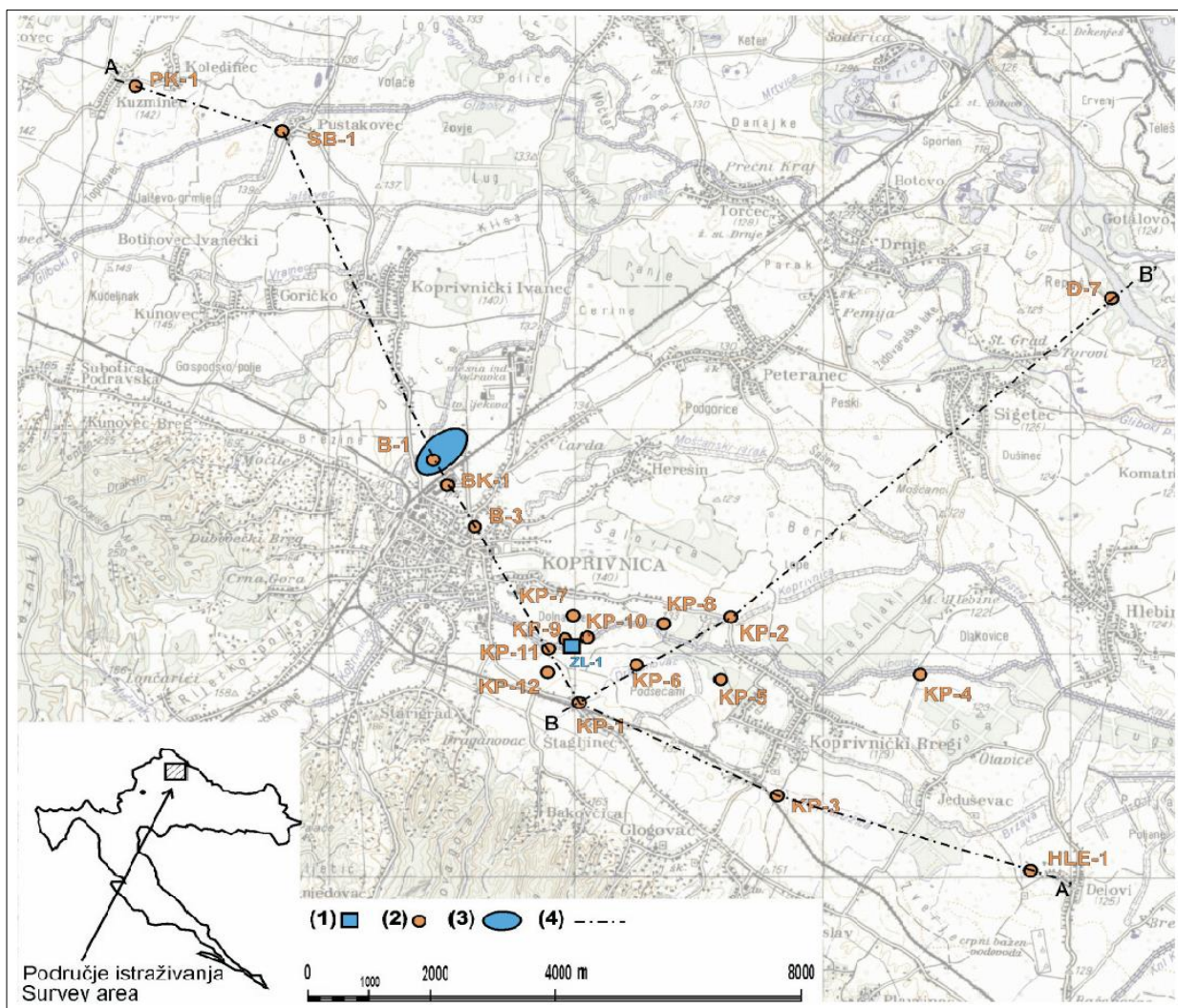
Područje promatrane domene oko odlagališta Piškornica (Slika 28.) pripada dravskom slivu i sačinjavaju ga naslage tzv. mlađe dravske terase (SUO Piškornica, 2001). Ove naslage se na površini terena sastoje od prašinstog tanjeg humusnog pokrivača te sloja glinastog pijeska i šljunka. U zoni odlagališta taj sloj je između 5 i 10 metara. Ispod tog površinskog krovinskog sloja je gornji vodonosni sloj šljunkovito-pjeskovitog materijala s dominantnim utjecajem šljunka. U zoni odlagališta taj sloj je oko 50 metara. Na promatranoj domeni ovaj sloj je većinom s donje strane ograničen nepropusnim do slabo-propusnim slojem gline. Taj glineni sloj dijeli gornji i donji vodonosnik (slabije propusniji šljunci), no njegov kontinuitet nije dokazan na cijeloj promatranoj domeni. Ispod drugog vodonosnika (debljine preko 50 m) je nepropusna podina vodonosnog kompleksa.

Na mjestu odlagališta su početkom devedesetih godina napravljeni plitki piezometri PK1-PK5 dubine 6 do 12 m koji su između ostalog služili za kontrolu kvalitete vode. U tim piezometrima su rađene 24 granulometrijske krivulje na 24 uzorka krupnozrnog materijala te su također rađena 24 uzorka sitnozrnog materijala u edometru (SUO Piškornica, 2001). Sva ta mjerenja pokazuju da je propusnost krovinskog pokrivača između  $7.5 \cdot 10^{-9}$  i  $4.8 \cdot 10^{-7}$  m/s, pješčanog dijela vodonosnika između  $3.5 \cdot 10^{-6}$  i  $4.7 \cdot 10^{-5}$  m/s te najzastupljenijeg šljunčanog dijela vodonosnika između  $2.1 \cdot 10^{-6}$  i  $1.8 \cdot 10^{-4}$  m/s. Iz ovih podataka na odlagalištu se može transmisivnost procijeniti da je manja od  $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ , no treba naglasiti da plitki piezometri ne zahvaćaju cijeli kompleks šljunaka u vodonosniku i da ovu procjenu možemo uzeti s rezervom.

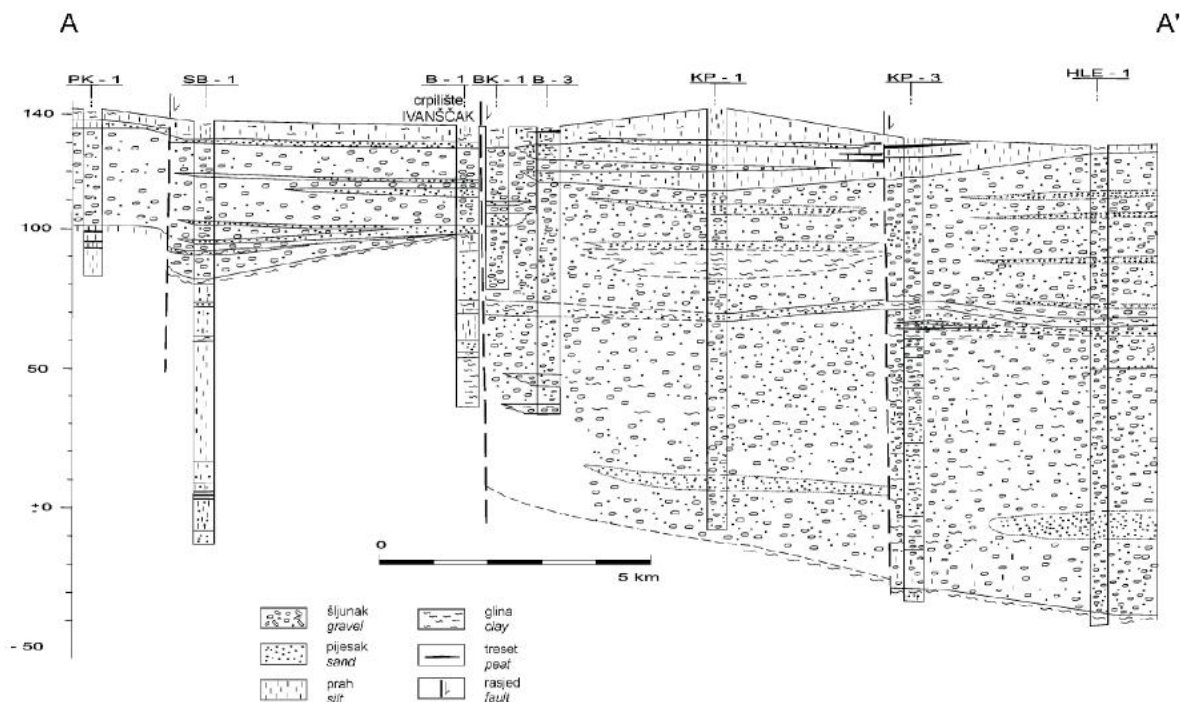
Duić i Urumović (2007) su sublimirali sve dotadašnje studije vezano za hidrogeologiju ovog područja, posebice dijela domene oko crpilišta Ivanščak i Lipovec. Na slici ispod (Slika 30.) je prikaz tog područja sa svim istražnim i eksploatacijskim dubokim bušotinama i plićim piezometrima te dva regionalna profila A-A' i B-B' (Slika 31. i Slika 32.). Vidljivo je iz profila da na području odlagališta (blizu bušotine SB-1) gornji vodonosnik je debljine 50 m i pretežno ga sačinjavaju šljunčane naslage. Na području oko crpilišta Ivanščak (bušotina B-1, Slika 31.) glineni sloj dijeli gornji i donji vodonosnik na dva dijela. Gornji vodonosnik prema pokusnim crpljenjima ima transmisivnost oko  $0.036 \text{ m}^2/\text{s}$  i efektivnu poroznost od 10% ili 0.1 (Duić i Urumović, 2007). Na području oko crpilišta Lipovec (bušotine ZL-1 i blizu KP-11, Slika 32.) glineni sloj također dijeli gornji i donji vodonosnik na dva dijela. Gornji vodonosnik prema pokusnim crpljenjima ima transmisivnost oko  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$  i efektivnu poroznost od 10% ili 0.1 (Duić i Urumović, 2007).

Regionalni model tečenja će opisati gornji vodonosnik kao vodonosnik pod tlakom zbog postojanja nepropusne podine i slabopropusne krovine (ne možemo reći da krovina stvara arteške uvjete). Bez obzira što kontinuitet podinskog glinenog sloja između dva vodonosnika nije potpuno dokazan, pretpostavit ćemo da gornji vodonosnik čini jednu hidrodinamičku cjelinu i da je povezan s odlagalištem. Iako transmisivnost nije homogena na području regionalnog modela, iz dostupnih podataka može se procijeniti da je srednja vrijednost transmisivnosti oko  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$  i efektivna poroznost oko 10% ili 0.1.

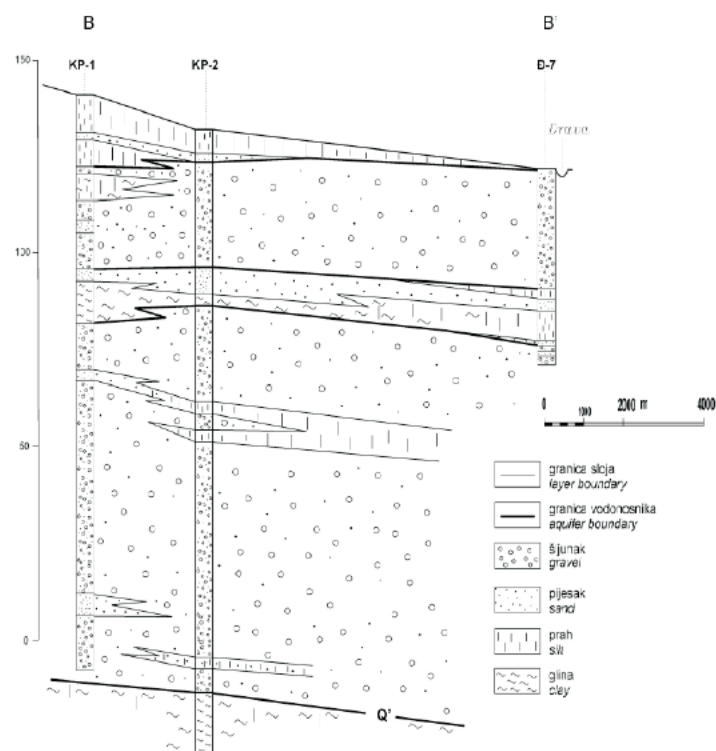
Kolebanja nivoa podzemne vode na godišnjoj razini su mala (2 do 5 m ispod razine terena) tako da možemo uzeti velike vode kao referentne za uspostavu stacionarnog (neovisnog o vremenu) regionalnog modela tečenja. Regionalni model pokriva relativno veliko područje od  $400 \text{ km}^2$  te uzima heterogenost aluvija u obliku transmisivnosti kao integrirane veličine po dubini (trećoj dimenziji, osi z). Stoga je model dvodimenzionalan i pokazuje regionalno tečenje u dravskom slivnom dijelu toka koji je vezan za odlagalište Piškornica.



Slika 30. Prikaz hidrogeoloških objekata na području crpilišta Ivanščak i Lipovec: 1) Istražna bušotina ZL-1 na crpilištu Lipovec, 2) istraživačke bušotine i piezometarska gnijezda, 3) crpilište Ivanščak, 4) profili regionalnog modela tečenja. Preuzeto iz Duić i Urumović (2007)



Slika 31. Regionalni profil A-A' sa slike 4.3. Preuzeto iz Duić i Urumović (2007)



Slika 32. Regionalni profil B-B' sa slike 4.3. Preuzeto iz Duić i Urumović (2007)

### 6.3.1. Opis rubnih uvjeta

Na slici ranije (Slika 28.) prikazane su rubovi/granice promatrane domene regionalnog modela tečenja. Na slici 4.2 prikazana je 2-D mreža konačnih elemenata regionalnog modela tečenja. Da bi dobili realno stanje tečenja na području oko odlagališta Piškornica, neophodno je ispravno postaviti rubne uvjete. Sa sjeverne strane Drava je rubna granica koja mora determinirati globalno regionalno tečenje u modelu. Drava je uzeta kao nepropusna granica (strujnica toka) tako da regionalni tok mora teći paralelno s Dravom što pokazuju i mjerenja na terenu. Na slici ranije (Slika 29.) treba napomenuti da sjeverna granica modela može samo približno opisati meandriranje rijeke. Na istočnom dijelu određena je granica s prisilnim rubnim uvjetom od 140 m. Na zapadnom dijelu određena je granica s prisilnim rubnim uvjetom od 120 m. Južna granica je nepropusna granica (odnosno strujnica) koja je približno paralelno položena u odnosu na tok Drave, a s druge strane dovoljno udaljena od Piškornice i crpilišta da ne bi utjecala na rezultate modela. Ovako definiranje rubnih uvjeta je u skladu sa studijom Urumović i dr. (1996).

### 6.3.2. Crpilište Ivanščak

Crpilište Ivanščak na promatranoj domeni je prikazano na slikama ranije (Slika 28., Slika 29. i Slika 30.) Crpilište je udaljeno oko 5.5 km zračne linije od odlagališta. Hidrogeološka analiza crpilišta je rađena u studiji Urumović i dr. (1996). Crpilište ima značajan utjecaj na hidrodinamičku sliku strujanja na promatranoj domeni. Značajno prekomjerno crpljenje može izazvati direktnu vezu između odlagališta Piškornica i crpilišta koje opskrbljuje grad Koprivnicu. Treba napomenuti da područje odlagališta ne spada u I, II i IIIa zaštitnu zonu crpilišta. Dosadašnja eksploatacija ne potvrđuje utjecaj odlagališta na kvalitetu vode u crpilištu. S obzirom na crpilište kao najznačajnije vodno tijelo u promatranoj domeni te njegov utjecaj na rezultate regionalnog modela tečenja, u ovom poglavlju studije se analiziraju slijedeći scenariji crpljenja:

S1 –  $Q = 0$  (l/s); nema crpljenja.

S2 –  $Q = 100$  (l/s); odgovara sadašnjem prosječnom crpljenju.

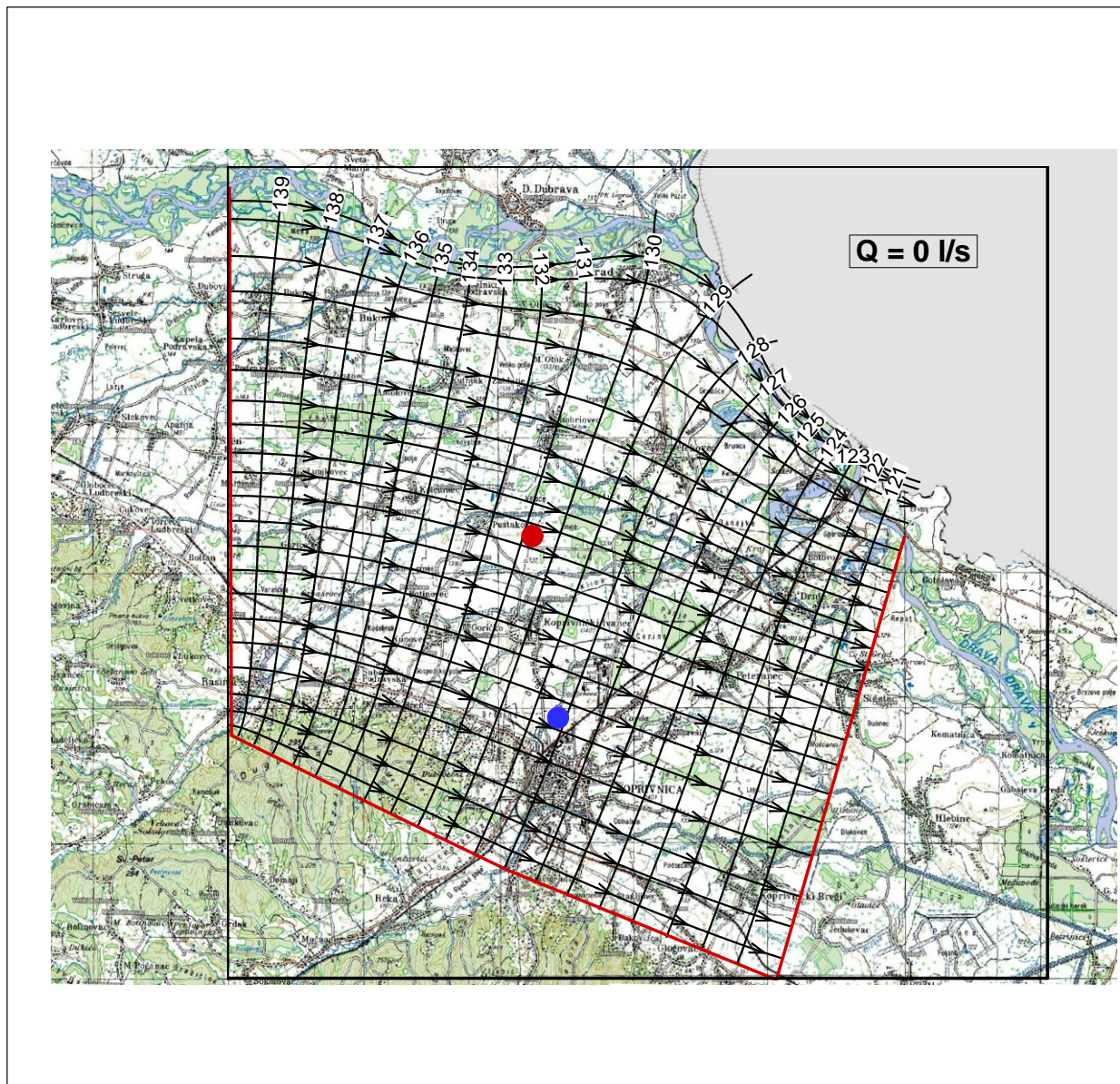
S3 –  $Q = 200$  (l/s); odgovara sadašnjem maksimalnom crpljenju.

S4 –  $Q = 420$  (l/s); odgovara maksimalnom crpljenju s obzirom na sadašnji kapacitet crpilišta.

S5 –  $Q = 600$  (l/s); odgovara crpljenju koje bi uzrokovalo direktnu hidrodinamičku vezu između crpilišta i odlagališta Piškornica.

### 6.3.3. Scenarij crpljenja - S1

S1 podrazumijeva da nema crpljenja, odnosno da je crpilište Ivanščak van funkcije ili opisuje početno stanje prije izgradnje crpilišta (Slika 33.). Zbog pretpostavke konstantne transmisivnosti regionalni tok prati sjevernu i južnu granicu modela i prilagođava se prije svega geometriji rijeke Drave i njenoj položenosti.



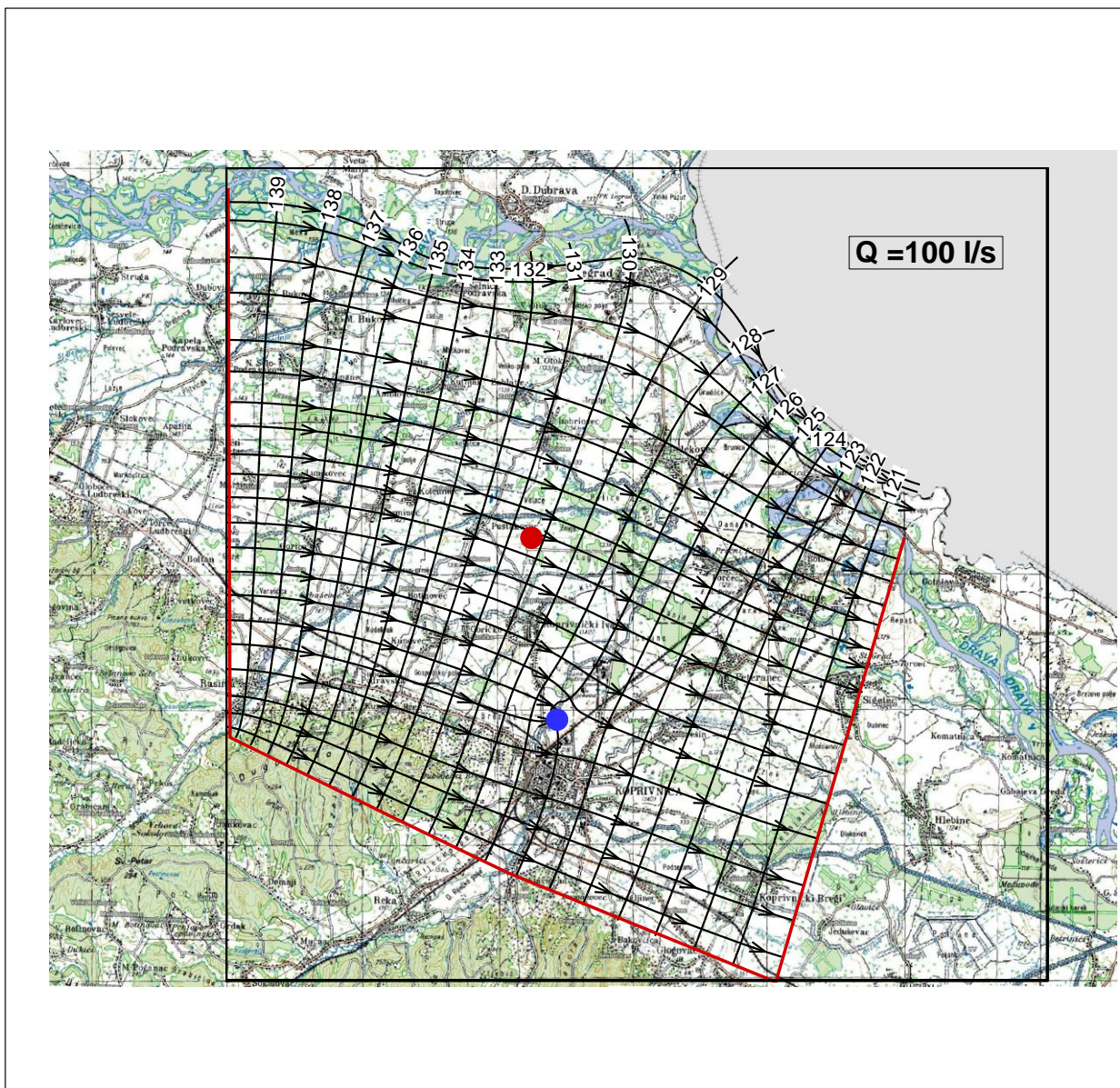
Slika 33. Prikaz tečenja na području odlagališta Piškornica bez crpljenja u izvorištu Ivanščak

Tok je usmjeren od sjeverozapada prema jugoistoku što je u suglasju s analizom studije Urumovića i dr. (1996). Linije označene sa strelicom u smjeru toka su strujnice. Druga familija krivulja okomita na strujnice su piezometarske visine koje se kreću od 140 na zapadu do 120 m na istoku. Srednja brzina na odlagalištu i nizvodno od njega je oko 86.4 cm/dan sa srednjim hidrauličkim gradijentom od 0.001 ili 0.1%. Da bi se stekao dojam o snazi toka, čestica otpada iz odlagališta pređe 1 km za malo više od 3 godine. Pošto od odlagališta do rijeke Drave ima oko 17 km, ispada da oblak zagađenja uslijed samo



advektivnog pronosa treba više od 50 godina da bi stigao do rijeke.

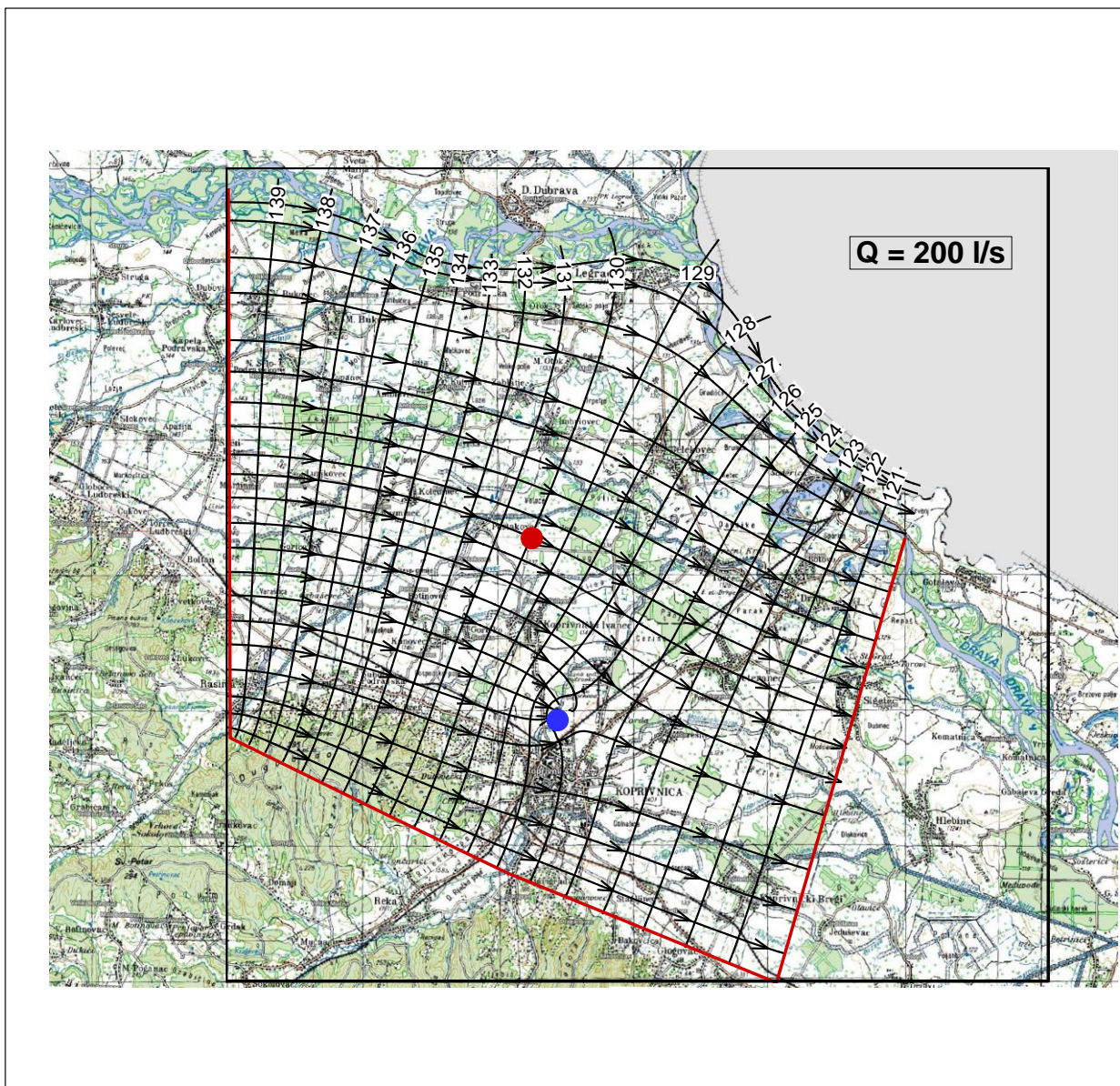
#### 6.3.4. Scenarij crpljenja – S2



Slika 34. Prikaz tečenja na području odlagališta Piškornica za crpljenje u izvorištu Ivanščak od 100 l/s što odgovara današnjim vrijednostima

S2 scenarij crpljenja odgovara sadašnjem prosječnom kapacitetu crpljenja od 100 l/s. Možemo reći da ovaj scenarij opisuje sadašnje stanje na terenu. Na slici iznad (Slika 34.) dana je hidrodinamička slika strujanja za ovaj slučaj crpljenja. Sada je dio toka usmjeren prema crpilištu. Širina toka („strujne cijevi“) prema crpilištu je oko 1.5 km. Brzina i gradijent na odlagalištu se nisu promijenili. Nizvodno od odlagališta regionalni tok je blago zakrenut prema crpilištu i udaljeniji od pružanja potoka Gliboki.

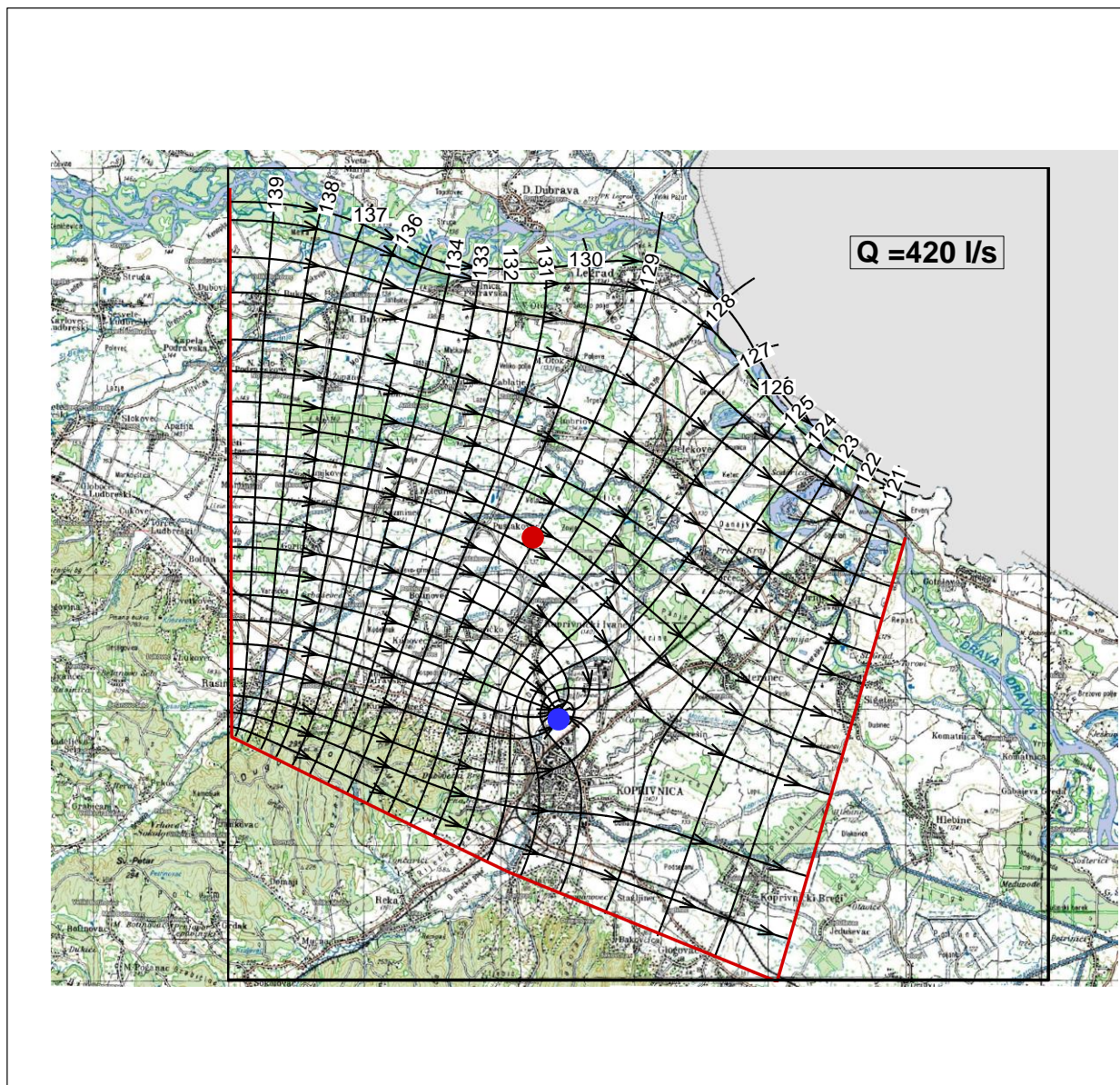
6.3.5. Scenarij crpljenja – S3



Slika 35. Prikaz tečenja na području odlagališta Piškornica za crpljenje u izvorištu Ivanščak od 200 l/s što odgovara maksimalnim današnjim količinama crpljenja

S3 scenarij crpljenja odgovara sadašnjem maksimalnom ili vršnom kapacitetu crpljenja od 200 l/s. Možemo reći da ovaj scenarij opisuje najnepogodnije sadašnje stanje na terenu. Na slici iznad (Slika 35.) dana je hidrodinamička slika strujanja za ovaj slučaj crpljenja. Sada je značajan dio toka usmjeren prema crpilištu. Širina toka („strujne cijevi“) prema crpilištu je oko 3 km. Brzina i hidraulički gradijent na odlagalištu i nizvodno od njega su zanimljivo manji nego u slučaju bez crpljenja čime bi oblak zagađenja još dulje putovao do rijeke Drave (efekt većeg zakretanja toka prema crpilištu). Nizvodno od odlagališta regionalni tok se nalazi između crpilišta i potoka Gliboki potencijalno ne ugrožavajući niti jedan od ova dva vodna tijela.

### 6.3.6. Scenarij crpljenja – S4

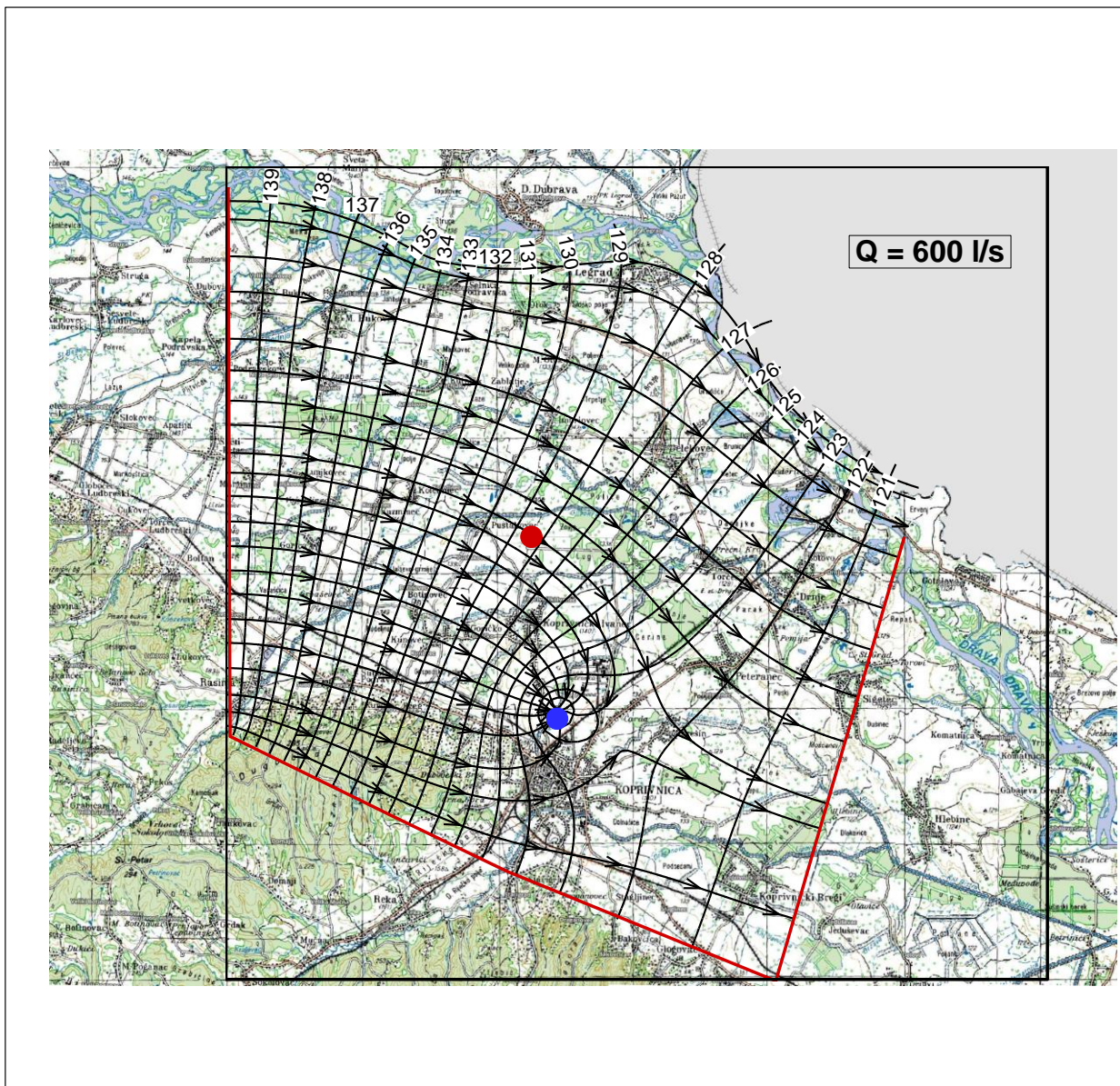


Slika 36. Prikaz tečenja na području odlagališta Piškornica za crpljenje u izvorištu Ivanščak od 420 l/s što odgovara trenutnim maksimalnim mogućim količinama crpilišta

S4 scenarij crpljenja odgovara maksimalnom ili vršnom kapacitetu crpilišta od 420 l/s. Možemo reći da ovaj scenarij opisuje najnepogodnije buduće stanje na terenu. Na slici iznad (Slika 36.) dana je hidrodinamička slika strujanja za ovaj slučaj crpljenja. Sada je veći dio toka usmjeren prema crpilištu. Širina toka („strujne cijevi“) prema crpilištu je oko 6 km. Nizvodno od odlagališta regionalni tok još nije spojen sa crpilištem, no u analizi pronosa ćemo analizirati da li disperzija može jedan dio oblaka zagađenja donijeti u crpilište. Brzina kretanja oblaka bila bi oko 96 cm/dan.

### 6.3.7. Scenarij crpljenja – S5

S5 scenarij crpljenja odgovara količini crpljenja od 600 l/s koja bi prouzročila direktnu vezu između odlagališta i crpilišta. Ovaj scenarij opisuje stanje na terenu kada se podzemna voda ispod odlagališta može usmjeriti prema crpilištu. Na slici ispod (Slika 37.) dana je hidrodinamička slika strujanja za ovaj slučaj crpljenja. Srednja brzina kretanja oblaka prema crpilištu bila bi oko 110 cm/dan čime bi za oko 20 godina došao do zahvaćene vode.



Slika 37. Prikaz tečenja na području odlagališta Piškornica za crpljenje u izvorištu Ivanščak od 600 l/s što odgovara količinama crpljenja koje uzrokuju hidrodinamičku vezu između odlagališta i crpilišta

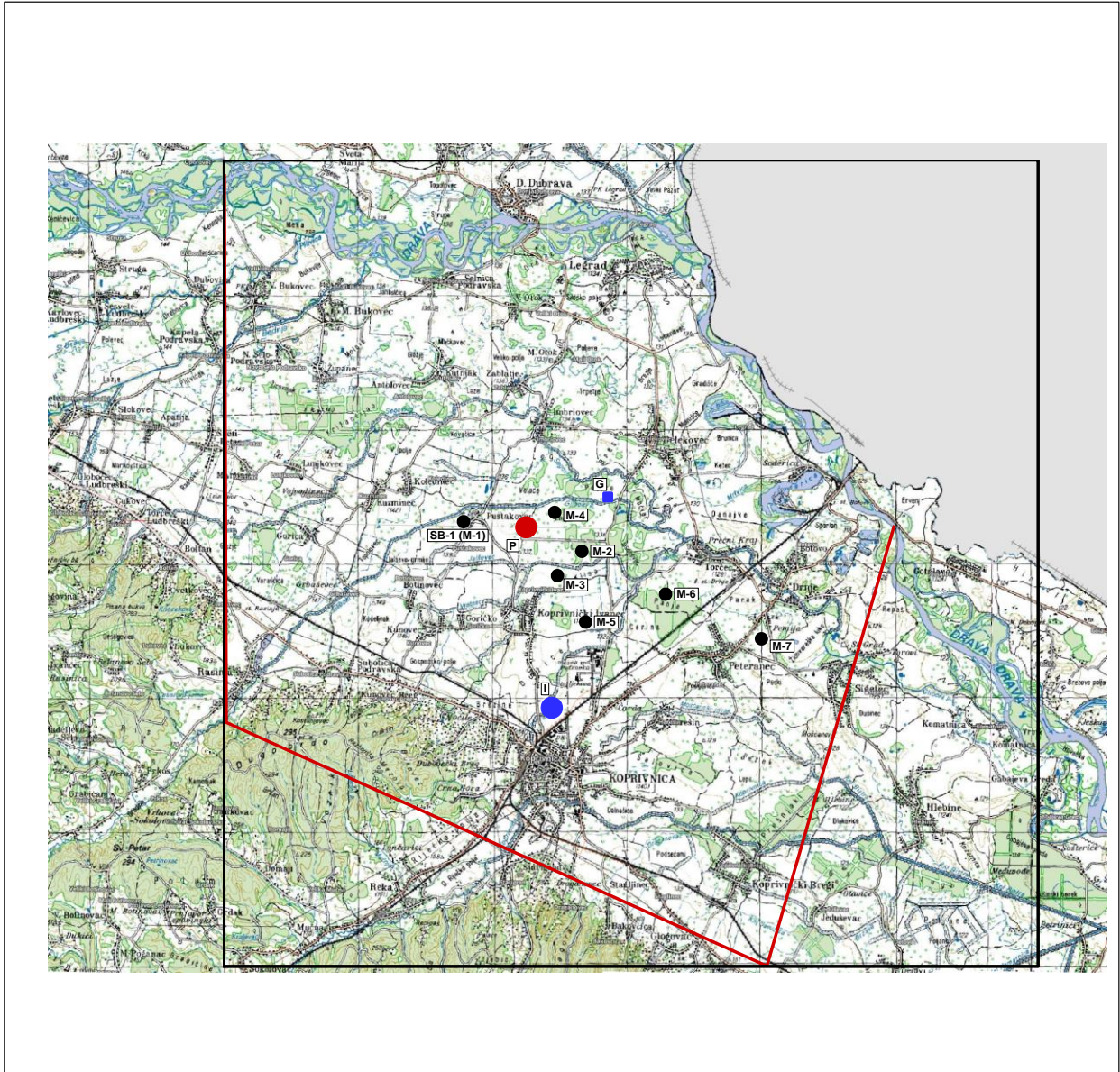
## 7. ANALIZA PRONOSA ZAGAĐENJA NA PODRUČJU ODLAGALIŠTA PIŠKORNICA

### 7.1. Uvod

Odlaganje komunalnog otpada na odlagalištu Piškornica odvija se od 1982. godine. Kao i kod većine odlagališta u to vrijeme, nije izvedeno nepropusno dno u obliku glinenog tepiha (barem metar debljine) sa primarnom i eventualnom sekundarnom odvodnjom koja procjednu vodu odvodi na uređaj za pročišćavanje. Oborine koje padaju na područje odlagališta se procjeđuju kroz „tijelo“ otpada i stvaraju efluent – fluid koji sadrži otpadnu vodu sa mnogim supstancama opasnim po vodna tijela kao što su teški metali, razni plinovi kao metani, sumporovodici te mnogi drugi organski i anorganski spojevi. Efluent u tom slučaju bez podinske barijere ulazi u vodonosnik i kao oblak zagađenja širi se i putuje nizvodno prema vodnim tijelima. U ovom slučaju na području odlagališta Piškornica mogu se ugroziti potok Gliboki, rijeka Drava i crpilište Ivanščak. Iako je veći dio odlagališta saniran te odlagalište ima u potpunosti izgrađene brtvene slojeve i dalje je jedan dio starog odlagališta bez podinske zaštite, odnosno nije saniran te se iz tog dijela potencijalno širi oblak onečišćenja koji je formiran za vrijeme odlaganja otpada do 2005. godine. Ovaj oblak predstavlja potencijalnu ugrozu za prethodno spomenuta vodna tijela i resurse pitke površinske i podzemne vode.

U ovom poglavlju će se izvršiti analiza pronosa zagađenja od odlagališta nizvodno prema vodnim tijelima. Generalno, oblak zagađenja se prenosi mehanizmima advekcije (uvjetovano brzinom podzemne vode), disperzije i kinetikom kemijskih reakcija efluenta i poroznog medija (kemijski pronos). Kako geokemijska analiza efluenta i poroznog medija nije dosad rađena na području odlagališta Piškornica (kao i u ostalim našim odlagalištima), nije moguće definirati niti oblik, niti parametre kemijskog pronosa (npr. retardacija brzine ili parametre sorpcije). Stoga se u ovoj studiji radi tzv. konzervativni pronos definiran osnovnim procesima advekcije i disperzije koji se inače zove i nereaktivni pronos. Takav oblik pronosa predstavlja najgori mogući scenarij („the worst case scenario“) s aspekta dosega oblaka, njegovog vremena putovanja i koncentracije oblaka. Naime, ovakav konzervativni oblak dati će najveći doseg širenja oblaka jer se promatra advektivni pronos bez retardacije (usporavanja) brzine kojeg u značajnoj mjeri uzrokuje kemijska komponenta pronosa. Kod ovakvih vrsta odlagališta i formiranog oblaka retardacija brzine može biti i do deset puta (Rubin, 2003). To znači da oblak zagađenja treba npr. deset puta više vremena putovanja do određenog vodnog tijela nego što će dati prezentirana analiza. Svako produljenje boravka oblaka zagađenja u podzemnoj poroznoj sredini omogućava dulje vrijeme njegove auto-purifikacije, odnosno većeg smanjenja koncentracije, vrlo često ispod dozvoljene maksimalne količine (MDK). Smanjenje koncentracije se događa jer jedan dio oblaka ide brže zbog advekcije, a retardacija brzine uzrokuje da je jedan dio oblaka usporen zbog kemijskih reakcija između efluenta i porozne sredine (značajan utjecaj mogu imati i reakcije između komponenti efluenta). Na taj način oblak zagađenja zauzima veći prostor nego u konzervativnom slučaju što znači da veće širenje oblaka implicira njegove manje koncentracije, a samim time i značajno manju opasnost za vodna tijela.

Na osnovi regionalnog modela tečenja određeno je pet osnovnih scenarija tečenja S1-S5 te je polje brzina glavna ulazna varijabla za analizu konzervativnog pronosa na odlagalištu koja definira advektivnu komponentu pronosa. Svaki scenarij tečenja je definiran drugačijom slikom strujanja što implicira drugačija svojstva širenja oblaka u smislu njegovog prostornog i vremenskog kretanja kao i veličine koncentracije.



Slika 38. Prikaz opservacijskih točaka korištenih u analizi pronosa na području odlagališta Piškornica (odlagalište – P, crpilište Ivanščak – I, potok Gliboki – G, piezometri M1 – M7 koji će predstavljati budući monitoring)

Dodatni mehanizam širenja oblaka konzervativnog pronosa je disperzija koja nastaje zbog zanemarenja varijacija brzina na skali manjoj od skale konačnog elementa u modelu tečenja. Zadavanje disperzije se svodi na definiranje parametara longitudinalne i transverzalne disperzije što unaprijed nije poznato te je ovisno o izboru veličine konačnog elementa u modelu tečenja. U ovoj studiji se bira relativno velika vrijednost longitudinalne disperzije (uvijek manja od veličine konačnog elementa u smjeru tečenja – strujnice). Posebice bitnu ulogu ima parametar transverzalne disperzije koji definira transverzalno širenje oblaka, okomito na strujnice. Novija istraživanja pokazuju da je trasverzalna vrijednost 10-1000 puta manja od vrijednosti longitudinalne disperzije (Rubin, 2003). U ovoj studiji mi biramo opet relativno veliku vrijednost transverzalne disperzije tako da je deset puta manja od longitudinalne disperzije. Ovakav odabir disperzije daje najveće širenje oblaka koji daje nešto manje njegove

koncentracije, ali definira kraće vrijeme prvih dolazaka do vodnih tijela i veći prostorni doseg te time veću potencijalnu opasnost za okoliš i vodna tijela.

Na slici iznad (Slika 38.) prikazana je domena promatranog područja sa deset opservacijskih točaka u kojima ćemo pratiti kretanje oblaka zagađenja i analizirati moguće efekte na vodna tijela. Tri osnovne opservacijske točke su odlagalište Piškornica – P, crpilište Ivanščak - I i potok Gliboki – G. Ostale opservacijske točke predstavljaju piezometre M1 do M7 koje kasnije mogu definirati budući monitoring. M1 je piezometar udaljen oko 2 km od odlagališta na mjestu gdje se nalazi duboka bušotina SB-1. Predlaže se da se ta bušotina koristi kao M-1 koja će odrediti uvjete tečenja i kvalitete vode uzvodno od odlagališta. Piezometar M-2 se nalazi oko 1.75 km od odlagališta i nalazi se na strujnici iz odlagališta za simulaciju crpljenja S2 koja odgovara današnjim uvjetima crpljenja. Piezometar M-3 se nalazi oko 1.75 km od odlagališta i nalazi se na strujnici iz odlagališta za simulaciju crpljenja S5 kada je uspostavljena direktna hidrodinamička veza između odlagališta i crpilišta. M-4 je piezometar udaljen oko 1.25 km od odlagališta blizu potoka Gliboki. M-4 se može kompenzirati s mjerenjima u potoku Gliboki jer ima zadaću praćenja oblaka zagađenja prema ovom vodnom tijelu. Piezometri M-6 i M-7 imaju zadaću odrediti kretanje oblaka zagađenja iz glavnog mogućeg pravca širenja zajedno sa M-2. M-6 je udaljen oko 4.87 km, a M-7 oko 8.12 km od odlagališta. M-5 udaljen 3.3 km od odlagališta ima zadaću odrediti kretanje oblaka iz odlagališta prema crpilištu Ivanščak zajedno sa M-3. Na ovaj način se prate sva tri moguća nizvodna smjera širenja oblaka u prostoru i vremenu.

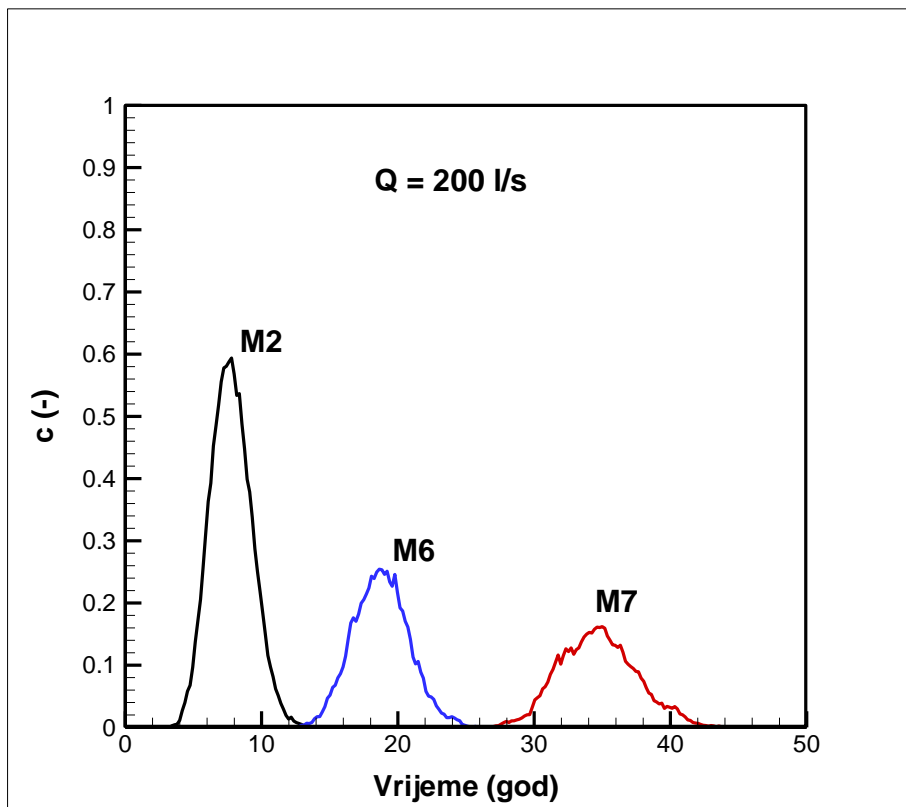
## 7.2. Ulazni podaci

Osnovni ulazni podaci su dani u regionalnom modelu tečenja, dakle domena, rubovi, mreža konačnih elemenata te polje brzina za scenarije tečenja S1-S5. Na odlagalištu otpada se formira efluent, oblak zagađenja koji se u analizi pronosa promatra kao niz čestica („particles“). U ovoj analizi promatramo trenutno utiskivanje otpada u trenutku otvaranja odlagališta kada utiskujemo u model 2000 čestica (Slika 38. - prikazano crvenim krugom – P). Naime, ovo je jednostavnija varijanta, dok je drugi način zadavanje kontinuiranog izvora zagađenja (što se realno događa na odlagalištu) što zahtijeva unošenje novih čestica u svakom vremenskom koraku. Međutim, ova jednostavnija varijanta će pokazati sva bitna svojstva konzervativnog pronosa u smislu prostorne i vremenske distribucije oblaka zagađenja. Realni scenarij bio bi mnogo važniji kada bi sagledavali reaktivni kemijski pronos.

Svaka čestica ima svoju masu. Iz položaja čestica interpolacijom njihovih položaja u mreži konačnih elemenata se računa početna koncentracija. Dakle, masa čestica se bira tako da se koncentracija u odlagalištu definira kao jedinična vrijednost ( $c=1$ ). Time smo prikazali koncentraciju u bezdimenzionalnoj formi jer nas zanima koliko je relativno razrjeđenje oblaka, a ne stvarne vrijednosti koncentracija pošto ne promatramo reaktivni pronos određenih odabranih supstanci u otpadu, niti imamo na dispoziciji detaljnu geokemijsku analizu. Analiza pronosa zagađenja se prikazuje na dva načina: 1) prostorno širenje oblaka zagađenja nizvodno od odlagališta za različita vremenska razdoblja i 2) krivulje ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije i vremena za svih 10 opservacijskih točaka sa slike iznad (Slika 38.). Na kraju je potrebno odrediti parametre longitudinalne i transverzalne disperzije. Kako je prosječna veličina konačnog elementa od 166 do 200 m, uzimamo da je koeficijent longitudinalne disperzije jednak desetini veličine prosječne stranice konačnog elementa i iznosi oko 20 m (što je realno velika vrijednost), a koeficijent transverzalne disperzije deset puta manji i iznosi oko 2 m (realno još veća vrijednost).

### 7.3. Analiza pronosa oblaka zagađenja za scenarij tečenja S1-S3

Na slikama ranije (Slika 33., Slika 34. i Slika 35.) prikazana je strujna slika za scenarije tečenja S1-S3. Regionalni tok se kreće od sjeverozapada prema jugoistoku. Advekcija uzrokuje da oblak putuje između potoka Gliboki i crpilišta, ali bliže potoku. Pri tome nema direktne hidrodinamičke veze između odlagališta i crpilišta te odlagališta i potoka Gliboki. Stoga, polje strujnica iz odlagališta koje definira advekciju prisiljava oblak zagađenja da njegov centar putuje po trasi P-M2-M6-M7. Nema značajnijih razlika između rezultata pronosa za scenarije S1 do S3, stoga dajemo samo rezultate za S3 koje predstavljaju najnepovoljniji scenarij.

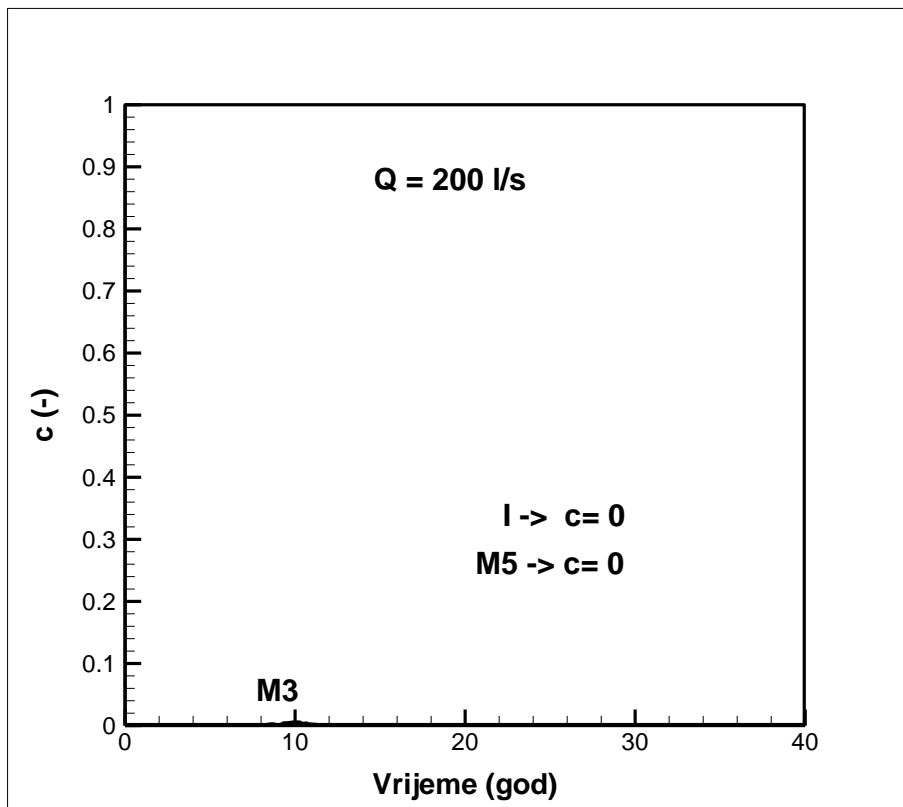


Slika 39. Prikaz ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije za scenarij tečenja S3 u opservacijskim točkama M2, M6 i M7 koje se nalaze u glavnom smjeru širenja oblaka nizvodno od odlagališta Piškornica

Na slici iznad (Slika 39.) se vidi da su maksimalne koncentracije u piezometru M2 (59% od početne koncentracije) te se gradualno smanjuju u M6 (25%) i M7 (16%). Krivulje koncentracije u piezometrima imaju oblik vrlo sličan normalnoj razdiobi gdje maksimum postižu u M2 za 7.5 godina, u M6 za 19 godina te u M7 za 35 godinu. Sve krivulje c-t imaju vrijednosti nula dok prve čestice zagađenja ne dođu u njihovu okolinu. Stoga su prva vremena putovanja oblaka zagađenja do M2 oko 3 godine, do M6 oko 13 godina, a do M7 oko 26 godina. Krivulje c-t imaju nenulte vrijednosti u vremenskom razdoblju dok oblak zagađenja putuje preko tog područja. Nakon prolaska oblaka vrijednosti koncentracije prolazne krivulje c-t su opet nula. Ovaj nenulti vremenski segment definira varijancu prolazne krivulje c-t (varijanca je jednaka njegovoj šestini) koja iznosi oko 2 godine za sve piezometre M2, M6 i M7.



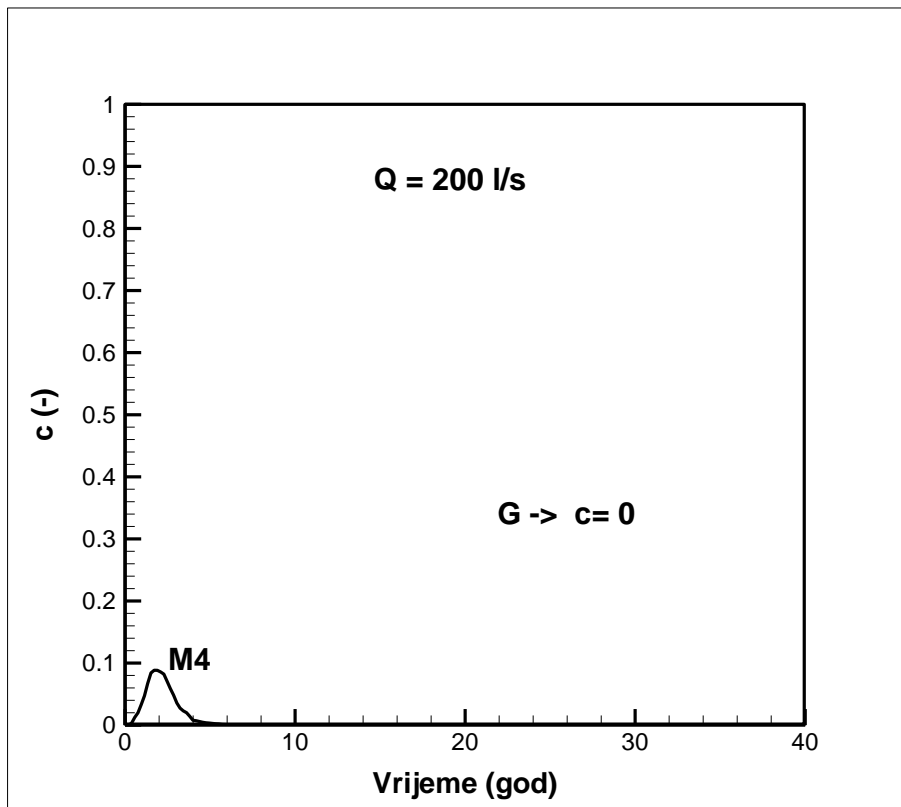
Dimenzije oblaka zagađenja su u odlagalištu procijenjene kao 0.5x0.5 km. Oblak zagađenja nošen nizvodno advekcijom i disperzijom se povećava i razrjeđuje te nakon 7.5 godina zauzima prostor od oko 2.5x1.25 km, nakon 19 godina oko 3x2 km, a nakon 35 godinu oko 4x3 km. Nakon 45 godina, oblak zagađenja prolazi područje zadnjeg najudaljenijeg piezometra M7.



Slika 40. Prikaz ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije za scenarij tečenja S3 u opservacijskim točkama I – Ivanščak te piezometrima M3 i M5

Na slici iznad (Slika 39.) se vide karakteristike pronosa zagađenja u crpilištu Ivanščak. Može se zaključiti da niti u slučaju najvećeg današnjeg crpljenja od 200 l/s te uporabe najgoreg mogućeg konzervativnog scenarija pronosa, neće doći do zagađenja pitke vode u crpilištu Ivanščak. Dokaz tome su nulte vrijednosti prolazne krivulje za crpilište Ivanščak i M5. Jedino je zabilježena jako mala koncentracija u piezometru M3 od 0.3%. Očigledno da oblak zagađenja u ovom scenariju može doći u područje crpilišta samo putem transverzalne disperzije. No, bez obzira na odabir velike vrijednosti koeficijenta transverzalne disperzije, to se u scenarijima S1-S3 ne događa.

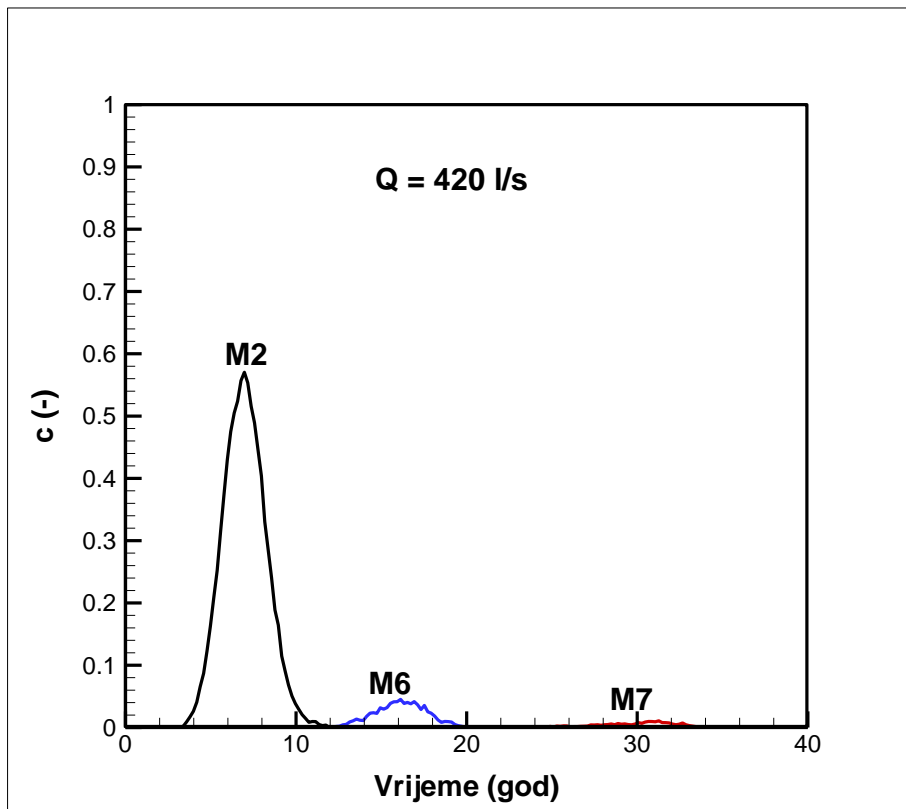
Preostalo pitanje je da li oblak zagađenja ugrožava potok Gliboki u ovom scenariju S3? S obzirom na smjer regionalnog tok. Na slici ispod (Slika 41.) se vidi da je maksimalna koncentracija u piezometru M4 oko 8.9% nakon 1.85 godina. U mjernoj točki u potoku Gliboki koncentracija je nula što znači da nema zagađenja iz odlagališta. Zaključak je da potok Gliboki nije u direktnom kontaktu s oblakom zagađenja iz odlagališta kako je pokazano i mjerenjima kvalitete vode.



**Slika 41.** Prikaz ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije za scenarij tečenja S3 u opservacijskim točkama G – Gliboki te piezometru M4

#### 7.4. Analiza pronosa oblaka zagađenja za scenarij tečenja S4

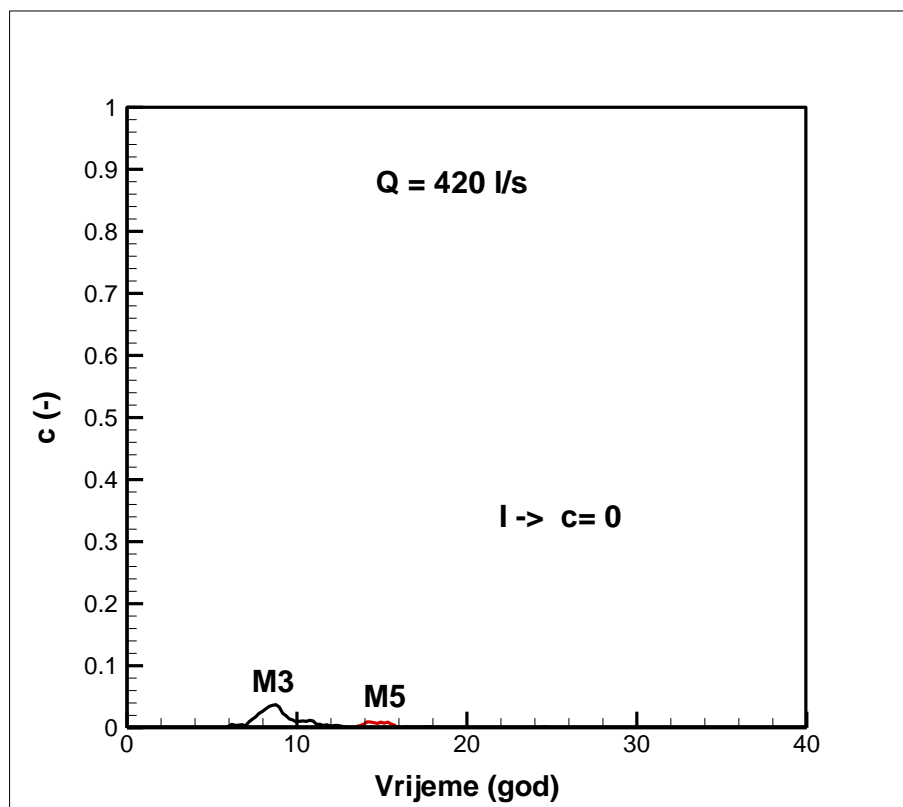
Na slici ranije (Slika 36.) prikazana je strujna slika za scenarij tečenja S4. Zbog relativno velikog crpljenja od 420 l/s u crpilištu Ivanščak, strujnice su zakrenute prema crpilištu u odnosu na scenarije S1-S3, no još nema direktne hidrodinamičke veze između odlagališta i crpilišta. Stoga, polje strujnica iz odlagališta koje definira advekciju prisiljava oblak zagađenja da i dalje najvećim dijelom putuje ne toliko udaljeno od trase P-M2-M6-M7. Sada oblik zagađenja putuje točno između potoka Gliboki i crpilišta. Na slici ispod (Slika 42.) se vidi da su maksimalne koncentracije u piezometru M2 (57% od početne koncentracije) te se gradualno smanjuju u M6 (4%), da bi značajno smanjenje doživjele u M7 (1%). Krivulje koncentracije u piezometrima imaju oblik vrlo sličan normalnoj razdiobi gdje maksimum postižu u M2 za 7 godina, u M6 za 16 godina te u M7 za 31 godinu. Sve krivulje c-t imaju vrijednosti nula dok prve čestice zagađenja ne dođu u njihovu okolinu. Stoga su prva vremena putovanja oblaka zagađenja do M2 oko 5 godina, do M6 oko 12 godina, a do M7 oko 25 godina. Krivulje c-t imaju nenulte vrijednosti u vremenskom razdoblju dok oblak zagađenja putuje preko tog područja. Nakon prolaska oblaka vrijednosti koncentracije prolazne krivulje c-t su opet nula. Ovaj nenulti vremenski segment definira varijancu prolazne krivulje c-t (varijanca je jednaka njegovoj šestini) koja iznosi oko 1.5 godinu za sve pieozemtre M2, M6 i M7.



Slika 42. Prikaz ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije za scenarij tečenja S4 u opservacijskim točkama M2, M6 i M7 koje se nalaze u glavnom smjeru širenja oblaka nizvodno od odlagališta Piškornica

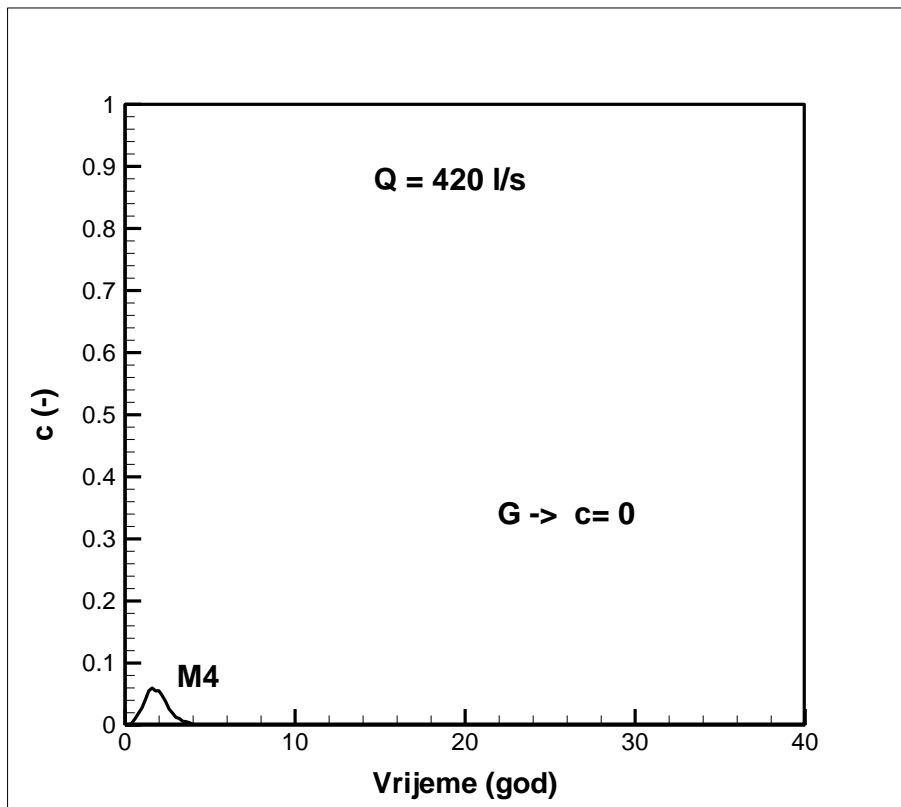
Dimenzije oblaka zagađenja su u odlagalištu procijenjene kao 0.5x0.5 km. Oblak zagađenja nošen nizvodno advekcijom i disperzijom se povećava i razrjeđuje te nakon 7 godina zauzima prostor od 2.5x1.25 km, nakon 16 godina 3x2 km, a nakon 31 godinu 4x3 km. Nakon 35 godina, oblak zagađenja prolazi područje zadnjeg najudaljenijeg piezometra M7.

Na slici ispod (Slika 43.) se vide karakteristike pronosa zagađenja u crpilištu Ivanščak. Dade se zaključiti da niti u slučaju najvećeg mogućeg crpljenja s obzirom na trenutni kapacitet crpilišta te uporabe najgoreg mogućeg konzervativnog scenarija pronosa, neće doći do zagađenja pitke vode u crpilištu Ivanščak. Dokaz tome su nulte vrijednosti prolazne krivulje. Dva postavljena piezometra između odlagališta i crpljenja pokazuju se kao dobar odabir za budući monitoring jer se u njima javljaju prolazne nenulte krivulje. U piezometru M3 maksimalna koncentracija je 3.5%, a u M5 0.8%. Varijanca je oko 1 godinu. Očigledno da oblak zagađenja u ovom scenariju može doći u područje crpilišta samo putem transverzalne disperzije. No, bez obzira na odabir velike vrijednosti koeficijenta transverzalne disperzije, to se niti u ovom scenariju tečenja S4 ne događa.



Slika 43. Prikaz ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije za scenarij tečenja S4 u opservacijskim točkama I – Ivanščak te piezometrima M3 i M5

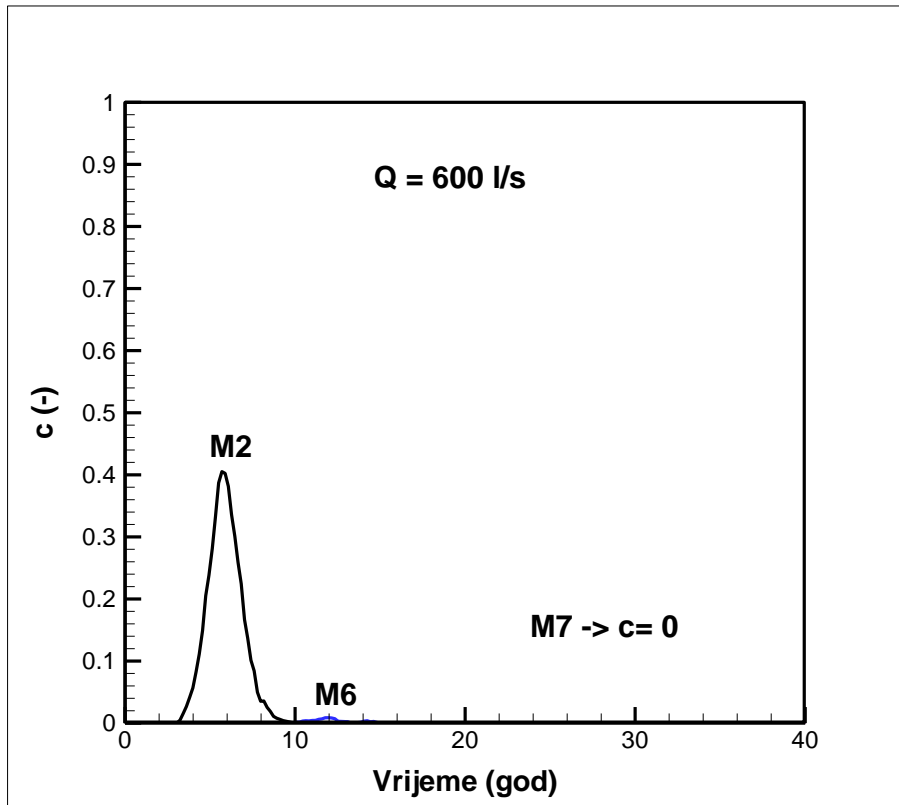
Preostalo pitanje je da li oblak zagađenja ugrožava potok Gliboki u ovom scenariju S4? S obzirom na zakretanje polja strujnica prema crpilištu, sada je situacija povoljnija nego u S1-S3. Na slici ispod (Slika 44.) se vidi da je sada maksimalna koncentracija u piezometru M4 smanjena i iznosi oko 5.6 % nakon 1.75 godina. U mjernoj točki u potoku Gliboki koncentracija je nula što znači da nema zagađenja iz odlagališta. Zaključak je da potok Gliboki nije u direktnom kontaktu s oblakom zagađenja iz odlagališta.



Slika 44. Prikaz ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije za scenarij tečenja S4 u opservacijskim točkama G – Gliboki te piezometru M4

### 7.5. Analiza pronosa oblaka zagađenja za scenarij tečenja S5

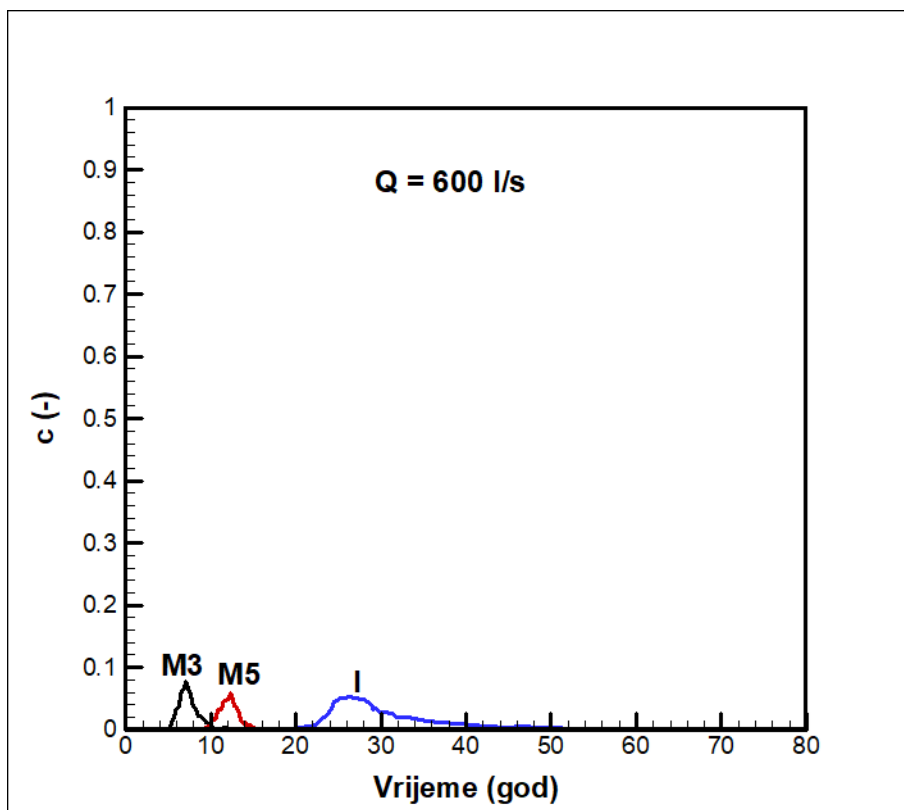
Na slici ranije (Slika 37.) prikazana je strujna slika za scenarij tečenja S5. Uslijed crpljenja od 600 l/s u crpilištu Ivanščak, strujnice su zakrenute prema crpilištu tako da je ostvarena direktna hidrodinamička veza između odlagališta i crpilišta. Stoga, polje strujnica iz odlagališta koje definira advekciju prisiljava oblak zagađenja da ide direktno prema crpilištu. Na slici ispod (Slika 45.) se vidi da su maksimalne koncentracije u piezometru M2 (40% od početne koncentracije) smanjene u odnosu na scenarije S1-S3 te se značajno smanjuju u M6 (0.7%), dok oblak zagađenja ne dolazi do M7 (0%). Krivulje koncentracije u piezometrima imaju oblik vrlo sličan normalnoj razdiobi gdje maksimum postižu u M2 za 6 godina, a u M6 za 12 godina. Sve krivulje c-t imaju vrijednosti nula dok prve čestice zagađenja ne dođu u njihovu okolinu. Stoga su prva vremena putovanja oblaka zagađenja do M2 oko 5 godina, do M6 oko 12 godina, a do M7 oko 25 godina. Krivulje c-t imaju nenulte vrijednosti u vremenskom razdoblju dok oblak zagađenja putuje preko tog područja. Nakon prolaska oblaka vrijednosti koncentracije prolazne krivulje c-t su opet nula. Ovaj nenulti vremenski segment definira varijancu prolazne krivulje c-t (varijanca je jednaka njegovoj šestini) koja iznosi oko 1 godinu za pieozemetre M2 i M6.



Slika 45. Prikaz ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije i vremena za scenarij tečenja S5 u opservacijskim točkama M2, M6 i M7

Dimenzije oblaka zagađenja su u odlagalištu procijenjene kao  $0.5 \times 0.5 \text{ km}$ . Oblak zagađenja nošen nizvodno advekcijom i disperzijom se povećava i razrjeđuje te nakon 15 godina se dijeli u dva dijela tako da jedan dio oblaka ide prema crpilištu, a drugi dio prema rijeci Dravi.

Na slici ispod (Slika 46.) se vide karakteristike pronosa zagađenja prema crpilištu Ivanščak. U ovom scenariju tečenja S5 oblak direktno dolazi do crpilišta. Potrebno je 20 godina da stigne do crpilišta i nakon 60 godina oko 43% početne mase zagađenja dođe u pitku zahvaćenu vodu. Nakon 26 godina maksimalna koncentracija u odlagalištu je 5.1%. Dva postavljena piezometra između odlagališta i crpljenja pokazuju da je u M3 maksimalna koncentracija 7.5%, a u M5 5.7%.



Slika 46. Prikaz ovisnosti bezdimenzionalne koncentracije i vremena za scenarij tečenja S5 u opservacijskim točkama I – Ivanščak te piezometrima M3 i M5

Preostalo pitanje je da li oblak zagađenja ugrožava potok Gliboki u ovom scenariju S5? S obzirom na direktnu vezu između odlagališta i crpilišta, regionalni tok je okrenut u potpuno drugom smjeru, pa u M4 i potoku Gliboki – G koncentracija je nula što znači da nema zagađenja i da potok Gliboki nije u direktnom kontaktu s oblakom zagađenja iz odlagališta.

### 7.6. Vertikalno širenje oblaka

Vertikalno širenje oblaka ovisi o više faktora kao što su dubina zakopavanja otpada u odlagalištu (max 3.5 metara), pad vodnog lica (0,1%), utjecaj oborine i njene infiltracije u tijelo odlagališta, heterogenosti poroznog medija (možemo pretpostaviti da se radi o maloj do srednjoj heterogenosti) i njegovog korelacijskog strukturi (nemamo takve podatke) te srednjoj brzini toka (80-100 cm/dan). U ovom trenutku je vrlo teško procijeniti međusobni utjecaj svih parametara. No, pošto heterogenost aluvija najčešće nije velika, može se procijeniti da vertikalno širenje oblaka neće preći 20 metara. Stoga se preporučuje da dubina novoizrađenih piezometara bude minimalno 20 metara.

### 7.7. Zaključak

Na osnovi pet scenarija tečenja S1-S5 uslijed različite količine crpljenja u crpilištu Ivanščak analiziran je pronos oblaka zagađenja nizvodno od odlagališta Piškornica. Analizira se širenje oblaka zagađenja u prostoru i vremenu, a oblak se prati u deset opservacijskih točaka (Slika 38.). Dakle, zagađenje se prati u uzvodnom piezometru M1 i tijelu odlagališta (točka P) te u tri osnovna pravca; 1) u smjeru glavnog regionalnog toka koji se proteže od sjeverozapada prema jugoistoku između potoka Gliboki i crpilišta

Ivanščak (piezometri M2, M6 i M7), 2) u smjeru od odlagališta do crpilišta Ivanščak (piezometri M3, M5 i 1) i 3) u smjeru od odlagališta do potoka Gliboki (piezometar M4, postojeća mjerna postaja G).

U ovom poglavlju je pokazana analiza konzervativnog pronosa koja je definirana osnovnim mehanizmima advekcije i disperzije. Dakle, ne promatra se utjecaj kemijskog reaktivnog dijela pronosa koji uzrokuje veće širenje oblaka, često puta značajno manje koncentracije i usporavanje kretanja oblaka. Kako reaktivni pronos zahtijeva posebnu geokemijsku analizu uz određivanje svih ključnih parametara tog pronosa, u ovoj studiji je primijenjen model konzervativnog pronosa kao najgori mogući scenarij. Također, korištena je varijanta trenutnog utiskivanja oblaka koja pokazuje prostorno širenje oblaka i vrijeme putovanja oblaka. Pronos je dan u obliku bezdimenzionalne koncentracije koja pokazuje koliko je razrjeđenje oblaka u prostoru i vremenu u odnosu na koncentraciju u odlagalištu.

Rezultati pokazuju da u svim realnim scenarijima tečenja S1-S4 ne dolazi do širenja oblaka zagađenja u vodna tijela potoka Gliboki i crpilišta Ivanščak. U smjeru regionalnog toka na slici ranije (Slika 39.) za scenarij tečenja S3 se vidi da su maksimalne koncentracije u piezometru M2 (59% od početne koncentracije) te se gradualno smanjuju u M6 (25%) i M7 (16%). Krivulje koncentracije u piezometrima imaju oblik vrlo sličan normalnoj razdiobi gdje maksimum postižu u M2 za 7.5 godina, u M6 za 19 godina te u M7 za 35 godinu. Prva vremena putovanja oblaka zagađenja su do M2 oko 3 godine, do M6 oko 13 godina, a do M7 oko 26 godina. Oblak zagađenja prolazi najudaljeniji piezometar M7 nakon 35 godina kada ima dimenzije oko 4\*3 km. Također, scenarij S4 pokazuje da ni u slučaju maksimalnog kapaciteta crpilišta od 420 l/s ne dolazi do onečišćenja crpilišta Ivanščak. Eventualno povećanje kapaciteta crpljenja u budućnosti na cca 600 l/s u scenariju tečenja S5 bi uzrokovalo direktnu hidrodinamičku vezu između odlagališta i crpilišta te bi se zagađenje pitke vode javilo nakon dvadesetak godina od formiranja oblaka u odlagalištu, kada odlagalište ne bi bilo u potpunosti sanirano. U konačnici, deset opservacijskih točaka korištenih u analizi pronosa zagađenja će služiti za predložak budućeg monitoringa.



## **8. MONITORING PROGRAM POVRŠINSKIH I PODZEMNIH VODA ŠIREG PODRUČJA LOKACIJE PIŠKORNICA**

Sve vode na promatranom području su dio sliva rijeke Drave koja pripada Dunavskom odnosno slivu Crnog mora. Raspored površinskih voda šireg područja lokacije Piškornica određeni su morfološkim i hidrogeološkim značajkama panonske nizine i kontinentalne klime.

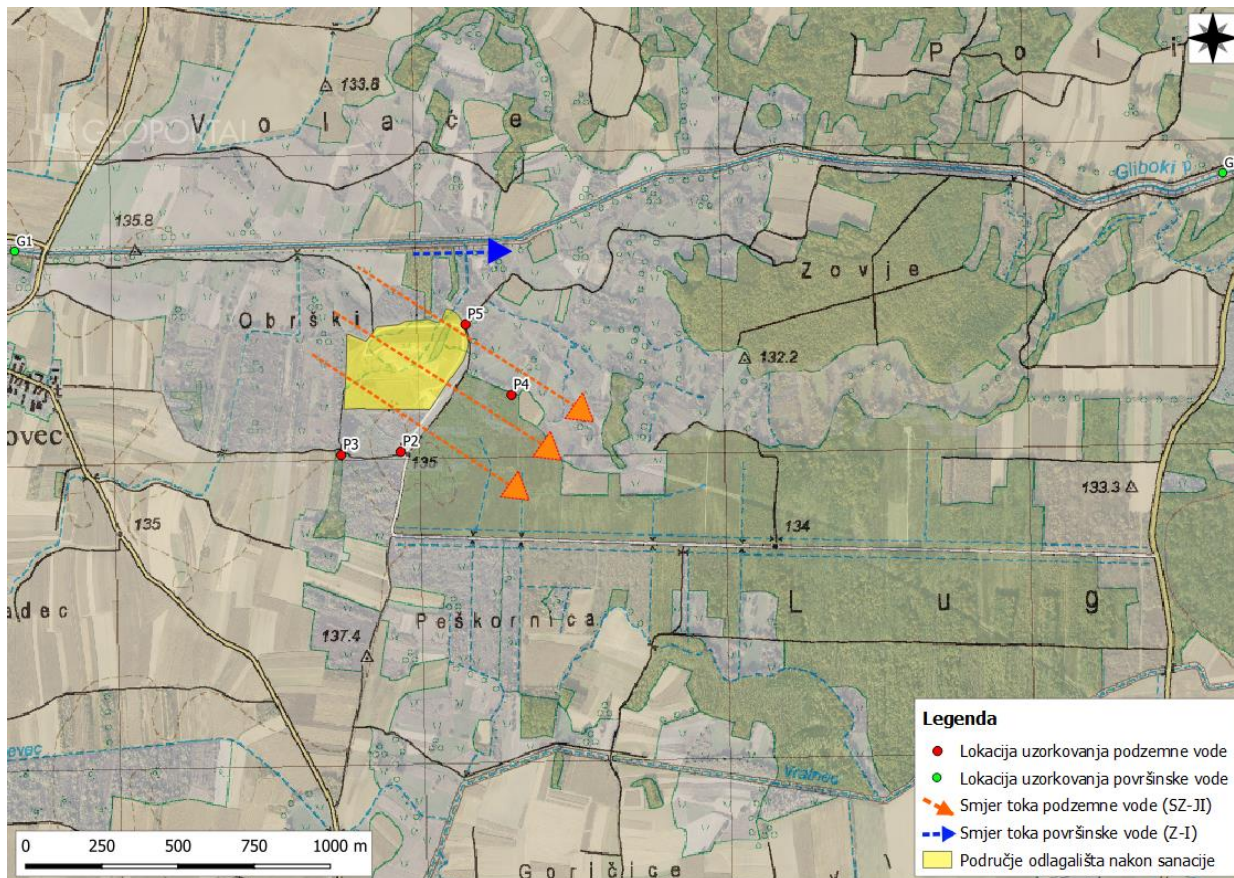
Promatrano područje ima znatne količine podzemnih voda čija stopa obnavljanja je daleko veća od stope eksploatacije. Od površinskih voda najznačajniji je potok Gliboki te nekoliko antropogenih jezera na istoku prema mjestu ulijevanja u rijeku Dravu.

Provedba zaštite voda provodi se istraživanjem i ispitivanjem stanja površinskih i podzemnih voda. Program ispitivanja stanja voda definiraju Hrvatske vode, Sektor razvitka u suradnji sa Zavodom za vodno gospodarstvo i Glavnim vodnogospodarskim laboratorijem Hrvatskih voda na temelju Zakona o vodama (NN 153/09, 63/11, 130/11, 56/13, 14/14), Uredbe o standardu kakvoće voda (NN 73/13, 151/14, 78/15) i Pravilnika o posebnim uvjetima za obavljanje djelatnosti uzimanja uzoraka i ispitivanja voda (NN 74/13). Na stalnim mjernim postajama utvrđuju se kvalitativne karakteristike, odnosno stanje i promjene kakvoće vode. Osnovni cilj navedenih istraživanja je utvrđivanje vrste vode, odnosno stanja i uzroka promjena stanja te utvrđivanje i primjena potrebnih mjera zaštite voda.

Sukladno podacima Hrvatskih voda, ukupno ekološko i kemijsko stanje vodnog tijela Gliboki (studeni 2018) u blizini lokacije odlagališta otpada Piškornica je opisano u Analizi i interpretaciji rezultata izvješća o ispitivanju površinskih, podzemnih, procjednih i oborinskih voda na odlagalištu otpada Piškornica nalazi se između dobrog (kemijsko stanje) i umjerenog (ekološko stanje). Vodno tijelo Gliboki pripada malim tekućicama s glinovito-pjeskovitom podlogom te se nalazi sjeverno od lokacije odlagališta otpada.

Sukladno okolišnoj dozvoli na odlagalištu Piškornica se primjenjuje recirkulacija procjednih voda vraćanjem u tijelo odlagališta koje je sa svojim sabirnim spremnikom i lagunama vodonepropusno. Time se može zaključiti da su zadovoljeni uvjeti zaštite površinskih i podzemnih vodnih tijela.

Slika ispod (Slika 47.) pokazuje trenutno stanje raspoloživih piezometara i točke uzorkovanja na vodnom tijelu Gliboki koji se proteže neposredno sjeverno od lokacije odlagališta otpada. Statistička analiza iz poglavlja 4. Analiza površinskih i podzemnih voda ukazuje da se rezultati sanacije odlagališta vide u sniženju srednjih vrijednosti odabranih parametara. Međutim, kako se u širem području lokacije Piškornica nalaze i druge industrijske i gospodarske aktivnosti potrebno je imati jedan oblik nadzornog monitoringa koji bi imao za cilj ranu detekciju mogućih izvanrednih okolnosti i situacija koje mogu nastati na širem promatranom području.



Slika 47. Lokacije piezometara i točke mjerenja na potoku Gliboki

Vrlo važno je napomenuti da prema članku 44. Zakona o vodama, ciljevi monitoring stanja površinskih i podzemnih voda su:

- Nadzorni monitoring (utvrđivanje dugoročnih promjena)
- Operativni monitoring (utvrđivanje promjena uslijed provođenja mjera na vodnim tijelima gdje je utvrđeno da ne ispunjavaju uvjete dobrog stanja)
- Istraživački monitoring (utvrđivanje nepoznatih odnosa)

Nadzorni monitoring provodi se radi dopunjavanja i vrednovanja postupka ocjene utjecaja onečišćenja i pribavljanja informacija za ocjenu znatno i trajno rastućih trendova koji su rezultat promjena prirodnih uvjeta i utjecaja ljudske aktivnosti. Nadzorni monitoring se uspostavlja s ciljem utvrđivanja dugoročnih promjena, a podrazumijeva nešto veći broj postaja u tijelima podzemnih voda za koja je analizom značajki vodnih područja utvrđen rizik nepostizanja ciljeva zaštite, kao i u tijelima podzemnih voda koja prelaze granice zemlje (Plan usklađenja monitoringa, HV 2016).

Isto tako Hrvatske vode su jedina institucija u RH nadležne za tumačenje rezultata monitoring stanja o čemu izrađuju godišnje izvješće koje se dostavlja nadležnom ministarstvu za vodno gospodarstvo i Agenciji za zaštitu okoliša. Dokument pod naslovom "Program usklađenja monitoringa" (HV, 2016) vrlo slikovito i jasno objašnjava stav i opredjeljenje nadležnih institucija prema EU u odnosu na zadovoljenje nekoliko najznačajnijih direktiva o vodama.

Prenošenjem Okvirne direktive o vodama u nacionalno zakonodavstvo znatno su prošireni elementi na osnovu kojih se prati stanje vodnih tijela. Jedan dio hidro-morfoloških pokazatelja služi za praćenje provedbe Direktive o procjeni i upravljanju rizicima od poplava.

Na slijedećoj slici (Slika 48.), pokazuje se pregled elemenata za ocjenjivanje stanja voda i upravljanje rizicima od poplava.

			Elementi stanja				
			biološki	fizikalno-kemijski i kemijski		hidromorfološki	kemijski
			biološki pokazatelji	osnovni pokazatelji	specifični pokazatelji	morfološki pokazatelji	hidrološki pokazatelji
površinske	kopnene	tekućice	ekološko stanje/potencijal			kemijsko stanje	
		stajaćice	ekološko stanje/potencijal			kemijsko stanje	
	prijelazne	prijelazne	ekološko stanje/potencijal			kemijsko stanje	
		prijelazne	ekološko stanje/potencijal			kemijsko stanje	
	more	priobalne	ekološko stanje/potencijal			kemijsko stanje	
		teritorijalno	ekološko stanje/potencijal			kemijsko stanje	
	podzemne		količinsko			kemijsko stanje	
	Prema Okvirnoj direktivi o vodama						
Prema Direktivi o procjeni i upravljanju poplavnim rizicima							

Slika 48. Elementi stanja voda, Izvor: Hrvatske vode, 2016

Stanje površinskih i podzemnih voda određuje se na temelju ekološkog i kemijskog stanja jednog ili više vodnih tijela. Ekološko stanje uzima u obzir biološke, hidromorfološke i one fizikalno-kemijske elemente koji su u korelaciji s biološkim elementima. S druge strane kemijsko stanje voda ocjenjuje se u odnosu na elemente kemijskog stanja koje može varirati i uključivati široki spektar elementa. Za svako vodno tijelo se procjenjuje o koji potencijalno kemijski elementi mogu dati ocjenu stanja.

Stanje podzemnih voda određuje se na temelju količinskog i kemijskog stanja podzemnih vodnih tijela. Količinsko stanje podrazumijeva razine podzemnih voda, izdašnost te kratkoročne i dugoročne promjene u prihranjivanju.

Kemijsko stanje ocjenjuje se u odnosu na onečišćujuće tvari za koje su propisani standardi kakvoće podzemnih voda i specifične onečišćujuće tvari za koje su propisane granične vrijednosti na razini grupiranih tijela podzemne vode.

Hidromorfološki monitoring povezuje i usklađuje hidrološke (količina vode i dinamika toka) i morfološke (oblik vodnog tijela, širina, dubina, niveleta dna korita, te struktura sedimenata dna, obala i inundacijskog prostora) elemente. Upravo su opisani morfološki elementi važni pri procjeni i upravljanju rizicima od poplava.

Monitoring program koji će se preporučiti u ovoj Studiji odnosi se na preventivni monitoring kao kombinacija nadzornog i operativnog koji ima zadatak da prati stanja kvalitete površinskih i podzemnih voda kao sustav rane detekcije u slučaju izvanrednih okolnosti i situacija vezanih za odlagalište otpada Piškornica.

Temeljem dosadašnje analize kvalitete površinskih i podzemnih voda u okolini odlagališta Piškornica vidljivo je da je sanacija odlagališta koja je trajala od 2005-2012. godine uvelike popravila stanje voda. Međutim, činjenica da još jedan dio starog odlagališta nije u potpunosti saniran uzrokuje da ostale razvojne aktivnosti na širem području zahtijevaju praćenje stanja koje će se provoditi u okolici odlagališta kao komplement unaprjeđenju monitoringa koje provode Hrvatske vode zajedno s lokalnim partnerima.

Provedeno numeričko modeliranje regionalnog toka i pronosa zagađenja na širem području lokacije Piškornica ponudio je ključna saznanja za odabir lokacija i način provedbe monitoring programa koji će biti opisan u nastavku.

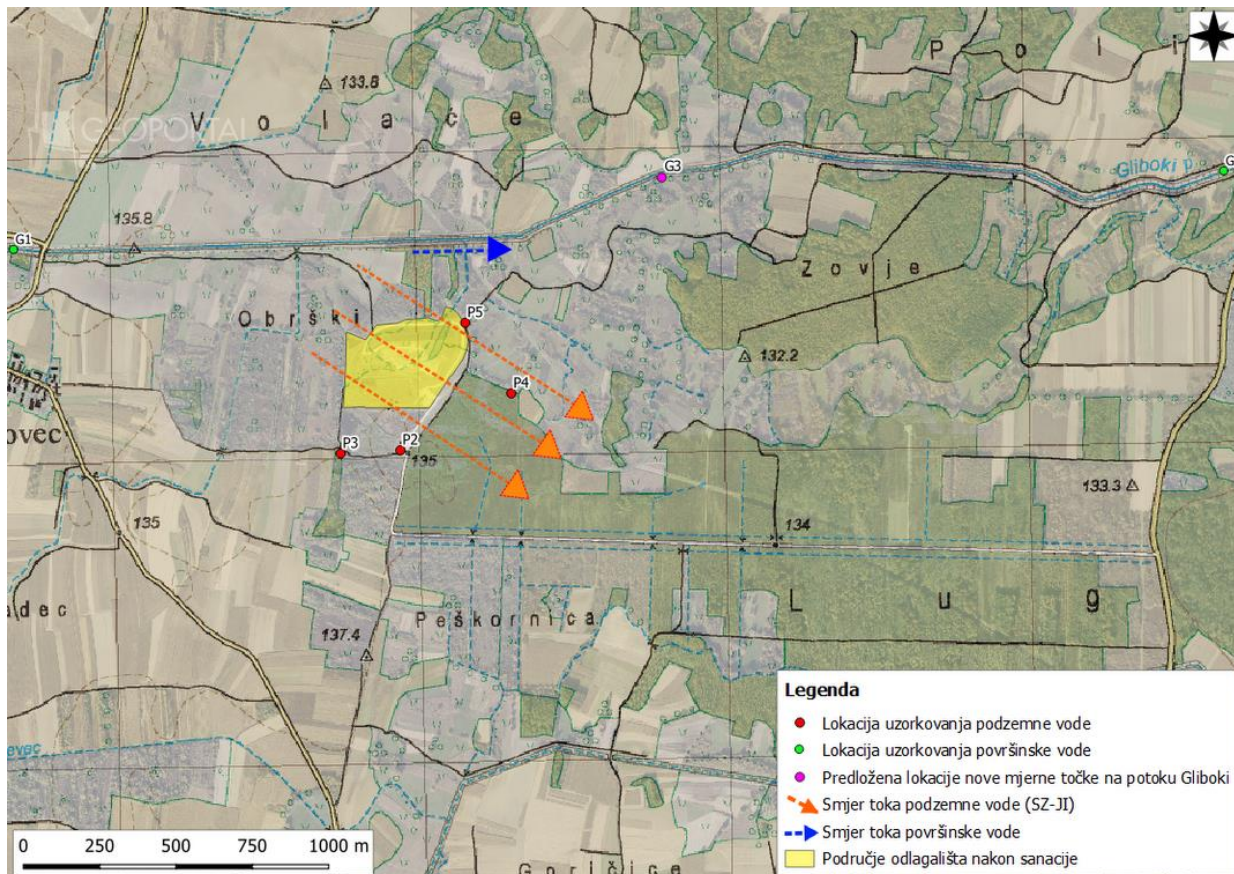
### **8.1. Prijedlog dodatnog mjerenja ekološkog i kemijskog stanja površinskih voda**

Pod površinskim vodama u ovoj Studiji podrazumijeva se voda iz vodnog tijela Gliboki, koji se nalazi u neposrednoj blizini odlagališta Piškornica, s njegove sjeverne strane. Sukladno Uredbi o standardu kakvoće voda (NN 73/13, 151/14, 78/15, 61/16) i Okolišnoj dozvoli ispitana je kakvoća površinskih voda uzorkovanih na dvije lokacije u vodotoku Gliboki, uzvodno (G1) i nizvodno (G2) od lokacije odlagališta Piškornica (Slika 47.), sukladno programu praćenja stanja okoliša iz Studije o utjecaju na okoliš i Okolišnoj dozvoli, prema kojima je uzorkovanje potrebno obavljati četiri puta godišnje. Uzorkovanje i ispitivanje kakvoće površinske vode je u ožujku, lipnju, rujnu i prosincu 2018. godine proveo neovisni akreditirani laboratorij Zavoda za javno zdravstvo Koprivničko - križevačke županije (Služba za zdravstvenu ekologiju), u suradnji sa Zavodom za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije (Zdravstveno- ekološki odjel, Odsjek za kontrolu voda za piće i voda u prirodi) i Nastavnim zavodom za javno zdravstvo dr. Andrija Štampar (Odsjek za zdravstvenu ispravnost i kvalitetu voda, Služba za zaštitu okoliša i zdravstvenu ekologiju).

Na temelju prikupljenih i dodatno analiziranih podataka, Konzultant je utvrdio da dva vodna tijela, definirana po Planu upravljanja vodnim područjima 2016-2021 (Hrvatske vode), imaju ekološko stanje umjereno za vodno tijelo Gliboki, odnosno loše za vodno tijelo rukav Komatnica. Za oba vodna tijela kemijsko stanje je procijenjeno kao dobro i ne zahtjeva poduzimanje dodatnih mjera. Problem ekološkog stanja se prvenstveno odnosi na biološke elemente kakvoće i kao takvi će se trebati tretirati u programu mjera koju će sukladno ODV morati provoditi relevantne institucije jedinica lokalne samouprave.

U detaljno provedenoj analizi prikupljenih podataka do sada postoje određena prekoračenja MDK za KPK te teške metale cink, bakar, krom, živa i arsen. Kako su prekoračenja ustanovljena na obje mjerne točke (G1 i G2) realno je zaključiti da se radi o raspršenim izvorima onečišćenja za koje bi trebalo detaljnom analizom industrijske aktivnosti u slivnom području potoka Gliboki utvrditi moguće izvore. Također bi bilo korisno provesti određene geokemijske analize tla što će biti predloženo u nastavku.

Kako za većinu pokazatelja nije došlo do povećanja koncentracija na nizvodnoj lokaciji (G2, opservacijska točka G -Slika 38.) zbog možebitnog utjecaja odlagališta „Piškornica, ova Studija predložit će jednu dodatnu mjernu točku na potoku Gliboki gdje bi se uzorkovanje provodilo isključivo kao kontrolna točka možebitnog incidentnog slučaja na odlagalištu Piškornica (Slika 49.).



Slika 49. Predložena lokacije nove mjerne točke na potoku Gliboki

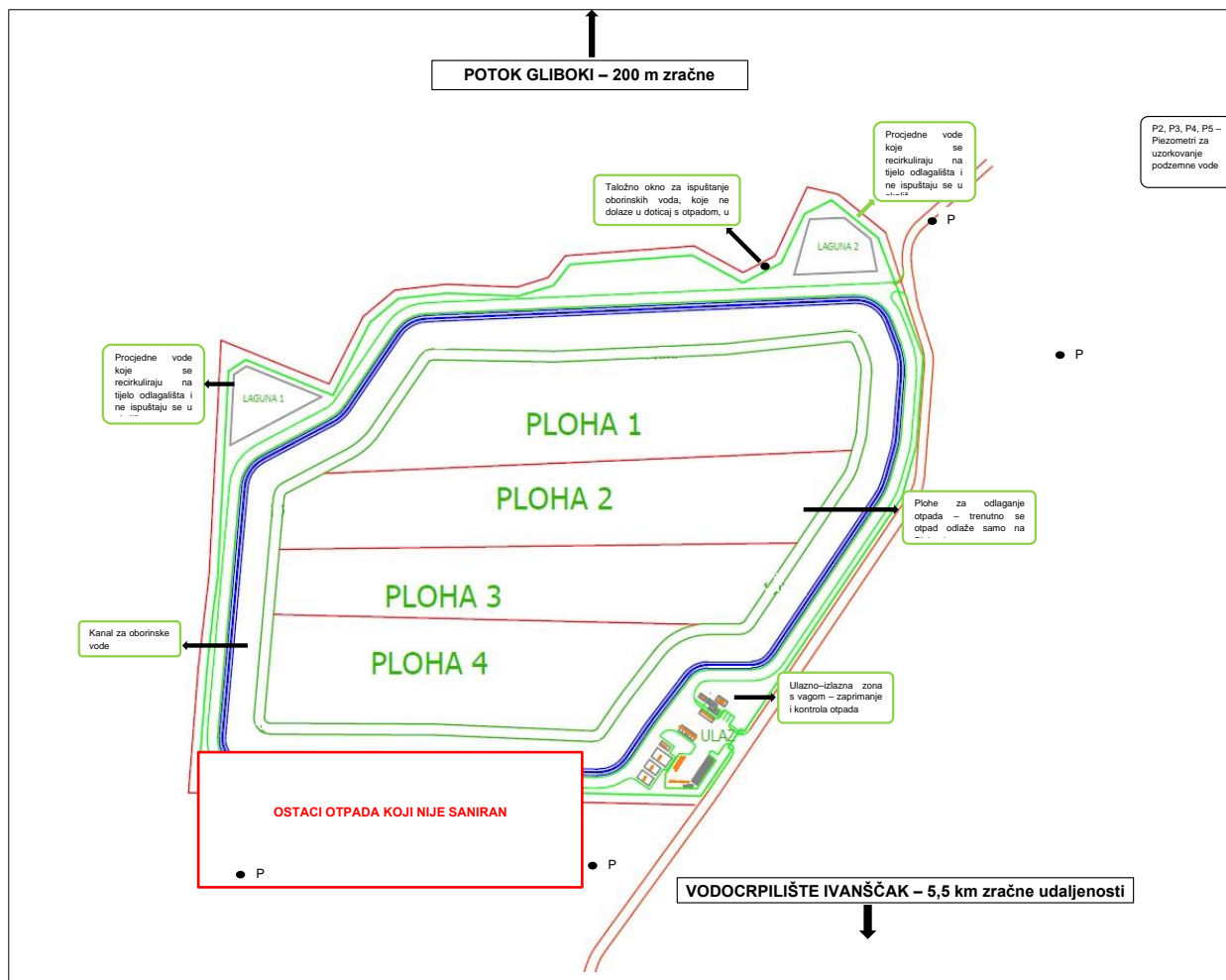
Za mjerene pokazatelje preporuča se mjerenje osnovnih fizikalno-kemijskih elemenata kakvoće, TOC, DOC i otopljeni kisik sukladno nadzornom monitoringu i Uredbi o standardu kakvoće voda (NN 61/16). Za razliku od propisane učestalosti za nadzorni monitoring, za predloženu novu lokaciju mjerenja, preporuča se kvartalno mjerenje (4 puta na god.).

Kako bi se odgovorilo na još neka pitanja vezano za loše ekološko stanje i prekoračenja određenih kemijskih elemenata kakvoće na mjernim točkama G1 i G2 preporuča se provođenje analize opterećenja i utjecaja ne samo od strane odlagališta otpada Piškornica već i drugih subjekata na širem području. Temeljem rezultata predložene analize moći će se točnije procijeniti koji su relevantni fizikalno-kemijski parametri koji bi mogli ukazivati na mogući utjecaj na vodno tijelo Gliboki, a posljedično i na podzemne vode. Time bi se predložena nova mjerna lokacija mogla svrstati u II korak usklađenja monitoringa (Program usklađenja monitoringa, HV 2016 ...”uspostava cjelovitog operativnog monitoringa uvođenjem novih mjernih postaja kojima su obuhvaćeni uzvodno identificirani točkasti izvori onečišćenja. S obzirom na vrstu opterećenja identificirani su indikativni elementi kakvoće”).

### 8.2. Prijedlog dodatnog mjerenja (monitoringa) podzemnih voda

Analizirajući podatke do sadašnjih mjerenja jasno je uočljivo da je za odlagalište otpada Piškornica važno što hitnije riješiti južnu plihu odlagališta na kojoj se nalaze ostaci otpada koji nije saniran (Slika 50.).

Kako je pokazao numerički model toka i pronosa zagađenja, upravo na južnom dijelu odlagališta Piškornica mogu se očekivati skretanje strujnica prema crpilištu Ivanščak za veće količine crpljenja od 420-600 l/s.



Slika 50. Skica odlagališta Piškornica s plohom koja nije sanirana

Monitoring kemijskog stanja podzemnih voda osigurava pregled kemijskog stanja podzemnih voda na vodnom području i omogućava utvrđivanje prisutnosti znatno i trajno rastućeg trenda onečišćenja. Prema Planu usklađenja monitoringa (HV, 2016) uspostavljen je na gotovo svim tijelima podzemnih voda, a na tijelima podzemnih voda koja nemaju odgovarajući broj mjernih postaja uključuju se mjerne postaje na okolnim područjima crpilišta, koja se koriste za vodoopskrbu i koja unutar jednog grupiranog vodnog tijela podzemne vode sudjeluju s više od 10% ukupnih eksploatacijskih količina.

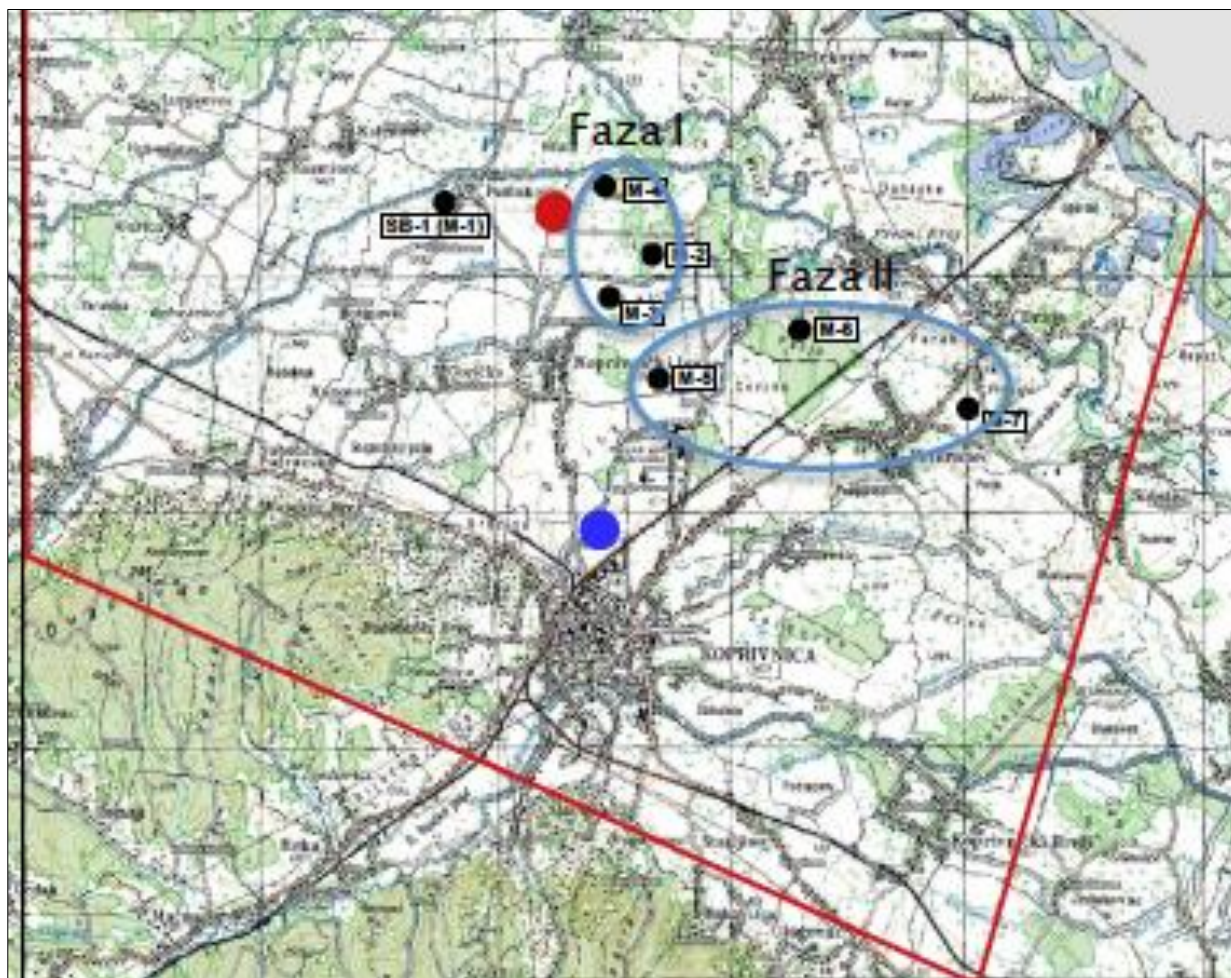
Na temelju provedene analize rezultata laboratorijskih ispitivanja zaključuje se da je provedena sanacija odlagališta rezultirala značajnom pozitivnom promjenom stanja podzemnih voda u okolišu odlagališta u odnosu na vrijednosti za KPK, BPK i elektrovodljivost, dok se rezultati ispitivanja udjela Fe nisu značajno promijenili nakon provedene sanacije odlagališta.

Zbog vrlo vjerojatnog povećanja kapaciteta crpilišta Ivanščak prijedlog dodatnog mjerenja stanja podzemnih voda na širem području lokacije Piškornica predlaže se u dvije faze.

Prva faza uključuje piezometre M1 do M4. Piezometar M1 se nalazi uzvodno od odlagališta Piškornica na udaljenosti od 2 km, na mjestu gdje se već nalazi duboka bušotina SB-1. Bušotina M1 bi određivala stanje podzemne vode koje se kreće prema odlagalištu i pristavlja ulazno stanje podzemne vode. Slijedeće tri bušotine M2, M3 i M4 su kružno postavljene nizvodno od odlagališta na udaljenosti od 1,25 - 1,75 km.

Piezometar M-2 se nalazi oko 1,75 km od odlagališta i nalazi se na strujnici iz odlagališta za simulaciju crpljenja S1-S3 koja odgovara današnjim uvjetima crpljenja. Piezometar M-3 se nalazi oko 1,75 km od odlagališta i nalazi se na strujnici iz odlagališta za simulaciju crpljenja S5 kada je uspostavljena direktna hidrodinamička veza između odlagališta i crpilišta. Piezometar M-4 je udaljen oko 1,25 km od odlagališta blizu vodnog tijela Gliboki i može se kompenzirati s predloženom novom mjernom točkom u vodnom tijelu Gliboki jer ima zadaću praćenja oblaka zagađenja prema ovom vodnom tijelu. Slika ispod (Slika 51.) prikazuje predložene lokacije dodatnih bušotina.

Sve predložene bušotine bi trebale biti strukturno – piezometarske s dubinom od minimalno 20 m i odgovarajućim profilom da se mogu obaviti geofizički testovi prije zacjeljivanja. Prva faza monitoringa također treba uključivati sanaciju, odnosno zamjenu postojećih piezometara P2-P5, pri čemu treba voditi računa da ovi piezometri imaju iste dimenzije i dubine kao i novopredloženi piezometri (M-1 do M-7).



Slika 51. Prijedlog lokacija novih bušotina u dvije faze

Druga faza bi se aktivirala u slučaju detektiranih prekoračenja u bušotinama M2 – M4 i uključuje piezometre M-5 do M-7. Piezometri M-6 i M-7 imaju zadaću odrediti kretanje oblaka zagađenja iz glavnog mogućeg pravca širenja zajedno sa M-2. M-6 je udaljen oko 4.87 km, a M-7 oko 8.12 km od odlagališta. M-5 udaljen 3.3 km od odlagališta ima zadaću detektirati moguće kretanje oblaka iz odlagališta prema crpilištu Ivanščak zajedno sa M-3 kod scenarija povećanja kapaciteta crpilišta. Na ovaj način bi se mogli pratiti sva tri moguća nizvodna smjera širenja oblaka u prostoru i vremenu. Također bi podaci iz ovih novih bušotina mogli biti podloga za jedno detaljnije 3-D modeliranje toka i pronosa zagađenja u širem području lokacije Piškornica kao i analizu opterećenja i utjecaja svih potencijalnih onečišćivača kako je i predviđeno operativnim monitoringom (Plan usklađenja monitoringa, HV, 2016).

Na svim predloženim novim bušotinama ispitivali bi se osnovni pokazatelji kemijskog stanja (nitrati i pesticidi), specifične onečišćujuće tvari (elektrovodljivost, amonijak, ortofosfati, metali arsen, kadmij, olovo i živa, lakohlapljivi halogenirani ugljikovodici, kloridi i sulfati) te fizikalno-kemijski i kemijski pokazatelji (uključujući ione i metale željezo, mangan, bakar, cink, krom i nikal) dinamikom od 6 puta godišnje (svaka 2 mjeseca) u prve dvije godine te kasnije 4 puta godišnje (odnosno svaka 3 mjeseca).



## 9. GEOLOŠKE I PEDOLOŠKE KARAKTERISTIKE PODRUČJA

### 9.1. Geološke karakteristike

Šire područje odlagališta otpada Piškornica nalazi se na pretežito aluvijalnim naslagama različitog granulometrijskog sastava. Gledajući debljinu aluvijalnih nanosa na području Koprivničke Podravine izdvaja se područje Legradskog praga u kojem je došlo do značajnijeg izdizanja sedimenta u podlozi aluvijalnog nanosa pa je posljedično aluvij puno tanji i litološki jednoličniji nego u području dravske ravnice (Duić, Urumović, 2007.). Usprkos blizini rijeke Drave, sama lokacija odlagališta otpada se nalazi na kontaktu barskog lesa (würmske naslage) i barskih naslaga.

Barski les je nastao taloženjem eolskog silta sa područja alpa u jezersko-barsko-kopnenim uvjetima sedimentacije. Ove naslage sadrže kombinaciju pjeskovito-glinovito-siltne sedimenta s velikim udjelom kvarca (do 60 %). Barske naslage se nalaze na sedimentima barskog lesa te su vezane za močvarne uvjete u kojima su pretežito taložene gline i glinoviti siltovi sa visokim sadržajem organske tvari. Oba tipa naslaga, barski les i barske naslage, se odlikuju malom propusnošću.

Litološki na području odlagališta otpada se izmjenjuju glina, prah i pijesak koji se miješaju u različitim omjerima. Na površini terena se mjestimično nalazi sloj prašinsto-glinovitog materijala s površinskim slojem humusa debljine oko 0,5 m. Ispod ovog sloja nalazi se sloj glinovito prašinstog materijala između 0,20 i 1,30 m debljine te sloj gline debljine 2-4 m. Ispod sloja gline se javlja sitnozrnati pijesak debljine između 2 i 4 metara te sloj šljunka procijenjene debljine između 50 i 60 metara. Ispod šljunka se nalaze glinovito-laporovite naslage.

Sukladno provedenim ispitivanjima tla na lokaciji Piškornica (1991.) za potrebe Elaborata „Odlagalište otpada općine Koprivnica – geologija, hidrologija i utjecaj na podzemne vode“ izrađenom od strane Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Institut za geologiju i mineralne sirovine, vrijednosti koeficijenta propusnosti slojeva su: za glinovito prašinsti materijal –  $k = 7,5 \times 10^{-7}$  cm/s do  $4,8 \times 10^{-5}$  cm/s, za sitnozrni pijesak –  $k = 3,5 \times 10^{-4}$  cm/s do  $4,7 \times 10^{-3}$  cm/s i za šljunkovito-pjeskoviti vodonosnik –  $k = 2,1 \times 10^{-4}$  cm/s do  $7,4 \times 10^{-2}$  cm/s. Uspoređujući vrijednosti koeficijenta propusnosti, vidljivo je kako su najniži slojevi, odnosno šljunkovito-pjeskoviti sloj propusniji u odnosu na gornji slabije propustan glinovito-prašinsti materijal.

### 9.2. Pedološke karakteristike

Na cijelom području Koprivničko-križevačke županije utvrđeno je 17 tipova tala s njihovim pripadajućim nižim jedinicama (podtipovi, varijeteti i forme). Pojedini tipovi ili niže sistematske jedinice javljaju se zajedno s drugim tipovima i nižim jedinicama u zemljišnim kombinacijama, ovisno o matičnom supstratu, reljefu, hidrologiji i drugom. Od 17 tipova tala na području Koprivničko-križevačke županije, deset ih pripada automorfnom, a sedam hidromorfom odjelu tala. Od automorfnih su najzastupljenija lesivirana tla, a među hidromorfnim močvarno-glejna i pseudoglejna tla. U nizinskom, pridravskom području, najrasprostranjenija su aluvijalna tla koja su u pojedinim dijelovima iznimno plodna (P-1), no u određenim područjima čisti matični supstrat, šljunak i pijesak ne mogu akumulirati i zadržavati vodu u tlu.

Prema dostupnim podacima te pedološkoj karti (Slika 52.), na području odlagališta otpada Piškornica se nalazi granica dvije pedološke jedinice. Na samoj lokaciji prevladava nekarbonatni mineralni hipoglej koji je pod utjecajem podzemne vode koja ima smjer kretanja sjeverozapad-jugoistok. Nekarbonatni mineralni hipoglej se na lokaciji odlagališta također javlja u kombinaciji sa mineralnim nekarbonatnim

amfiglejem i pseudoglejnim semiglejem u manjim omjerima (70:20:10). Uz dominantni hipoglej, drugu pedološku jedinicu čini pseudoglejni semiglej koji dolazi u kombinaciji sa pseudoglejem na zaravni i mineralnim nekarbonatnim hipoglejem u omjerima 40:30:30.

Na lokaciji predvladavaju glinasto ilovasta tla sa primjesama pijeska nošenih sa okolnih pjeskovitih dina Đurđevca i vodom. Ovaj tip tla karakterizira zbijenost i loši vodozračni odnosi te su umjereno propusna. U neposrednoj blizini krajnjeg južnog ruba odlagališta nalazi se III zona vodozaštitnog područja Ivanščak.



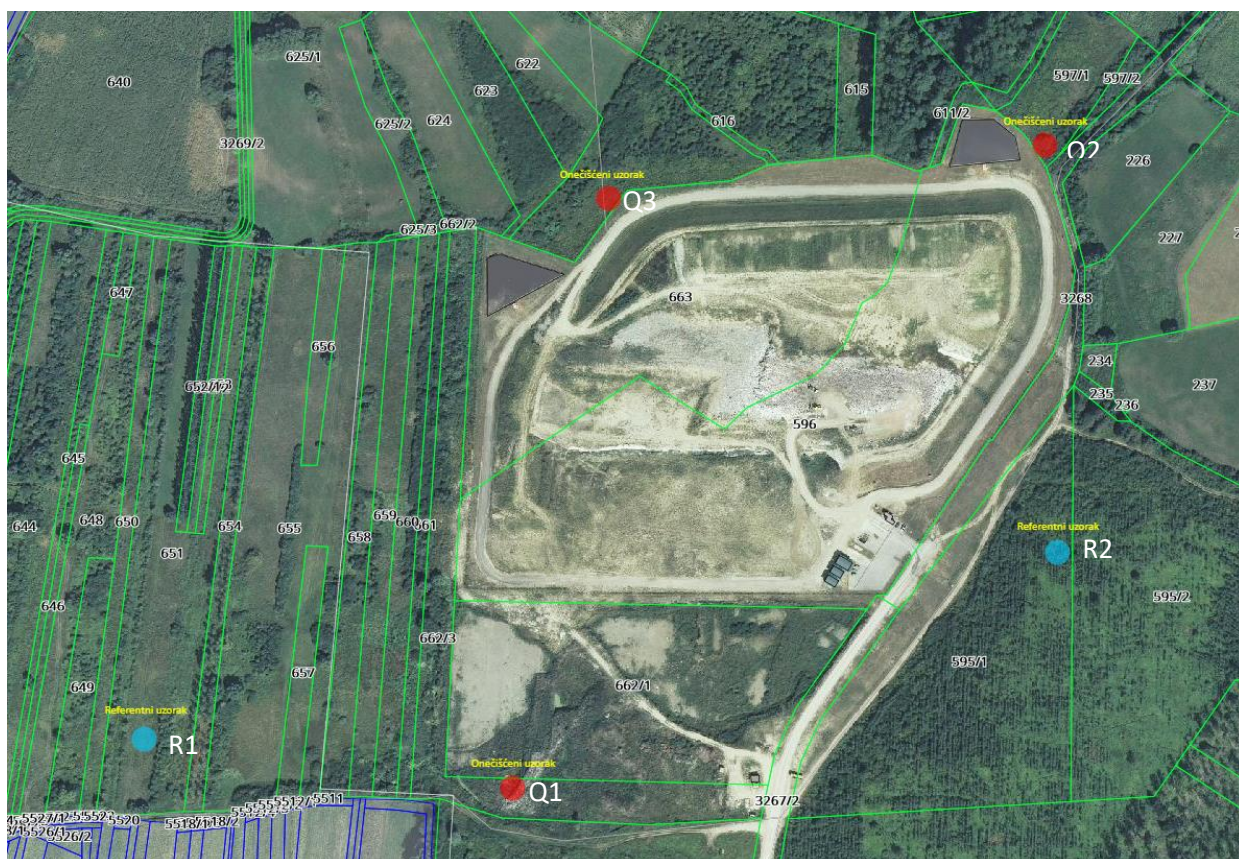
Slika 52. Pedološka karta područja odlagališta otpada Piškornica

### 9.3. Izvještaj o uzorkovanju sedimenata

#### 9.3.1. Uvod

Kako bi se dobio uvid u stanje tla u neposrednoj blizini odlagališta otpada Piškornica, uzeto je pet uzoraka tla, od kojih su dva uzorka poslužila kao referentna. Uzorci tla su uzeti strojno kombiniranim radnim strojem na lokacijama prikazanim na slici niže (Slika 53) sa dubine oko 2 metra, pojedinačne mase oko 3 kilograma te su predani na laboratorijsku analizu teških metala u prosincu 2018. godine na Institut Ruđer Bošković.

Imajući na umu da se na području odlagališta otpada Piškornica nalazi granica između dvije pedološke jedinice (vidi poglavlje 9.2. Pedološke karakteristike), kako bi se osigurala ispravnost analize, uzorkovanje svih 5 uzoraka je izvršeno na istom tipu tla. Imajući na umu da uzorkovanje tla nije bilo moguće unutar samog tijela odlagališta zbog činjenice da je tlo na kojem se nalazio otpad već ukomponiran u samo tijelo odlagališta tijekom sanacije te da je stavljena vodonepropusna podloga ispod ploha odlagališta, uzorci su uzeti u neposrednoj blizini laguna za procjedne vode (uzorci Q2 i Q3) koje predstavljaju rizik svakog odlagališta otpada te na dijelu koji je još uvijek nesaniran, a nalazi se izvan same ograde odlagališta (uzorak Q1).



Slika 53 Lokacije uzorkovanja tla u neposrednoj blizini odlagališta otpada Piškornica, crvenim točkama su označeni onečišćeni uzorci, dok su plavim točkama označeni referentni uzorci.

#### 9.3.2. Metodologija

Uzorci su dostavljeni na analizu teških metala u Laboratorij za nuklearne analitičke metode, Zavod za eksperimentalnu fiziku na Institutu Ruđer Bošković gdje su osušeni na 105°C te potom prosijani ( $\phi = 2$

mm), homogenizirani, smljeveni u tarioniku i opet prosijani ( $\phi = 45 \mu\text{m}$ ). Iz tako pripremljenog tla načinjene su tablete pod tlakom od 9 tona, težine oko 2 g i promjera 2.5 cm.

Uzorci su analizirani metodom energetske disperzije karakterističnog rendgenskog zračenja – u daljnjem tekstu EDXRF metoda (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy). Kao izvor korištena je Philips-ova W rendgenska cijev.

Rendgenska pobuda je korištena uz sekundarno Mo zračenje i Camberra Si(Li) detektor (SL30170, FWHM 170 eV na 5.9 keV) u pravokutnoj geometriji i pri vakuumu od 100 bara. Aktivne površina detektora iznosila je 30 mm<sup>2</sup>, debljina je bila 3 mm, a debljina berilijevog prozora iznosila je 0.025 mm. Radni parametri za ozračivanje meta iznosili su 35 kV, 35 mA i 1000 s. Ovom metodom mjerene su koncentracije elemenata K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Pb, Hg i Th. Intenziteti karakterističnih x-linija i koncentracije elemenata određene su QXAS programom (Quantitative X-ray Analysis System, IAEA).

Metoda „Direct comparison of count rates“ (Direktna usporedba broja događaja) s referentnim materijalom „IAEA S-7“, (referentni materijal za tlo) korištena je za određivanje koncentracija K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr i Pb. Usklađivane su  $K\alpha$  linije osim za Pb gdje zbog interferencija s As korištena linija  $L\beta_2$ .

Metoda standardnog dodatka s certificiranim referentnim materijalima TraceCERT, koncentracije 1g/l, korištena je za određivanje koncentracije Hg. Za Hg usklađivane su  $L\alpha$ -linije.

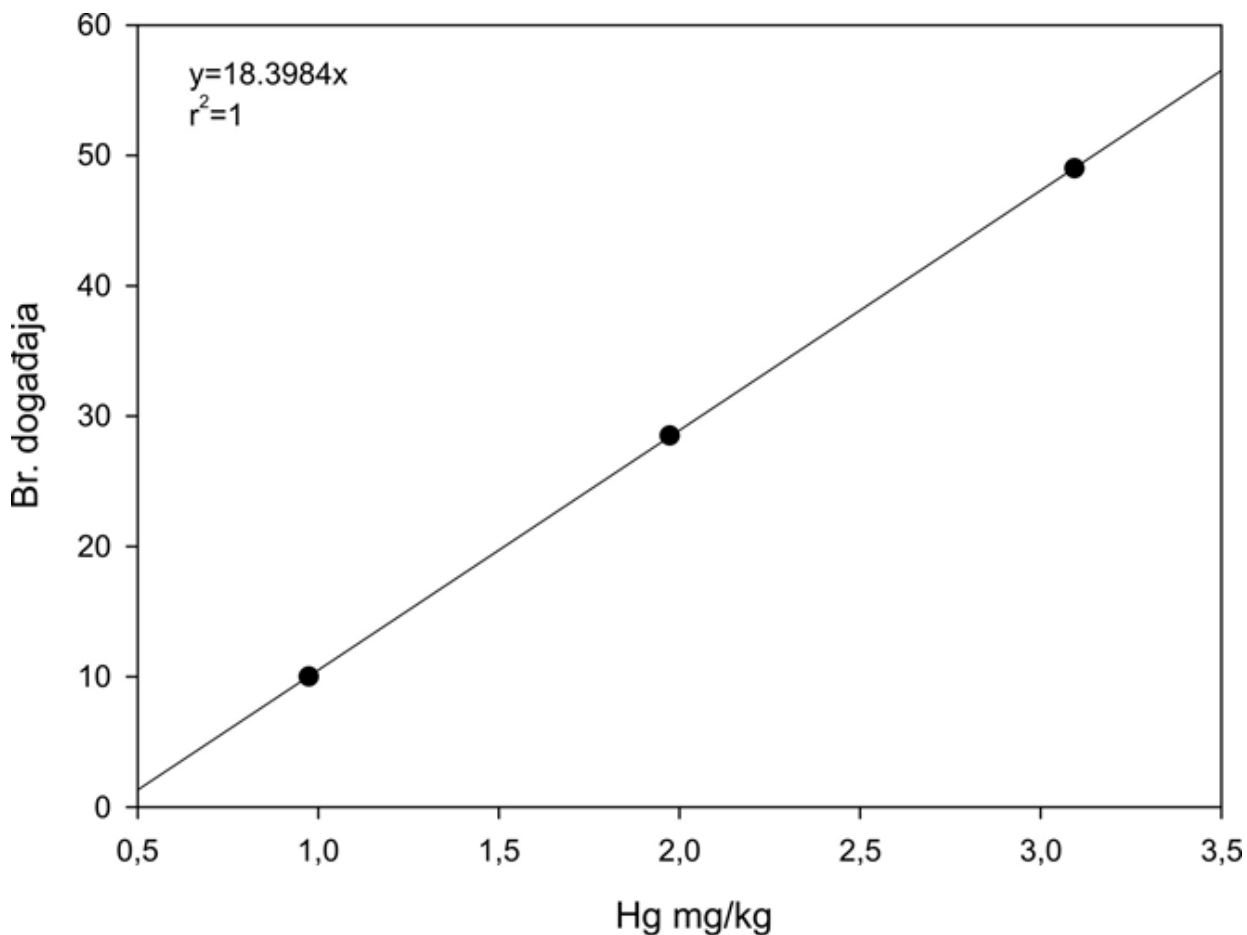
Relativne pogreške mjerenja iznosile su: K: 7.2 %, Ca: 8.1 %, Ti: 7.5 %, V: 8,8%, Cr: 8.6 %, Mn: 4.9, Fe: 2.5 %, Ni: 20.5 %, Cu: 20.5 %, Zn: 5.1 %, Ga: 23.3 %, As: 11.1 %, Br: 31.0 %, Rb: 9.8 %, Sr: 5.2 %, Y: 7.4 %, Zr: 10 %, Hg: 5 % i Pb: 20.5%. Minimalni detekcijski limiti (MDL) iznosili su: 1 mg/kg za Ga, As, Rb, Y i Pb, 1,2 mg/kg za Hg, 3 mg/kg za Cu, 5 za V, Cr, Ni i Br, 10 mg/kg za Fe i Zn, 13 mg/kg za Mn, 50 mg/kg za Sr i Zr, 80 mg/kg za Ti i 150 mg/kg za K i Ca.

Relativne pogreške mjerenja i MDL su izračunati pomoću standardnih referentnih materijala, a na njih utječu efekti kao što su blizina vrhova vezanih uz elemente visokih koncentracija i efekti matrice. U tablici ispod (Tablica 2) prikazane su certificirane referentne vrijednosti za S-7. Slika 54. prikazuje kalibracijski pravac za Hg.

Tablica 17 Certificirane vrijednosti za standardni referentni materijal IAEA S-7

Element	Certificirana referentna vrijednost
K (%)*	1,21± 0,07
Ca (%)*	16,3±0,85
Ti (mg/kg)*	3000±549
V (mg/kg)	66±7
Cr (mg/kg)	60±12,5
Mn (mg/kg)	631±23
Fe (%)*	2,57±0,05
Ni (mg/kg)*	26±8
Cu (mg/kg)	11±2,4
Zn (mg/kg)	104±6
Ga (mg/kg)*	10±1
As (mg/kg)	13,4±0,8
Br (mg/kg)*	7±3

Rb (mg/kg)	51±4,5
Sr (mg/kg)	108±5,5
Y (mg/kg)	21±6
Zr (mg/kg)	185±10,5
Pb (mg/kg)	60±16



Slika 54 Kalibracijski pravac za Hg

### 9.3.3. Rezultati

Rezultati provedene analize uzoraka tla su prikazani u tablici ispod (Tablica 18).

Tablica 18 Koncentracije elemenata izmjerene u uzorcima tla

	R1	R2	Q1	Q2	Q3
<b>K</b>	1,57 ± 0,09	1,83 ± 0,11	1,42 ± 0,08	1,71 ± 0,10	1,65 ± 0,10
<b>Ca</b>	7302 ± 385	6519 ± 346	7168 ± 377	68130 ± 3560	70350 ± 3670
<b>Ti</b>	7538 ± 1384	8239 ± 1512	10600 ± 1940	6425 ± 1180	6435 ± 1181
<b>V</b>	151 ± 17	172 ± 19	201 ± 22	125 ± 14	122 ± 14
<b>Cr</b>	101 ± 22	112 ± 24	81 ± 18	85 ± 19	88 ± 19
<b>Mn</b>	986 ± 37	1018 ± 38	776 ± 29	558 ± 21	579 ± 22

<b>Fe</b>	10,73 ± 0,23	6,07 ± 0,13	4,15 ± 0,09	4,09 ± 0,09	3,69 ± 0,08
<b>Ni</b>	60 ± 19	66 ± 21	37 ± 11	58 ± 18	39 ± 12
<b>Cu</b>	17,8 ± 3,3	23,3 ± 4,3	19,0 ± 3,5	19,0 ± 3,5	19,7 ± 3,6
<b>Zn</b>	123,6 ± 7,2	114,5 ± 6,7	128,9 ± 7,5	110,2 ± 6,5	95,8 ± 5,6
<b>Ga</b>	16,9 ± 3,5	21,0 ± 4,3	20,6 ± 4,2	17,2 ± 3,5	16,1 ± 3,3
<b>As</b>	18,4 ± 1,2	8,4 ± 0,5	6,2 ± 0,4	5,2 ± 0,3	3,9 ± 0,3
<b>Br</b>	<mdl*	<mdl	3,0 ± 1,5	<mdl	<mdl
<b>Rb</b>	126 ± 11	153 ± 13	135 ± 12	117 ± 10	107 ± 9
<b>Sr</b>	121 ± 6	150 ± 8	190 ± 10	179 ± 9	180 ± 9
<b>Y</b>	43 ± 12	52 ± 15	56 ± 16	41 ± 12	41 ± 12
<b>Zr</b>	366 ± 21	364 ± 21	835 ± 48	444 ± 26	425 ± 25
<b>Hg</b>	<mdl	<mdl	<mdl	1,250 ± 0,435	<mdl
<b>Pb</b>	23,8 ± 3,2	24,5 ± 3,3	22,9 ± 3,1	17,5 ± 2,4	17,3 ± 2,3
<b>Th</b>	13,1 ± 1,8	17,2 ± 2,4	21,5 ± 3,0	16,7 ± 2,3	15,1 ± 2,1

mdl – minimalni detekcijski limit, K i Fe su prikazani u %, ostali elementi su u mg/kg

#### 9.3.4. Interpretacija rezultata koncentracija elemenata u uzorcima

Koncentracije elemenata Cr, Ni, Cu, Zn, As, Hg i Pb u uzorcima tla uzetim s lokacije saniranog deponija komunalnog otpada „Piškornica” ne odudaraju od vrijednosti izmjerenih u referentnim uzorcima.

Prema Geokemijskom atlasu Republike Hrvatske (Halamić & Miko 2009), koncentracije Cr, Ni, Cu, Zn, As, Hg i Pb u skladu su s normalnim vrijednostima za tlo u bližoj okolini (Tablica 19). Od ostalih kemijskih elemenata izmjerene su značajno veće koncentracije Ca i Zr te značajno niže vrijednosti Fe u odnosu na referentne lokacije, međutim ti elementi ne utječu na ocjenu kvalitete tla.

Tablica 19 Srednje vrijednosti za tlo s referentnih lokacija i sanirani deponij. Vrijednosti za tla Hrvatske u cijelosti te raspon koncentracija za bližu okolicu deponija preuzeti su od Halamić & Miko, 2009.

	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
<b>Sr.vr. Referentni uz.</b>	1,701	6911	7888	161	106	1002	8,40	63	21	119
<b>Sr. vr. Deponij</b>	1,594	4854 9	7820	149	85	638	3,98	45	19	112
<b>Sr.vr. Hrvatska (Halamić, J. &amp; Miko, S., 2009)</b>	1,49	2130 0	4050	119	97	808	3,51	55	30	99
<b>Raspon vrijednosti za okolicu lokacije (Halamić &amp; Miko, 2009)</b>	-	-	-	-	70,6- 88,2	-	-	30- 47,5	17- 25,4	88- 116

K i Fe u izraženi %, dok su ostali elementi izraženi u mg/kg.

	Ga	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Hg	Pb	Th
<b>Sr.vr. Referentni uz.</b>	19	13,4	<mdl*	139	135	48	365	<mdl	24	15
<b>Sr. vr. Deponij</b>	18	5,1	3,0	120	183	46	568	1,250	19	18
<b>Sr.vr. Hrvatska</b>	-	13	-	-	108	22	59	0,093	38	13

<b>(Halamić &amp; Miko, 2009)</b>										
<b>Raspon vrijednosti za okolicu lokacije (Halamić &amp; Miko, 2009)</b>	-	5-8	-	-	-	-	-	0,035-0,060	33-46	-

\* mdl - minimalni detekcijski limit

Gledajući maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK) kemijskih elemenata u tlu, u Republici Hrvatskoj važeći je samo Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (NN 39/13) koji definira MDK vrijednosti za teške metale i potencijalno onečišćujuće elemente (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn). Prema tom pravilniku izmjerene koncentracije elemenata Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn u dostavljenim uzorcima tla ne prelaze MDK.

S obzirom da Pravilnik NN 39/13 ne razmatra potencijalni rizik od onečišćenja okoliša te potencijalni rizik od oboljenja za ljude, pokušali smo definirati zaštitne vrijednosti koncentracija kemijskih elemenata u tlima Hrvatske (

Tablica 20) polazeći od zaštitnih i interventnih vrijednosti u SAD, Kanadi i Europskoj Uniji te uzimajući u obzir srednje vrijednosti koncentracija elemenata mjerenim u različitim tlima Republike Hrvatske (Obhođaš i sur., 2012). Te su vrijednosti predmet diskusije, ali su svakako dobra polazna točka i bilo bi se dobro pridržavati mjera koje iz toga slijede. Drugim riječima na području lokacija uzoraka čije vrijednosti za jedan od elemenata naveden u tablici ispod spadaju u Klasu III ili Klasu IV potrebno je provesti mjere sanacije – uklanjanja kontaminiranog zemljišta. Ukoliko uzmemo u obzir vrijednosti navedene u

Tablica 20, možemo zaključiti da se tlo sa saniranog odlagališta komunalnog otpada Piškornica s obzirom na izmjerene koncentracije Ni, Cu, Zn, As i Pb svrstava u tlo Klase I (zanemarivi rizik).

Tablica 20 Zaštitne vrijednosti koncentracija kemijskih elemenata različitih klasa za tla u Hrvatskoj – prijedlog (Obhođaš i sur., 2012).

Kemijski element	ZVK (mg/kg) zanemarivi rizik Klasa I	ZVK (mg/kg) upozoravajući rizik Klasa II	ZVK (mg/kg) neprihvatljiv rizik – naseljeno Klasa III	ZVK (mg/kg) neprihvatljiv rizik – nenaseljeno Klasa IV
<b>Ni</b>	<100	100-200	200-400	>400
<b>Cu</b>	<40	40-100	100-500	>500
<b>Zn</b>	<250	250-700	700-2.000	>2.000
<b>As</b>	<20	20-30	30-50	>50
<b>Ba</b>	<500	500-1.000	1.000-2.000	>2.000
<b>Pb</b>	<85	85-150	150-500	>500
<b>Boja oznake</b>				

### 9.3.5. Ocjena kvalitete tla

Sukladno dobivenim rezultatima provedenih analiza na Institutu Ruđer Bošković, može se utvrditi kako u dostavljenim uzorcima uzetim u neposrednoj blizini odlagališta otpada Piškornica nije utvrđeno onečišćenje s obzirom na teške metale. Sukladno jedinom postojećem Pravilniku o zaštiti

poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (NN 39/13), koncentracije elemenata Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn ne prelaze maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK) kemijskih elemenata u tlu, odnosno ovih teških metala. Prema predloženim zaštitnim vrijednostima za tla u Hrvatskoj koje uzimaju u obzir potencijalni rizik od onečišćenja okoliša i rizik od oboljenja za ljude, izmjerene koncentracije Ni, Cu, Zn, As i Pb svrstavaju tlo deponije u Klasu I (zanemarivi rizik).

Iako su koncentracije teških metala na svim uzorcima bile ispod propisanih maksimalnih dozvoljenih granica, može se primijetiti kako su u uzorku Q1 koji je uzet na još uvijek ne saniranom dijelu odlagališta zabilježene nešto veće koncentracije teških metala Zn, As, Pb, V, Ti, Mn, Br, Th te elemenata Fe i Mn u odnosu na druga dva uzorka tla uzeta u neposrednoj blizini procjernih laguna. Uzorci uzeti u neposrednoj blizini procjernih laguna (Q2 i Q3) upućuju na to kako nije došlo do propuštanja onečišćenih procjernih voda iz laguna, odnosno kako nije došlo do bočnog širenja onečišćenja. Ovo je u skladu sa provedenim istraživanjima od strane Zavoda za javno zdravstvo Koprivničko-križevačke županije u 2009. godini kada su analizirane koncentracije teških metala u procjernih vodama laguna prilikom čega su rezultati ukazali na to kako su koncentracije ispitivanih teških metala u obje lagune bile ispod graničnih vrijednosti.

Iako u uzorkovanim uzorcima nisu zabilježene koncentracije teških metala iznad maksimalnih dozvoljenih koncentracija, ovdje je potrebno imati na umu kako je uzorkovanje obavljeno na relativno plitkim dubinama te na malom broju uzoraka te se stoga ne može sa sigurnošću utvrditi kako nije došlo do infiltracije teških metala na veće dubine, odnosno kako nije došlo do procjeđivanja teških metala u dublje slojeve tla, posebno imajući na umu poroznost sredine. Sukladno navedenom, kako bi se preciznije utvrdila kakvoća tla potrebna je analiza uzoraka tla sa većih dubina, odnosno iz bušotina kako bi se preciznije utvrdile koncentracije teških metala, za koje se pretpostavlja kako su procjeđivanjem dospjele u dublje slojeve.

#### **9.4. Prijedlog geokemijskih mjerenja tala na lokaciji Piškornica**

Temeljem provedene analiza kakvoće podzemnih voda na piezometrima PK2 do PK5 uočene su povećane vrijednosti nekih teških metala, prvenstveno željeza i mangana. Sadržaj željeza u podzemnoj vodi povećan je desetak puta više od maksimalno dozvoljene koncentracije u pitkoj vodi. S obzirom na namjeru povećanja kapaciteta crpilišta Ivanščak razloge povećanih koncentracija željeza u podzemnoj vodi svakako bi trebalo istražiti.

Modelska analiza toka podzemne vode i pronosa zagađenja ukazuje da pri povećanim količinama crpljenja na crpilištu Ivanščak može doći do skretanja krajnjih strujnica prema crpilištu, koje mogu pronositi visoke sadržaje teških metala. Kako je pojava povećanih koncentracija željeza u podzemnoj vodi posljedica kombinacije prirodnog i antropogenog utjecaja, potrebno je detaljnije analizirati geokemijske procese u vodonosniku šireg područja odlagališta Piškornica.

Predlaže se da za vrijeme provedbe prve faze dodatnih mjerenja u novim piezometrima M2 do M4 uz već predložena fizikalno-kemijska mjerenja, provedu i mjerenja stabilnih izotopa kisika i vodika, radioaktivnog izotopa vodika tricija ( $H^3$ ) i ugljika ( $C^{13}$ ). Tako provedena geokemijska analiza tla u promatranom vodonosniku će pomoći numeričkom modeliranju pronosa zagađenja onih supstanci koje imaju kemijske reakcije pri pronosu kroz vodonosnik. Također geokemijska analiza tla treba rasvijetliti



moćnost prisustva određenih teških metala u geološkoj strukturi vodonosnih slojeva na širem području lokacije Piškornica.

## 10. SAŽETAK STUDIJE

Odlagalište otpada Piškornica nalazi se na području općine Koprivnički Ivanec, sjeverno od grada Koprivnice na udaljenostima od oko 1 km zračne udaljenosti od najbližeg naselja Pustakovec, oko 2 km zračne udaljenosti od naselja Koprivnički Ivanec te oko 8 km zračne udaljenosti od centra grada Koprivnice. Lokacija odlagališta otpada definirana je prostornim planom Koprivničko-križevačke županije. Na trenutnoj lokaciji odlaganje industrijskog i komunalnog otpada vrši se od 1982. godine, pri čemu se do sanacije odlaganje vršilo na nesantaran način, odnosno nije bilo izvedeno nepropusno dno sa riješenom odvodnjom procjednih voda na uređaj za pročišćavanje. 1991. godine izrađeno je prvo idejno rješenje sanacije odlagališta u okviru kojega je planiran nastavak rada kao sanitarnog odlagališta. Desetak godina kasnije (2001) izrađeno je novo „Idejno rješenje odlagališta otpada I. kategorije na lokaciji Piškornica – Koprivnica“ (IPZ Uniprojekt MCF, Zagreb), a u ožujku 2001. godine prihvaćena je Studija utjecaja na okoliš. Lokacijska i građevinska dozvola za sanaciju i konačno uređenje odlagališta Piškornica izdane su 2004. godine. Sanacija odlagališta je započela 2005. godine te se provodila u nekoliko faza kroz više godina. Danas je na odlagalištu otpada Piškornica izvedena sanacija ploha 1, 2 i 3 te se otpad od 2018. godine odlaže na plohu 4 na sanitaran način. U trenutnoj situaciji je ostalo nesantirano oko 100 000 m<sup>3</sup> otpada izvan granica odlagališta, odnosno izvan današnje ograde, južno od tijela odlagališta.

Kako bi se pratila kakvoće podzemnih voda u neposrednoj blizini odlagališta otpada 1991. godine je izvedeno 5 piezometara (P1-P5). Danas je temeljem okolišne dozvole, odlagalištu otpada Piškornica propisana obveza provođenja mjerenja osnovnih pokazatelja kakvoće vode u podzemnim vodama na piezometrima P2, P3, P4 i P5 te u površinskim vodama na vodnom tijelu Gliboki na lokacijama G1 (most Pustakovec) i G2 (most Đelekovec) s minimalnom učestalosti uzorkovanja četiri puta godišnje za vrijeme rada odlagališta te uz primjenu analitičke metode mjerenja. Ispitivanja stanja kakvoće podzemnih i površinskih voda u proteklim godinama, uključivo i 2018. godinu, obavljena su od strane neovisnog akreditiranog laboratorija Zavoda za javno zdravstvo Koprivničko-križevačke županije (Služba za zdravstvenu ekologiju), u suradnji sa Zavodom za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije (Zdravstveno-ekološki odjel, Odsjek za kontrolu voda za piće i voda u prirodi) i Nastavnim zavodom za javno zdravstvo dr. Andrija Štampar (Odsjek za zdravstvenu ispravnost i kvalitetu voda, Služba za zaštitu okoliša i zdravstvenu ekologiju).

Kako bi se utvrdile moguće razlike u kvaliteti podzemnih i površinskih voda nastale uslijed rada odlagališta otpada Piškornica analizirani su rezultati ovih izvješća kako bi se dobio uvid u trendove kretanja određenih parametara, odnosno onečišćivača te je dodatno izvršena statistička analiza određenih parametara kako bi se uz primjerenu pouzdanost mogla procijeniti djelotvornost sanacije odlagališta otpada koja je sukladno projektnom zadatku ugovora, provedena u razdoblju od 2005. do 2012. godine. Za statističku analizu su uzeti parametri s najduljim vremenskim nizom ispitivanja, što su u slučaju podzemnih voda bili parametri KPK, BPK, elektrovodljivost i željezo na piezometrima P2, P3, P4 i P5, dok su za površinske vode, odnosno vodno tijelo Gliboki, uzeti parametri KPK<sub>5</sub>, BPK<sub>5</sub>, elektrovodljivost, bakar i cink na lokaciji uzvodno (lokacija G1) i lokaciji nizvodno (lokacija G2). Prilikom statističke analize, kao polazna pretpostavka uzeto je da su sva ispitivanja provedena u istom referentnom laboratoriju te da su svi parametri analizirani primjenom iste metodologije. Statistička analiza je obavljena temeljem t-testa i analize varijance (ANOVA).

Rezultati statističke analize su utvrdili da je provedena sanacija odlagališta rezultirala značajnom pozitivnom promjenom stanja podzemnih voda u neposrednoj blizini odlagališta otpada u odnosu na vrijednosti za KPK, BPK i elektrovodljivost, dok se rezultati ispitivanja udjela željeza nisu signifikantno promijenili nakon provedene sanacije odlagališta (za ovaj parametar je utvrđeno veliko rasipanje pojedinačnih rezultata). Statističkom analizom je također utvrđeno kako su najveće promjene vrijednosti promatranih značajki kakvoće vode (nakon provedene sanacije odlagališta) utvrđene na lokaciji P5, koja se nalazi pokraj sjeveroistočnog dijela odlagališta. U slučaju površinskih voda, odnosno vodnog tijela Gliboki, temeljem provedene statističke analize može se utvrditi kako za izmjerene vrijednosti promatranih značajki kakvoće nije zamjetan utjecaj odlagališta otpada Piškornica. Ovdje je potrebno napomenuti kako su dobivene povišene koncentracije bakra nakon provedene sanacije najvjerojatnije posljedica poljoprivrednih aktivnosti.

Dodatno, kako bi se dobio uvid u stanje tla u neposrednoj blizini odlagališta otpada Piškornica uzeto je pet uzoraka tla, od kojih su dva uzorka bila referentna. Uzorci tla su uzeti strojno (kombinirani radni stroj) s prosječne dubine od oko 2 metra, pojedinačne mase oko 3 kilograma te je analiza teških metala izrađena od strane Instituta Ruđer Bošković u prosincu 2018 godine. Jedan uzorak je uzet na još uvijek nesaniranom dijelu odlagališta (južna ploha), izvan današnje ograde odlagališta (Q1), dok su dva uzorka uzeta u neposrednoj blizini laguna za procjedne vode (Q2 i Q3). Rezultati analize su pokazali kako u dostavljenim uzorcima uzetim u neposrednoj blizini odlagališta otpada Piškornica nije utvrđeno onečišćenje s obzirom na teške metale. Sukladno Pravilniku o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (NN 39/13), koncentracije elemenata Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn nisu prelazile maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK) kemijskih elemenata u tlu. Prema predloženim zaštitnim vrijednostima za tla u Hrvatskoj koje uzimaju u obzir potencijalni rizik od onečišćenja okoliša i rizik od oboljenja za ljude, izmjerene koncentracije Ni, Cu, Zn, As i Pb svrstavaju tlo deponije u Klasu I (zanemarivi rizik). Temeljem rezultata vidljivo je kako nije došlo do bočnog širenja onečišćenja, no ovdje je potrebno napomenuti kako su uzorci uzeti sa relativno male dubine (2m) te se ne može sa sigurnošću utvrditi kako nije došlo do infiltracije teških metala na veće dubine, odnosno kako nije došlo do procjeđivanja teških metala u dublje slojeve tla, posebno imajući na umu poroznost sredine.

Imajući na umu kako se na odlagalište otpada Piškornica, do sanacije, otpad odlagao na propusno dno bez izvedene odvodnje i pročišćavanja procijenjenih voda, došlo je do procjeđivanja oborina kroz tijelo odlagališta prilikom čega se stvarao fluid koji sadrži otpadnu vodu sa mnogim supstancama opasnim po vodna tijela kao što su teški metali, razni plinovi kao metani, sumporovodici te mnogi drugi organski i anorganski spojevi. U ovom slučaju bez postojanja podinske barijere, ovaj fluid ulazi u vodonosnik i kao oblak zagađenja širi se i putuje nizvodno prema vodnim tijelima. U slučaju odlagališta Piškornica mogu se ugroziti vodno tijelo Gliboki, rijeka Drava i crpilište Ivanščak.

Kako bi se utvrdio moguć rizik od onečišćenja, analiziran je pronos zagađenja od odlagališta nizvodno prema vodnim tijelima na temelju konzervativnog pronosa (bez kemijskog pronosa) koji je ujedno i najgori mogući scenarij s obzirom na prostorni doseg oblaka, njegovog vremena putovanja i koncentracije oblaka bez ikakvih (realnih) usporavanja ponosa. Temeljem regionalnog modela tečenja izrađen je numerički model toka podzemne vode i pronosa zagađenja te su dani scenariji mogućeg širenja zagađenja s odlagališta otpada Piškornica s obzirom na različite režime rada vodocrpilišta

Ivanščak. Istoimeno vodocrpilište nalazi se na zračnoj udaljenosti od oko 5,5 km od odlagališta otpada Piškornica pri čemu se samo odlagalište ne nalazi u I, II i IIIa zaštitnoj zoni vodocrpilišta. Scenariji su razmatrani s obzirom na crpljenje vodocrpilišta Ivanščak sa prosječnim kapacitetom od 0 l/s (crpilište izvan funkcije, scenarij S-1), od 100 l/s (scenarij S-2), 200 l/s (scenarij S-3), 420 l/s (scenarij S-4) i 600 l/s (scenarij S-5). Temeljem rezultata analize vidljivo je kako u svim realnim scenarijima tečenja S1-S4 ne dolazi do širenja oblaka zagađenja u vodna tijela potoka Gliboki i crpilišta Ivanščak. U scenariju S-4 iako dolazi do zakretanja strujnica prema vodocrpilištu više u odnosu na scenarije S1-S3, niti u slučaju maksimalnog kapaciteta crpilišta od 420 l/s neće doći do onečišćenja crpilišta Ivanščak. Eventualno povećanje kapaciteta crpljenja u budućnosti na oko 600 l/s u scenariju tečenja S5 će uzrokovati direktnu hidrodinamičku vezu, odnosno zakretanje strujnica prema vodocrpilištu prilikom čega bi došlo do kretanja zagađenja direktno prema vodocrpilištu u slučaju kada odlagalište ne bi bilo sanirano. U svim spomenutim scenarijima S1-S5 vodno tijelo Gliboki nije ugroženo zbog mogućeg onečišćenja iz odlagališta Piškornica.

Usprkos poboljšanju stanja podzemnih voda sanacijom odlagališta otpada, ostaje činjenica da je još jedan dio starog odlagališta bez podinske zaštite, odnosno nije saniran te se iz tog dijela potencijalno širi oblak onečišćenja koji je formiran za vrijeme odlaganja otpada na ovaj dio odlagališta do 2005. godine te je svakako ovu južnu plohu odlagališta otpada potrebno što hitnije sanirati kako bi se spriječilo daljnje formiranje oblaka zagađenja koji potencijalno može ugroziti prethodno spomenuta vodna tijela i resurse pitke površinske i podzemne vode. Dodatno, uzimajući u obzir razvojne aktivnosti na širem području, odnosno vjerojatno povećanje kapaciteta vodocrpilišta Ivanščak, ovom studijom se predlaže dodatno mjerenje stanja podzemnih voda i to u dvije faze. Prva faza uključuje piezometar M-1 koji se nalazi uzvodno od odlagališta Piškornica na udaljenosti od 2 km, na mjestu gdje se već nalazi duboka bušotina SB-1 te bi se na ovoj bušotini određivalo stanje podzemne vode koje se kreće prema odlagalištu otpada (ulazno stanje podzemnih voda) te dodatne piezometre M-2, M-3 koji su postavljeni nizvodno od odlagališta na udaljenostima od 1,25 - 1,75 km. Piezometar M-2 se nalazi oko 1,75 km od odlagališta i nalazi se na strujnici iz odlagališta za simulaciju crpljenja S1-S3 koja odgovara današnjim uvjetima crpljenja. Piezometar M-3 se nalazi oko 1,75 km od odlagališta i nalazi se na strujnici iz odlagališta za simulaciju crpljenja S5 kada je uspostavljena direktna hidrodinamička veza između odlagališta i crpilišta. Piezometar M-4 se nalazi blizu vodnog tijela Gliboki te je udaljen od odlagališta otpada oko 1,25 km te se može kompenzirati s predloženom novom mjernom točkom u vodnom tijelu Gliboki jer ima zadaću praćenja oblaka zagađenja prema ovom vodnom tijelu. Svi predloženi piezometri bi trebali imati minimalnu dubinu od oko 20 metara te ogovarajući profil. Lokacije ovih predloženih piezometara se nalaze na slici 51. u studiji. Prva faza monitoringa također treba uključivati sanaciju, odnosno zamjenu postojećih piezometara P2-P5, pri čemu treba voditi računa da ovi piezometri imaju iste dimenzije i dubine kao i novopredloženi piezometri (M-1 do M-7).

U drugoj fazi monitoringa predlažu se dodatni piezometri M5-M7, na udaljenostima od 3,3 km (M-5), 4,87 km (M-6) i 8,12 km od odlagališta (M-7). Ovi piezometri bi se aktivirali u slučaju detektiranih prekoračenja koncentracija onečišćivača u piezometrima M2-M4. Piezometar M-5 bi, uz piezometar M-3, trebao detektirati moguće kretanje oblaka iz odlagališta prema crpilištu Ivanščak kod scenarija povećanja kapaciteta crpilišta. Izgradnjom ovih piezometara bi se moglo pratiti kretanje oblaka zagađenja na sva tri moguća nizvodna smjera širenja te bi predstavljali podlogu za detaljnije 3-D modeliranje toka i pronosa zagađenja u širem području lokacije Piškornica, kao i za analizu opterećenja i

utjecaja svih potencijalnih onečišćivača kako je i predviđeno operativnim monitoringom (Plan usklađenja monitoringa, HV, 2016). Posebice treba naglasiti kako realno 3-D modeliranje zahtijeva geokemijsku analizu tla, ali i intrakcije tla i otpada kako bi se odredili geokemijski parametri pronosa kao što su npr. koeficijenti retardacije i sorpcije, neophodni za simulacije reaktivnog pronosa oblaka zagađenja.

Predložena dinamika ispitivanja osnovnih pokazatelja kemijskog stanja (nitrati i pesticidi), specifičnih onečišćujućih tvari (elektrovodljivost, amonijak, ortofosfati, metali arsen, kadmij, olovo i živa, lakohlapljivi halogenirani ugljikovodici, kloridi i sulfati) te fizikalno-kemijskih i kemijskih pokazatelja (uključujući ione i metale željezo, mangan, bakar, cink, krom i nikal) je 6 puta godišnje (svaka 2 mjeseca) u prve dvije godine te kasnije 4 puta godišnje (odnosno svaka 3 mjeseca).

Dodatno kako bi se smanjio rizik od mogućih pronosa teških metala, potrebno je u provedbi prve faze dodatnih mjerenja provesti geokemijsku analizu tla pomoću mjerenja stabilnih izotopa kisika i vodika, radioaktivnog izotopa vodika tricija ( $H^3$ ) i ugljika ( $C^{13}$ ). Ovakva analiza će pomoći u saznanjima ima li prisustva teških metala u geološkoj strukturi vodonosnih slojeva na širem području lokacije Piškornica te pomoći numeričkom modeliranju pronosa zagađenja onih supstanci koje imaju kemijske reakcije pri pronosu kroz vodonosnik.

## 11. LITERATURA

1. Ackerer P., Younes A., Mose R., Modeling variable density flow and solute transport in porous medium: 1. Numerical model and verification. *Transp Porous Media*;35(3):345-73, 1999.
2. Bear J., *Hydraulics of Groundwater*, 567 p., McGraw-Hill, New York, 1979.
3. Bear J., Bachmat Y., A generalized theory on hydrodynamic dispersion in porous media, IASH Symp, Artificial Recharge and Management of Aquifers, IASH, 1967.
4. Čuljak, V. (2011) Vjerojatnost i statistika, Građevinski fakultet, <http://grad.unizg.hr/vera/webnastava/vjerojatnoststatistika/html/VIS.html>.
5. Dalbelo Bašić, B. (2005) ANOVA, materijal za kolegij „Statističko učenje“, Fakultet elektrotehnike i računarstva, [www.zemris.fer.hr/predmeti/stu/Anova-i-primjena.ppt](http://www.zemris.fer.hr/predmeti/stu/Anova-i-primjena.ppt) .
6. DHMZ (2018) Klima i klimatske promjene, <http://meteo.hr/klima>, 9.1.2019.
7. Duić Ž., Urumović, K., UTJECAJ STRUKTURE LEGRADSKOG PRAGA NA HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE U PODRUČJU KOPRIVNICE, Rudarsko-geološko- naftni zbornik, RGN, Zagreb, 2007.
8. Elinder CG. (1986) Zinc, u: *Handbook on the toxicology of metals*, 2. izd., Amsterdam: Elsevier Science Publishers, str. 664-679.
9. GIS, Bioportal – Web portal Informacijskog sustava zaštite prirode, <http://www.bioportal.hr/gis/>, 12.12.2018.
10. Gotovac H., Fi-program za analizu tečenja i pronosa u podzemlju, FGAG, Split, 2002.
11. Halamić J. & Miko, S. (2009): *Geokemijski atlas Republike Hrvatske*, Hrvatski geološki institut, Zagreb.
12. Holzbecher E., *Modeling density-driven flow in porous media*, Berlin, Springer, 1998.
13. Institut Ruđer Bošković, Laboratorij za nuklearne analitičke metode (2018) Ispitni izvještaj analize tla za teške metale.
14. Izvještaj radne skupine za odlagalište otpada Piškornica o monitoringu površinskih i podzemnih voda, Koprivnica, 8.3.2018.
15. Jović V., *Uvod u inženjersko numeričko modeliranje*, Aqarius, Split, 1993
16. Klima i klimatske promjene, DHMZ, [http://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_modeli&param=klima\\_promjene#a10](http://meteo.hr/klima.php?section=klima_modeli&param=klima_promjene#a10), 13.12.2018.
17. La Bolle, E.M., Fogg, G.E., Tompson, A.F.B., Random-Walk Simulation of Transport in Heterogeneous Porous Media: Local Mass-Conservation Problem and Implementation Methods, *Water Resources Research*, 32, 3, 1996.
18. Mendenhall, W., Sincich, T. (1988) *Statistics for the Engineering and Computer Sciences*, 2nd ed., San Francisco: Dellen Publ. Comp.
19. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. (2016) Rješenje o okolišnoj dozvoli za postojeće postrojenje odlagališta otpada „Piškornica“.
20. Obhodaš, J., Valković. V., Kutle, A. (2012): Geokemijska karakterizacija okoliša slivnog područja donje Neretve, NGO “Lijepa naša”, Zagreb.
21. Park C-H., Beyer C., Bauer C., Kolditz O., A study of preferential flow in heterogeneous media using random walk particle tracking, DOI: 10.1007/s12303-008-0029-2, *Geosciences Journal* 12(3):285-297, 2008.
22. Pavlič, I. (1971) *Statistička teorija i primjena*. Zagreb: Tehnička knjiga.
23. Rubin Y., *Applied subsurface hydrogeology*, Prentice Hall, Ney York, 2003.
24. Ruk, D., Nemčić-Jurec, J., Horvat, I., Martinaga, N., Gres, M. (2018) Izvještaj radne skupine za

odlagalište otpada Piškornica o monitoringu površinskih i podzemnih voda.

25. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet (2017) Analiza i interpretacija rezultata izvješća o ispitivanju površinskih, podzemnih, procjednih (otpadnih) i oborinskih voda na odlagalištu Piškornica za ožujak i lipanj 2017. godine.
26. Uniprojekt MCF d.o.o. (2000) Studija o utjecaju na okoliš uređenja postojećeg odlagališta komunalnog otpada „Piškornica“, Koprivnica.
27. Urumović, K., Hlevnjak, B., Gold, H., Vodoopskrbni sustav Koprivnice. Hidrogeološka studija razvitka crpilišta Ivanščak, RGN, Zagreb, 1996.
28. Urumović, K., Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2003.
29. Voss C.I., A finite-element simulation model for saturated-unsaturated fluid-density-dependent groundwater flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport, U.S. Geol. Surv. Water Resour. Invest., 409 pp. [Rep 84-4369], 1984.
30. Zavod za javno zdravstvo Koprivničko-križevačke županije (2009) Elaborat o procjeni početnom stanju kakvoće voda na odlagalištu otpada „Piškornica“.
31. Zavod za javno zdravstvo Koprivničko-križevačke županije (Služba za zdravstvenu ekologiju), Zavod za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije (Zdravstveno-ekološki odjel, Odsjek za kontrolu voda za piće i voda u prirodi) i Nastavni zavod za javno zdravstvo dr. Andrija Štampar (Odsjek za zdravstvenu ispravnost i kvalitetu voda, Služba za zaštitu okoliša i zdravstvenu ekologiju) (2016-2018.) Izvješće o ispitivanju kakvoće podzemnih, površinskih, otpadnih i procjednih voda.
32. Welty C., Gelhar L.W., Simulation of large-scale transport of a variable density and viscosity fluids using a stochastic mean model, Water Res. Res., Vol. 28, 815-827, 1992.
33. Web servisi (WMS i WFS), Bioportal – Web portal Informacijskog sustava zaštite prirode, <http://services.bioportal.hr/wms>; WFS: <http://services.bioportal.hr/wfs>, 11.12.2018.