

Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko - geološko - naftni fakultet

Ivan Bašić i Marko Sinčić

Planirano vodocrpilište Ježdovec - karte prirodne ranjivosti i utjecaj planiranih  
hidroelektrana na razine podzemne vode

Zagreb, 2019.

Ovaj je rad napisan na Zavodu za geologiju i geološko inženjerstvo pod vodstvom mentora prof.dr.sc. Kristijana Posavca i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

## SADRŽAJ

1.	Uvod .....	1
2.	Ciljevi rada i hipoteze .....	2
3.	Istraživano područje i planirano stanje .....	3
3.1.	Geologija .....	4
3.2.	Hidrogeologija te utvrđivanje hidrauličke veze Save i podzemnih voda .....	7
3.3.	Planirano stanje i dosadašnji radovi .....	11
4.	Metodologija .....	16
4.1.	Numeričke metode u rješavanju modela toka .....	16
4.2.	Matematički i računalni model .....	17
4.3.	Prirodna ranjivosti modificirane SINTACS metode .....	18
5.	Određivanje karakteristika planiranog vodocrpilišta Ježdovec i utjecaj HE Prečko i HE Podsused na podzemne vode .....	29
5.1	Odabir potencijalne lokacije za razvoj vodocrpilišta .....	29
5.1.1	Karta izostata podine aluvijalnih naslaga vodonosnika .....	29
5.1.2	Karte ekvipotencijala niskih i visokih razina podzemne vode .....	30
5.1.3	Karte izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika .....	32
5.1.4.	Lokacije zdenaca za planirano vodocrpilište Ježdovec.....	33
5.2	Hidroelektrane.....	35
5.3.	Rezultati simulacije .....	36
6.	Ranjivost .....	40
6.1.	Izrada faktorskih karata .....	40
6.1.1	Dubina do podzemne vode (S1) .....	40
6.1.2	Efektivna infiltracija (I) .....	43
6.1.3	Kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni (N) .....	44
6.1.4	Kapacitet tla ili površinskih naslaga (T).....	45
6.1.5	Hidrogeološka ocjena vodonosnika (A) i raspon hidrauličke vodljivosti (C) .....	46
6.1.6	Hidrološka uloga nagiba terena (S2) .....	46
6.1.7.	Namjena zemljišta .....	47
6.2.	Karte prirodne ranjivosti .....	49

7.	Rasprava i zaključak .....	53
8.	Zahvale.....	56
9.	Popis literature .....	57
10.	Sažetak .....	60
11.	Summary.....	61
	<b>PRILOZI.....</b>	<b>62</b>



## POPIS SLIKA

Slika 3.1 Istraživano područje.....	3
Slika 3.2 Litološki stupovi na istraživanom području (Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske, 1999.).....	5
Slika 3.3 Isječak OGK List Zagreb, M 1:100.000 (Šikić i dr., 1978.).....	6
Slika 3.4 Usporedba vodostaja Save i razine podzemne vode u piezometru P - 69 .....	7
Slika 3.5 Prikaz situacije za određivanje hidrauličke veze Save i podzemnih voda.....	8
Slika 3.6 Linearni regresijski model piezometra P - 69 i hidrološke postaje Podsused .....	9
Slika 3.7 Kros-korelogram razina podzemne vode u piezometru P - 69 i vodostaja na hidrološkoj postaji Podsused.....	10
Slika 3.8 Situacija na istraživanom području.....	12
Slika 3.9 Prirodna ranjivost vodonosnika (prema HGI, 2009.) .....	13
Slika 3.10 Prijedlog zona sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec (prema Pavić 2016.) .....	14
Slika 3.11 Simulirane trase za period trajanja 50 dana (Pavić, 2016.) .....	15
Slika 3.12 Simulirane trase za period trajanja 25 godina (Pavić, 2016.).....	15
Slika 4.1 Klase ranjivosti SINTACS metode (Loborec, 2013.).....	19
Slika 4.2 Dijagram za određivanje parametra S1 (Civita & de Maio, 1997.).....	20
Slika 4.3 Dijagram za određivanje koeficijenta X (Civita & de Maio, 1997.) .....	21
Slika 4.4 Dijagram za određivanje parametra I (Civita & de Maio, 1997.).....	21
Slika 4.5 Dijagram za određivanje parametra N (Civita & de Maio, 1997.) .....	22
Slika 4.6 Dijagram za određivanje parametra T (Civita & de Maio, 1997.).....	23
Slika 4.7 Dijagram za određivanje parametra A (Civita & de Maio, 1997.) .....	24
Slika 4.8 Dijagram za određivanje vrijednosti hidrauličke vodljivosti (Civita & de Maio, 1997.).....	25
Slika 4.9 Dijagram za određivanje parametra C (Civita & de Maio, 1997.) .....	25
Slika 4.10 Dijagram za određivanje parametra S2 (Civita & de Maio, 1997.).....	26
Slika 4.11 Težinski koeficijenti pojedinog parametra u različitim scenarijima (Loborec, 2013.).....	27
Slika 4.12 Kategorizacija indeksa ranjivosti prema normaliziranom indeksu ranjivosti (Civita & de Maio, 1997.).....	28
Slika 5.1 Karta izostrata podine aluvijalnih naslaga na istraživanom području .....	30
Slika 5.2 Karta ekvipotencijala na dan niskih razina podzemne vode (12.7.2012.) .....	31
Slika 5.3 Karta ekvipotencijala na dan visokih razina podzemne vode (6.11.2012.) .....	32

Slika 5.4 Karta izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika za stanje niskih razina podzemne vode (12.7.2012.).....	33
Slika 5.5 Lokacije zdenaca s obzirom na razmatrane kriterije .....	35
Slika 5.6 Hidrauličke granice modela istraživanog područja .....	37
Slika 5.7 Prognozna karta ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec bez utjecaja hidroelektrana.....	38
Slika 5.8 Prognozni 3D model ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec bez utjecaja hidroelektrana.....	38
Slika 5.9 Prognozna karta ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec s utjecajem hidroelektrana.....	39
Slika 5.10 Prognozni 3D model ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec s utjecajem hidroelektrana.....	39
Slika 6.1 Izrada faktorske karte dubina do podzemne vode (S1) .....	41
Slika 6.2 Primjer faktorske karte dubina do podzemne vode (S1) .....	42
Slika 6.3 Izrada faktorske karte efektivne infiltracije (I).....	43
Slika 6.4 Faktorska karta efektivne infiltracije (I).....	44
Slika 6.5 Faktorska karta kapaciteta razrjeđenja u nezasićenoj zoni (N) .....	45
Slika 6.6 Faktorska karta kapaciteta tla ili površinskih naslaga (T) .....	46
Slika 6.7 Izrada faktorske karte hidrološke uloge nagiba terena (S2) .....	47
Slika 6.8 Izrada faktorske karte namjene zemljišta .....	48
Slika 6.9 Faktorska karta namjene zemljišta.....	49
Slika 6.10 Postupak izrade konačne karte.....	50
Slika 6.11 Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij A.....	50
Slika 6.12 Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij B.....	51
Slika 6.13 Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij C.....	51
Slika 6.14 Karta prirodne ranjivosti prema standardnoj SINTACS metodi - scenarij 0.....	52
Slika 7.1 Karta dubina do podzemne vode za stanje niskih razina podzemne vode (12.7.2012.) uz crpljenje $Q=182$ l/s.....	54
Slika 7.2 Prognozna karta ekvipotencijala za slučaj izgrađenosti hidroelektrana i režim rada planiranog vodocrpilišta Ježdovec s $Q = 325$ l/s.....	55

## **POPIS TABLICA**

Tablica 3.1 Sistematizirani podaci statističkih analiza .....	10
Tablica 3.2 Koordinate planiranih zdenaca i hidroelektrana .....	11
Tablica 5.1 Karakteristike potencijalnih 8 zdenaca planiranog vodocrpilišta Ježdovec .....	34
Tablica 5.2 Donje i gornje vode planiranih hidroelektrana (Posavec, 2017.).....	36
Tablica 5.3 Karakteristike mogućih 5 zdenaca planiranog vodocrpilišta Ježdovec .....	36
Tablica 7.1 Udio pojedine klase ranjivosti za promatrane scenarije .....	53

## 1. UVOD

U radu se određuje prirodna ranjivost vodonosnika i utvrđuje se utjecaj hidroelektrana na podzemne vode na području predviđenom za razvoj novog vodocrpilišta Ježdovec. Planirano vodocrpilište Ježdovec nalazi se s desne obale rijeke Save u gradskoj četvrti Novi Zagreb - zapad, a konkretna domena ovog rada je obuhvat predloženih sanitarnih zona zaštite i vodozaštitno područje - II. zona zaštite (definirano u prostornom planu grada Zagreba). Povoljna geografska lokacija hipsometrijski viša u odnosu na grad Zagreb čini područje Ježdovca potencijalnim prostorom za razvoj novog vodocrpilišta koje bi se moglo uključiti u vodoopskrbu Grada Zagreba.

Ranjivost vodonosnika utječe na zaštitu vodonosnika odnosno podzemne vode i očuvanje njene dobre kakvoće. Ocjena prirodne ranjivosti u ovom radu temeljena je na postojanju dvije planirane hidroelektrane, HE Podsused i HE Prečko (WBIF IPF3, 2018.) čija izgradnja bi u značajnoj mjeri utjecala na razine podzemne vode zagrebačkog vodonosnika te bi stoga promijenila i uvjete u kojima se ocjenjuje prirodna ranjivost vodonosnika.

Prirodna ranjivost vodonosnika određena je za cjelokupno područje panonskog dijela Hrvatske pomoću SINTACS metode (HGI, 2009.). Rezultati su prikazani pomoću šest kategorija (od vrlo niske do vrlo visoke ranjivosti), a na području zagrebačkog vodonosnika odnosno planiranog vodocrpilišta Ježdovec u velikoj mjeri prevladava visoka ranjivost vodonosnika.

U ovom radu korištena je SINTACS metoda za određivanje prirodne ranjivosti uz modifikaciju, odnosno korištenje dodatnog parametra koji uzima u obzir namjenu zemljišta. Osim toga, utjecaj hidroelektrana i crpljenja, a koji utječu na promjenu razina podzemne vode tj. dubinu do vode također su uzeti u obzir pri izradi karte prirodne ranjivosti ovog područja.

Numerički model tečenja podzemne vode kojim se identificirao utjecaj hidroelektrana na podzemne vode izrađen je u računalnom programu Visual Modflow dok su ostale analize i kartografski prilozi izrađeni u programima ArcMap i MS Office Excel.

Ovaj rad uzima u obzir dosadašnje rezultate i istraživanja provedena na promatranom području te na osnovu istih unaprijeđuje i izrađuje novi koncept određivanja prirodne ranjivosti. Prirodna ranjivost, koja kao koncept zaštite vodonosnika uzima u obzir jedan parametar više od prethodno korištenog modela čini dodatan iskorak u tom smjeru.

## 2. CILJEVI RADA I HIPOTEZE

Ciljevi rada:

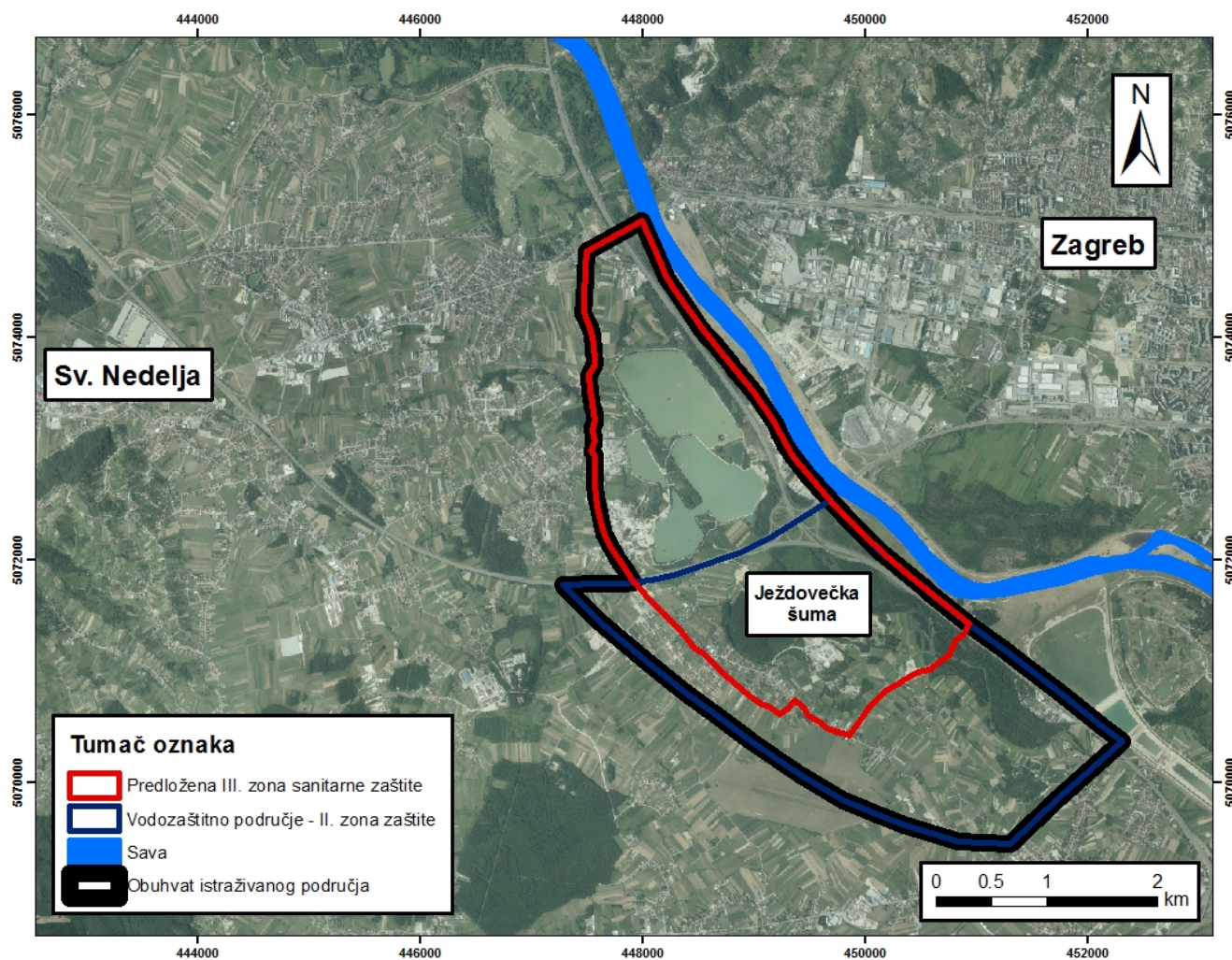
- a) izrada karata prirodne ranjivosti na području planiranog vodocrpilišta Ježdovec
  - unaprijediti postojeću zaštitu vodonosnika analizom prirodne ranjivosti
  - u izradi karata koristiti modificirane metode odnosno primjeniti nove parametre (karakteristične za istraživano područje)
    - napraviti usporedbu ranjivosti i odrediti utjecaj na ranjivost vodonosnika za postojeće i izgrađeno stanje novog vodocrpilišta i planiranih hidroelektrana
    - odrediti korisnost dodavanja karakterističnog parametra u ocjeni prirodne ranjivosti vodonosnika u ovakvoj vrsti analize
  
- b) simulirati izgrađeno stanje planiranih hidroelektrana na promatranom području
  - odrediti utjecaj hidroelektrana na razine podzemne vode
  - odrediti utjecaj hidroelektrana na prirodnu ranjivost vodonosnika

Hipoteze:

- a) vodocrpilišta u blizini urbanih sredina podložna su onečišćenju stoga drugačiji pristup u smislu zaštite vodocrpilišta (prirodna ranjivost) ima značajnu ulogu
  
- b) u hidrološkom sustavu gdje je rijeka u direktnoj hidrauličkoj vezi s podzemnom vodom (vodocrpilište Ježdovec) postojanje hidroelektrane na rijeci dovodi do značajnih promjena u podzemnoj vodi

### 3. ISTRAŽIVANO PODRUČJE I PLANIRANO STANJE

Zdenci planiranog vodocrpilišta Ježdovec smješteni su na područje Ježdovečke šume, uz sjeverozapadni rub rezerviranog područja u prostornom planu, a koje se štiti pod posebnim uvjetima (Pavić, 2016). Vodozaštitno područje je približno pravokutnog oblika, dužine 4 km i širine 2 km. Proteže se pravcem sjeverozapad - jugoistok, a sjeverozapadna i sjeveroistočna granica definirane su prometnicama. Predložena III. zona sanitarne zaštite proteže se sjevernije, do naselja Brestovje i uključuje jezera Rakitje. Istraživano područje ovog rada predstavlja zajedničko područje ove dvije zone, a prikazano je na Slici 3.1



Slika 3.1 Istraživano područje

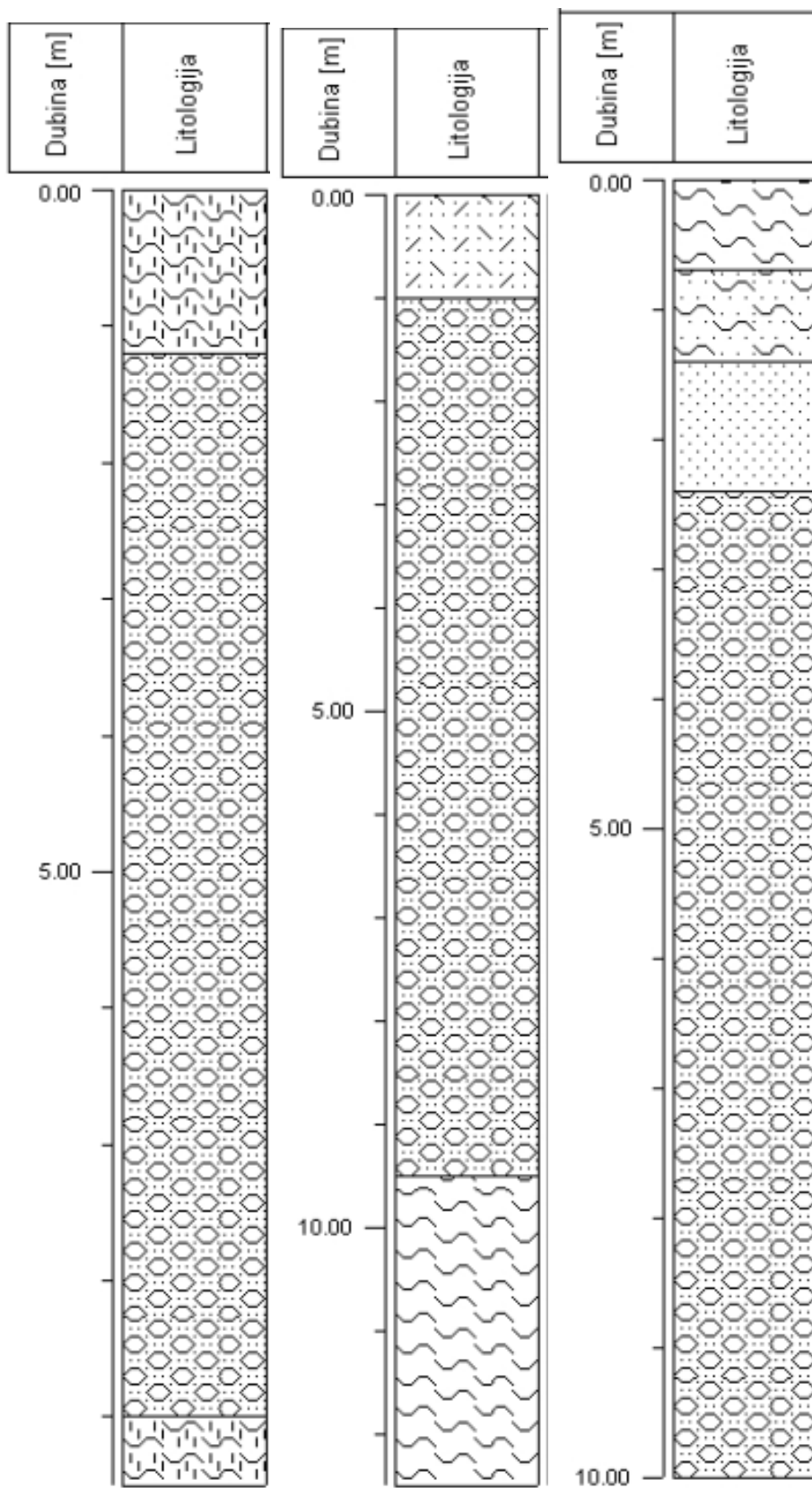
### 3.1. Geologija

Istraživano područje planiranog vodocrpilišta Ježdovec nalazi se na području Grada Zagreba. Prema tumaču osnovne geološke karte M 1:100000, list Zagreb (Šikić et al., 1979.), zagrebački vodonosni sustav je uglavnom izgrađen od naslaga kvartarne starosti (srednje i gornje pleistocenske te holocenske naslage), koje su detaljno istraživali Šimunić & Basch (1975.). U tektonskom smislu pripada strukturnoj jedinici Zagrebačka depresija, koja je dio tektonske jedinice Savske potoline odnosno Savskog tercijarnog bazena.

Zagrebački vodonosni sustav sastoji se od dva vodonosna sloja: prvi vodonosni sloj s dominantno aluvijalnim naslagama rijeke Save i drugi vodonosni sloj s dominantno jezersko – barskim naslagama (Nakić et al., 2013.). Ova podjela je stratigrafska s obzirom da su vodonosnici hidraulički povezani i čine jedinstveni vodonosnik s hidrogeološkog stajališta. Na Slici 3.2 prikazani su litološki stupovi istraživanog područja iz kojih je vidljivo da holocenske aluvijalne sedimente uglavnom čine šljunci i pijesci, a debljina šljunkovito – pjeskovitog vodonosnog sloja u prosjeku iznosi oko 9 metara

Površinski slabopropusni sloj je neujednačene debljine i na mjestima nije prisutan. Neposredno uz korito Save nalaze se šljunkovite naslage dok se udaljavanjem od korita rijeke Save primjetno povećava udio pjeskovite komponente. Slabopropusna podina se u prosjeku nalazi na oko 111 m n.m. Prema osnovnoj geološkoj karti M 1:100000, list Zagreb, potencijalno vodocrpilište (položaj zdenaca) smješteno je na sedimentima prve savske terase ( $a_1$ ) (Slika 3.3) u čijem litološkom sastavu prevladava krupnozrnasti šljunak pomiješan s pijeskom. Bazu aluvijalnih naslaga izgrađuju utonuli sedimenti pleistocena i mlađeg pliocena. Sve bušotine čiji su podaci korišteni prilikom izrade ovog rada, nalaze se unutar područja prve savske terase (Pavić, 2016.). Cijelo promatrano područje se nalazi još na dvije jedinice: na aluvijalnom nanosu recentnog toka Save ( $a$ ) i aluvijalnom nanosu druge savske terase ( $a_2$ ).

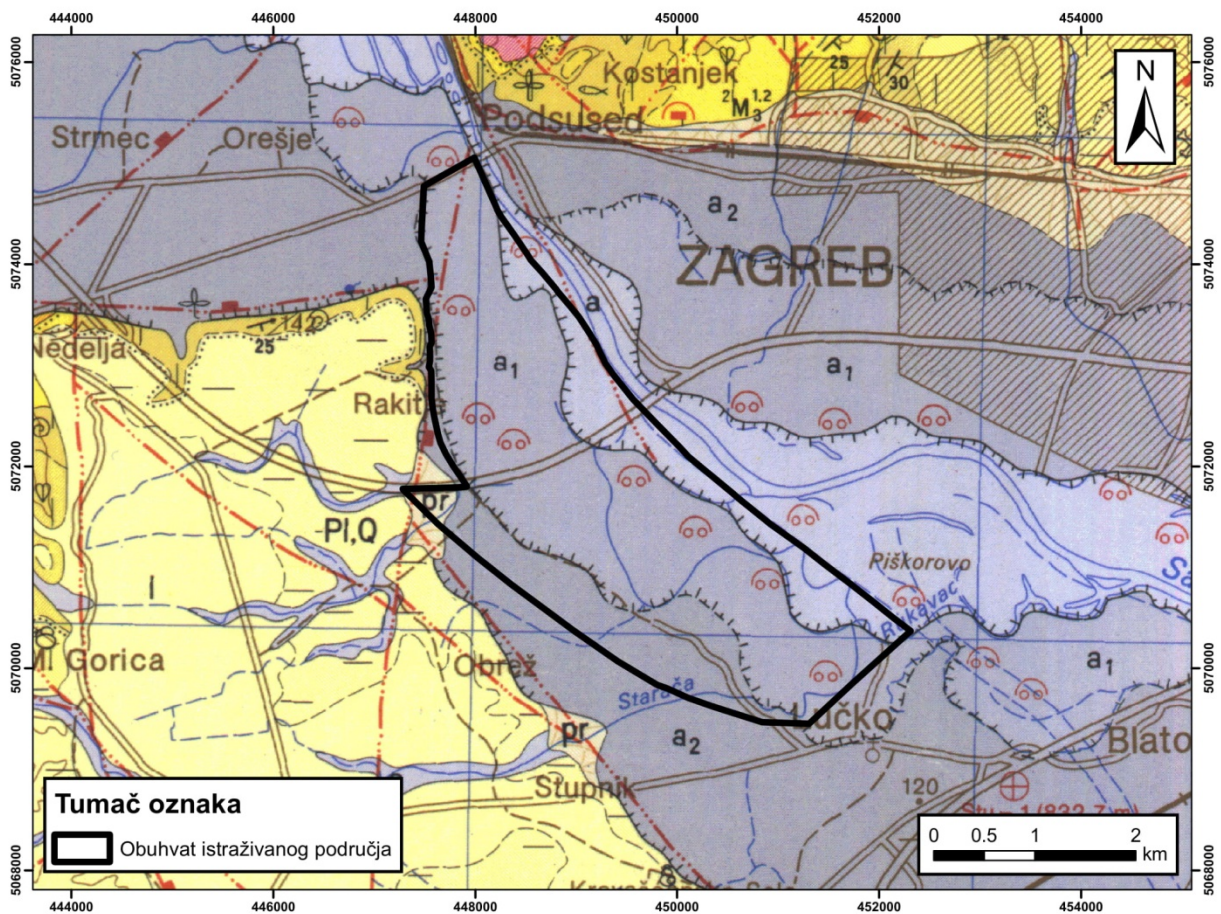
Pod aluvijalni nanos recentnog toka Save spadaju sedimenti na području neposredno uz Savu, koju ona plavi za vrijeme visokih vodostaja i poplava. Prevladava krupnozrnasti pijesak, sa slabije zastupljenim šljunkom. Sadrži u gornjim dijelovima i mnogo ugljenog trunja, nanešenog rijekom Savom s područja slovenskih ugljenokopa.



**Slika 3.2** Litološki stupovi na istraživanom području (Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske, 1999.)



Druga savska terasa je nastala usijecanjem Save u aluvijalne sedimente, koje je prije nanijela. Razvijena je uz manje prekide duž cijelog toka rijeke Save. Sastoji se od izmjene krupnozrnastih šljunaka i pijesaka. Količina pijeska u odnosu na šljunak povećava se od sjeverozapada prema jugoistoku, tj. u smjeru toka Save. U tom smjeru opada i promjer valutica i veličina zrna pijeska. Debljina naslaga druge savske terase je dosta promijenjiva. Zbog dobre kvalitete šljunka i pijeska, ove terase se eksploatiraju na više mjesta (okolica Zagreba, Krško polje...).



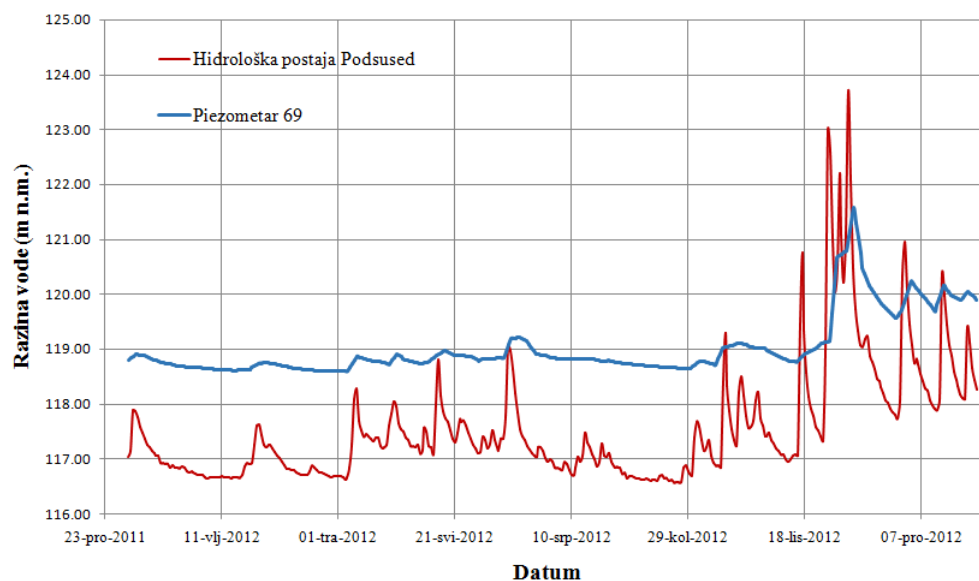
**Slika 3.3** Isječak OGK List Zagreb, M 1:100.000 (Šikić i dr., 1978.)

*tumač oznaka: a - aluvij: šljunci, pijesci i gline; a1 - najniža terasa: šljunci, pijesci, podređeno gline; a2 - srednja terasa: šljunci i pijesci; pr - proluvij: šljunci, pijesci i gline; l - kopneni beskarbonatni les: glinoviti silt; Pl,Q - šljunci, pijesci i gline (pleistocen); <sup>2</sup>M<sup>3,2</sup> - vapnoviti lapori, podređeno pijesci, pješčenjaci, šljunci i konglomerati (gornji panon)*

### 3.2. Hidrogeologija te utvrđivanje hidrauličke veze Save i podzemnih voda

Područje planiranog vodocrpilišta nalazi se s desne obale rijeke Save i pripada zapadnom dijelu zagrebačkog vodonosnika. Radi se o otvorenom vodonosniku, što znači da je vodna ploha pod atmosferskim tlakom, koji je zbog relativno visokih vrijednosti hidrauličkih vodljivosti u direktnoj hidrauličkoj vezi sa Savom. Regionalni smjer toka podzemne vode je od sjeverozapada prema jugoistoku, uglavnom paralelan rijeci Savi. Lokalni smjerovi toka podzemne vode u značajnoj mjeri ovise o vodostajima rijeke Save koja ima dominantan utjecaj na promjene razina podzemne vode (Bačani & Posavec, 2014.).

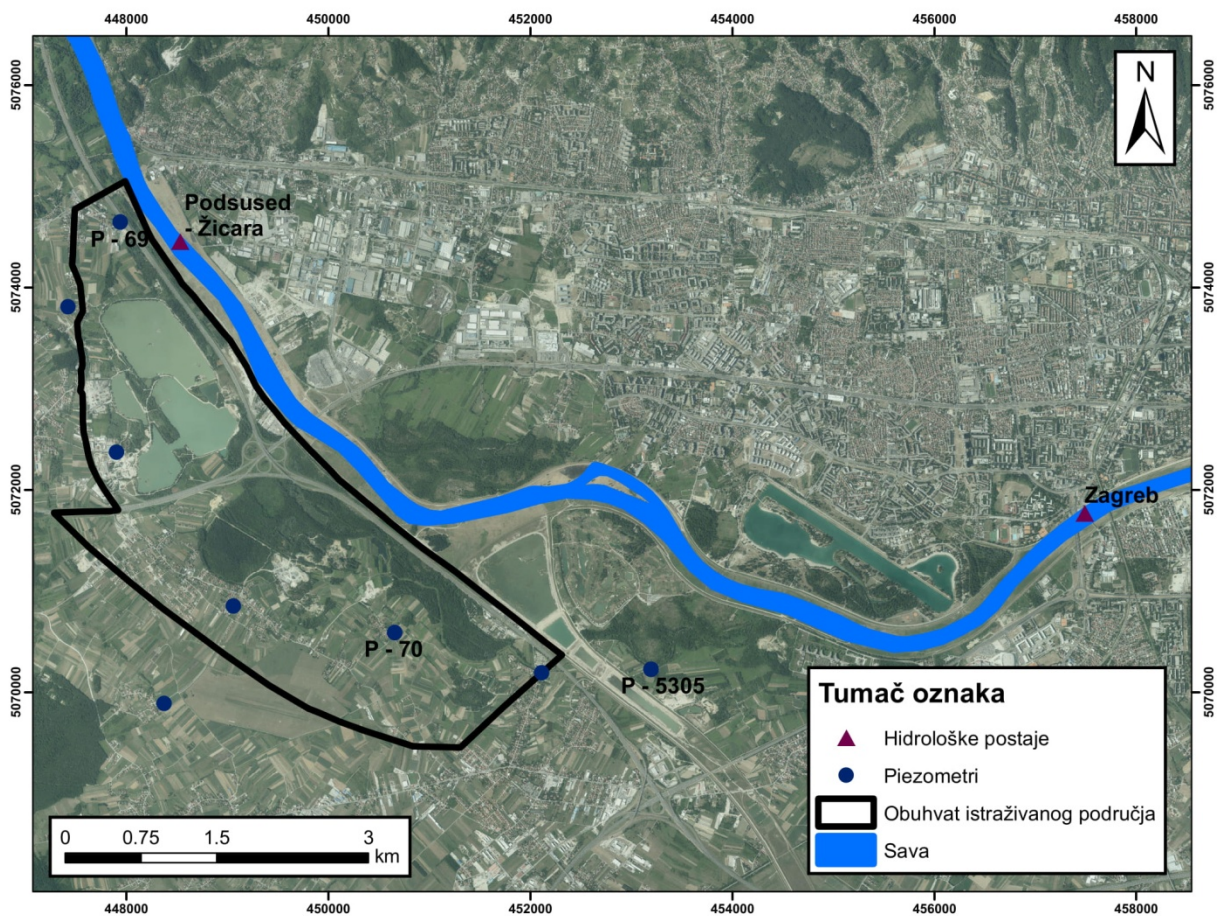
Sava ovisno o vodostaju prihranjuje ili drenira vodonosnik (Posavec, 2006.). Na Slici 3.4 prikazan je vremenski niz vodostaja Save mjenjenog na hidrološkoj stanici Podsused i vremenski niz razina podzemne vode mjerene u piezometru oznake 69, a koji se nalazi na istraživanom području. Kada je vodostaj Save viši od razine podzemne vode (razdoblje visokih voda) Sava prihranjuje vodonosnik (za promatranu situaciju od sredine listopada do sredine studenog). U slučaju kada je vodostaj niži od razine podzemne vode Sava drenira vodonosnik, što je slučaj u ostatku godine (izuzev par kratkih intervala prihranjivanja). Općenito zagrebački vodonosnik omeđen je nepropusnim granicama na sjeveru i jugu, te dotjecanjem sa zapadne i otjecanjem s istočne strane. Na području planiranog vodocrpilišta, Sava na sjeveroistočnoj strani predstavlja granicu stalnog potencijala, dok s jugozapadne strane Vukomeričke Gorice predstavljaju nepropusnu granicu. Na sjeverozapadnom rubu dolazi do dotjecanja iz samoborsko - zaprešičkog vodonosnika, dok na jugoistočnom dolazi do otjecanja iz istraživanog sustava.



Slika 3.4 Usporedba vodostaja Save i razine podzemne vode u piezometru P - 69



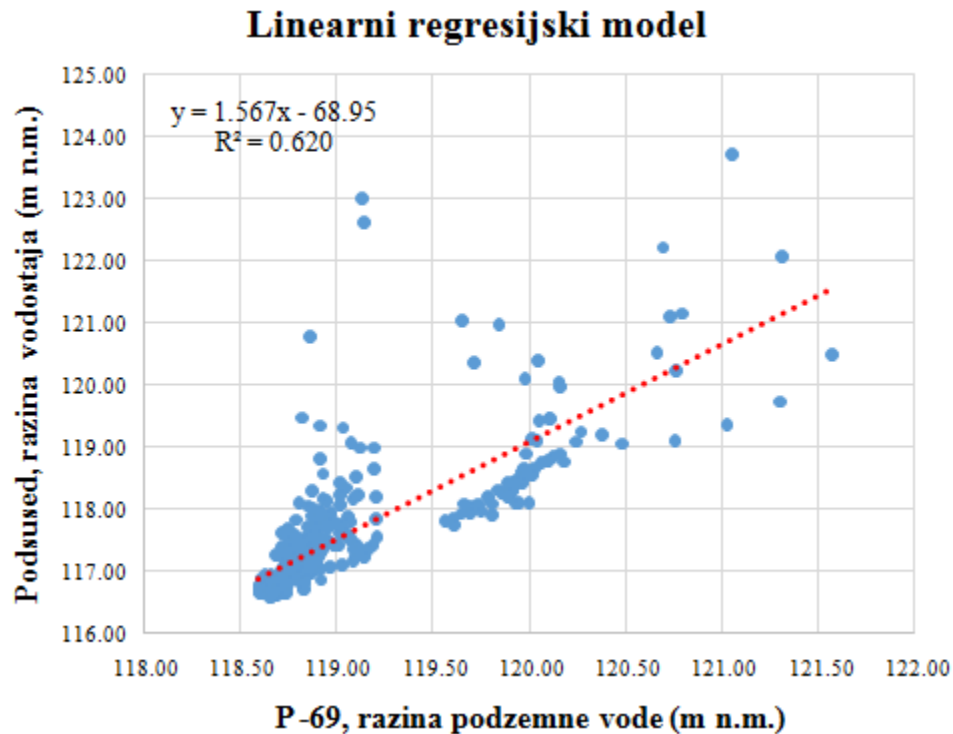
Hidraulička veza Save i vodonosnika opisana je pomoću statističkih metoda korelacije, regresije i kros-korelacije. Na slici 3.5 prikazani se uspoređivani piezometri (P - 69, P - 70 i P - 5305) i hidrološke stanice (Podsused - Žičara i Zagreb).



**Slika 3.5** Prikaz situacije za određivanje hidrauličke veze Save i podzemnih voda

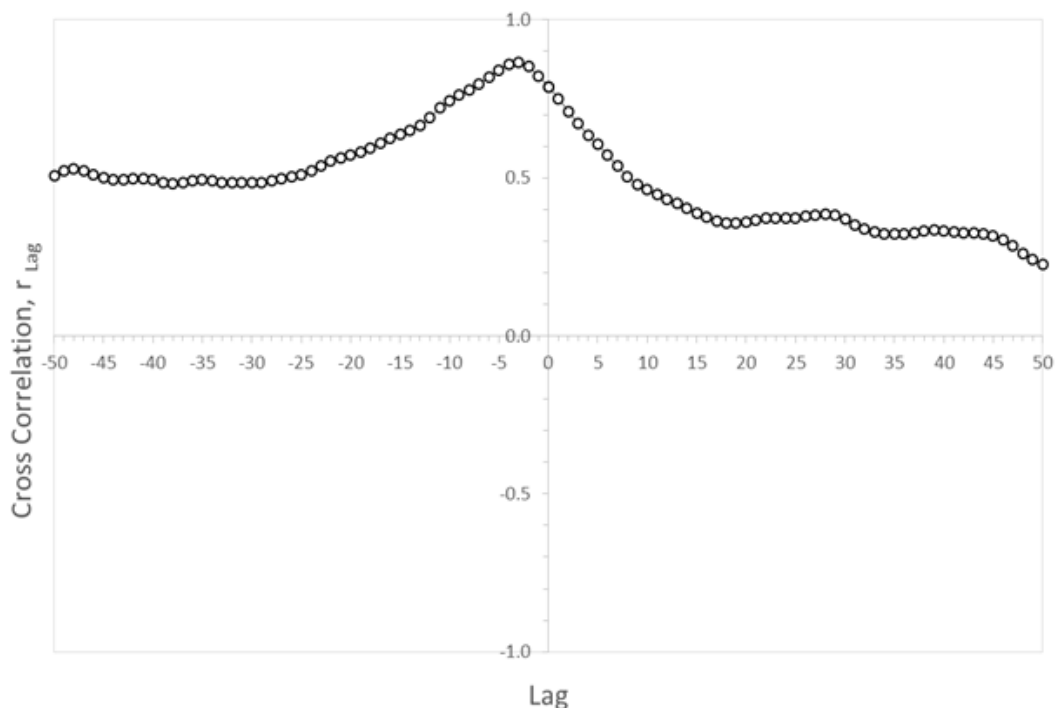
Korelacija odnosno s njome povezani koeficijent korelacije  $r$ , mjeri jačinu odnosa između dviju varijabli i izražava njihov linearni odnos. Koeficijent korelacije ima raspon od  $+1$  do  $-1$ , gdje je pozitivna korelacija za iznose  $r$  bliskima  $+1$ , a negativna korelacija za iznose  $r$  bliskima  $-1$ . Ako je korelacija vrlo slaba ili ako je nema, vrijednosti  $r$  bliske su nuli. (Posavec & Škudar, 2016.). Općenito, koeficijenti korelacije veći od  $0,8$  ukazuju na jaku korelaciju dok koeficijenti korelacije manji od  $0,5$  ukazuju na slabu korelaciju. Prosječna vrijednost koeficijenta korelacije za promatrane slučajeve iznosi  $0,66$ , a pojedinačni rezultati prikazani su u Tablici 3.1. Analiza regresije izračunava liniju ovisnosti između proučavanih varijabli odnosno u našem slučaju razine podzemne vode u piezometrima i vodostaja na hidrološkim stanicama. Linearni regresijski model vremenskih nizova za piezometar P - 69 i hidrološku stanicu Podsused - Žičara prikazan je na Slici 3.6. Koeficijent determinacije  $R^2$

predstavlja mjeru koja nam omogućujemo da odredimo koliko dobro podešana linija tj. regresijski model reprezentira mjerene podatke. Vrijednost koeficijenta determinacije daje postotak mjerenih podataka koji su najbliže podešenoj liniji tj. regresijskom modelu (Posavec & Škudar, 2016.). Općenito, vrijednosti  $R^2$  bliski 1 znači da linija dobro reprezentira mjerene vrijednosti, a u slučaju da linija loše reprezentira mjerene vrijednosti vrijednosti  $R^2$  biti će bliski nuli.



**Slika 3.6** Linearni regresijski model piezometra P - 69 i hidrološke postaje Podused

Kros-korelacija definira mjeru sličnosti dviju varijabli odnosno dvaju niza podataka tj. stupanj do kojeg se dva niza koreliraju s obzirom na zaostajanje jedne varijable u odnosu na drugu. Proces njihove usporedbe za svako uzastopno zaostajanje naziva se kros-korelacija. (Davis, 2002.). U kros-korelacijskoj analizi, mjerenja vremenskih nizova trebaju međusobno odgovarati, tj. biti mjerena u isto vrijeme. Mjerenja razine podzemne vode obavljaju se svaka tri dana, a mjerenja vodostaja svakog dana tako da su podaci o razinama podzemne vode za dane na koje su mjerenja nedostajala dobiveni linearnom interpolacijom. S obzirom na male oscilacije i relativno spore promjene u razinama podzemne vode te vremenski raspon u kojima se nisu obavljala mjerenja razine podzemne vode od svega par dana, ovakva interpolacija je bila opravdana. Rezultati analize ukazuju na vremensko zaostajanje od 3 do 13 dana (Tablica 3.1), a primjer kros-korelograma razina podzemne vode u piezometru P-69 i vodostaja na hidrološkoj postaji Podused prikazan je na Slici 3.7.



**Slika 3.7** Kros-korelogram razina podzemne vode u piezometru P - 69 i vodostaja na hidrološkoj postaji Podsused

Sistematizirani podaci korelacije, regresije i kros-korelacije prikazani su u Tablici 3.1. Na temelju tih rezultata zaključujemo da su Sava i zagrebački vodonosnik u dobroj hidrauličkoj vezi. Sva tri parametra u svim promatranim slučajevima imaju isti trend koji ovisi o udaljenosti dviju promatranih postaja. Najveće vrijednosti koeficijenta korelacije i koeficijenta determinacije (odnosno najmanje vremensko zaostajanje) su određene za slučaj P-69 i Podsused, što je i za očekivati zbog neposredne blizine dviju stanica.

**Tablica 3.1** Sistematizirani podaci statističkih analiza

	<b>Koeficijent korelacije R</b>	<b>Koeficijent determinacije R<sup>2</sup></b>	<b>Vremensko zaostajanje (dana)</b>
<b>P-69 i Podsused</b>	0,788	0,620	0,864 (3)
<b>P-70 i Podsused</b>	0,591	0,350	0,733 (13)
<b>P-70 i Zagreb</b>	0,584	0,341	0,723 (13)
<b>P-5305 i Zagreb</b>	0,678	0,460	0,764 (6)
<b>Prosječne vrijednosti</b>	0,660	0,443	0,771 (8,5)

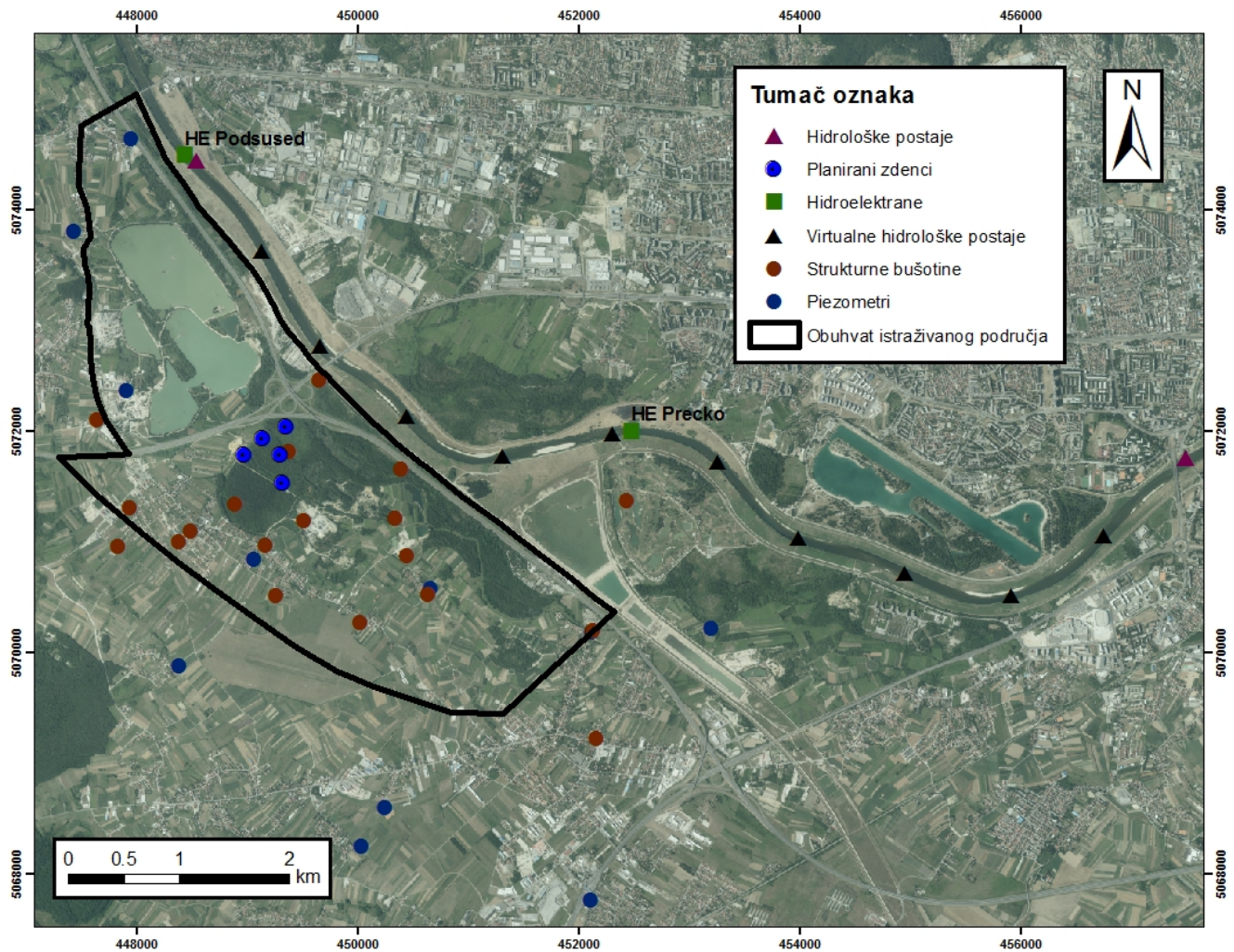
### 3.3. Planirano stanje i dosadašnji radovi

U prostornom planu je definirano vodozaštitno područje - II. zona zaštite unutar kojeg je razmatrano planirano vodocrpilište Ježdovec (Slika 3.8). Hidrološke postaje Podsused i desetak kilometara nizvodna Zagreb mjere vodostaj rijeke Save na istraživanom području. U svrhu ovog rada analizirani su dnevni vodostaji za 2012. godinu. Osim hidroloških postaja postoji 11 piezometara i 19 strukturnih bušotina. Piezometri su raspoređeni i na širem području, a na temelju podataka o razinama podzemne vode (također za razdoblje 2012. godine) izrađene su karte ekvipotencijala za visoke, srednje i niske vode. Iz strukturnih bušotina dobiveni su litološki podaci na temelju kojih je izrađena karta izostrata podine te se naposljetku definirane zone saturiranosti koje predstavljaju jedan od glavnih parametara pri određivanju lokacije zdenaca. Strukturne bušotine su raspoređene relativno gusto, ali samo u južnom dijelu istraživanog područja. Naime, na sjevernom dijelu istraživanog područja nema informacija o litologiji. Planirani zdeneci nalaze se u spomenutoj Ježdovečkoj šumi kako je prikazano na Slici 3.8., dok su koordinate planiranih objekata prikazane u Tablici 3.2. Prema Pavić (2016.) maksimalni kapacitet vodocrpilišta iznosio bi 200 l/s odnosno svaki od 5 zdenaca crpio bi kapacitetom od 40 l/s, a zdeneci su udaljeni od korita Save između 800 i 1200 m. U blizini istraživanog područja planirane su i dvije hidroelektrane (WBIF IPF3, 2018.), čije postojanje ima značajan utjecaj na razine podzemne vode i hidrogeološko stanje sustava u sustavi vodoopskrbe. Hidroelektrana Podsused nalazi se u neposrednoj blizini hidrološke postaje Podsused, odnosno na sjeveru istraživanog područja dok se hidroelektrana Prečko nalazi oko 5,5 kilometara nizvodno, nedaleko od jezera Jarun.

**Tablica 3.2** Koordinate planiranih zdenaca i hidroelektrana

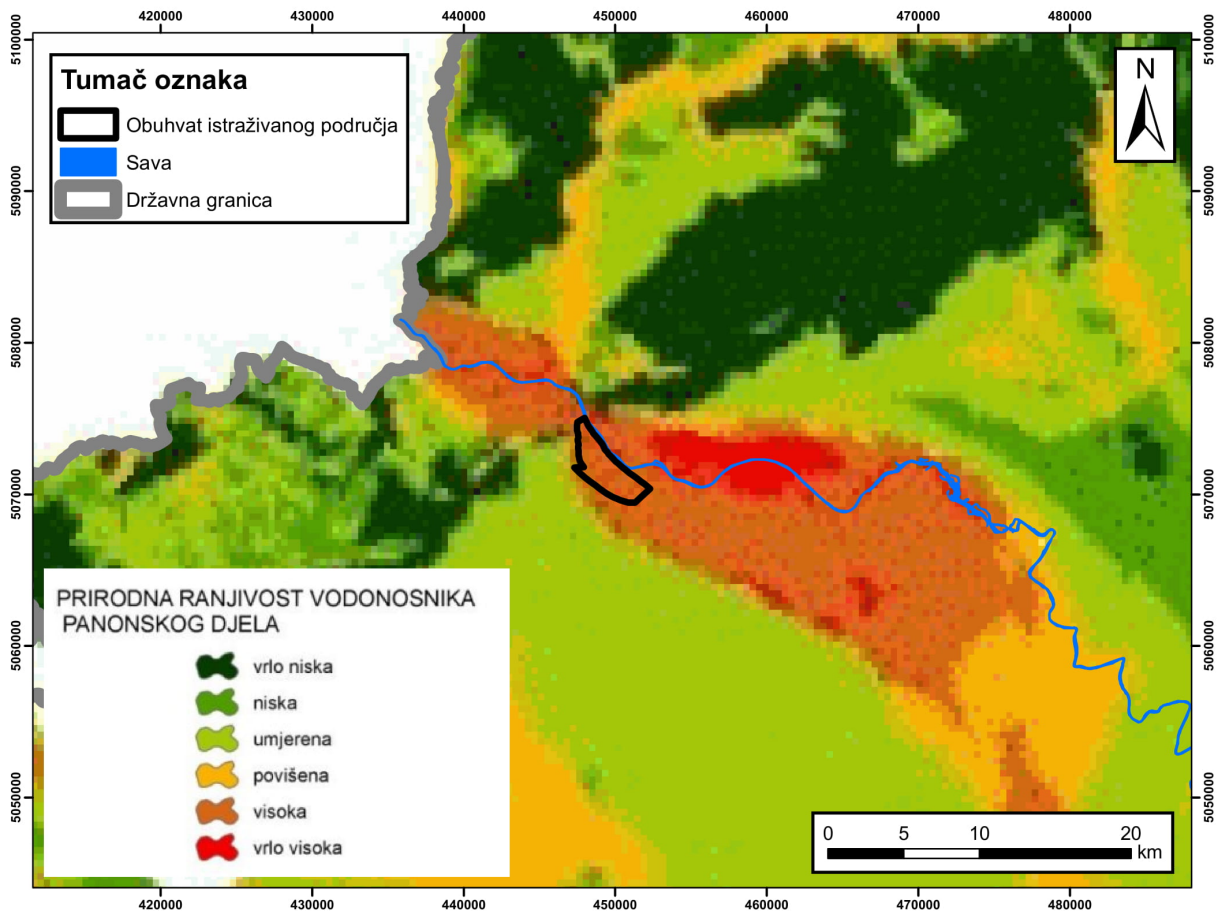
<b>Objekt</b>	<b>X koordinata</b>	<b>Y koordinata</b>
<b>Zdenac Z1</b>	448967,38	5071791,20
<b>Zdenac Z2</b>	449314,23	5071545,53
<b>Zdenac Z3</b>	449293,51	5071794,12
<b>Zdenac Z4</b>	449141,20	5071940,83
<b>Zdenac Z5</b>	449347,06	5072044,81
<b>HE Prečko</b>	452476	5072010
<b>HE Podsused</b>	448432	5074506





**Slika 3.8** Situacija na istraživanom području

Analiza prirodne ranjivosti provedena je SINTACS metodom koja pripada u “point count” model (HGI, 2009.). Veličina elemenata prostorne mreže iznosi 500 m, a definirani tematski slojevi su slijedeći: dubina do podzemne vode, efektivna infiltracija, utjecaj nesaturirane zone, značajke tla, značajke vodonosnika, hidraulička vodljivost vodonosnika i nagib topografske površine. Nakon što je vrijednost svakog parametra pomnožena s definiranim težinskim faktorom izvršena je normalizacija i kategorizacija. Na taj način cjelokupno područje istraživanja podijeljeno je u šest kategorija od vrlo nisko do vrlo visoke ranjivosti kako je prikazano na Slici 3.9. Zbog karakteristika zagrebačkog vodonosnika promatrano područje uglavnom je kategorizirano u kategoriju visoka ranjivost vodonosnika. Nedostatak ove metode je da susjedni elementi prostorne mreže pripadaju različitim kategorijama ranjivosti iako su male razlike u vrijednostima indeksa ranjivosti. Detaljnija kategorizacija ili korištenje mreže veće gustoće (krupnije mjerilo) bi rezultiralo pouzdanijim informacijama o razini ranjivosti.

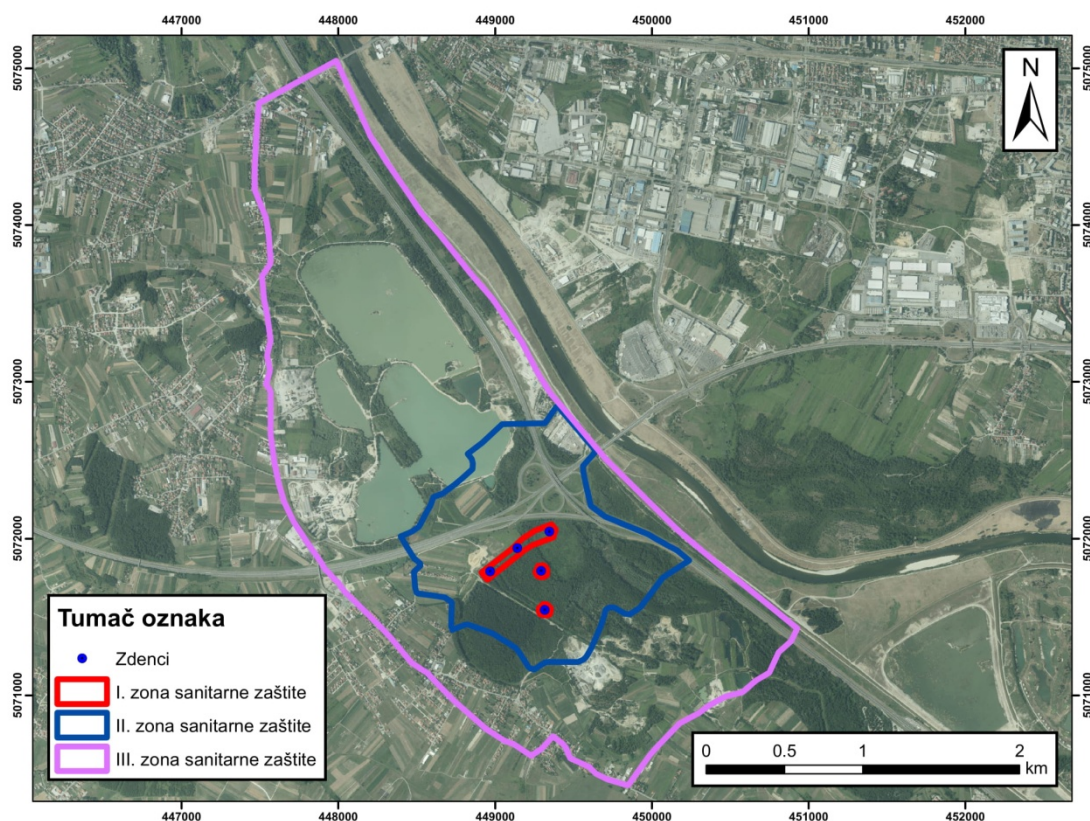


**Slika 3.9** Prirodna ranjivost vodonosnika (prema HGI, 2009.)

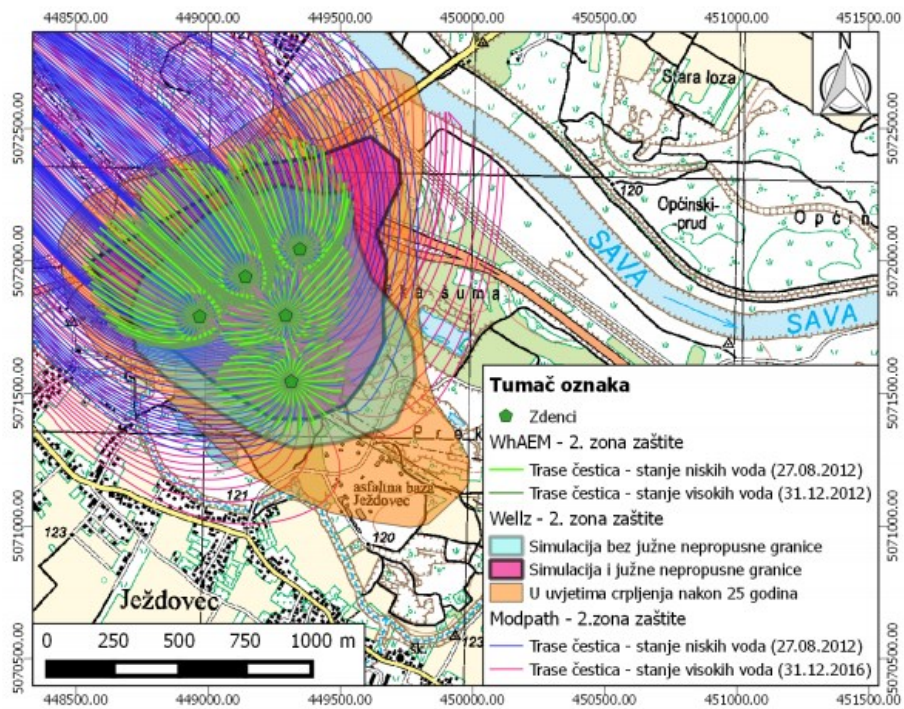
Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta propisuje uvjete za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta koja se koriste za javnu vodoopskrbu te mjere i ograničenja koja se u njima provode. U diplomskom radu (Pavić, 2016.) određene su sanitarne zone zaštite sukladno spomenutom pravilniku (NN br. 66/11, 47/13). Zone su određene primjenom tri različite metode: numerička metoda konačnih diferencija, analitička metoda analitičkih elemenata te direktnom primjenom Darcy-jevog zakona. Za sve tri metode su opisani matematički i računalni modeli te su definirane osnovne postavke modela istraživanog područja. Tok podzemne vode vode simuliran je za periode u trajanju od 50, 365 i 9125 dana, uzimajući u obzir stanje niskih i visokih voda. Za simulacije trasiranja čestica numeričkom metodom korišten je računalni program Modpath (Pollock, 1989.), a za simulacije trasiranja čestica analitičkom metodom programi Whaem2000 i Wellz. Rezultati modela toka podzemne vode, odnosno modela trasiranja čestica, za stanje visokih i niskih voda, korišteni su za procjenu druge i treće zaštitne zone vodocrpilišta. Rezultati simuliranih trasa prikazani su na Slikama



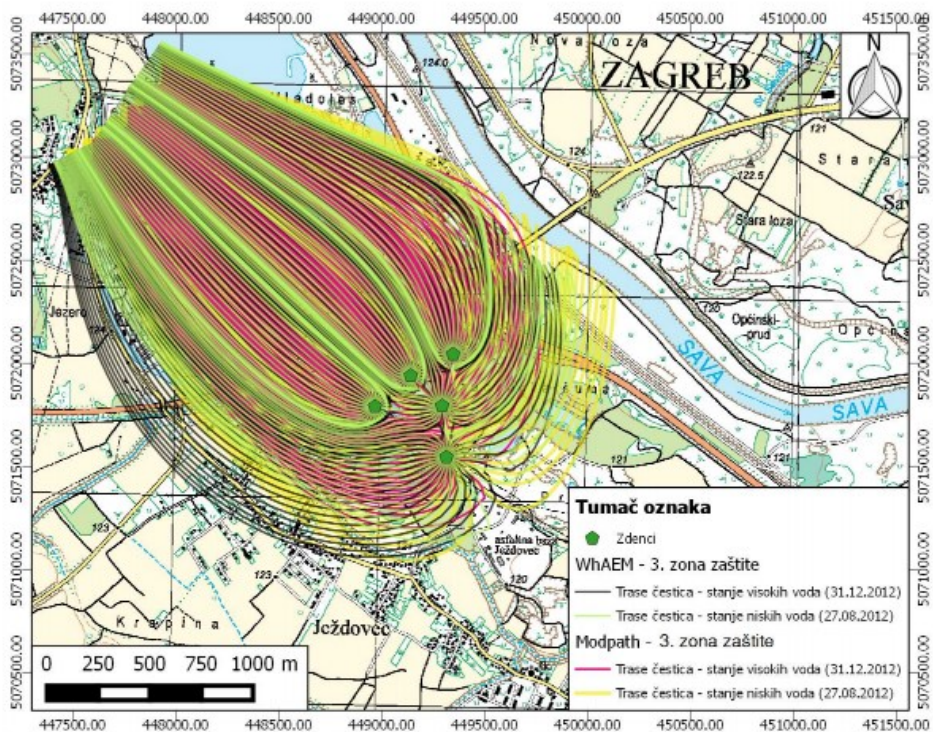
3.11 i 3.12. Grafički prikaz prijedloga granica zona vodocrpilišta Ježdovec prikazan je na Slici 3.10. Zone sanitarne zaštite predložene su u skladu s Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011). I. zona sanitarne zaštite uključuje fizičku barijeru male udaljenosti (10 metara) od lokacije samog zdenca, a utvrđuje se radi zaštite izvorišta, vodozahvatnih građevina i njihove neposredne okolice od bilo kakvog oštećenja, onečišćenja vode te drugih slučajnih ili namjernih štetnih utjecaja. II. zona sanitarne zaštite određena je udaljenošću od koje podzemna voda ima minimalno vrijeme zadržavanja u podzemlju od 50 dana prije ulaska u vodozahvatnu građevinu, a predložena je granicom otprilike 1,5 km od zdenaca. Ova zona određuje se ukoliko je vertikalni tok vode manji od 50 dana trajanja prije ulaska u vodozahvatnu građevinu, a u svrhu smanjenja rizika od onečišćenja podzemnih voda patogenim mikroorganizmima i drugih štetnih utjecaja koji se mogu pojaviti tijekom zadržavanja vode u podzemlju. III. zona sanitarne zaštite proteže se duljine 4,5 km u smjeru sjeverozapad - jugoistok, širine okvirno 2 km ili manje. S obzirom na lokaciju zdenaca zona je asimetrična, naime zbog smjera iz kojeg voda dotječe (sjeverozapad) zona je izdužena odnosno obuhvaća veće područje iz tog smjera. Ova zona utvrđuje se osobito radi smanjena rizika onečišćenja podzemne vode od teško razgradivih opasnih i onečišćujućih tvari.



**Slika 3.10** Prijedlog zona sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec (prema Pavić 2016.)



Slika 3.11 Simulirane trase za period trajanja 50 dana (Pavić, 2016.)



Slika 3.12 Simulirane trase za period trajanja 25 godina (Pavić, 2016.)



## 4. METODOLOGIJA

### 4.1. Numeričke metode u rješavanju modela toka

Prognozni numerički model toka podzemne vode korišten je kao osnova za dobivanje prognoznih stanja podzemnih voda. Postupak se provodi u više koraka: postavljanje konceptualnog modela, definiranje matematičkog modela i rješavanje matematičkog modela numeričkom metodom. Od numeričkih metoda se najčešće koriste metoda konačnih diferencija (MKD), metoda konačnih elemenata (MKE) i metoda graničnih elemenata (MGE). Razlikuju se po načinu diskretizacije prostora i načinu sastavljanja algebarskih jednadžbi kojima se zamjenjuju parcijalne diferencijalne jednadžbe. Diskretizacija područja, odnosno domene toka, dijeli se u niz diskretnih (konačnih) elemenata. Ako se koristi MKD metoda mreža je ortogonalna, a u slučaju MKE metoda mreža je poligonalna. Time se omogućava definiranje različitih heterogenosti u sustavu.

Primjena metode konačnih diferencija (MKD) uključuje podjelu domene na niz ćelija pravokutnih oblika. Time se kontinuirano polje diskretizira na skup diskretnih elemenata koji daju 'n' čvorova, za koje se postavlja 'n' diferencijalnih jednadžbi toka koje se zatim provode u 'n' algebarskih jednadžbi za rješavanje 'n' nepoznatih potencijala. Rješenja je beskonačno, tek postavljanjem početnih i rubnih uvjeta dobivamo približna rješenja, odnosno raspodjele potencijala kao funkcije prostornih i vremenskih koordinata (Bačani & Posavec 2011.).

Granični uvjeti definirani su hidrauličkim uvjetima na granicama modela. S obzirom na matematički opis događaja na granici postoje tri tipa granica odnosno graničnih uvjeta: 1. tip (Dirichlet), 2. tip (Neuman) i 3. tip (Cauchy) (Bačani & Posavec, 2011.). U svim točkama Dirichletove granice poznata je vrijednost funkcije (raspodjela potencijala, piezometarskih visina). Tim tipom granice opisuje se kontakt vodonosnog sloja s površinskom vodom: rijekom ili jezerom. Neumanova granica definira raspodjelu normalne derivacije na granicu, što znači derivacija funkcije okomito na granicu. Na taj se način opisuje granica s drugom propusnom sredinom, a isto tako i nepropusna granica. Cauchyjeva granica je kombinirani tip granice gdje je u svim točkama granice poznat vrijednost potencijala i protoka okomito na granicu. Tim tipom granice se opisuje primjerice granica s vodotokom čije dno korita ne dopire do podine vodonosnika.

## 4.2. Matematički i računalni model

Trodimenzionalno gibanje podzemne vode konstantne gustoće kroz porozni medij može se opisati parcijalnom diferencijalnom jednačbom (4.1.) :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right) - W = S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1)$$

gdje su:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  i  $K_{zz}$  vrijednosti hidrauličke vodljivosti u smjeru  $x$ ,  $y$  i  $z$  koordinatnih osi za koje se pretpostavlja da su paralelne s glavnim osima hidrauličke vodljivosti [ $LT^{-1}$ ];

$h$  je piezometarska razina [ $L$ ];

$W$  je volumetrijski fluks po jediničnom volumenu i predstavlja izvor/ponor vode [ $T^{-1}$ ];

$S_s$  je specifično uskladištenje vodonosnika [ $L^{-1}$ ]; i

$t$  je vrijeme [ $T$ ].

Generalno,  $S_s$ ,  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  i  $K_{zz}$  mogu biti funkcije prostora ( $S_s = S_s(x, y, z)$ ,  $K_{xx} = K_{xx}(x, y, z)$ , itd.), a  $W$  može biti funkcija prostora i vremena ( $W = W(x, y, z, t)$ ). Jednačba (4.1) opisuje gibanje podzemne vode u neravnotežnim uvjetima u heterogenoj i anizotropnoj poroznoj sredini, pri pretpostavci da su glavne osi hidrauličke vodljivosti paralelne s osi koordinatnog sustava. Jednačba (4.1), zajedno s početnom raspodjelom razine podzemne vode (početni uvjet) te definiranim dotjecanjima/otjecanjima i/ili potencijalom na granicama vodonosnika (granični uvjeti) čini matematički model gibanja vode u vodonosniku. Primjenom metode konačnih diferencija kontinuirani sustav opisan prethodnom jednačbom zamjenjuje se konačnim setom diskretnih točaka u prostoru i vremenu, a parcijalne derivacije se zamjenjuju s konačnim diferencijama (terminima računatim iz razlika vrijednosti piezometarske razine u tim točkama). Taj proces vodi do sustava linearnih algebarskih jednačbi, a rješenje tog sustava daje vrijednosti piezometarske razine u određenim točkama i vremenima. Te vrijednosti predstavljaju približne vrijednosti raspodjele razina podzemne vode u odnosu na vrijednost kakve bi bile dobivene analitičkim rješenjem parcijalne diferencijalne jednačbe toka podzemne vode (Bačani & Posavec, 2014.).

## Računalni model

Za simulacije toka podzemne vode korišten je program Modflow (McDonald & Harbaugh, 1988) koji je danas široko rasprostranjen za potrebe simulacije toka podzemne vode. Program Modflow sastavni je dio računalnog programa Visual Modflow, a koji predstavlja grafičko sučelje uz pomoć kojeg se vrši unos ulaznih podataka, provođenje simulacija te prikaz i statistička obrada rezultata simulacija (Bačani & Posavec, 2014.).

### 4.3. Prirodna ranjivost modificirane SINTACS metode

Metode procjene ranjivosti su uobičajeni alat za određivanje mjera za zaštitu podzemnih voda, a ranjivost označava vjerojatnost pojave onečišćenja i potrebno ju je odrediti na temelju podataka koje je moguće izmjeriti. Ovisno o tome uzima li se u određenim hidrološkim uvjetima u obzir određena vrsta onečišćujućih tvari ili ne, razlikuju se prirodna i specifična ranjivost vodonosnika. Prirodna ranjivost uključuje geološke, pedološke i hidrološke uvjete promatranog područja. Za razliku od toga, specifična ranjivost vodonosnika uključuje i obilježja onečišćujućih tvari, njihov transport kroz različite dijelove hidrogeološkog sustava te različite scenarije onečišćenja. (Nakić, 2015.). U ovom radu na području istraživanog područja korištena je modificirana SINTACS metoda. Naime, uz definirane parametre za navedenu metodu nadodan je i dodatni parametar, namjena zemljišta.

SINTACS metoda pripada u parametarske metode, koje se danas u svijetu najčešće primjenjuju. Osnovna karakteristika im je definiranje promatranih parametara, zbrajanje istih i naknadna klasifikacija na stupnjeve ranjivosti. Prema stupnju složenosti (Vrba & Zaporozec (eds), 1994.) parametarske metode dijele se u tri skupine: matrični sustavi, "rating" sustavi te "point cloud" sustavi - kojem pripada SINTACS metoda. U "point cloud" sustavu svaki od parametara ima propisani raspon vrijednosti, a sukladno vrijednosti dodijeljuju se bodovi. Dodijeljeni bodovi množe se odabranim težinskim faktorima pomoću kojih određenim parametrima pojačavamo utjecaj u konačnoj klasifikaciji, a nekima smanjujemo. Najveći izazov razvoje ove skupine metoda predstavlja podjela konačnog numeričkog zbroja u pojedinačne kategorije ranjivosti vodonosnika (Mageira, 2000.).

SINTACS metoda razvijena je na temelju DRASTIC metode u Italiji 90-ih godina. Svrha ove metoda bila je dobiti model za procjenu ranjivosti koji bi bio primjenjiv na sva područja, neovisno o tipu vodonosnika. Metoda se temelji na vrednovanju sedam parametara i na sustavu pet težinskih koeficijenata. Svakom parametru pripisuje se vrijednost od 1 do 10, gdje veći iznos označava veću

ranjivost. Vrijednosti se pripisuju na temelju definiranih dijagrama, tablica i raspona. 7 parametara koji određuju ovu metodu su dubina do podzemne vode (S1), efektivna infiltracija (I), kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni (N), kapacitet tla ili pokrovnih naslaga (T), hidrogeološka obilježja vodonosnika (A), raspon hidrauličke vodljivosti (C) i hidrološka uloga nagiba terena (S2) (Nakić, 2015.). Nakon procjene pojedinog parametra određuju se i pripadajući težinski koeficijenti. Metoda predviđa pet različitih sustava za različite scenarije: normalni uvjeti, veliko opterećenje, procjeđivanje, krš i raspucale stijene. Ocjena ranjivosti izračunava se prema izrazu:

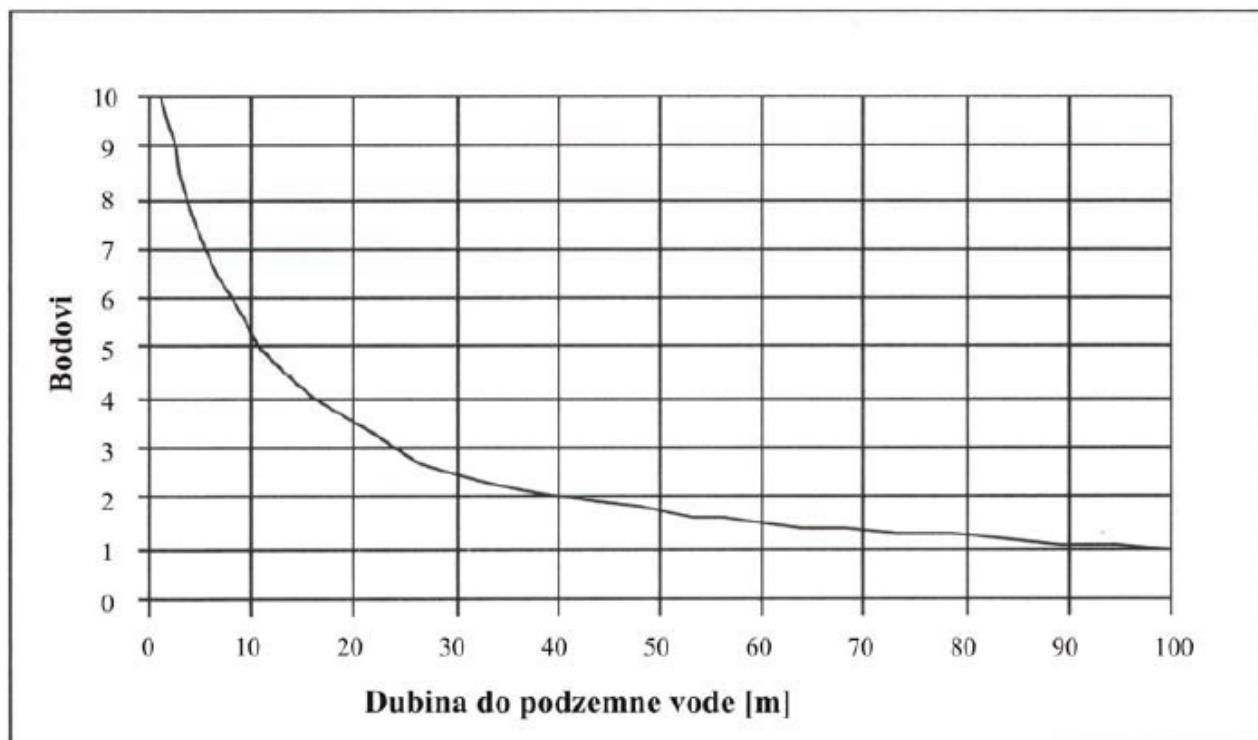
$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i \times W_i \quad (4.2)$$

Gdje  $P_i$  predstavlja bodove parametra, a  $W_i$  težinski faktor. Obzirom na vrijednost ocjene ranjivosti, postoji 6 klasa kako je prikazano na Slici 4.1 od kojih svaka ima svoju boju za kartografski prikaz: vrlo niska, niska, srednja, velika, vrlo velika i ekstremna klasa ranjivosti.

<b>I<sub>SINTACS</sub></b>	<b>Klasa ranjivosti</b>
26 - 80	Vrlo niska
>80 - 105	Niska
>105 - 140	Srednja
>140 - 186	Velika
>186 - 210	Vrlo velika
>210 - 260	Ekstremna

**Slika 4.1** Klase ranjivosti SINTACS metode (Loborec, 2013.)

Dubina do podzene vode (S1) definira se kao dubina piezometarske razine koja, zajedno sa značajkama nezasićene zone, određuje vrijeme procjeđivanja onečišćenog fluida te trajanja procesa razrjeđivanja uslijed pojave sorpcije (Nakić, 2015). Već nakon dubine od 10 metara, bodovi dolaze do vrijednosti 5 i niže, da bi se zatim sporim trendom smanjivali do maksimalne predviđene dubine od 100 metara, odnosno 1 boda. Sukladno tome zaključujemo, a kako je i vidljivo na Slici 4.2 da svaki metar dubine u rasponu od 0 do 10 čini veliku razliku u dodjeljivanju bodova za ovaj parametar.

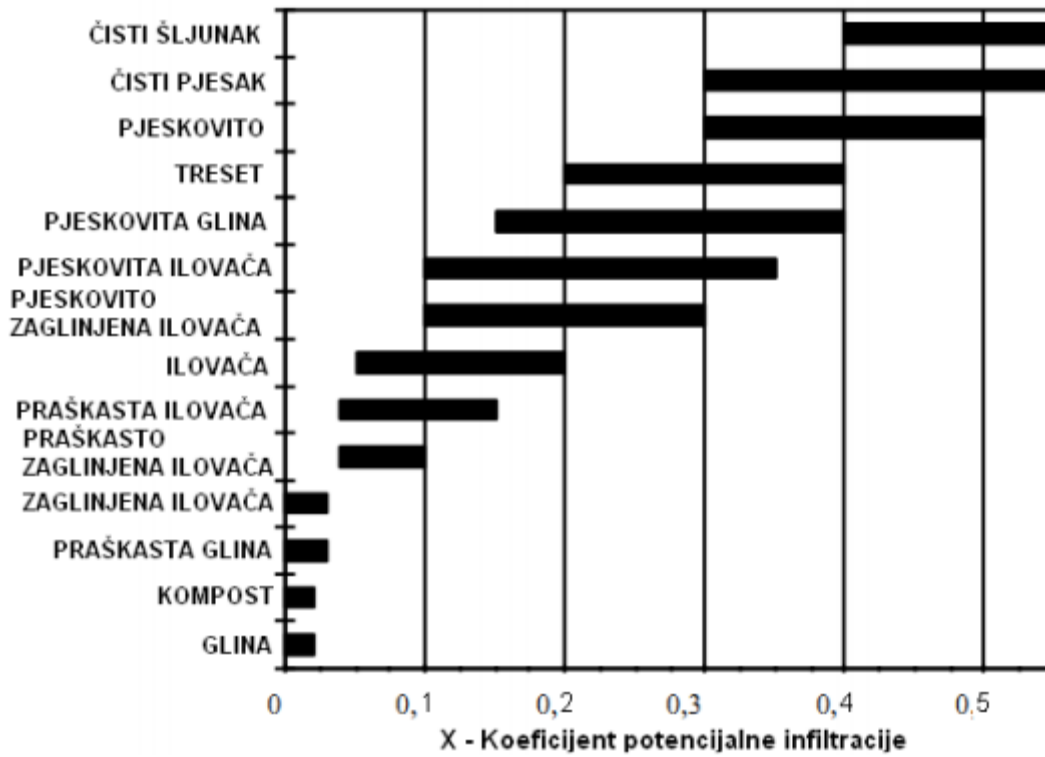


Slika 4.2 Dijagram za određivanje parametra S1 (Civita & de Maio, 1997.)

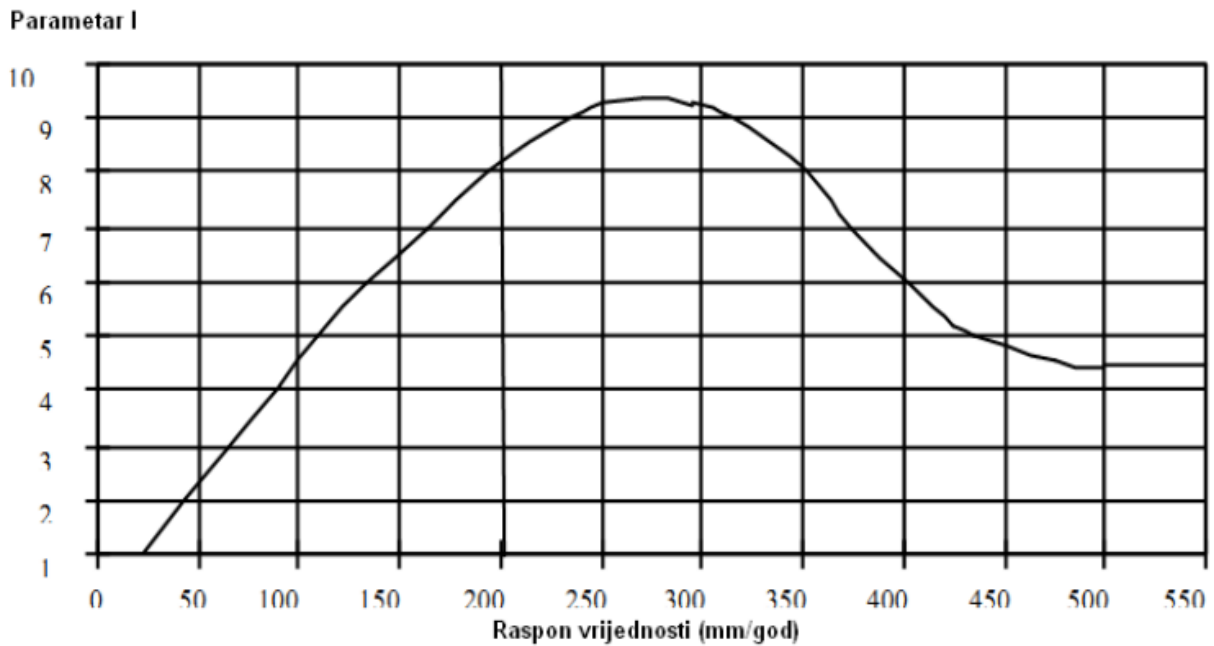
Količina infiltracije  $I$  za područja gdje je debljina tla veća od 0,5 m izračunava se prema formuli:

$$I = P \times X \quad (4.3)$$

gdje je  $P$  količina oborina u mm/god, a  $X$  indeks potencijalne infiltracije koji se definira prema dijagramu prikazanog na Slici 4.3. Nakon izračuna količine infiltracije, konačni bodovi za parametar efektivne infiltracije ( $I$ ) dodjeluje se na temelju interpretacije dijagrama prikazanog na Slici 4.4. Za raspone vrijednosti  $I$  od 0 do 275 mm/god krivulja ima uzlaznu putanju (raspon bodova od 1 do 10), dok za vrijednosti veće od 275 mm/god dolazi do silazne putanje, koja završava s 550 mm/god odnosno 4,4 boda.



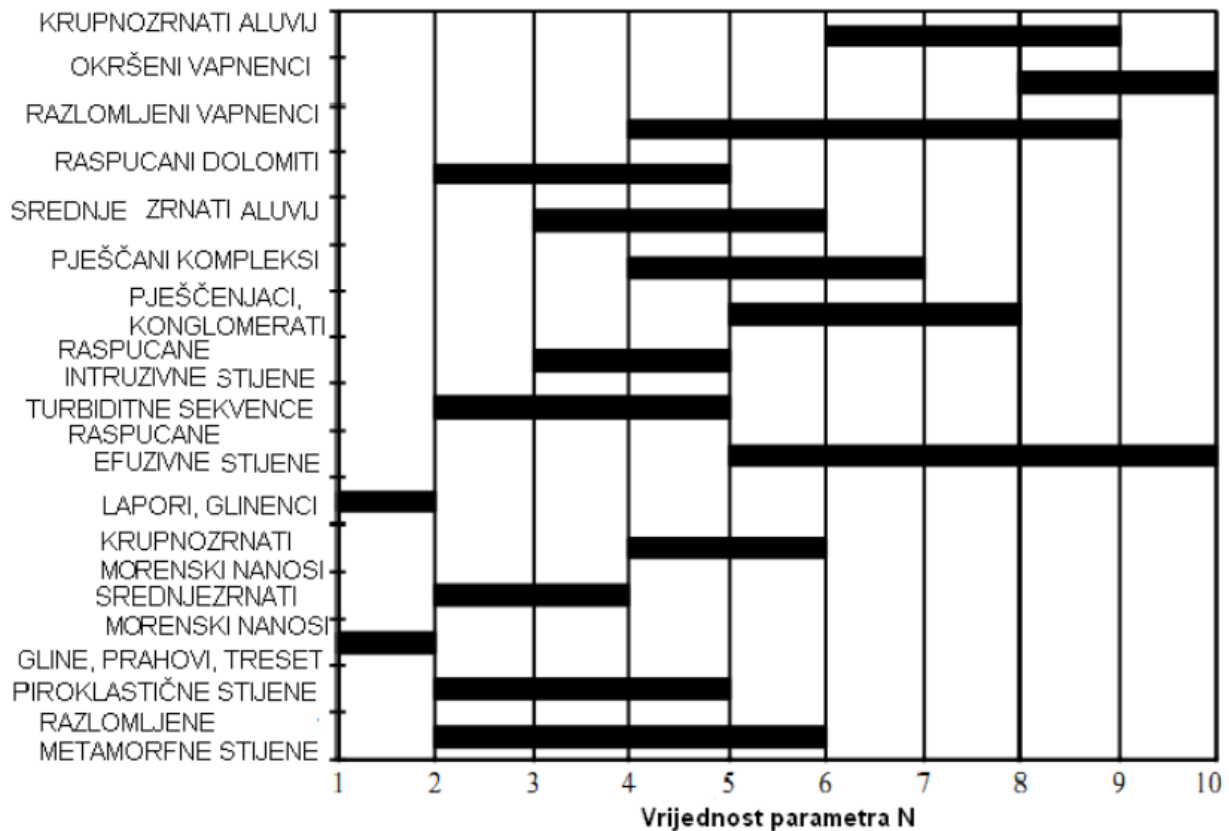
Slika 4.3 Dijagram za određivanje koeficijenta X (Civita & de Maio, 1997.)



Slika 4.4 Dijagram za određivanje parametra I (Civita & de Maio, 1997.)

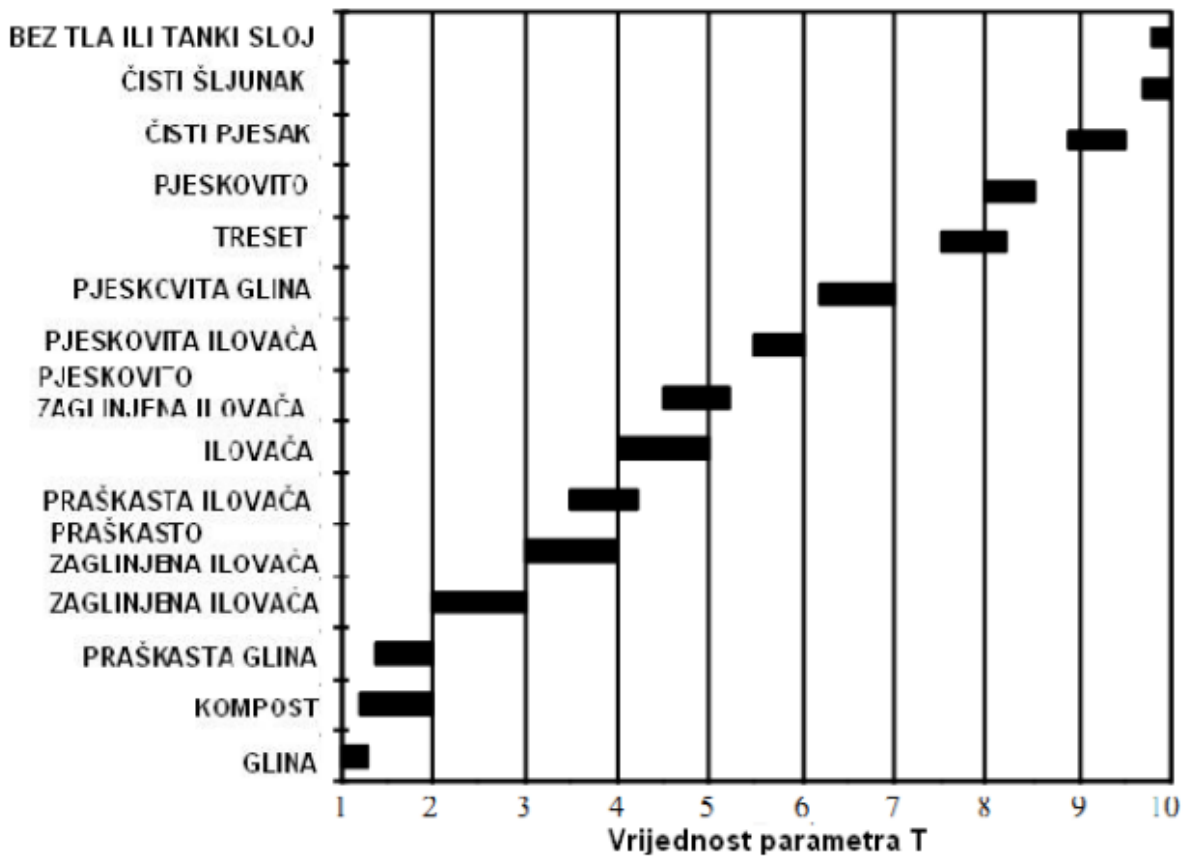


Nesaturirana zona (N) opisuje kapacitet razrijeđivanja u nezasićenj zoni. Uključuje litološke i hidrogeološke značajke kao što su: tekstura, mineralni sastav, granulometrijski sastav, razlomljenost i okršenost (Nakić, 2015). Vrijednost bodova za ovaj parametar nije jednoznačna, prema dijagramu na Slici 4.5 za pojedine naslage postoji veći raspon bodova (do 5 za jednu vrstu stijena) stoga se ključna kvalitetna interpretacija korisnika kako bi se odredili reprezentativni bodovi.



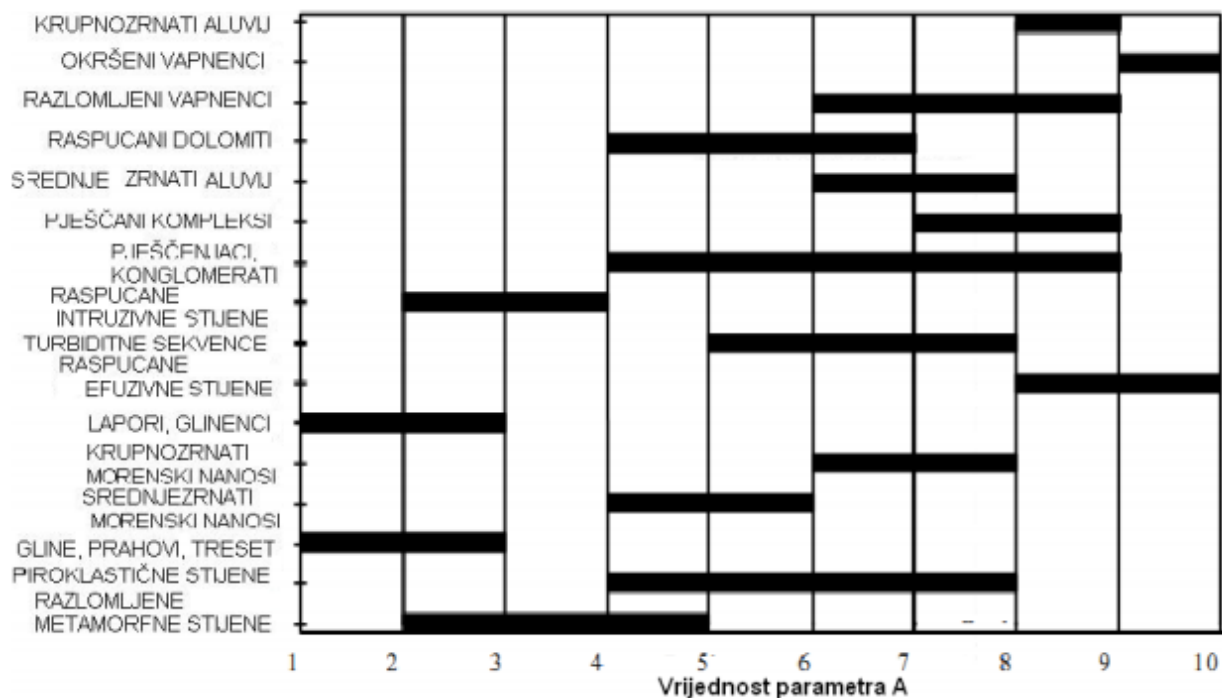
**Slika 4.5** Dijagram za određivanje parametra N (Civita & de Maio, 1997.)

Parametar T opisuje kapacitet pokrovnih naslaga za zadržavanje onečišćenja, a upravo u tlu ili pokrovnim naslagama mogu se pojaviti razni procesi koji utječu na ponašanje onečišćivala (Nakić, 2015). Često ne postoji dovoljno podataka, tako da je razvijen sustav bodovanja temeljen na granulometrijskom sastavu prikazan na Slici 4.6. Za razliku od parametra N, ovdje su rasponi bodova za pojedine vrste tla dosta manji.



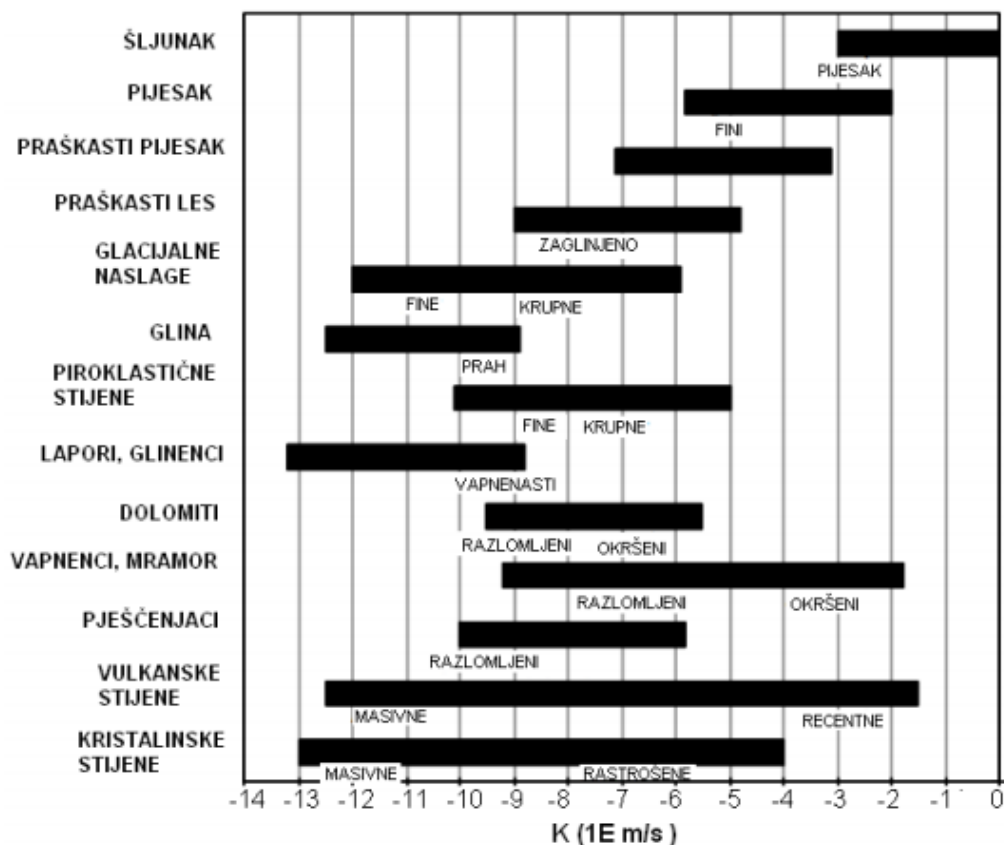
**Slika 4.6** Dijagram za određivanje parametra T (Civita & de Maio, 1997.)

Parametar A definiše hidrogeološke značajke vodonosnika, a određuje se ovisno o litologiji kako je prikazano na Slici 4.7. Prema Čupić (2011.), onečišćivalo se nakon vertikalnog procjeđivanja kroz nesaturiranu zonu u vodonosniku kreće pod utjecajem advekcije u smjeru tečenja, a općenito se u saturiranoj zoni očekuje manji broj procesa koji utječu na smanjenje koncentracije zagađivala u odnosu na nesaturiranu zonu i tlo. Sukladno tome, naslage kao što su raspucali karbonati i vodonosnici međuzrnske poroznosti s velikom hidrauličkom vodljivošću će imati veću bodovnu vrijednost.



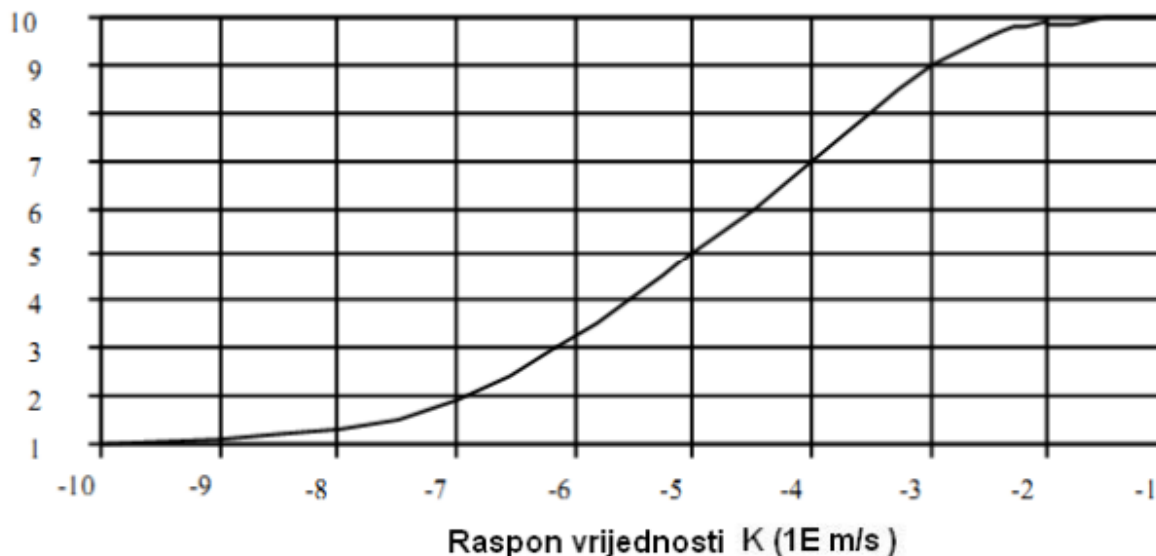
**Slika 4.7** Dijagram za određivanje parametra A (Civita & de Maio, 1997.)

Parametar C uvjetovan je iznosima hidrauličke vodljivosti koji se često zbog nedostatka informacija empirijski procjenjuje. S obzirom na litologiju vodonosnika, pomoću dijagrama prikazanog na Slici 4.8 prvo se određuje hidraulička vodljivost koja za određene vrste stijena ima izrazito velike oscilacije. Nakon određivanja hidrauličke vodljivosti prema dijagramu na Slici 4.9 pripisuju se bodovi za parametar C. Vrijednosti bodova su proporcionalni vrijednosti hidrauličke vodljivosti, tako da naslage poput šljunka i pijeska s visokom hidrauličkom vodljivošću imaju najveće vrijednosti bodova, obično 7 ili više.



Slika 4.8 Dijagram za određivanje vrijednosti hidrauličke vodljivosti (Civita & de Maio, 1997.)

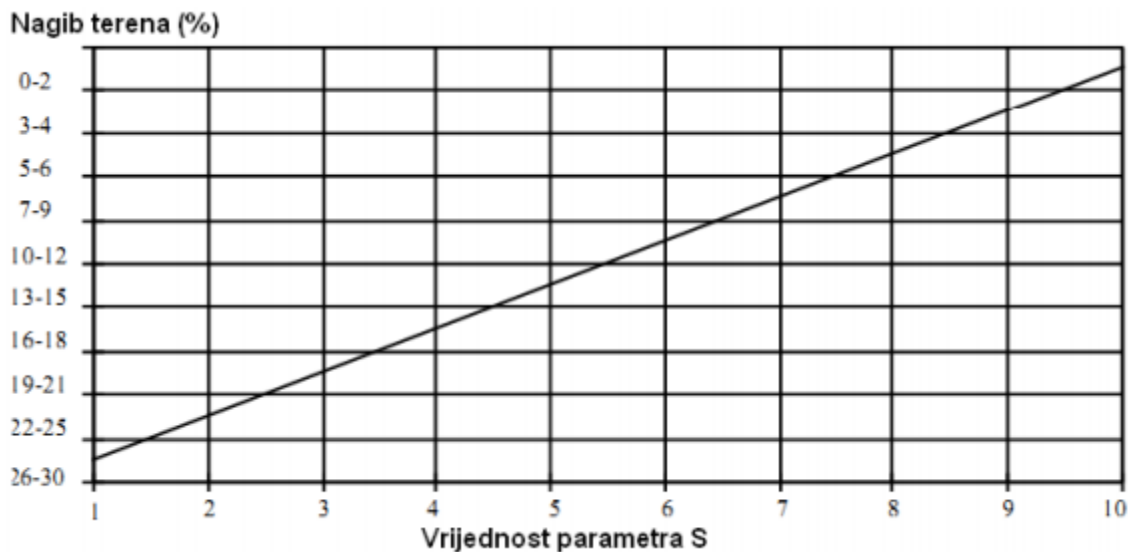
Parametar C



Slika 4.9 Dijagram za određivanje parametra C (Civita & de Maio, 1997.)

Parametar S2 opisuje ulogu nagiba terena, koja se linearno smanjuje s povećavanjem kuta nagiba padine. Nagib terena uvjetuje brzini i smjeru toka vode odnosno onečišćivala, stoga padine s

najvećim nagibom imaju najmanje vrijednosti bodova budući da je onečišćivalu gotovo onemogućeno da se pojavi u vodonosniku. Horizontalni i subhorizontalni predjeli su najopasniji i pripisani su im najveće vrijednosti bodova, kako je prikazano na dijagramu na Slici 4.10.



**Slika 4.10** Dijagram za određivanje parametra S2 (Civita & de Maio, 1997.)

U ovom radu, uz opisanih 7 parametara SINTACS metode korišten je i novi parametar koji opisuje namjenu zemljišta. Promatrano područje kategorizirano je u šest klasa: umjetne površine, ceste, poljoprivredne površine, šume i vode. Formula za izračun konačne ocjene 3.2 sada poprima oblik:

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^8 P_i \times W_i \quad (4.4)$$

Gdje  $P_i$  predstavlja bodove parametre, a  $W_i$  težinski faktor. Težinski faktori s obzirom na različite scenarije prikazani su na slici 4.11.

PARAMETAR	NORMALNI UVJETI	VELIKO OPTEREĆENJE	PROCJEĐIVANJE	KRŠ	RASPUCALE STIJENE
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

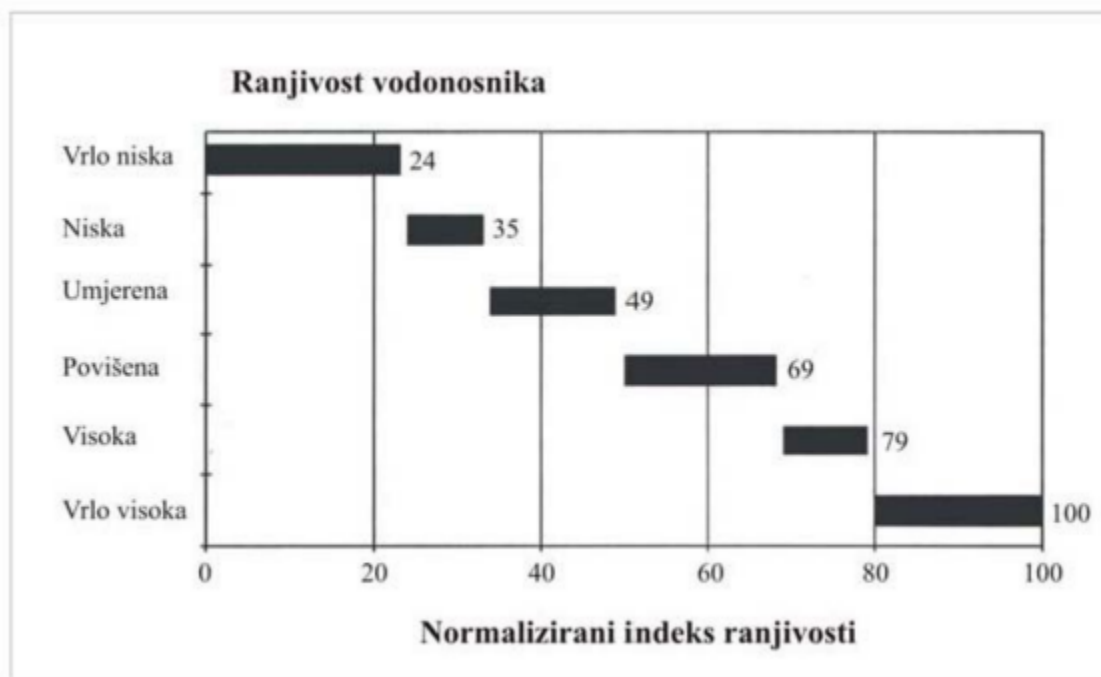
**Slika 4.11** Težinski koeficijenti pojedinog parametra u različitim scenarijima (Loborec, 2013.)

Kod normalnih uvjeta naglašena je uloga dubine do podzemne vode i kapaciteta razrjeđenja u nezasićenoj zoni, a ovaj scenarij pogodan je za korištenje u nizinskim predjelima s debelim slojevima tla. Prema Čupić (2011) veliko opterećenje pogodno je za područja s intenzivnim korištenjem prostora, za razliku od normalnog scenarija gdje prirodni okoliš nije narušen. Scenarij procjeđivanja odnosi se na područja gdje je dubina do podzemne vode zanemariva (Nakić, 2015). Sukladno tome, izraženi su parametri koji opisuju karakteristike samo vodonosnika (hidrogeološka obilježja vodonosnikak i raspon hidrauličke vodljivosti).

S obzirom na dodani parametar i korištenje modificirane formule 4.4 konačna klasifikacija prema Slici 4.1 nije moguća, stoga je u sklopu ovog rada konačna klasifikacija određena u obliku normaliziranih vrijednosti prema formuli:

$$IS_{NO} = \frac{IS - IS_{MIN}}{IS_{MAX} - IS_{MIN}} \times 100 [\%] \quad (4.5)$$

gdje je  $IS_{NO}$  normalizirani indeks ranjivosti,  $IS$  indeks ranjivosti,  $IS_{MAX}$  najveća vrijednost indeksa, a  $IS_{MIN}$  najmanja vrijednost indeksa. Na temelju normaliziranih vrijednost klasificira se kako je prikazano na slici 4.12.



**Slika 4.12** Kategorizacija indeksa ranjivosti prema normaliziranom indeksu ranjivosti (Civita & de Maio, 1997.)

## **5. ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA PLANIRANOG VODOCRPILIŠTA JEŽDOVEC I UTJECAJ HE PREČKO I HE PODSUSED NA PODZEMNE VODE**

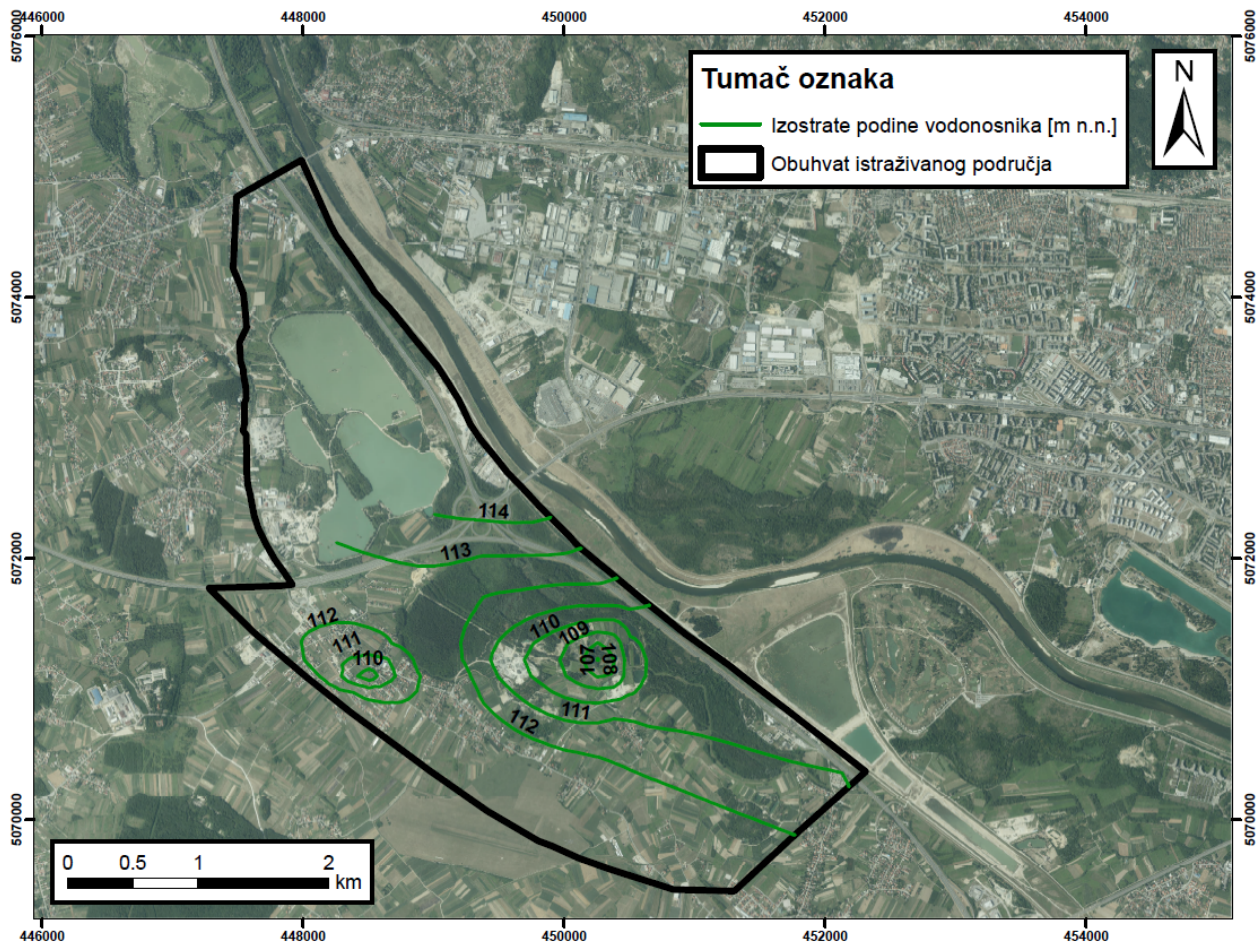
### **5.1 Odabir potencijalne lokacije za razvoj vodocrpilišta**

#### **5.1.1 Karta izostrata podine aluvijalnih naslaga vodonosnika**

Za izradu karte izostrata podine aluvijalnih naslaga interpretirano je dvadesetak litoloških stupova strukturnih bušotina koje su izbušene u ovom dijelu zagrebačkog vodonosnika (poglavlje 3.3). Karte izohipsi izrađene su na osnovi topografske karte mjerila M 1:25000 (<https://geoportal.dgu.hr/>), koristeći kote s iste. Oduzimanjem vrijednosti dubina do podine od kote terena za svaki litološki stup i interpolacijom dobivenih vrijednosti izrađena je karta izostrata podine aluvijalnih naslaga (Slika 5.1). Analiziramo li kartu izostrata podine aluvijalnih naslaga na području lokaliteta Ježdovec (Slika 5.1) uočavamo da se podina naslaga na većini područja planiranog vodocrpilišta Ježdovec nalazi na apsolutnoj visini od oko 110 m n.m. S obzirom da se već dio ovog područja nalazi na nadmorskoj visini od oko 120 m n.m., dubina zalijeganja aluvijalnih naslaga je na većini istraživanog područja oko desetak metara, a u čijoj podini se nalaze naslage nepropusne, sive masne gline (Posavec, 2013.).

Debljine aluvijalnih naslaga od oko desetak metara utvrđene su i na većini litoloških stupova dvadesetak analiziranih strukturnih bušotina koje su izbušene na ovom dijelu zagrebačkog vodonosnika. Karta izostrata podine aluvijalnih naslaga kao i pripadni digitalni model izrađeni su s ciljem omogućavanja usporedbe apsolutne visine podine aluvijalnih naslaga s vodnim licem za vrijeme niskih i visokih voda, a u svrhu procjene debljine saturiranog dijela vodonosnika, odnosno izrade karte izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika.





Slika 5.1 Karta izostrata podine aluvijalnih naslaga na istraživanom području

### 5.1.2 Karte ekvipotencijala niskih i visokih razina podzemne vode

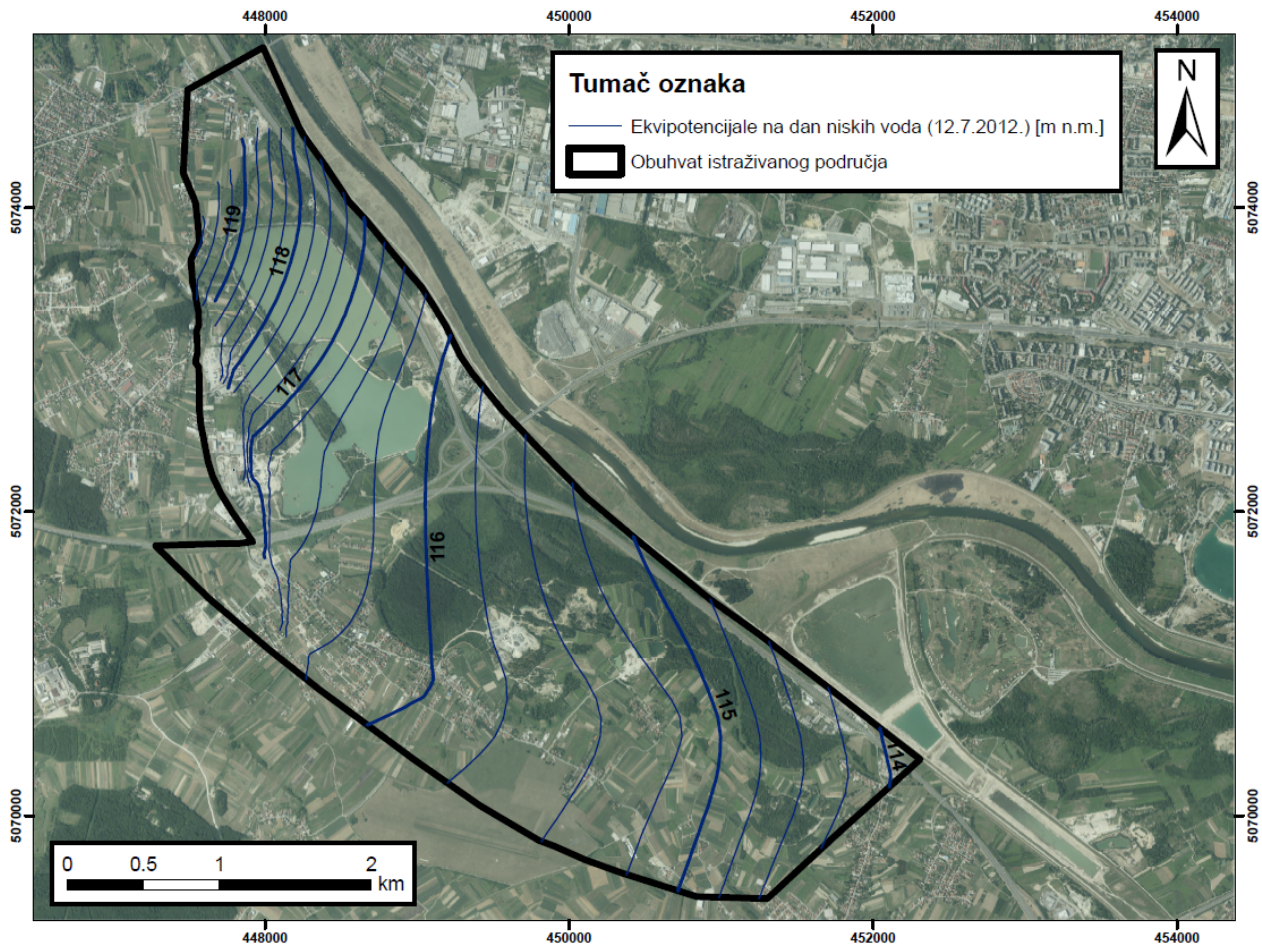
Kod procjene debljine saturiranog dijela vodonosnika, potrebno je izraditi karte izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga. Zbog toga je potrebno napraviti karte ekvipotencijala za niske i visoke razine podzemne vode. Za potrebe određivanja datuma karakterističnih niskih i visokih razina podzemne vode analizirani su nivogrami piezometara na području lokaliteta Ježdovec (Slika 3.8.) kao i nivogram hidrološke stanice Podsused koja se nalazi uzvodno i nivogram hidrološke stanice Zagreb koja se nalazi nizvodno od istraživanog područja. Kao najreprezentativniji datumi odabrani su 6.11.2012. za visoke i 12.7.2012. za niske vode. S obzirom na nedovoljan broj hidroloških stanica na rijeci Savi za potrebe izrade karata ekvipotencijala, kreirane su i virtualne stanice između stvarnih stanica, kako je prikazano na Slici 3.8. Koristeći linearnu interpolaciju između dvije susjedne hidrološke stanice dobiven je vodostaj na tim virtualnim stanicama. Vodostaj između početne točke (uzvodna stvarna hidrološka stanica) i završne točke (nizvodna stvarna hidrološka stanica) linearno je interpoliran koristeći formulu:

$$h_i = h_p + \frac{(h_z - h_p)}{L} \times L_i \quad (5.1)$$

gdje je:

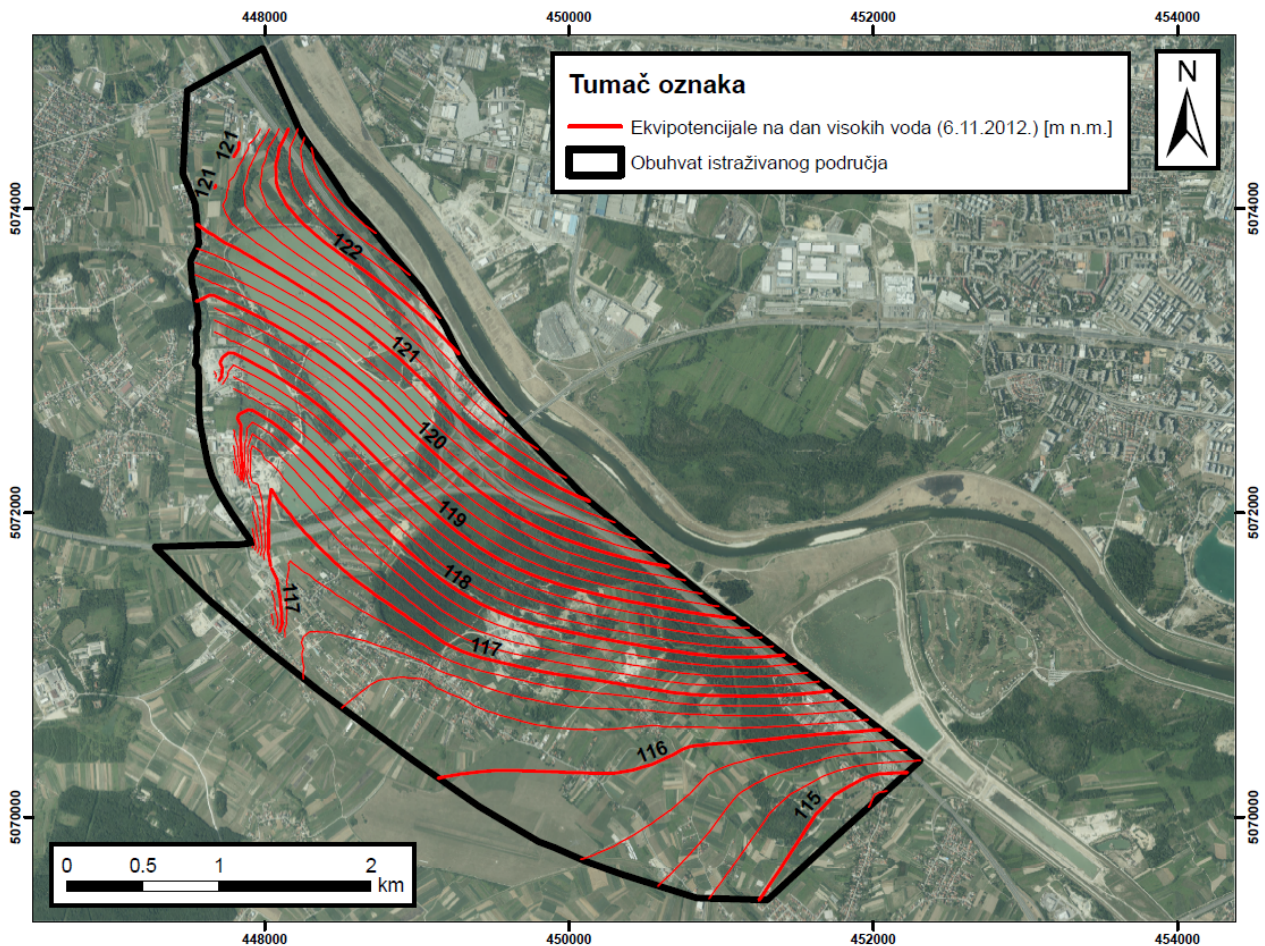
$h_i$  – vodostaj na  $i$ -toj virtualnoj hidrološkoj stanici,  $h_p$  – vodostaj na početnoj stvarnoj hidrološkoj stanici,  $h_z$  – vodostaj na završnoj stvarnoj hidrološkoj stanici,  $L$  – udaljenost između početne i završne stvarne hidrološke stanice i  $L_i$  – udaljenost između početne stvarne hidrološke stanice i  $i$ -te virtualne hidrološke stanice

Mjerenja razina podzemnih voda i vodostaja (virtualnih i stvarnih) su interpolirana *Kriging (3D Analyst)* metodom, a karte ekvipotencijala na dan niskih i visokih razina podzemne vode su prikazane na slikama 5.2 i 5.3.



Slika 5.2 Karta ekvipotencijala na dan niskih razina podzemne vode (12.7.2012.)

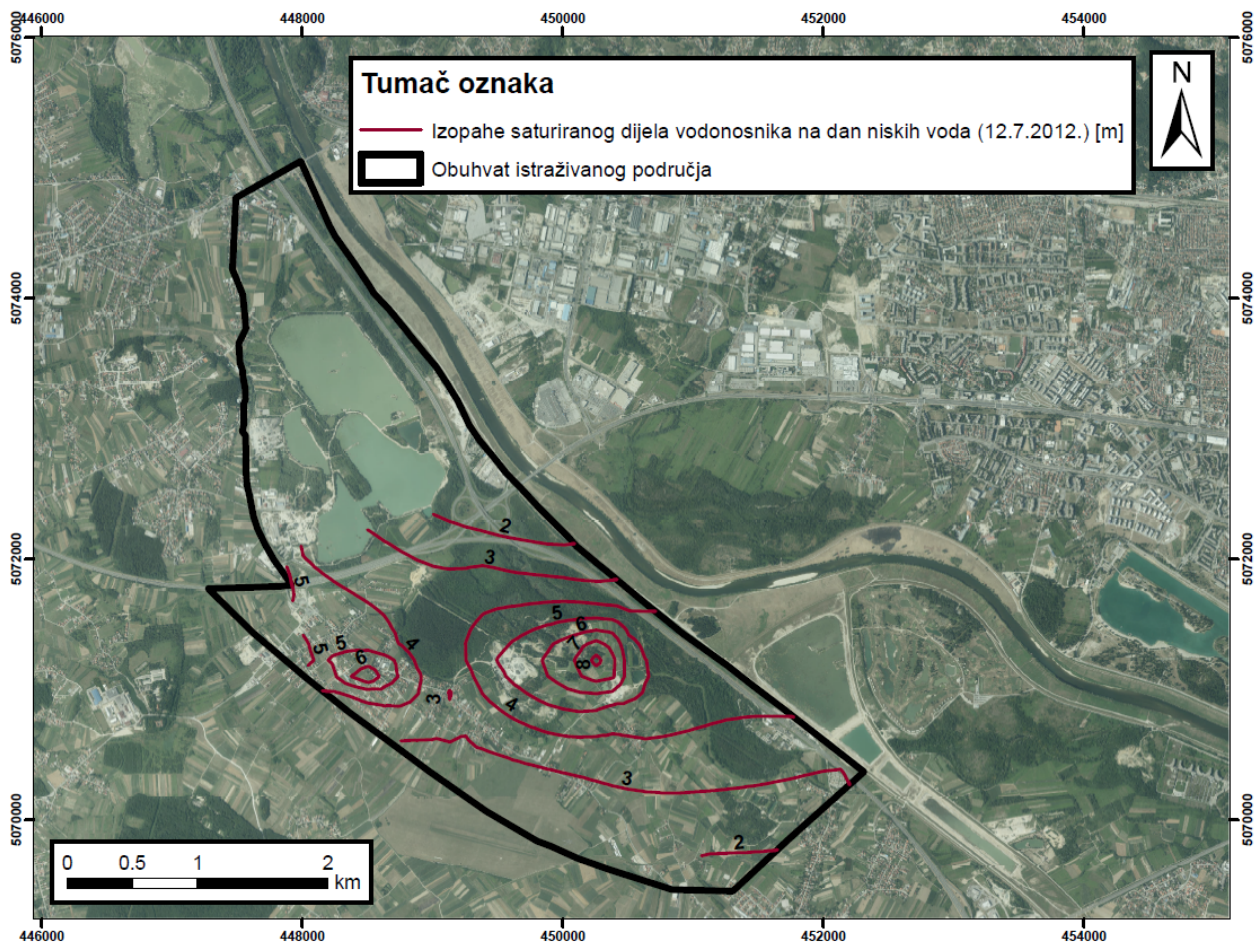




Slika 5.3 Karta ekvipotencijala na dan visokih razina podzemne vode (6.11.2012.)

### 5.1.3 Karte izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika

Karte izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika izrađene su za stanje niskih i visokih razina podzemne vode. Prethodno izrađena karta izostrata podine aluvijalnih naslaga (poglavlje 5.1.1) te karte ekvipotencijala za niske i visoke razine podzemne vode (poglavlje 5.1.2) omogućile su izradu karata izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika na način da su karte ekvipotencijala za niske i visoke vode oduzete od karte izostrata podine aluvijalnih naslaga. Time su dobivene karte izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga za stanje niskih i visokih razina podzemne vode. Za odabir samih lokacija zdenaca od značaja je bila karta izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika za stanje niskih razina podzemne vode (Slika 5.4).



**Slika 5.4** Karta izopaha saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika za stanje niskih razina podzemne vode (12.7.2012.)

#### 5.1.4. Lokacije zdenaca za planirano vodocrpilište Ježdovec

Sukladno Prostornom planu Grada Zagreba (PPGZ), Prostornom planu Zagrebačke Županije (PPZŽ) i Prostornom planu područja posebnih obilježja (PPPPO) Črnkovec - zračna luka Zagreb, odabrana je potencijalna lokacija za razvoj planiranog vodocrpilišta Ježdovec. Lokacija planiranog vodocrpilišta razmatrana je unutar granice II. zone zaštite vodocrpilišta, a prema kojima lokacija Ježdovec spada u planirana vodocrpilišta Grada Zagreba s predviđenim kapacitetom od 300 do 400 l/s.

Pored definirane granice II. zone zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec, kriteriji za odabir lokacije potencijalnih 8 zdenaca vodocrpilišta bili su sljedeći:

- debljina saturiranog dijela aluvijalnih naslaga vodonosnika za stanje niskih razina podzemne vode (nepovoljna situacija), na temelju analize izrađenih karata, (poglavlje 5.1.3) (Slika 5.5)

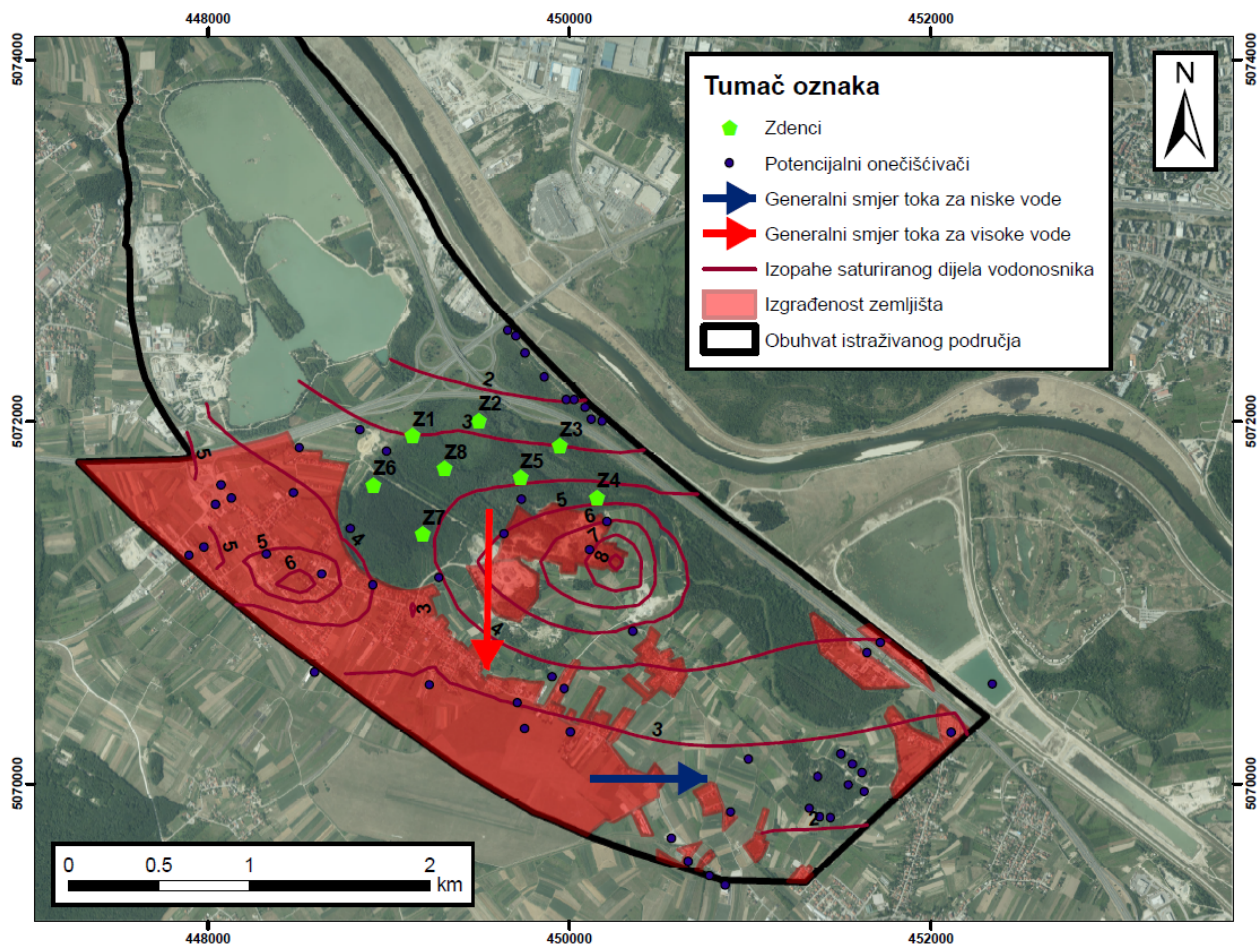
- generalni smjer toka podzemne vode, zdenci su pozicionirani tako da u što manjoj mjeri jedan drugom rade sjenu za stanje niskih i visokih razina podzemne vode (Slika 5.5),
- postojeća izgrađenost područja unutar II. zone zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec, na osnovu interpretacije digitalnog ortofota i topografske karte mjerila 1 : 25 000 (<https://geoportal.dgu.hr/>) (Slika 5.5)
- lokacije značajnijih potencijalnih onečišćivača, na temelju interpretacije prostornih planova i naznačenih potencijalnih onečišćivanja prema Bačani i Posavec (2014) (Slika 5.5),
- vlasništvo zemljišta, a prema kojem zdenci nisu na katastarskim česticama u privatnom vlasništvu (uvidom u posjedovne listove katastarskog registra)

S obzirom na gore navedene kriterije odabrane su lokacije za potencijalnih 8 zdenaca planiranog vodocrpilišta Ježdovec oznaka Z-1 do Z-8 karakteristika prikazanih u Tablici 5.1, a koji su prikazani na Slici 5.5.

**Tablica 5.1** Karakteristike potencijalnih 8 zdenaca planiranog vodocrpilišta Ježdovec

<b>Naziv</b>	<b>X koordinata</b>	<b>Y koordinata</b>	<b>Crpna količina (l/s)</b>	<b>Filtar do (m n.m.)</b>	<b>Filtar od (m n.m.)</b>	<b>Debljina filtra (m)</b>
<b>Z1</b>	449132,265	5071924,333	32	114,9	112,9	2
<b>Z2</b>	449496,682	5072006,867	29	114,8	113	1,8
<b>Z3</b>	449946,829	5071866,392	32	114,2	112,2	2
<b>Z4</b>	450151,843	5071582,073	60	114,3	110,5	3,8
<b>Z5</b>	449728,508	5071690,023	46	114,4	111,5	2,9
<b>Z6</b>	448913,590	5071649,807	41	115,1	112,5	2,6
<b>Z7</b>	449186,641	5071376,756	44	114,9	112,1	2,8
<b>Z8</b>	449307,291	5071742,94	41	114,8	112,2	2,6





Slika 5.5 Lokacije zdenaca s obzirom na razmatrane kriterije

## 5.2 Hidroelektrane

Program „Zagreb na Savi“ predviđa izgradnju 10 protočnih hidroelektrana, na dionici rijeke Save od granice s Republikom Slovenijom do Siska te izgradnju kanala Sava-Sava, kojima bi se ostvarili važni energetske ciljevi, ali i ciljevi vezani za podzemne vode i obranu od poplava, tj. smanjivanje negativnih trendova opadanja razine podzemne vode (Posavec, 2019.). S obzirom na istraživano područje, utjecaj na podzemne vode bio bi posljedica utjecaja dvije hidroelektrane: HE Podsused i HE Prečko. HE Podsused nalazi se uzvodno od promatrane lokacije, a HE Prečko se nalazi na promatranom području. Na istraživanom području (zapadni dio zagrebačkog vodonosnika) razvijen je regionalni numerički model tečenja podzemne vode (program Visual Modflow) za izgrađeno stanje planiranog vodocrpilišta Ježdovec i HE Podsused te HE Prečko. Crpne količine zdenaca planiranog vodocrpilišta Ježdovec iznosile su kako je to prikazano u Tablici 5.1, a vodostaji rijeke Save za izgrađeno stanje prikazani su u Tablici 5.2.

**Tablica 5.2** Donje i gornje vode planiranih hidroelektrana (Posavec, 2017.)

<b>Hidroelektrana</b>	<b>Gornja voda (m n.m.)</b>	<b>Donja voda (m n.m.)</b>
<b>Podsused</b>	121,6	118,25
<b>Prečko</b>	117,5	114,06

### 5.3. Rezultati simulacije

U računalnom okruženju Visual Modflow provedene su simulacije toka podzemne vode u svrhu dobivanja prognoznih karata ekvipotencijala. Promatrane su dvije situacije, crpljenje (parametri definirani u poglavlju 5.1) sa i bez utjecaja hidroelektrana Podsused i Prečko. Domena numeričkog modela definirana je na sjevernoj strani rijekom Savom, odnosno njezinim vodostajem. Budući da se radi o granici stalnog potencijala ovakav tip rubnog uvjeta definiramo kao Dirichtletov tip granice. Isti tip granice je i na zapadnom te istočnom rubu, samo što je u ovom slučaju razina stalnog potencijala definirana pomoću ekvipotencijala niskih voda prema situaciji na Slici 5.2. Južna granica određena je kao nepropusna granica (Neumanov tip granice). Nakon nekoliko provedenih simulacija i optimizacije uvjeta crpljenja, 8 planiranih zdenaca s ukupnom crpnom količinom 325 l/s (Tablica 5.1), svedeno je na svega 5 zdenaca i ukupnu crpnu količinu od 182 l/s, s karakteristikama filtra zdenca kako je prikazano u Tablici 5.3. Veća crpna količina od spomenute rezultira padom razine podzemne vode ispod kote gornjeg ruba filtra u zdencima, a što dovodi do pada njihovog kapaciteta.

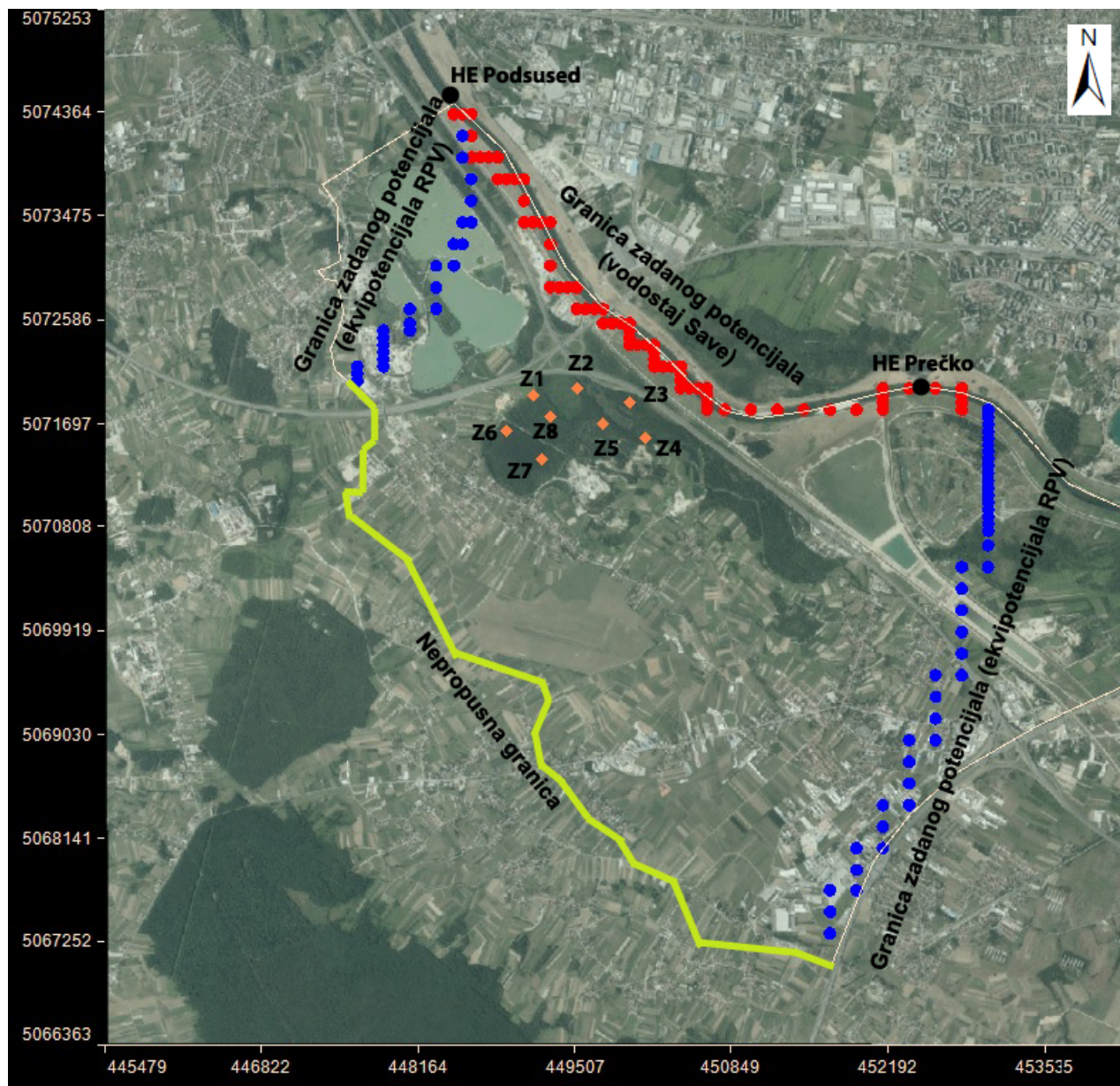
**Tablica 5.3** Karakteristike mogućih 5 zdenaca planiranog vodocrpilišta Ježdovec

<b>Naziv</b>	<b>X koordinata</b>	<b>Y koordinata</b>	<b>Crpna količina (l/s)</b>	<b>Filtar do (m n.m.)</b>	<b>Filtar od (m n.m.)</b>	<b>Debljina filtra (m)</b>
<b>Z1</b>	449132,265	5071924,333	32	114,9	112,9	2
<b>Z2</b>	449496,682	5072006,867	24	114,5	113	1,5
<b>Z3</b>	449946,829	5071866,392	32	114,2	112,2	2
<b>Z4</b>	450151,843	5071582,073	60	114,3	110,5	3,8
<b>Z7</b>	449186,641	5071376,756	35	114,3	112,1	2,2

Navedeni parametri i rubni uvjeti prikazani se na Slici 5.6, a isti su korišteni u provedbi simulacije. Prognozne ekvipotencijale za ovu situaciju prikazane su na Slici 5.7 (3D prikaz na slici

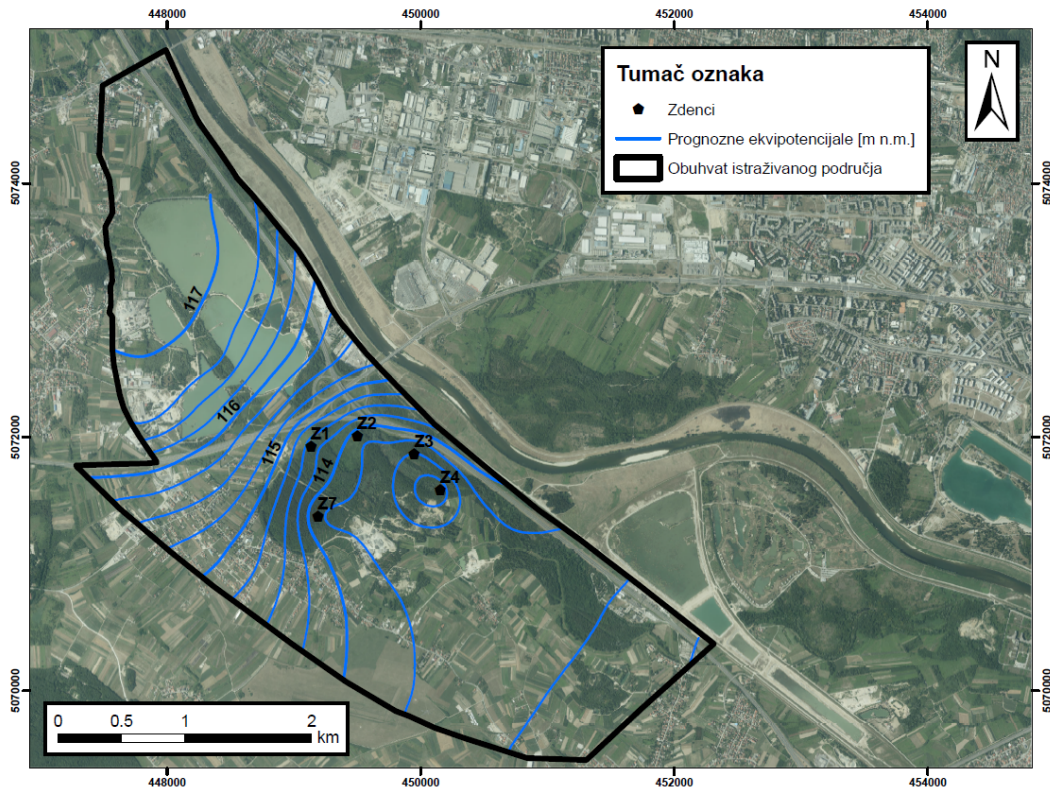


5.8), a prognozne ekvipotencijale u slučaju aktivnosti hidroelektrana prikazane su na slici 5.9 (3D prikaz na slici 5.10). U situaciji kada se prognozira postojanje hidroelektrana, jedini promjenjeni paramater jest granica stalnog potencijala na sjeveroistočnoj granici domene koja je u ovom slučaju definirana vodostajima uzrokovanim pod utjecam hidroelektrana prema kotama vodostaja prikazanih u Tablici 5.2.

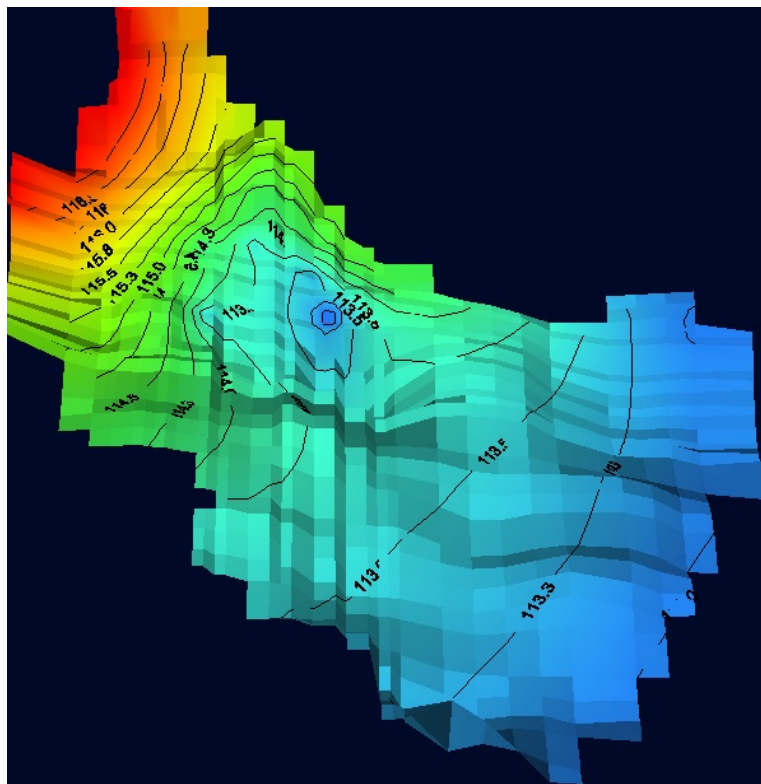


Slika 5.6 Hidrauličke granice modela istraživanog područja

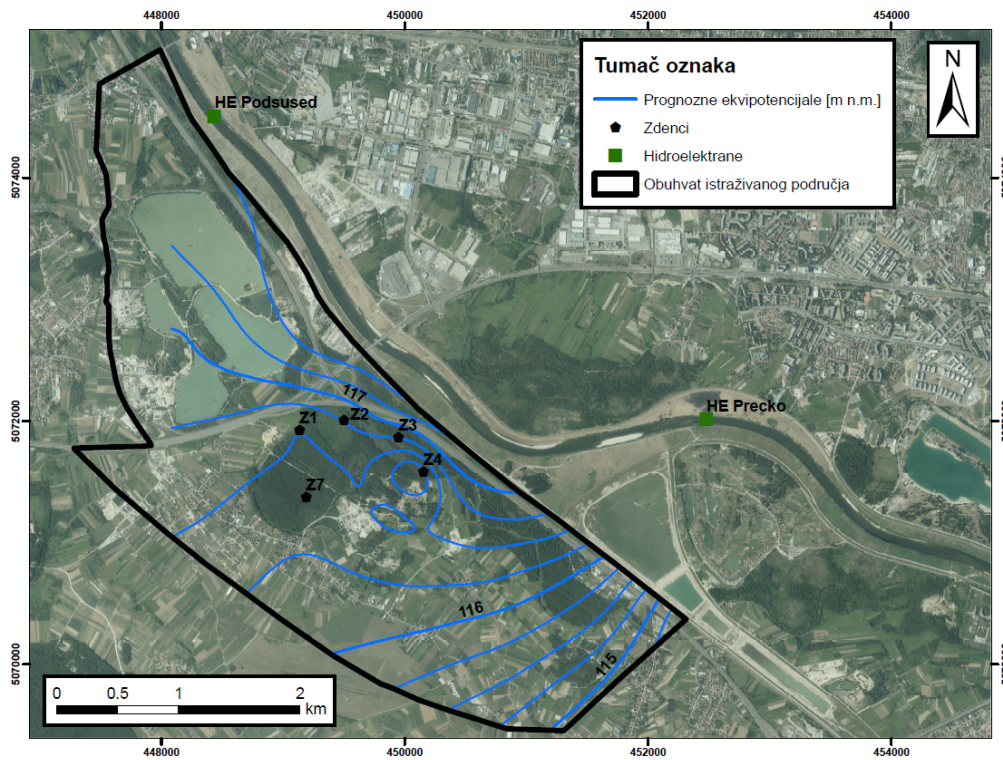




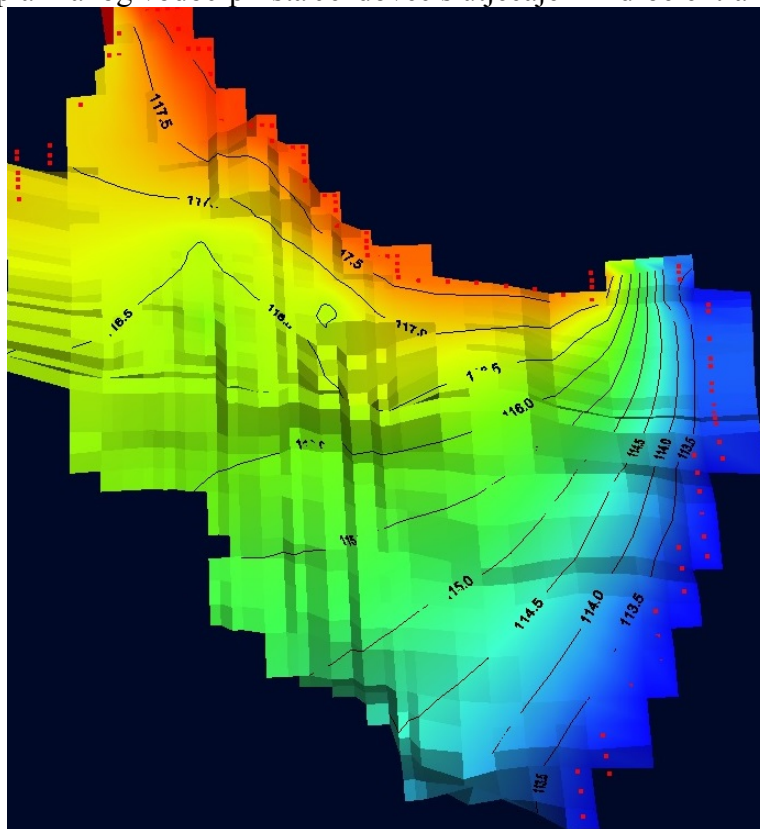
Slika 5.7 Prognozna karta ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec bez utjecaja hidroelektrana



Slika 5.8 Prognozni 3D model ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec bez utjecaja hidroelektrana



Slika 5.9 Prognozna karta ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec s utjecajem hidroelektrana



Slika 5.10 Prognozni 3D model ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec s utjecajem hidroelektrana

## 6. RANJIVOST

SINTACS metoda kao jedna od najpoznatijih metoda za određivanje ocjene ranjivosti vodonosnika, omogućuje korištenje pet različitih scenarija s čak sedam parametara. S obzirom na specifičnu situaciju na istraživanom području u ovom radu odabran je scenarij "procjeđivanje", odnosno naglašavaju se parametri vodonosnika. Budući da postupak normalizacije omogućuje dodavanje novih parametara bez narušavanja sustava bodovanja odlučeno je nadodati parametar namjene zemljišta budući da se istraživano područje nalazi u relativno aktivnom području što se tiče antropogenog utjecaja te kao takvo namjena zemljišta ima značajnu ulogu u ocjeni ranjivosti vodonosnika. Budući da se taj parametar inače ne koristi, a najbliži mu je scenarij "veliko opterećenje", koji pak nema naglašene parametre vezane za karakteristike vodonosnika odlučeno je koristiti koeficijente za scenarij "procjeđivanje" uz nadodani parametar namjene zemljišta kako bi se metoda prilagodila istraživanom području. U daljnjem tekstu opisani su postupci dobivanja pojedinih faktorskih karata u GIS okruženju (ArcMap 10.1) tj. način dodjeljivanja bodova.

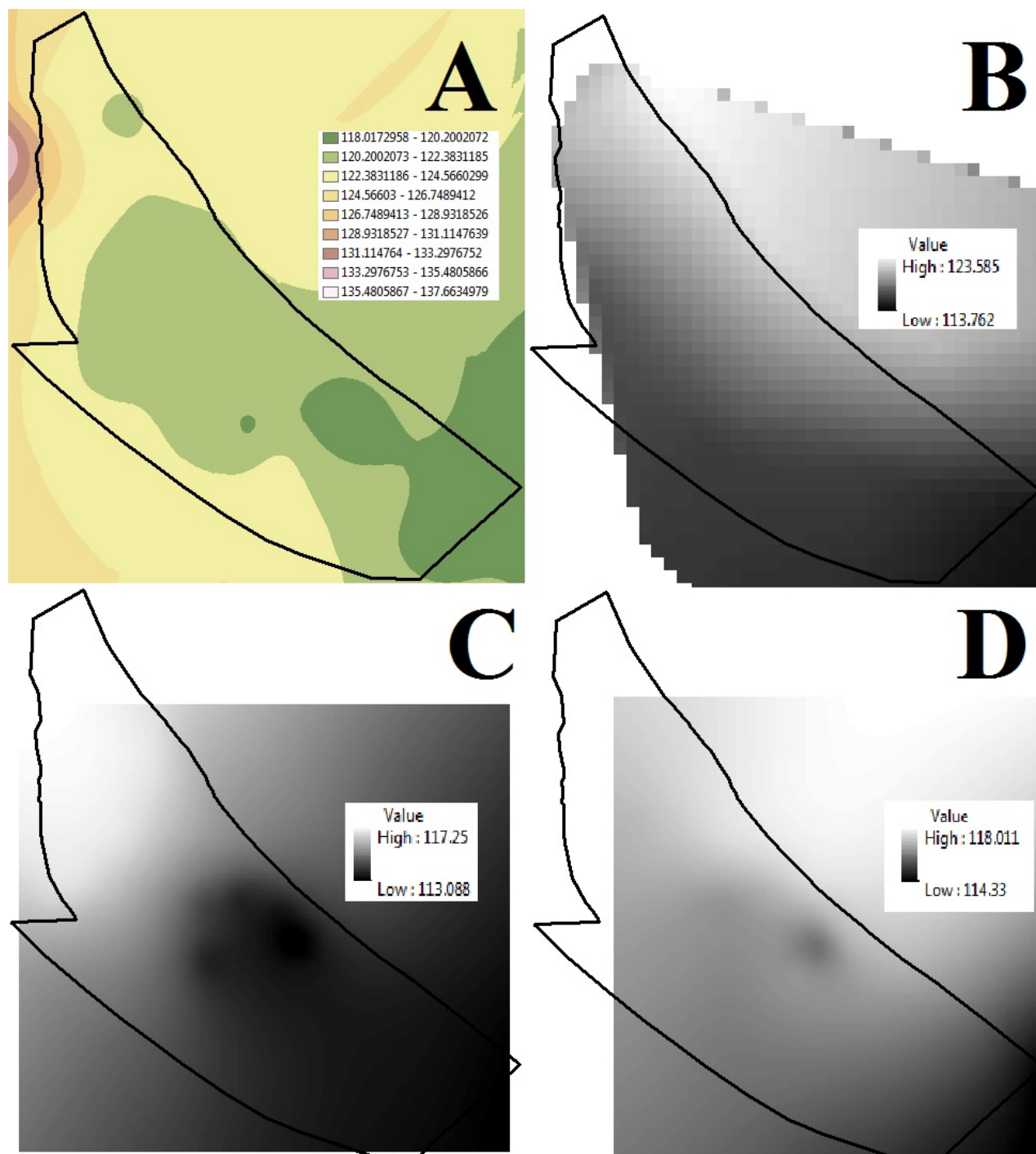
### 6.1. Izrada faktorskih karata

#### 6.1.1 Dubina do podzemne vode (S1)

S obzirom na rezultate prikazane u poglavlju 4, ovaj parametar razmatran je u 3 različita scenarija. Prvi scenarij (u daljnjem tekstu A), je scenarij u kojem je obavljena analiza s obzirom na visoke vode (Slika 5.3) budući da s obzirom na svrhu određivanja ocjene ranjivosti visoke vode daju najnepovoljnije rezultate, a što rezultira najvećom sigurnošću. Drugi scenarij (u daljnjem tekstu B), je scenarij za prognoziranu razinu podzemne vode u slučaju crpljenja pomoću mogućih 5 zdenaca (Slika 5.7). U situaciji kada su aktivne HE Prečko i HE Podsused dolazi do značajnih razlika u razinama podzemne vode (Slika 5.9) u uspoređi sa scenarijem B tako da je i ovaj scenarij uzet u obzir (u daljnjem tekstu C). Dubina do podzemne vode definirana je preko dubine izražene u metrima, prema dijagramu prikazanog na Slici 4.2. U svrhu dobivanja dubina, a kojima je onda pripisana bodovna vrijednost obavljene su analize u GIS okruženju. Od ulaznih datoteka korišten je digitalni model reljefa (engl. Digital Elevation Model, DEM) čija je rezolucija 30,92 metara (Slika 6.1 - oznaka A), dobiven interpolacijom kota visine s topografske podloge mjerila 1 : 25 000 (<https://geoportal.dgu.hr/>). Naredbom *Topo To Raster (3D Analyst)* je od ekvipotencijala visokih voda (*shapefile*) izrađen *raster* iste rezolucije (Slika 6.1 - oznaka B). Korištenjem prognoznih karata ekvipotencijala dobivenih u poglavlju 4 za slučaj crpljenja bez izgrađenosti hidroelektrana (Slika 5.7) i za slučaj crpljenja uz



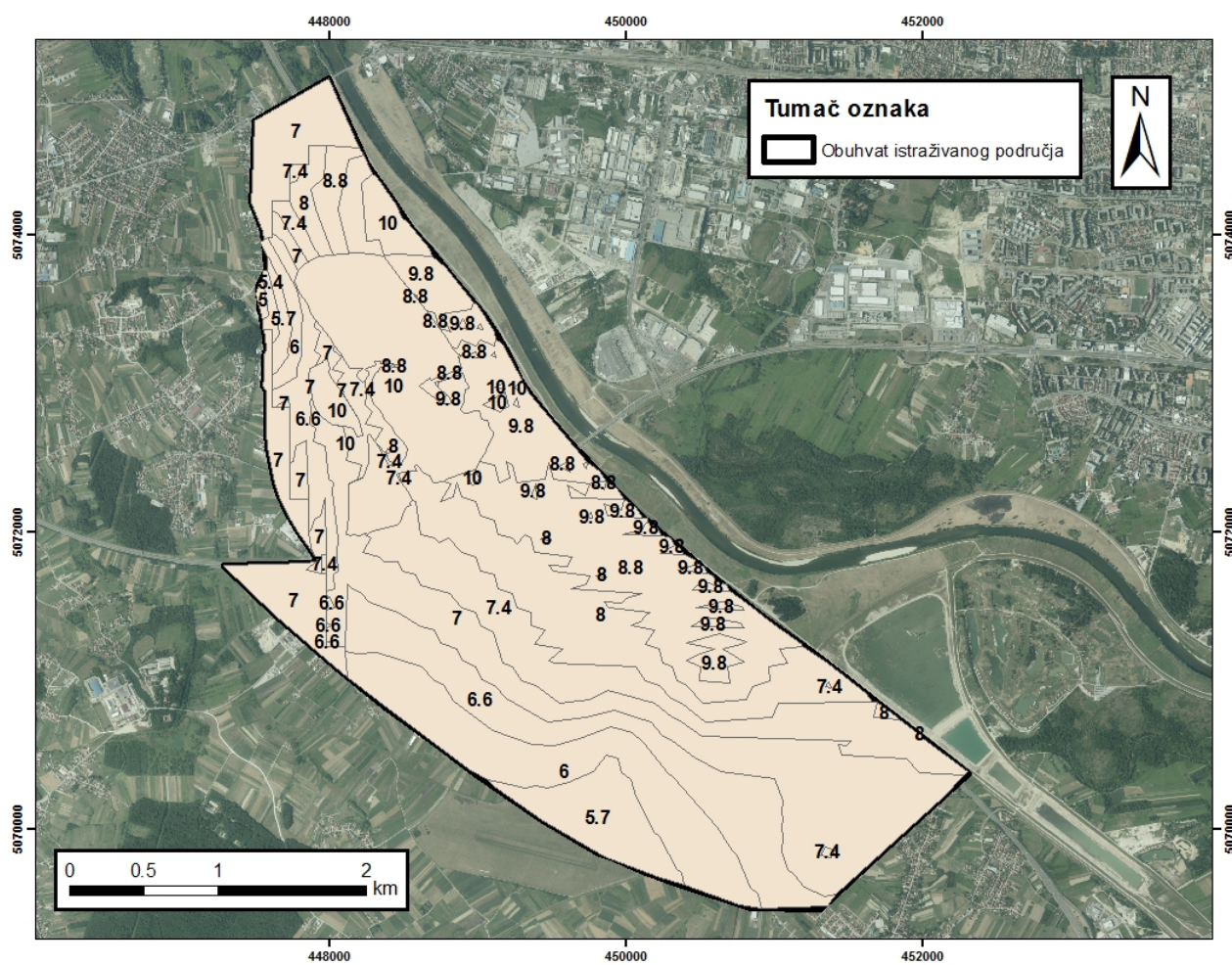
izgrađenost hidroelektranama (Slika 5.9) istim postupkom su dobivene i *raster* podloge prikazane na Slici 6.1 - oznaka C odnosno D.



**Slika 6.1** Izrada faktorske karte dubina do podzemne vode (S1)

*tumač: A - digitalni model reljefa; B - S1 (scenarij A), C - S1 (scenarij B); D - S1 (scenarij C)*

Naredbom *Minus (3D Analyst)* oduzet je DEM od razina podzemne vode i dobivene su karte koje prikazuju dubinu do podzemne vode za tri razmatrana scenarija. Također, naredbom *Clip (Data Management)* dobivene *raster* podloge izrezane su po obuhvatu istraživanog područja. Nakon toga podloge su reklasificirane narednom *Reclassify (3D Analyst)* i prebačene u poligone naredbom *Raster to Polygon (Conversion)*. Na taj način reklasificiranim vrijednostima dubine dodijeljeni su bodovi koji su množeni s odgovarajućim koeficijentom. Zbog nedostatka informacija o razinama podzemne vode na sjevernom dijelu istraživanog područja, dodijeljeno je 10 bodova, budući da se pretežito radi o jezerskom području i području s zanemarivom dubinom do podzemne vode. Kvalitetniji ulazni podatci, posebice DEM-a bolje rezolucije bi uvelike poboljšali vjerodostojnost i točnost ovog parametra. Primjer pripremljene faktorske karte u obliku poligona (*shapefile*) prikazan je na Slici 6.2. Svaki poligon ima dodijeljene bodove - stupac "S1" dok vrijednosti u stupcu "S1\_calc" atributne tablice predstavljaju dodijeljene bodove pomnožene s odgovarajućim koeficijentom.



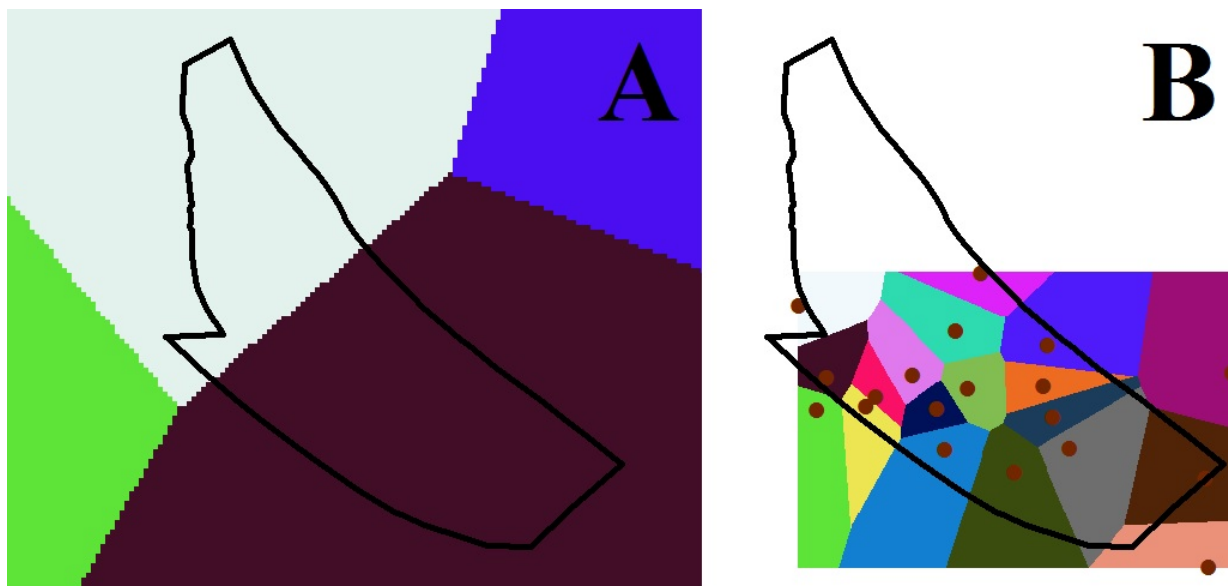
Slika 6.2 Primjer faktorske karte dubina do podzemne vode (S1)

### 6.1.2 Efektivna infiltracija (I)

Za izračun ovog parametra potrebno je odrediti prosječnu količinu oborina na istraživanom području. U tu svrhu korištena je metoda Thiessenovih poligona. Kod primjene ove metode, za svaku stanicu utvrđuje se pripadna površina sliva, tzv. Thiessenov poligon, a površina koja pripada pojedinoj stanici omeđena je simetralama dužina koje spajaju stanice (Bačani, 2006). U tu svrhu, locirane su četiri postaje koje bilježe oborine za koje su određeni Thiessenovi poligoni pomoću naredbe *Euclidean Distance (Spatial Analyst)* koji su prikazani na Slici 6.3 - oznaka A. Pomoću iste naredbe određeni su poligoni za pojedine strukturne bušotine, a prikazani su na Slici 6.3 - oznaka B. Prosječna visina oborina  $P_{sr}$  izračunava se prema formuli:

$$P_{sr} = \sum_{i=1}^n P_i p_i \quad (6.1)$$

gdje je  $P_i$  prosječna oborina pojedine stanice (mm),  $p_i = \frac{f_i}{F}$  težina stanice,  $f_i$  dio površine slika koji pripada pojedinoj stanici ( $\text{km}^2$ ) i  $F$  površina sliva ( $\text{km}^2$ ). Sukladno navednoj formuli, a prema podacima dobivenih iz spomenutih karata, prosječna količina oborina na promatranom području iznosi 945,768 mm/god.



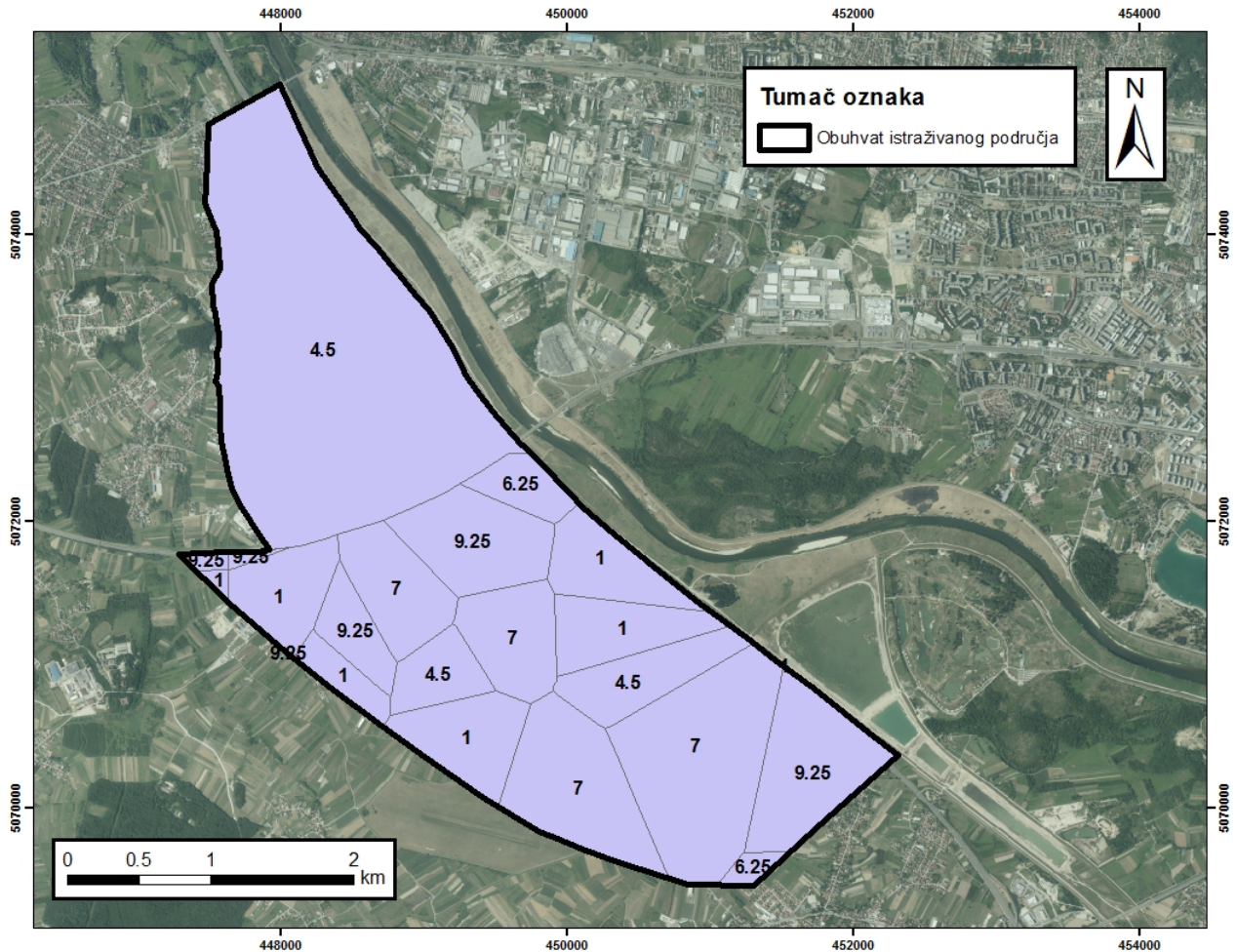
**Slika 6.3** Izrada faktorske karte efektivne infiltracije (I)

tumač: A - težinski poligoni kišomjernih stanica; B - težinski poligoni strukturnih bušotina

Prema dijagramu prikazanom na Slici 4.3 nakon interpretacije strukturnih bušotina određen je parametar X. Zatim su prema formuli 4.3 dobiveni rasponi vrijednosti za pojedini težinski poligon



strukturne bušotine, nakon čega su sukladno dijagramu (Slika 4.4) dodijeljeni odgovarajući bodovi. U području gdje nema informacija o litologiji, vrijednosti faktora X su interpretirane, u ovom slučaju najvećim iznosima za parametar I budući da se radi o sjevernom dijelu obuhvata (prethodno opisanom).



Slika 6.4 Faktorska karta efektivne infiltracije (I)

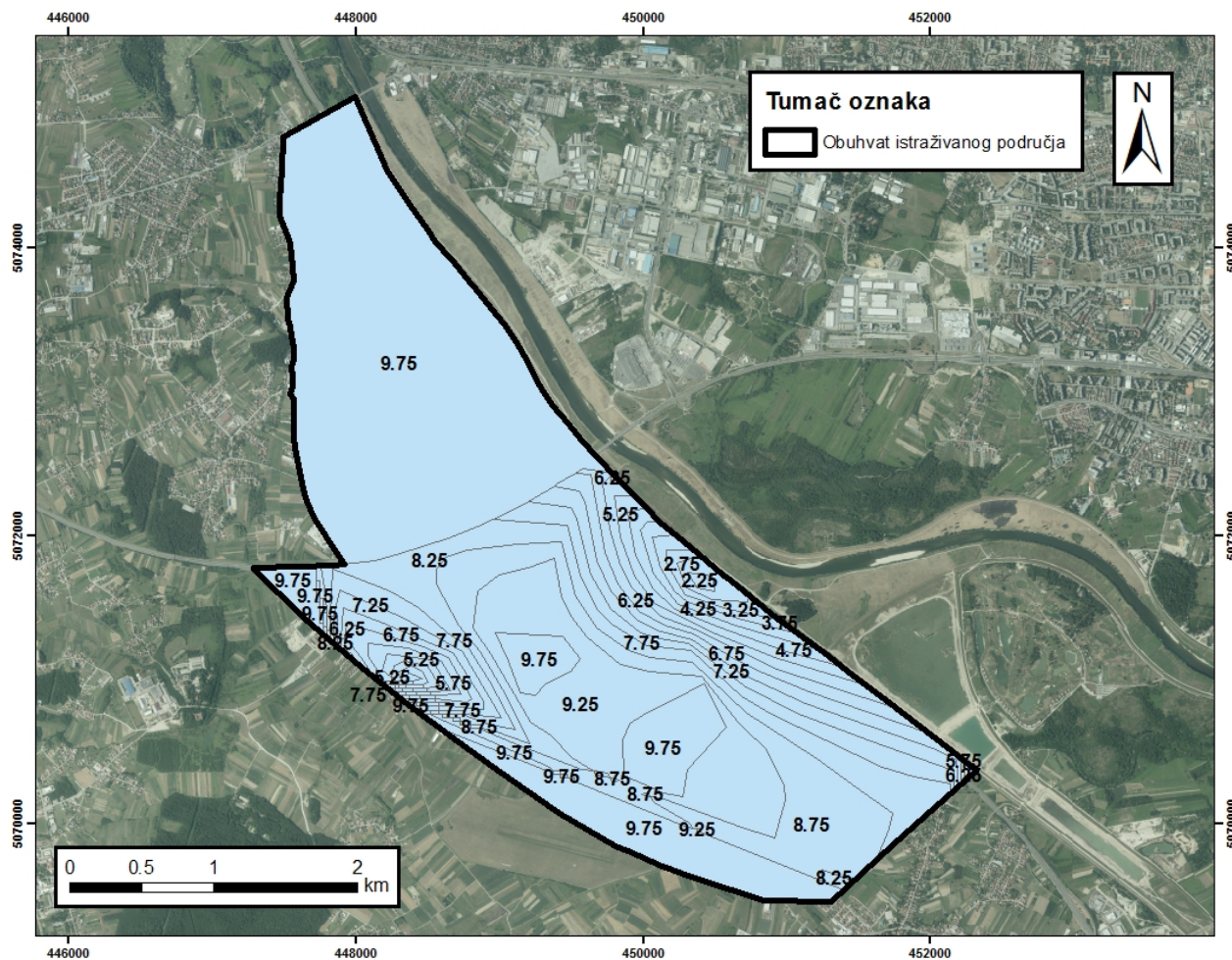
### 6.1.3 Kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni (N)

Da bi se odredila vrijednost parametra N potrebno je interpretirati strukturne bušotine, a tamo gdje nema podataka pretpostaviti vrijednosti. Nezasićenu zonu uglavnom čini jedan dio propusnih naslaga (nesaturirani dio vodonosnika) i drugi dio nepropusne krovine. Pojedinom paketu naslaga dodijeljeni su bodovi sukladno dijagramu (Slika 4.5), a ukupni bodovi za bušotinu dodijeljeni su prema formuli:

$$N = N_1 \times \frac{h_1}{h_1 + h_2} + N_2 \times \frac{h_2}{h_1 + h_2} \quad (6.2)$$







Slika 6.6 Faktorska karta kapaciteta tla ili površinskih naslaga (T)

### 6.1.5 Hidrogeološka ocjena vodonosnika (A) i raspon hidrauličke vodljivosti (C)

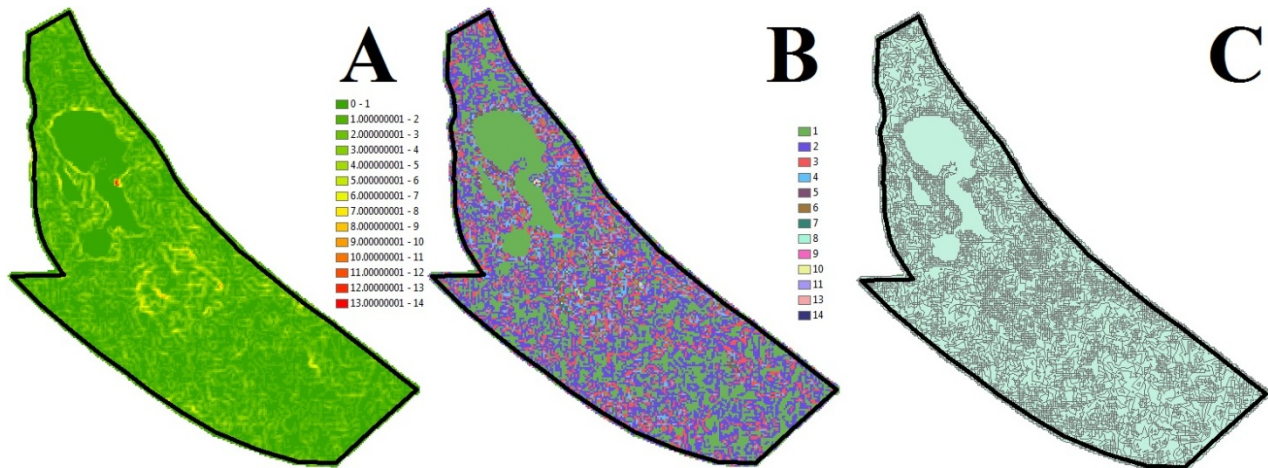
S obzirom na podatke iz strukturnih bušotina, litološki sastav vodonosnika je nedvojbeno krupnozrnati pijesak i šljunak. Sukladno tome prema dijagramu (Slika 4.7) za cijeli obuhvat istraživanog područja dodijeljeno je 9 bodova za parametar A. Krupnozrnati pijesak i šljunak prema dijagramu za određivanje hidrauličke vrijednosti (Slika 4.8) poprima vrijednosti od odprilike  $10^{-2}$  m/s. Ovakvi iznosi odgovaraju i prijašnjim istraživanjima na ovom području, kao i podacima iz druge literature tako da se također koristila jedna vrijednost za cijelo istraživano područje. Hidraulička vrijednost od  $10^{-2}$  m/s odgovara maksimalnim 10 bodova za parametar C sukladno dijagramu za dodjelu bodova prikazanog na Slici 4.9.

### 6.1.6 Hidrološka uloga nagiba terena (S2)

Da bi se dobio nagib terena izražen u postocima potreban za određivanje bodova za parametar S2 izvršena je naredba *Slope (3D Analyst)*, a ulazna datoteka je bio digitalni model reljefa. Rezultati



ove naredbe prikazani su na Slici 6.7 - oznaka A, da bi se zatim napravila reklasifikacija s korakom od 1% nagiba pomoću naredbe *Reclassify (3D Analyst)*. Ovakva raster podloga (Slika 6.7 - oznaka B) se pretvorila u poligon pomoću naredbe *Raster to Polygon (Conversion)* čiji rezultati su prikazani na Slici 6.7 - oznaka C. Naredbom *Dissolve (3D Analyst)* poligoni su grupirani po istom kutu nagiba, na temelju čega su im dodijeljeni bodovi, sukladno dijagramu prikazanog na Slici 4.10.



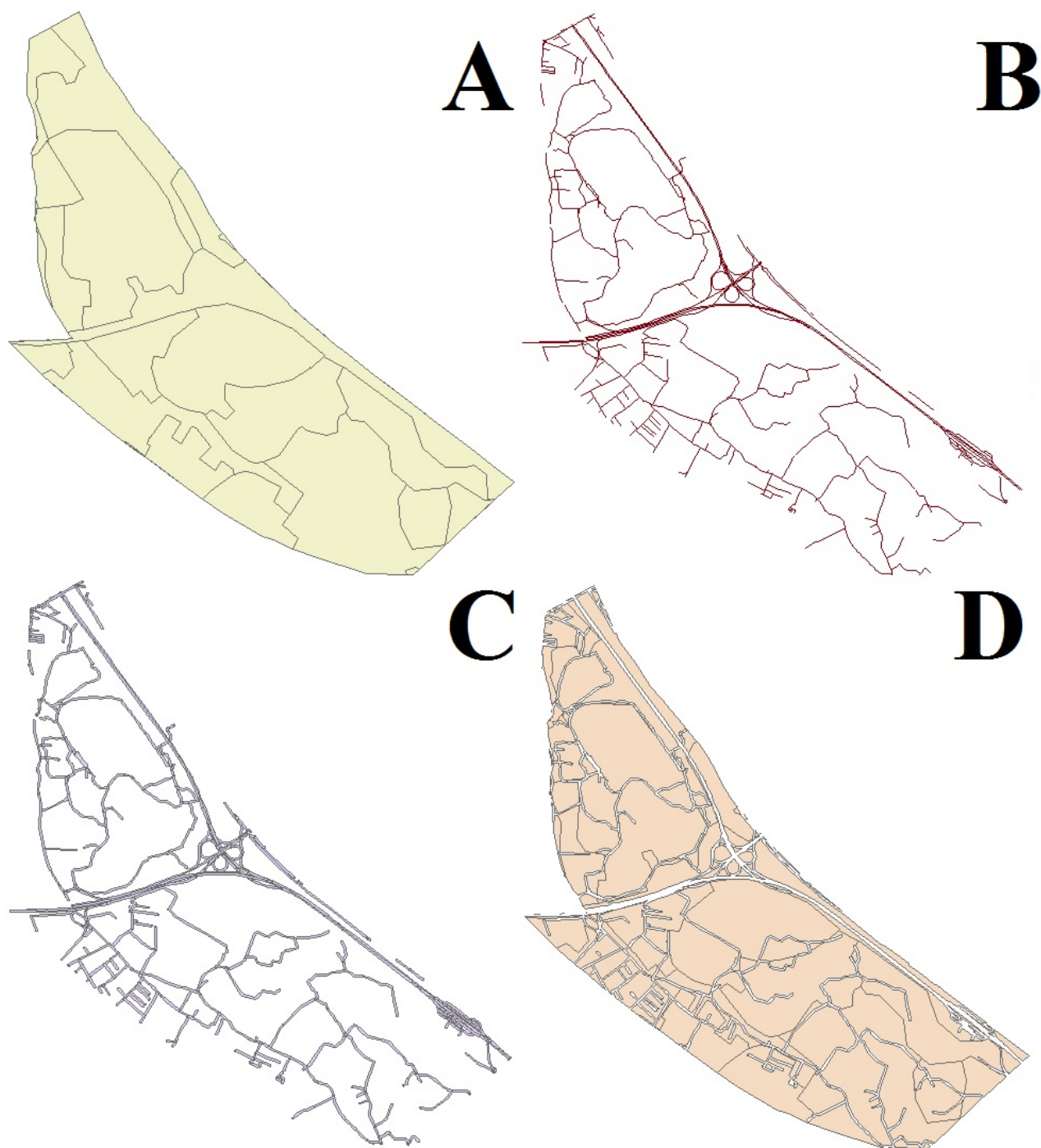
**Slika 6.7** Izrada faktorske karte hidrološke uloge nagiba terena (S2)

tumač: A - Slope naredba; B - reklasifikacija; C - naredba Raster to Polygon

### 6.1.7. Namjena zemljišta

Namjena zemljišta određena je prema podlozi CORINE Land Cover iz 2012 godine. Radi se o vektorskoj podlozi, gdje je za svaki poligon određena njegova namjena (Slika 6.8 - oznaka A). Podjela je razgrađena u tri stupnja, a za ovu svrhu korištena je ona najosnovnija s 4 klase te glasi: umjetne površine, poljoprivredne površine, šume i vode. Osim toga, s *OpenStreetMap*-a preuzeta je vektorska podloga s cestama (Slika 6.8 - oznaka B). Za cijeli parametar korišten je težinski koficijent 4 s obzirom da se radi o području koje je pod velikim antropogenim utjecajem, prije svega poljoprivrednih zemljišta i mnogih cesta. Osim toga, vodene površine koje su "otvorena rana" vodonosnika dobivaju na značaju na ovaj način. Umjetnim površinama dodijeljena su 4 boda, poljoprivrednim površinama 7, šumama 2 i vodenim površinama 10 bodova. Na *polyline* vektorskoj datoteci (ceste) napravljena je *buffer* zona od 10 metara pomoću naredbe *Buffer (Analyst)* (Slika 6.8 - oznaka C) koja predstavlja zonu utjecaja, a cijeloj zoni pripisano je 8 bodova. Nakon što je određena buffer zona za ceste, taj prostor je oduzet od CORINE Land Cover sloja (Slika 6.8 oznaka D), da bi se zatim nadodala *buffer* zona kao dodatna peta klasa kako je prikazano na završnoj faktorskoj karti. Na ovaj način zapravo je dobiven detaljniji prikaz umjetnih površina gdje svaka klasa ima svoju ocjenu, a ujedno se ističu ceste

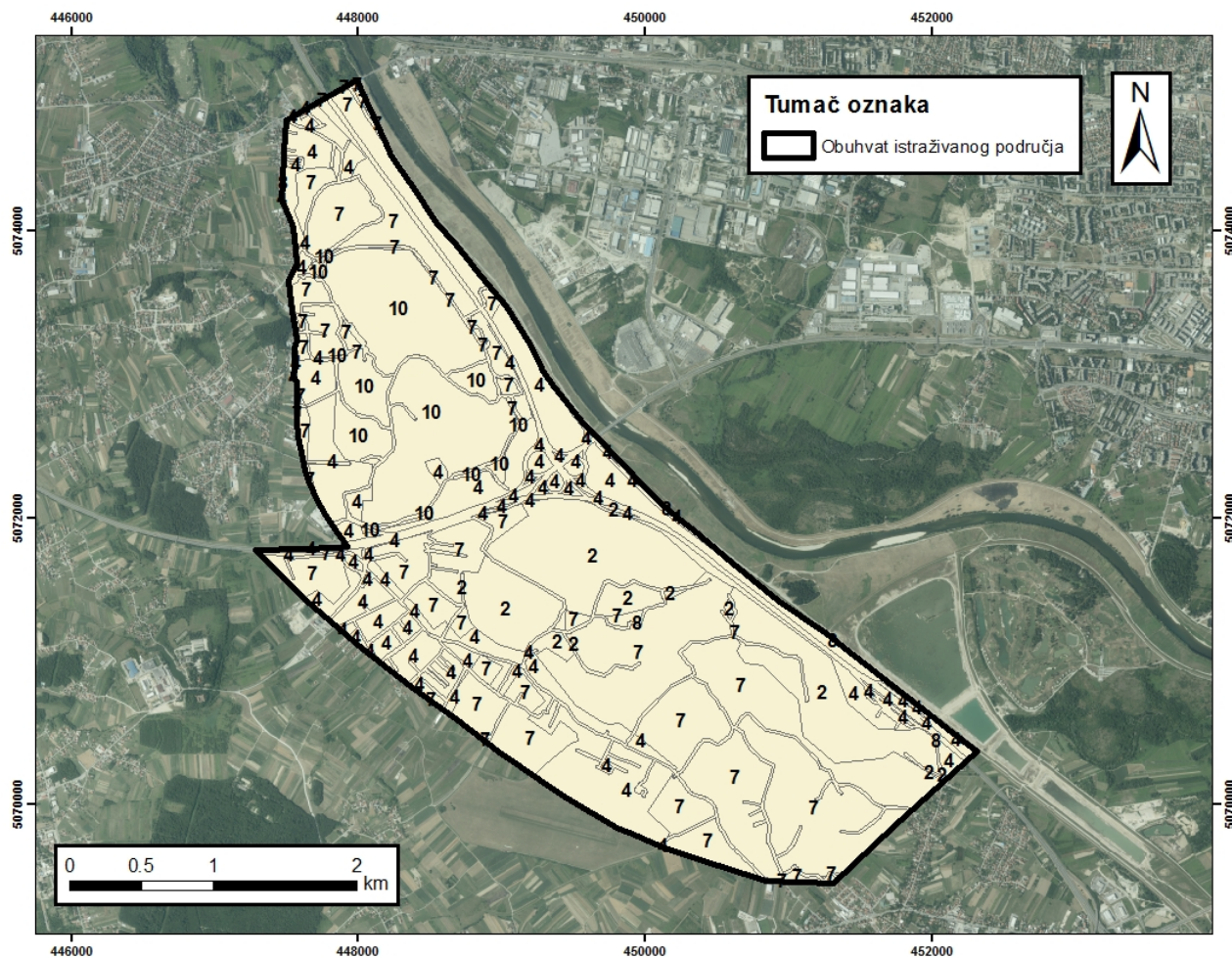
kao potencijalni onečišćivači sa svojim bodovima, sada različitim od ostalih umjetnih površina. Završna faktorska karta namjene zemljišta s pripadajućim bodovima prikazana je na Slici 6.9.



**Slika 6.8** Izrada faktorske karte namjene zemljišta

*tumač: A - CORINE Land Cover (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>); B - OpenStreetMap (<https://download.geofabrik.de/europe.html>);*

*C - naredba Buffer; D - naredba Clip*

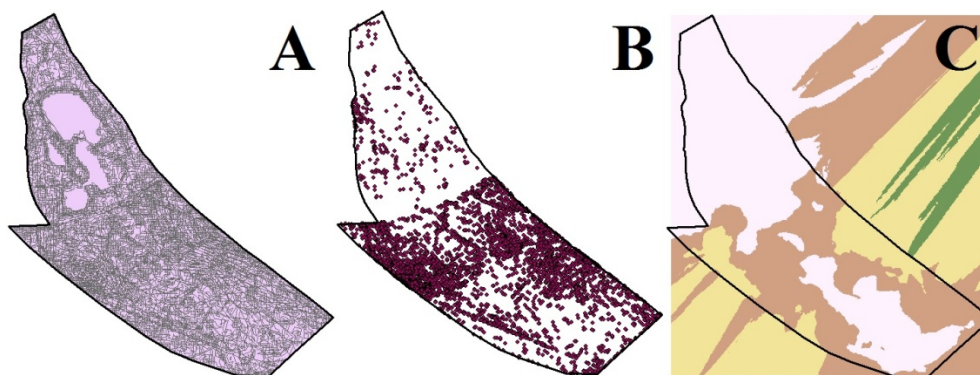


Slika 6.9 Faktorska karta namjene zemljišta

## 6.2. Karte prirodne ranjivosti

Nakon pripreme svih faktorskih karata u vektorskom obliku kako je objašnjeno u prethodnom poglavlju zbrojene su vrijednosti potrebnih parametara tj. "preklopljene" su sve faktorske karte. Naredbom *Union (Analysis)* zbrojene su bodovne vrijednosti svih faktorskih karata, a rezultati su poprimili vrijednosti od 30 do 300. Primjer vektorskog sloja nakon naredbe *Union* prikazan je na slici 6.10 - oznaka A. Naredbom *Feature to Point (Data Management)* svakom poligonu je pripisana točka kako je prikazano na Slici 6.10 - oznaka B. Na ovaj način svaka točka je dobila sumirani broj nakon čega su naredbom *Kriging (3D Analyst)* interpolirane vrijednosti kako bi se dobila rasterska podloga s rasponima bodova (Slika 6.10 - oznaka C).

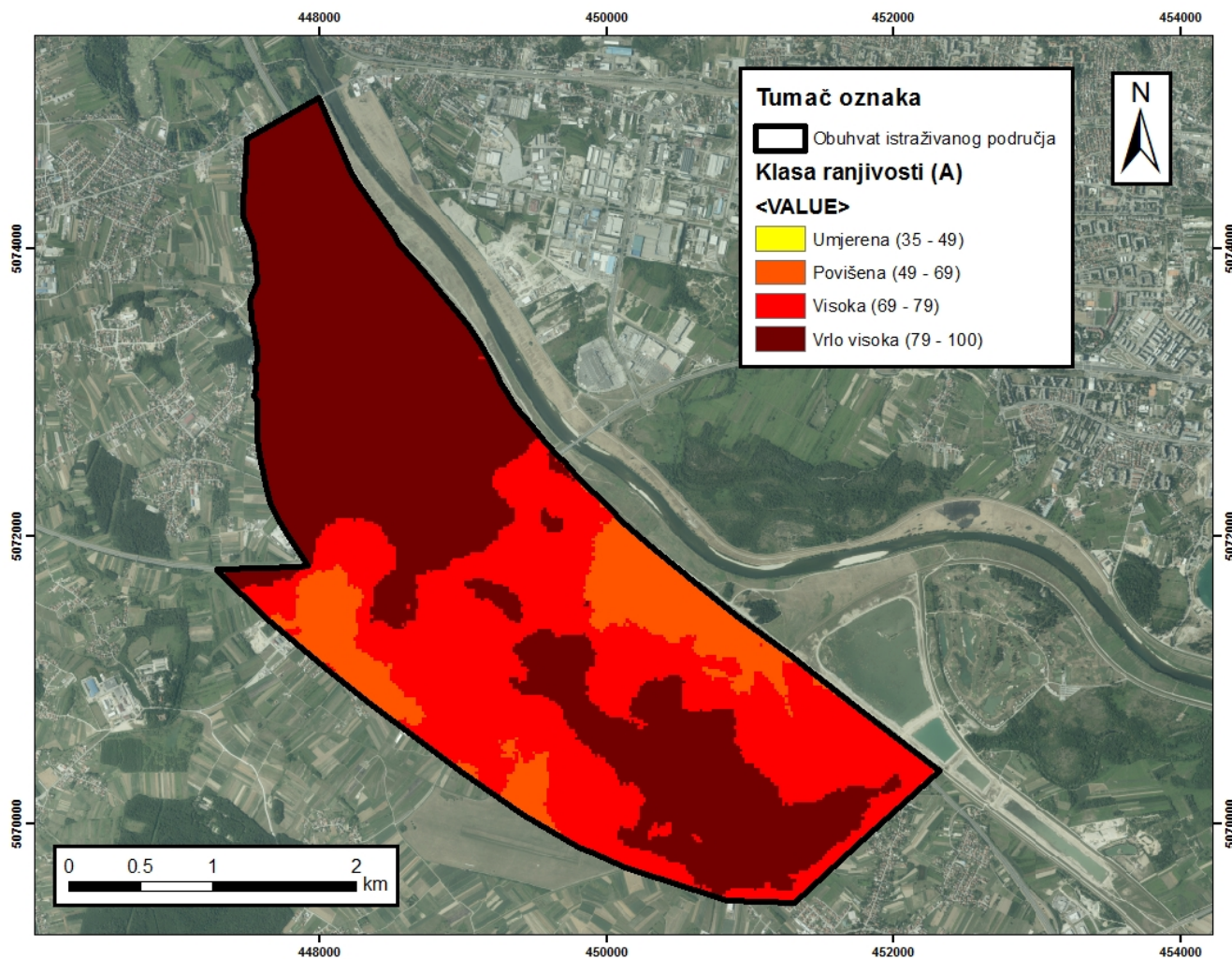




**Slika 6.10** Postupak izrade konačne karte

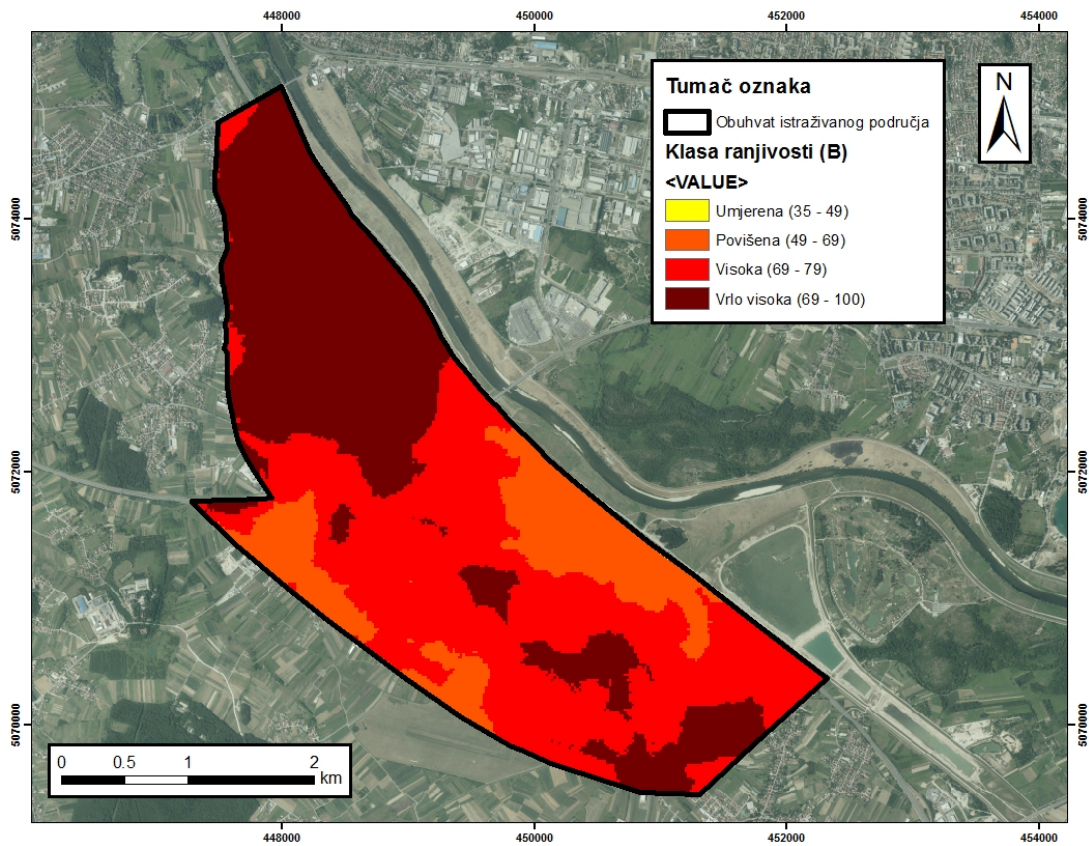
tumač: A - naredba Union; B - naredba Feature to Point; C - naredba Kriging

Konačne karte prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi kategorizirane su (nakon naredbe *Clip (Data Management)*) prema normaliziranim vrijednostima (Slika 4.12) za promatrane scenarije A, B i C, a prikazane su na slikama 6.11, 6.12 odnosno 6.13.

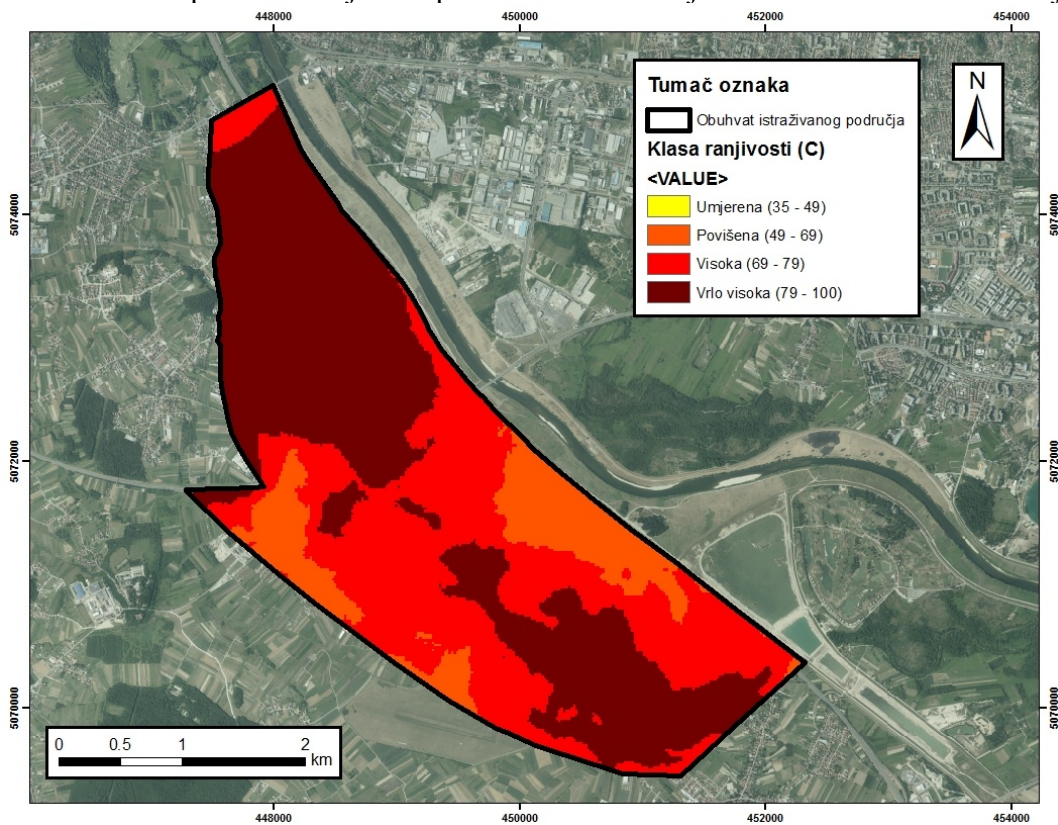


**Slika 6.11** Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij A





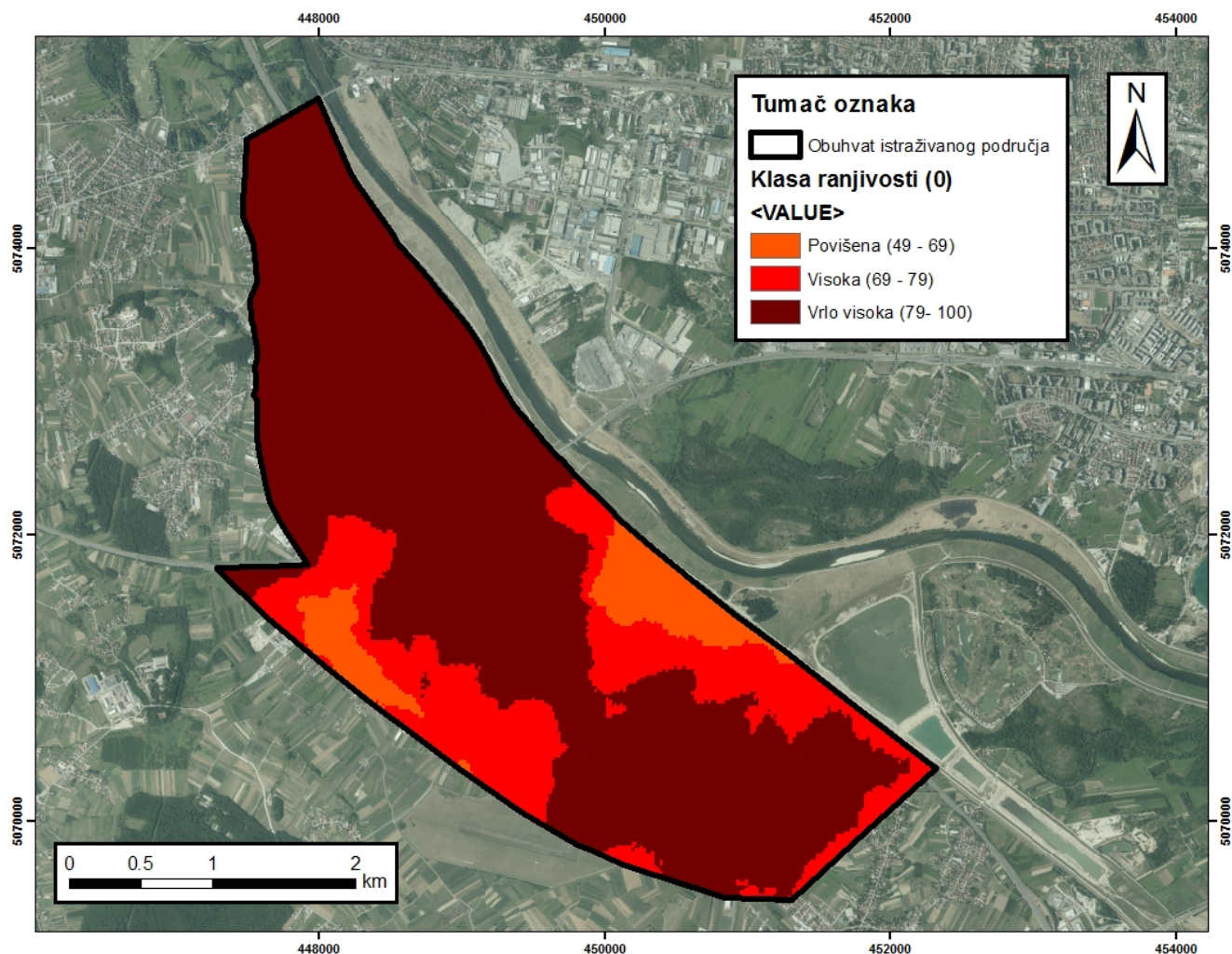
Slika 6.12 Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij B



Slika 6.13 Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij C



U svrhu utvrđivanja korisnosti i utjecaja dodavanja novog parametra (u ovom radu namjene zemljišta) izrađena je i karta prirodne ranjivosti prema uobičajenom postupku SINTACS metode (Slika 6.14). Sadrži prvotno predviđenih 7 parametara, a kako bi bila mjerodavna za usporedbu s modificiranom metodom klasificirana je na isti način odnosno pomoću normaliziranih vrijednosti. Također, u ovom scenariju nije simulirano crpljenje ili postojanje hidroelektrana stoga je najvjerođostojnija usporedba sa scenarijem A.



**Slika 6.14** Karta prirodne ranjivosti prema standardnoj SINTACS metodi - scenarij 0

## 7. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatrana su četiri scenarija za određivanje prirodne ranjivosti vodonosnika. Tri scenarija primjenom modificirane SINTACS metode: postojeće stanje tj. situacija bez crpljenja na planiranom vodocrpilištu Ježdovec (scenarij A - Slika 6.11), izgrađeno stanje planiranog vodocrpilišta Ježdovec (scenarij B - Slika 6.12) i izgrađeno stanje planiranog vodocrpilišta Ježdovec i hidroelektrana (scenarij C - Slika 6.13) te jedan scenarij primjenom standardne SINTACS metode: postojeće stanje tj. situacija bez crpljenja na planiranom vodocrpilištu Ježdovec (scenarij 0 - Slika 6.14). Tablica 7.1 prikazuje udio pojedine kategorije prirodne ranjivosti u cjelokupnom obuhvatu. Usporedbom scenarija 0 s preostale tri situacije, očigledno je da je nadodani parametar bio značajan. Naime, vrlo visoka kategorija čini više od tri četvrtine područja, dok u kombinaciji s visokom kategorijom zajedno zauzimaju više od 90% područja.

**Tablica 7.1** Udio pojedine klase (kategorije) ranjivosti za promatrane scenarije

Raspon ocjene	Klasa ranjivosti	"A"	"B"	"C"	"0"
<b>79-100</b>	<b>Vrlo visoka</b>	58,57 (%)	49,26 (%)	57,52 (%)	76,23 (%)
<b>69-79</b>	<b>Visoka</b>	29,9 (%)	33,97 (%)	29,20 (%)	16,24 (%)
<b>49-69</b>	<b>Povišena</b>	11,19 (%)	16,33 (%)	12,94 (%)	7,53 (%)
<b>35-49</b>	<b>Umjerena</b>	0,35 (%)	0,44 (%)	0,35 (%)	0 (%)

U uspoređivanju scenarija A, B i C jedini parametar koji se mijenjao je dubina do podzemne vode, kako je prikazano na slici 7.1 - oznaka A za situaciju bez izgrađenosti hidroelektrana odnosno oznaka B za situaciju s izgrađenošću hidroelektrana. Hidroelektrane povisuju razinu podzemne vode i samim time dovode do veće ranjivosti vodonosnika budući da se bodovi za ovaj parametar povećavaju što je dubina do podzemne vode manja. Uočavamo da u scenariju C kada su hidroelektrane aktivne, zona s vrlo visokom ranjivošću poprima veće vrijednosti. U situaciji bez crpljenja i s neaktivnim hidroelektranama vodonosnik je također veoma ranjiv (scenarij A), slično kao i kada se crpi uz utjecaj hidroelektrana. Razlog tome je što je promatrana najnepovoljnija situacija, odnosno razine podzemne vode definirane su za slučaj visokih voda (kako je prethodno objašnjeno) čije su razine slične onima koje uzrokuju hidroelektrane.



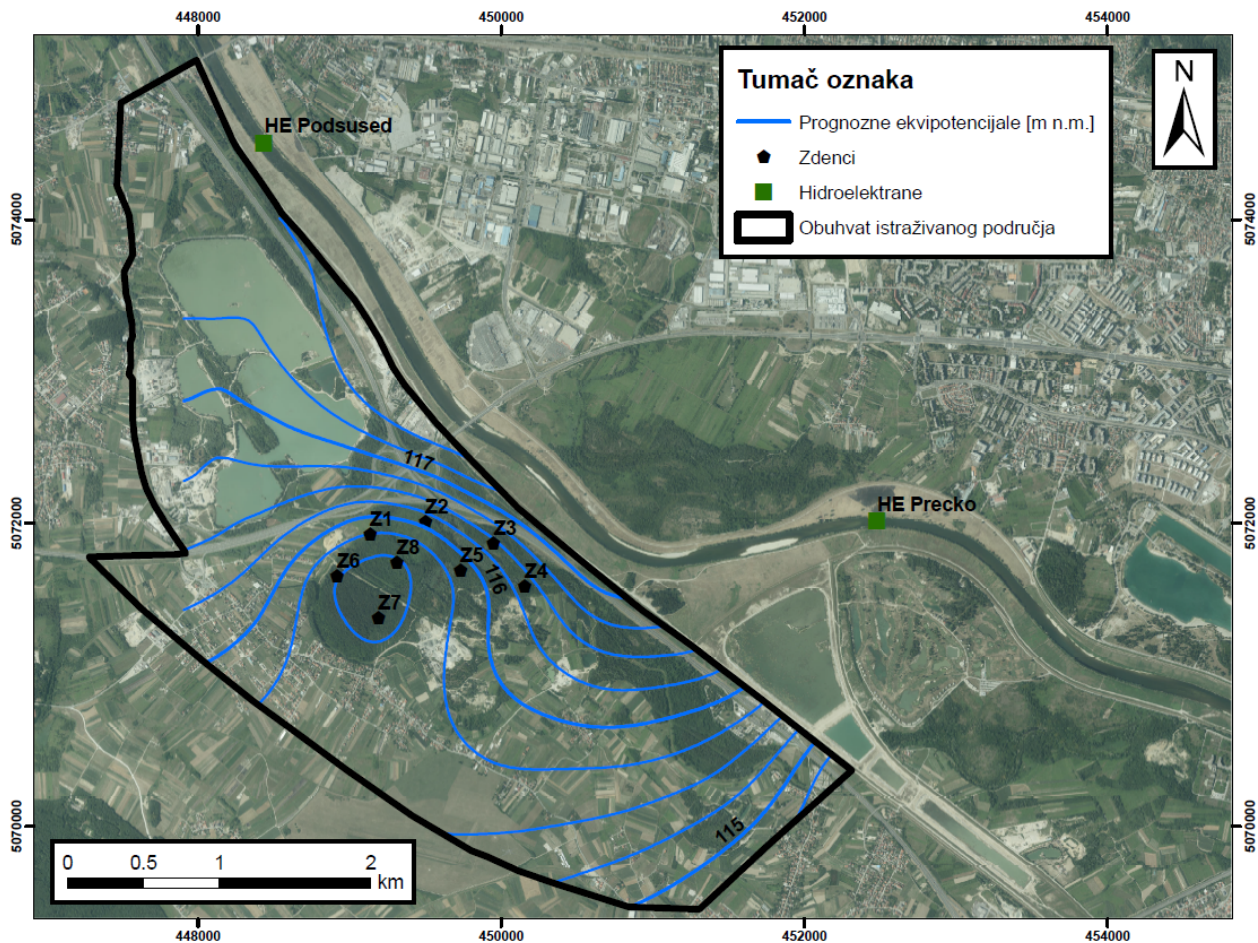
**Slika 7.1** Karta dubina do podzemne vode za stanje niskih razina podzemne vode (12.7.2012.) uz crpljenje  $Q=182$  l/s

tumač: *A - bez utjecaja hidroelektrana; B - s utjecajem hidroelektrana*

Iako se scenarij planiranog vodocrpilišta Ježdovec s prvotno zamišljenih 8 zdenaca s crpnom količinom od 325 l/s pokazao neizvediv za postojeće stanje izgrađenosti na rijeci Savi zbog prevelikog sniženja razina podzemne vode, rezultati prognoznog modela za izgrađeno stanje hidroelektrana na rijeci Savi i planiranog vodocrpilišta Ježdovec s kapacitetom od prvotno zamišljenih 325 l/s, potvrđuju kako je potencijalno moguće izvesti svih 8 prvotno predviđenih zdenaca, a vjerojatno i više s obzirom na prognozirane razine podzemne vode (Slika 7.2).

U smislu vodoopsrke hidroelektrane imaju izrazito pozitivan učinak jer podižu razinu podzemne vode i samim time omogućuju veću, dugotrajniju i pouzdaniju crpnu količinu, no povećavaju i ranjivost samog vodonosnika. Kako je prethodno opisano, situacija izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec s kapacitetom od 300 do 400 l/s, a koja je za postojeće stanje izgrađenosti bila neizvediva, za stanje izgrađenosti hidroelektrana postaje izvediva uz dodatna povećanja crpljenja - koja je potrebno ispitati dodatnim istražnim radovima. Veća debljina saturacije vodonosnika za stanje izgrađenosti hidroelektrana, kao jedan od važnijih parametara pri određivanju crpne količine i broja zdenaca, omogućuje znatno veće crpne količine.





**Slika 7.2** Prognozna karta ekvipotencijala za slučaj izgrađenosti hidroelektrana i režim rada planiranog vodocrpilišta Ježdovec s  $Q = 325$  l/s

Općenito, može se zaključiti da je ranjivost na promatranom području u klasi vrlo visoke u svim promatranim scenarijima budući da ova klasa uvijek zauzima 50 ili više posto udijela u promatranom području. Krupnije mjerilo i detaljnija interpretacija podataka omogućili su dobru distribuciju klasa ranjivosti i njihov kvalitetan prikaz. Također, modificirana verzija SINTACS metode kao i manje mjerilo omogućili su pouzdanije određivanje prirodne ranjivosti budući da antropogeni utjecaj (namjena zemljišta) ima velik značaj na promatranom području.

## **8. ZAHVALE**

*Zahvaljujemo našem mentoru, prof. dr.sc. Kristijanu Posavcu na strpljenju, uloženom vremenu te brojnim savjetima i podršci pri izradi ovog rada.*

## 9. POPIS LITERATURE

1. Bačani, A. (2006.) *Hidrogeologija I*, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
2. Bačani, A., Posavec, K., (2011.) *Metode operacijskih istraživanja u hidrogeologiji*, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
3. Bačani, A., Posavec, K., (2014.) *Elaborat o zonama zaštite izvorišta Grada Zagreb*, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
4. Civita, M., De Maio, M. (1997.) *SINTACS - Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia & automatizzazione*, Pitagora Editrice, Bologna
5. Čupić, D. (2011.) *Implementacija okvirne direktive o vodama u dijelu koji se odnosi na ranjivost vodonosnika na samoborskom području*, Magistarski rad, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
6. Davis, J.C. (2002.) *Statistics and Data Analysis in Geology*, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 638 p.
7. EGPV - Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske (1999.) *Ujednačavanje baze znanja i grafičke baze za dolinski dio Save*, Fond dokumentacije Hrvatskih voda
8. Hrvatski geološki institut, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju (2009.) *Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda u panonskom dijelu Republike Hrvatske*, Zagreb
9. Loborec, J. (2013.) *Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice*, Doktorska disertacija, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
10. Magiera, P. (2000.) *Methoden zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Groundwassers*, *Groundwasser*, 3, 103-114, Springer, Berlin/Heidelberg
11. McDonald, M.G., Harbaugh, A.W. (1988.) *A modular three - dimensional finite-difference ground - water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water - Resources Investigations*, book 6, chap. A1, 586 p
12. Nakić, Z. (2015.) *Zaštita podzemnih voda*, skripta, nastavni materijala RGN fakulteta, Zagreb
13. Nakić, Z., Ružičić, S., Posavec, K., Mileusnić, Parlov, J., Bačani, A., Durn, G. (2013.) *Conceptual model for groundwater status and risk assesment - case study of the Zagreb aquifer system* *GeologicaCroatica*, 66/1, str 55-75
14. Pavić, M., (2016.): *Zone sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec*, Diplomski rad, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu

15. Pollock, David W. (1989.) Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three - dimensional 213 Finite difference ground - water flow model, U.S. Geological Survey Open - File report 89-381, 188p
16. Posavec, K. (2006.) *Identifikacija i prognoza minimalnih razina podzemne vode zagrebačkoga aluvijalnog vodonosnika modelima recesijskih krivulja*, Doktorska disertacija, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
17. Posavec, K. (2013.) *Zagreb - hidrogeološki istražni radovi u svrhu određivanja mogućnosti korištenja vodocrpilišta Ježdovec za javnu vodoopskrbu*, Zagreb
18. Posavec, K. (2019.) *Program "Zagreb na Savi" - utjecaj na podzemne vode i pridružene ekonomske koristi*, Zbornik radova - HAZU
19. Posavec, K., Škudar, S. (2016.) *Korelacijsko, regresijsko i kros-korelacijsko modeliranje vremenskih nizova podataka u hidrogeologiji*, Matematičke metode i nazivlje u geologiji 2016
20. Posavec, K. (2017.) *Mathematical Modelling of Option 2A. Groundwater flow and contaminant transport modeling. Regulation and Development of Sava River in Zagreb - Feasibility Study, SEA and CBA*, IPA 2011 WBIF - Infrastructure Project Facility, Technical Assistance 3, Energy - Croatia - WB8-HR-ENE-11
21. *Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta*, Narodne novine 66, od 15.6.2011.
22. *Pravilnik o izmjenama pravilnika o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta*, Narodne novine 47, od 19.04.2013.
23. Šikić, K., Basch, O., Šimunić, A. (1978.) *Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100 000 - list Zagreb*, Institut geoloških istraživanja Zagreb
24. Šikić, K., Basch, O., Šimunić, A. (1979.) *Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100 000 - tumač za list Zagreb, L 33 - 80*. Institut geoloških istraživanja Zagreb
25. Šimunić, A. Basch, O. (1975.) *Stratigrafija kvartarnih sedimenata Zagrebačkog Posavlja*, geol vjesnik, 28, Zagreb
26. Vrba, J., Zaporozec, A. (eds) (1994.) *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, International Association of Hydrogeologists, Verlag Heinz Heise, 131 str., Hannover
27. WBIF IPF3 (2018.) *Strateška studija o utjecaju na okoliš za Program zaštite, uređenja i korištenja rijeke Save i zaobalja na dionici od granice s Republikom Slovenijom do Siska*, Zagreb



WEB izvori:

1. <https://geoportal.dgu.hr/> (1.3.2019.)
2. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012> (20.3.2019.)
3. <https://download.geofabrik.de/europe.html> (20.3.2019.)

## 10. SAŽETAK

Planirano vodocrpilište Ježdovec - karte prirodne ranjivosti i utjecaj  
planiranih hidroelektrana na razine podzemne vode

Ivan Bašić i Marko Sinčić

U radu se određuje prirodna ranjivost vodonosnika i utvrđuje se utjecaj hidroelektrana na podzemne vode na lokalitetu planiranog vodocrpilišta Ježdovec. Domena istraživanja sadrži predložene zone sanitarne zaštite i vodozaštitno područje - II. zona zaštite, kako je definirano prostornim planom Grada Zagreba. Tri scenarija prirodne ranjivosti određena su pomoću modificirane SINTACS metode koja uzima u obzir i namjenu zemljišta, a jedan scenarij pomoću standardne SINTACS metode. Simulacija crpljenja na istraživanom području provedena je numeričkim modelom u računalnom programu Visual Modflow. Prognozirana su sniženja razine podzemne vode za izgrađeno stanje vodocrpilišta te za izgrađeno stanje vodocrpilišta i hidroelektrana. Stanje podzemnih voda za razdoblje visokih voda i navedena prognozna sniženja korištena su za definiranje scenarija pri analizama prirodne ranjivosti koje su izvršene u GIS okruženju (ArcMap). Analiziran je utjecaj hidroelektrana na razine podzemne vode kao i ocjena prirodne ranjivosti, a promatrani scenariji međusobno su uspoređivani na temelju čega su donešeni zaključci.

Ključne riječi: prirodna ranjivost vodonosnika, razine podzemne vode, hidroelektrane, namjena zemljišta, vodoopskrba, Ježdovec

## 11. SUMMARY

Planned wellfield Ježdovec - aquifer vulnerability maps and planned hydro power plants influence on groundwater

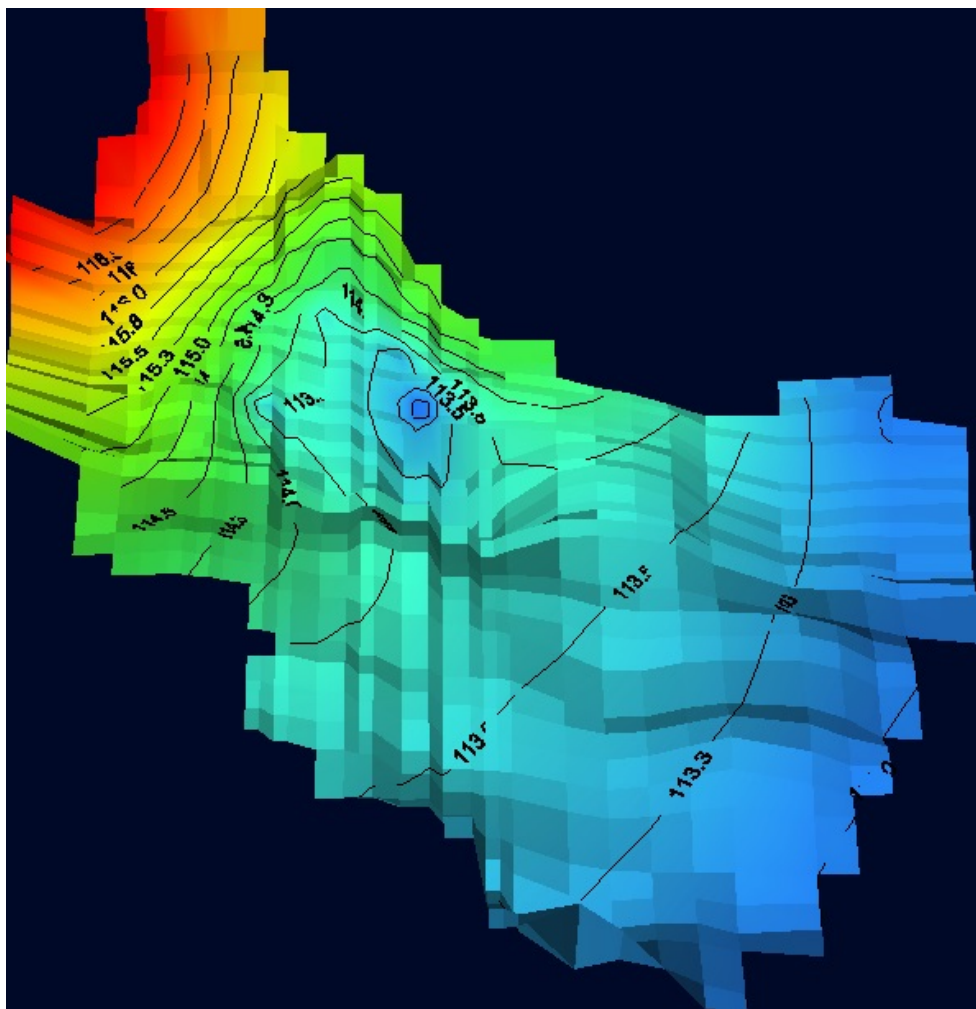
Ivan Bašić i Marko Sinčić

The subject of this research is to determine vulnerability of an aquifer and to distinct the influence of hydro power plants on groundwater at the research area of planned wellfield Ježdovec. The domain of research includes proposed sanitary protection zones and protected water area - II zone of protection, as it is defined in the spatial plan of the city of Zagreb. Three scenarios of groundwater vulnerability were determined using a modified SINTACS method, which took land use into consideration and one scenario was determined using the standard SINTACS method. Pumping wells simulation in the research area was done using a numerical model in Visual Modflow computer program. Predictions were made that there would be a decrease in groundwater level for a built environment of planned wellfield and for a built environment of planned wellfield with hydro power plants. Groundwater level for high water levels and the expected decrease of water level were used to define aquifer vulnerability scenarios which were made in GIS surroundings (ArcMap). Also, an analysis was made to determine the influence of hydro power plants on groundwater levels as well as aquifer vulnerability grade. Observed scenarios were mutually compared, and conclusions were conducted based on the results of the comparison.

Keywords: aquifer vulnerability, groundwater table, hydro power plants, land use, public wellfield, Ježdovec

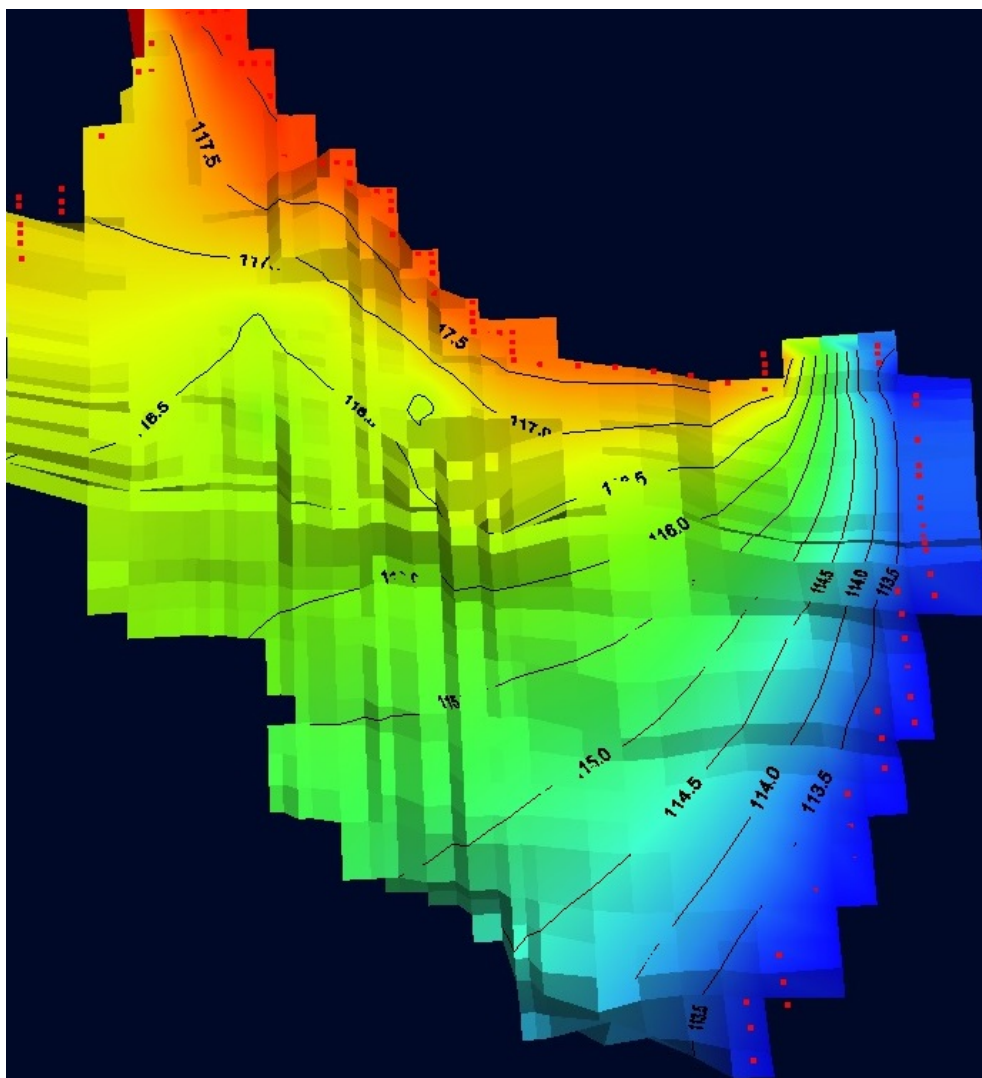
## PRILOZI

**Prilog 1.** Prognozni 3D model ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec bez utjecaja hidroelektrana

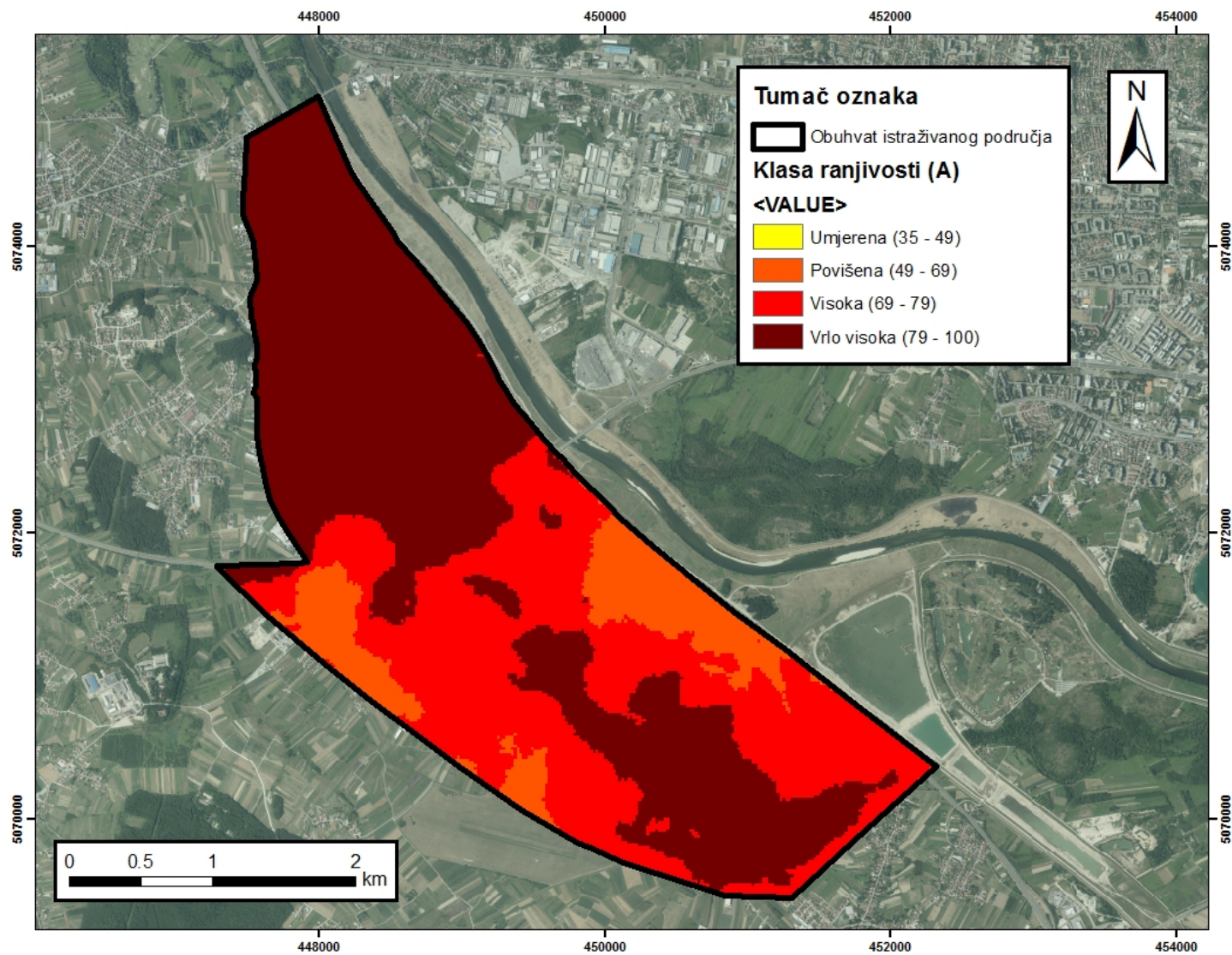




**Prilog 2.** Prognozni 3D model ekvipotencijala za niske razine podzemne vode za stanje izgrađenosti planiranog vodocrpilišta Ježdovec s utjecajem hidroelektrana

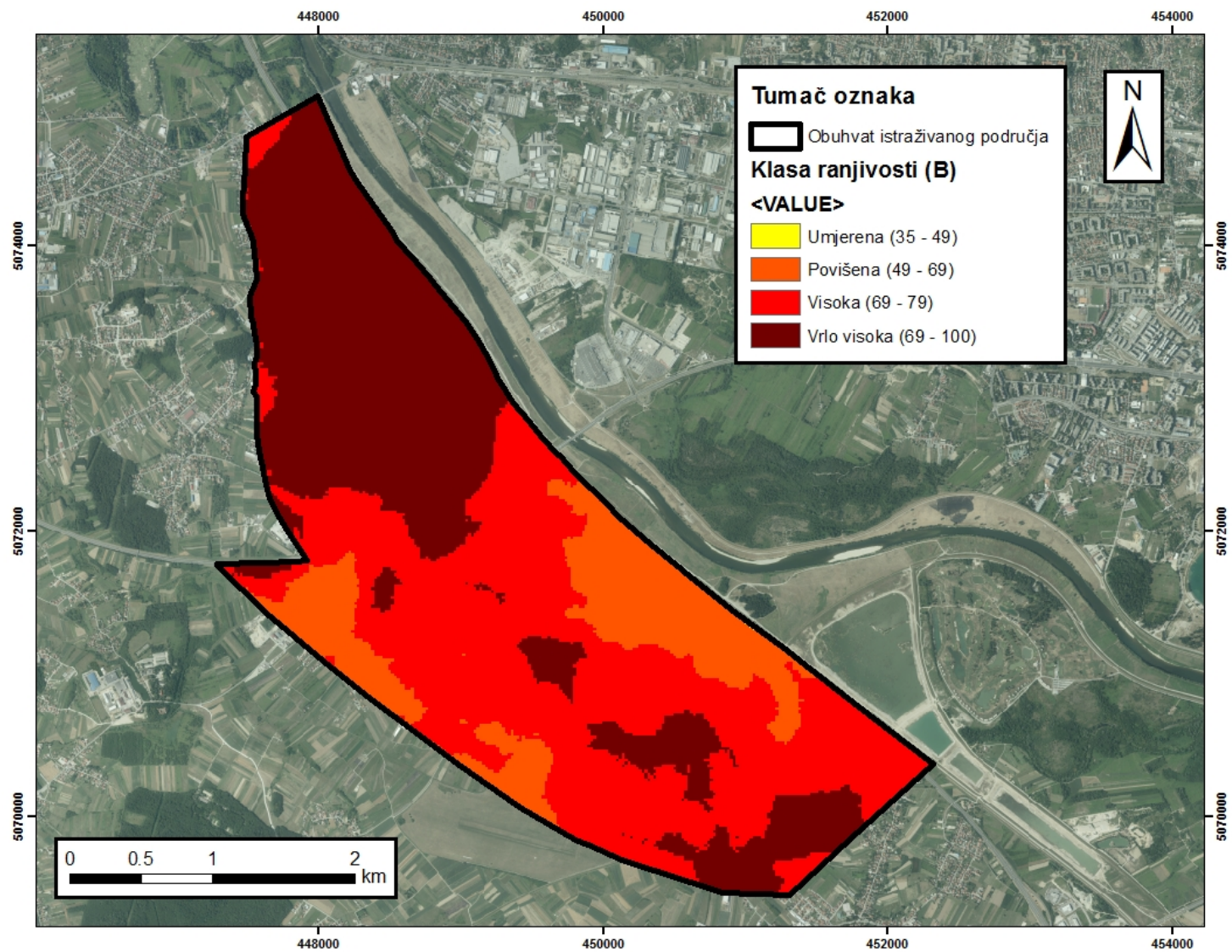


Prilog 3. Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij A

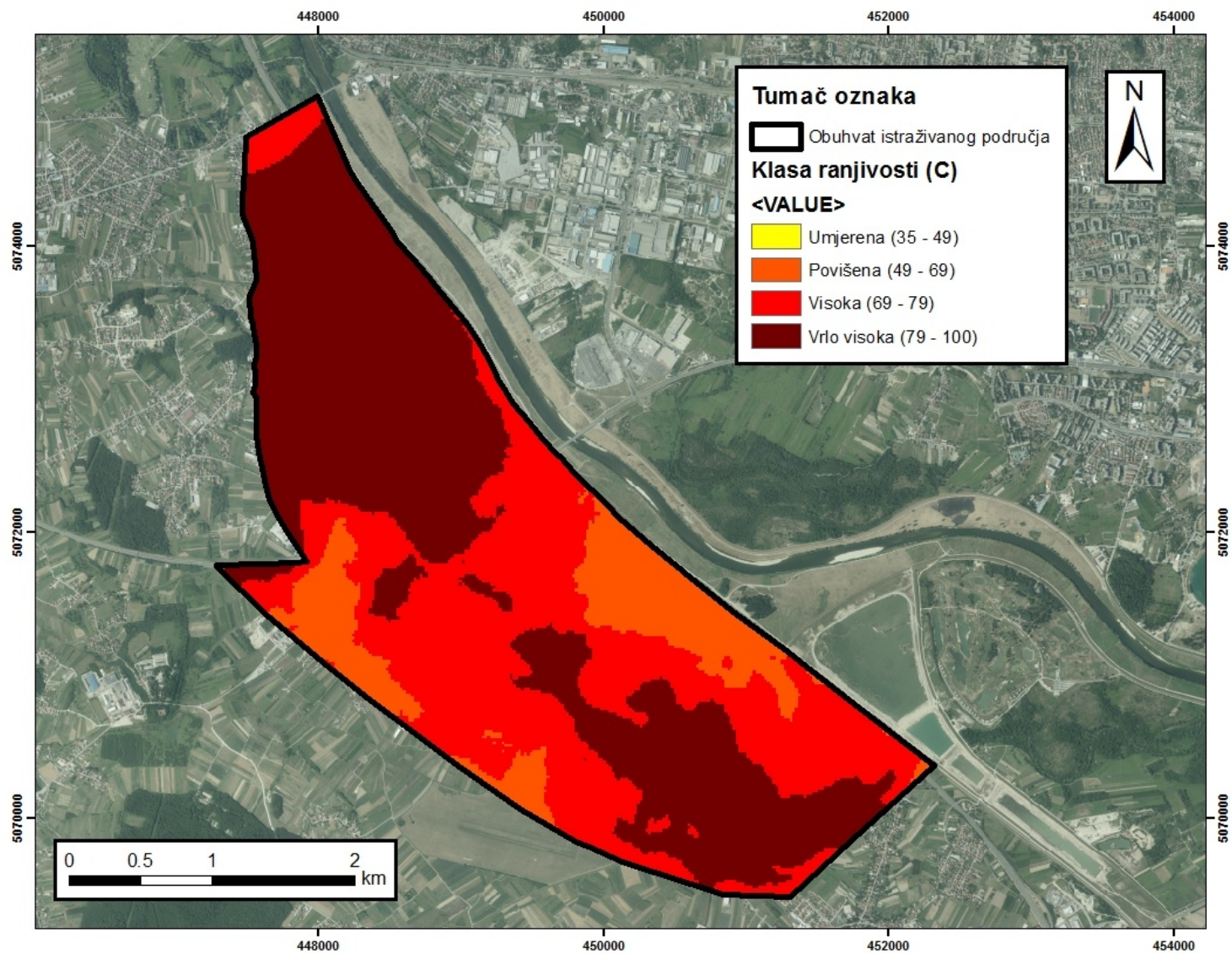




Prilog 4. Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij B

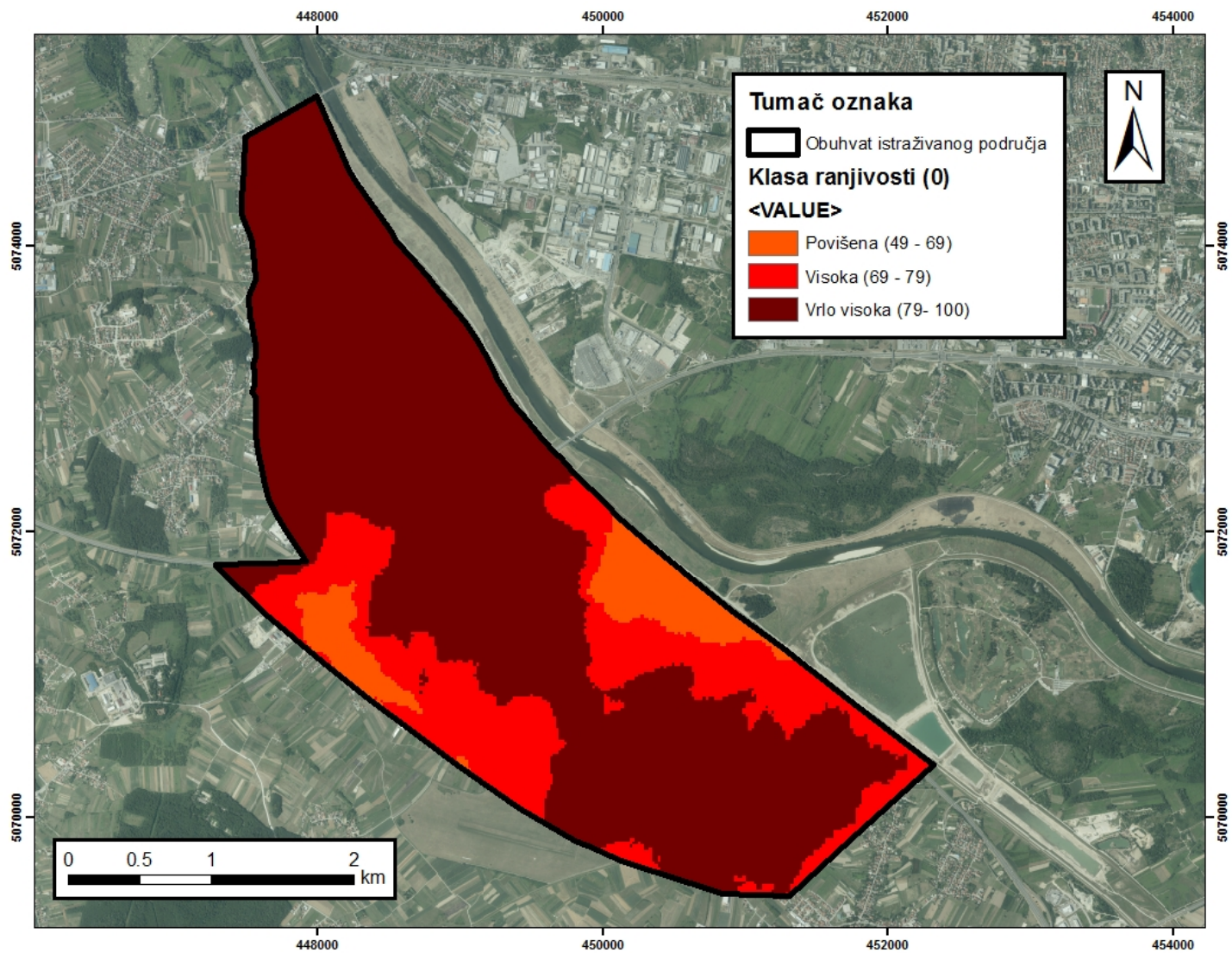


Prilog 5. Karta prirodne ranjivosti prema modificiranoj SINTACS metodi - scenarij C





Prilog 6. Karta prirodne ranjivosti prema standardnoj SINTACS metodi - scenarij 0





**Prilog 7.** Karta dubina do podzemne vode za stanje niskih razina podzemne vode (12.7.2012.) uz crpljenje  $Q=182$  l/s  
tumač: A - bez utjecaja hidroelektrana; B - s utjecajem hidroelektrana

