

Projektiranje zamjenskih zdenaca vodocrpilišta Bregana

Filipović, Vedrana

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:114797>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geološkog inženjerstva

**PROJEKTIRANJE ZAMJENSKIH ZDENACA VODOCRPILIŠTA
BREGANA**

Diplomski rad

Vedrana Filipović

GI 472

Zagreb, 2024.



KLASA: 602-01/24-01/142
URBROJ: 251-70-14-24-1
U Zagrebu, 20.09.2024.

Vedrana Filipović, studentica


RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/142, URBROJ: 251-70-14-24-1 od 14.07.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

PROJEKTIRANJE ZAMJENSKIH ZDENACA VODOCRPILIŠTA BREGANA

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Kristijan Posavec nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

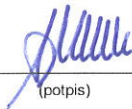


(potpis)

Prof.dr.sc. Kristijan Posavec

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

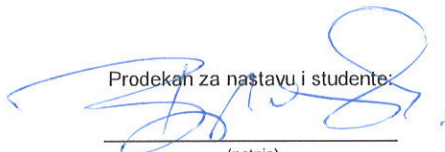


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Ana Maričić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

Zahvaljujem znanstveno-nastavnom kadru Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, posebno onima koji pokazuju kvalitetu i volju u prenošenju znanja.

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Kristijanu Posavcu, na korisnim sugestijama.

Zahvaljujem kolegicama i kolegama s kojima sam iskusila ljepote i stresove studiranja.

Zahvaljujem bliskim ljudima u svom životu, a zahvaljujem i sebi zbog neodustajanja.

Audaces fortuna iuvat.

PROJEKTIRANJE ZAMJENSKIH ZDENACA VODOCRPILIŠTA BREGANA

Vedrana Filipović

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Predmet istraživanja ovog diplomskog rada je projektiranje zamjenskih zdenaca vodocrpilišta Bregana koje zahvaća podzemnu vodu samoborsko-zaprešićkog vodonosnika. Vodonosnik je otvorenog tipa i međuzrnske poroznosti, izgrađen od kvartarnih aluvijalnih naslaga. Niske razine podzemne vode najznačajnije su za projektiranje vodocrpilišta jer ukazuju na količinu vode dostupnu tijekom cijele godine. Numeričkim modeliranjem tečenja podzemne vode simulirano je sniženje razina podzemne vode uzrokovano crpnom količinom triju zdenaca ukupnog iznosa 120 l/s. Prognozne razine podzemne vode nakon 365 dana simuliranog crpljenja nalaze se oko 1 m iznad kota gornjeg ruba filtra u zdencima.

Ključne riječi: samoborsko-zaprešićki vodonosnik, niske razine podzemne vode, numeričko modeliranje tečenja podzemne vode, projektiranje vodocrpilišta

Rad sadrži: 21 stranicu, 2 tablice, 16 slika i 18 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: prof. dr. sc. Kristijan Posavec

Ocjenjivači: prof. dr. sc. Kristijan Posavec

prof. dr. sc. Jelena Parlov

izv. prof. dr. sc. Dario Perković

WATER WELLS DESIGN AT THE BREGANA WELL FIELD

Vedrana Filipović

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The subject of this thesis is the design of new water wells at the Bregana well field where groundwater is pumped from the Samobor-Zaprešić aquifer. The aquifer is unconfined with intergranular porosity and is composed of Quaternary alluvial deposits. Low groundwater levels are most significant for the well field design because they indicate the amount of water available throughout the year. Numerical groundwater flow modeling simulated the drawdown of groundwater levels caused by the pumping rate of three water wells with a total rate of 120 l/s. After 365 days of simulated pumping, the predicted groundwater levels are approximately 1 m above the elevations of the top of the well screen.

Keywords: Samobor-Zaprešić aquifer, low groundwater levels, numerical groundwater flow modeling, well field design

Thesis contains: 21 pages, 2 tables, 16 figures and 18 references

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Professor Kristijan Posavec, PhD

Reviewers: Professor Kristijan Posavec, PhD
Professor Jelena Parlov, PhD
Associate Professor Dario Perković, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA.....	2
2.1. Geografske značajke područja istraživanja	2
2.2. Geološke značajke područja istraživanja	3
2.3. Hidrogeološke značajke područja istraživanja	4
3. KABINETSKI VODOISTRAŽNI RADOVI.....	5
3.1. Analiza saturiranog dijela vodonosnika i određivanje lokacije zamjenskih zdenaca vodocrpilišta Bregana.....	6
3.2. Identifikacija utjecaja crpljenja zamjenskih zdenaca na razine podzemne vode vodonosnika	15
4. ZAKLJUČAK.....	19
5. POPIS LITERATURE.....	20

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Geografski položaj i smještaj područja istraživanja	2
Slika 2-2. Isječak lista Zagreb <i>Osnovne geološke karte</i> (Šikić et al., 1978), ostale jedinice vidljive na karti nisu opisane jer se nalaze izvan područja istraživanja	3
Slika 3-1. Lokacije strukturnih bušotina.....	6
Slika 3-2. Litološki stup na području istraživanja (EGPV, 1988 – danas).....	7
Slika 3-3. Karta izostrata podine vodonosnika.....	8
Slika 3-4. Nivogram piezometra 453.....	9
Slika 3-5. Nivogrami piezometara 453 i 5245 i hidroloških postaja (HP) <i>Drenje Brdovečko</i> i <i>Podsused žičara</i>	9
Slika 3-6. Lokacije piezometara i hidroloških postaja (stvarnih i virtualnih)	10
Slika 3-7. Karta ekvipotencijala niskih voda na datum 7. rujna 2017. godine	11
Slika 3-8. Karta izopaha saturiranog dijela vodonosnika na datum 7. rujna 2017. godine .	12
Slika 3-9. Lokacija zamjenskih zdenaca.....	13
Slika 3-10. Lokacije potencijalnih onečišćivača (Ministarstvo zaštite okoliša i zelene tranzicije, 2024).....	13
Slika 3-11. Lokacija zamjenskih zdenaca u odnosu na katastarske čestice (Državna geodetska uprava i Ministarstvo pravosuđa, uprave i digitalne transformacije, 2024)	14
Slika 3-12. Lateralno prostiranje domene modela, podloga je isječak lista Zagreb <i>Osnovne geološke karte</i> (Šikić et al., 1978)	15
Slika 3-13. Granični uvjeti domene modela	16
Slika 3-14. Prognozne ekvipotencijale	18

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Izračun crpne količine	17
Tablica 3-2. Lokacijske značajke zdenaca	17

1. UVOD

Hrvatski zavod za javno zdravstvo (2024) procjenjuje da je 87,8 % stanovništva Republike Hrvatske priključeno na javnu vodoopskrbu (preostalo stanovništvo koristi lokalnu ili individualnu vodoopskrbu), a u 76 % zona opskrbe u javnoj vodoopskrbi koristi se podzemna voda. Iz navedenih podataka jasan je značaj podzemnih voda za potrebe vodoopskrbe u Republici Hrvatskoj.

Cilj ovog diplomskog rada je istražiti raspoložive crpne količine podzemne vode iz otvorenog aluvijalnog vodonosnika za potrebe vodoopskrbe na vodocrpilištu Bregana. Parametar koji ukazuje na količinsko stanje podzemne vode u aluvijalnom vodonosniku je razina podzemne vode (Hrvatske vode, 2023). Crpljenjem podzemne vode iz vodonosnika dolazi do sniženja razine podzemne vode, stoga je potrebno projektirati optimalne crpne količine na vodocrpilištu kako ne bi došlo do sniženja razine podzemne vode ispod kote gornjeg ruba filtra u zdencu. Niske razine podzemne vode najznačajnije su za projektiranje jer ukazuju na količinu vode dostupnu tijekom cijele godine, za razliku od srednjih i visokih razina koje su kraćeg trajanja i količinom vode ne predstavljaju problem za potrebe vodoopskrbe.

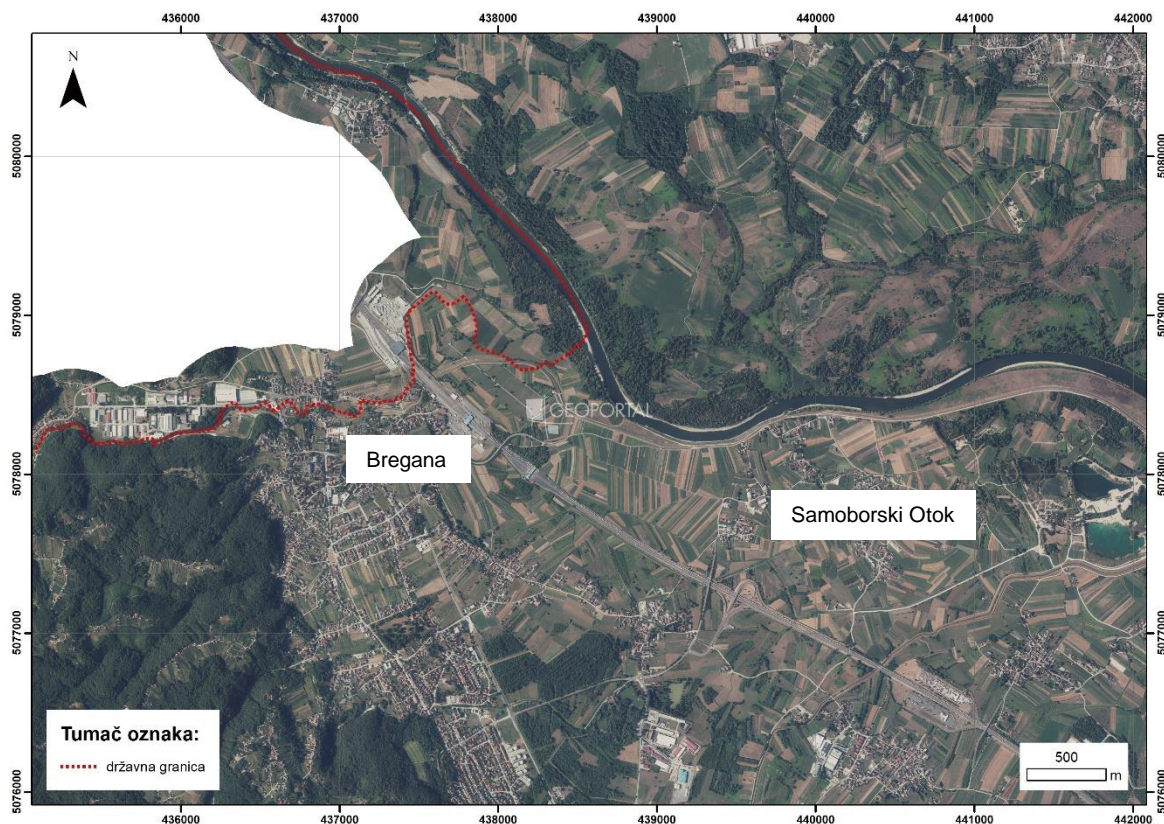
Postojeće vodocrpilište Bregana sastoji se od triju zdenaca (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014), njime upravlja Vodoopskrba i odvodnja d. o. o. Vodocrpilište Bregana zajedno s vodocrpilištem Strmec čini zonu opskrbe Strmec koja vodom opskrbljuje 50 okolnih naselja (Vodoopskrba i odvodnja d. o. o., 2024).

Diplomski rad izrađen je na temelju kabinetskog istraživanja postojećih podataka. Korišteni su podaci iz baze podataka *Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske* (EGPV-GIS): litološki stupovi strukturnih bušotina te petogodišnji vremenski nizovi razina podzemne vode samoborsko-zaprešićkog vodonosnika i vodostaja rijeke Save mjereni od 1. siječnja 2016. do 31. prosinca 2020. godine. Pri izradi rada korišteni su računalni programi: *ArcMap 10.1* za izradu GIS projekta, *Surfer 8* za interpolaciju vrijednosti točkastih podataka, *Visual MODFLOW Flex 9.0* za modeliranje tečenja podzemne vode i *Microsoft Excel* za izradu grafova i izračune. Analizom saturiranog dijela vodonosnika određena je lokacija zamjenskih zdenaca te je identificiran utjecaj crpljenja zamjenskih zdenaca na razine podzemne vode vodonosnika.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

2.1. Geografske značajke područja istraživanja

Područje istraživanja je zapadni dio samoborsko-zaprešićkog vodonosnika koji se nalazi na području naselja Bregane i Samoborskog Otoka (slika 2-1), u sastavu Grada Samobora, na području Zagrebačke županije. Nalazi se na desnom zaobalju rijeke Save. U blizini se nalaze rijeka Bregana, državna granica s Republikom Slovenijom i autocesta Bregana – Zagreb – Lipovac. Samoborsko-zaprešićki vodonosnik pruža se pravcem sjeverozapad – jugoistok, duž rijeke Save, a omeđen je Breganom na zapadu, Podsusedom na istoku, Marijagoričkim brdima na sjeveru te Žumberačkim i Samoborskim gorjem na jugu (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014).

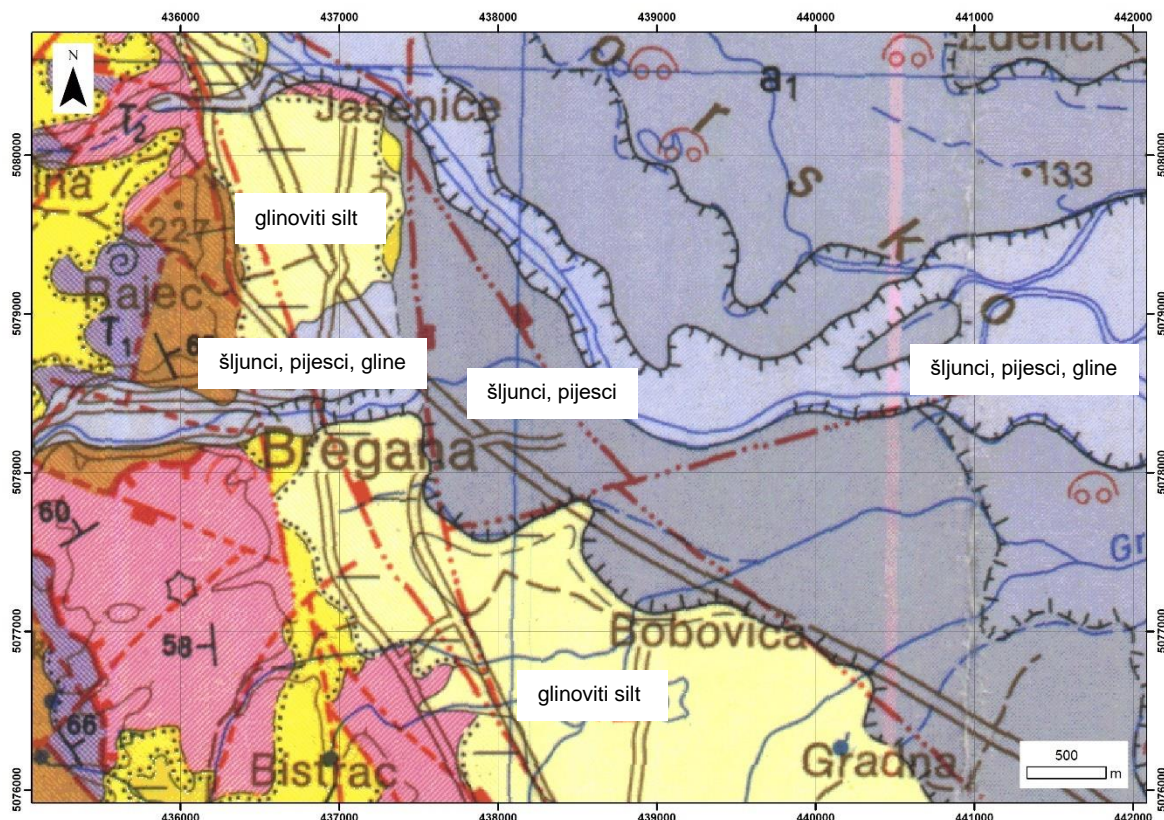


Slika 2-1. Geografski položaj i smještaj područja istraživanja

2.2. Geološke značajke područja istraživanja

Litostratigrafske jedinice kartirane na području istraživanja (slika 2-2) su:

- holocenski aluvij (šljunci, pijesci, gline)
- holocenska srednja savska terasa (šljunci, pijesci)
- pleistocenski kopneni beskarbonatni les (glinoviti silt) (Šikić et al., 1978).



Slika 2-2. Isječak lista Zagreb *Osnovne geološke karte* (Šikić et al., 1978), ostale jedinice vidljive na karti nisu opisane jer se nalaze izvan područja istraživanja

Glinoviti silt je sediment lesnog porijekla s vrlo malim postotkom kalcijevog karbonata, taložen je tijekom pleistocenskih glacijacija nakon čega je erodiran i pretaložen tijekom interglacijacija i holocena (Šikić et al., 1979). Srednja savska terasa sastoji se od izmjena krupnozrnatih šljunaka i pijesaka, a nastala je usijecanjem rijeke Save u aluvijalne sedimente koje je ranije nanijela, najzastupljenije su dobro zaobljene i izdužene valutice karbonatnih stijena (Šikić et al., 1979). Šljunci, pijesci, gline su recentni aluvijalni nanosi rijeke Bregane i rijeke Save (Šikić et al., 1979).

2.3. Hidrogeološke značajke područja istraživanja

Samoborsko-zaprešićki vodonosnik je otvorenog tipa, dakle gornja granica saturiranog dijela vodonosnika je vodno lice pod atmosferskim tlakom (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014). Zapravo se radi o vodonosnom sustavu izgrađenom od:

- plićeg vodonosnika holocenske starosti, pretežno građenog od savskih aluvijalnih naslaga: šljunka i pijeska
- dubljeg vodonosnika srednje i mlađe pleistocenske starosti, građenog od jezersko-barskih naslaga s lateralnim i vertikalnim izmjenama šljunka, pijeska i gline (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014).

S obzirom da su plići i dublji vodonosnik hidraulički povezani, diferencijacija između njih je isključivo stratigrafska i nije vidljiva na litološkim stupovima, stoga je ispravno reći da se radi o jednom vodonosniku (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014).

Krovinske naslage vodonosnika pretežno su građene od gline i praha (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014) i vrlo su tanke pa se prihranjivanje vodonosnika odvija infiltracijom oborina (Hrvatske vode, 2023). Korito rijeke Save usječeno je u vodonosnik zbog čega postoji izravni kontakt rijeke Save i podzemne vode pa rijeka Sava prihranjuje ili drenira vodonosnik (Hrvatske vode, 2023). Analizom karata ekvipotencijala utvrđeno je da Sava za vrijeme visokih voda prihranjuje vodonosnik duž cijelog toka, dok za vrijeme srednjih i niskih voda na pojedinim dijelovima toka drenira vodonosnik (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014). Usporedbom nivograma rijeke Save s nivogramima piezometara u blizini rijeke Save vidljiva je dobra povezanost vodostaja Save i razina podzemne vode samoborsko-zaprešićkog vodonosnika (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014). Prihranjivanje vodonosnika se osim infiltracijom iz rijeke Save i infiltracijom oborina, ostvaruje i infiltracijom iz rijeke Sutle, infiltracijom iz propusne vodoopskrbne i kanalizacijske mreže te dotjecanjem iz aluvija Krapine (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014).

Velike hidrauličke vodljivosti naslaga u skladu su s njihovim litološkim sastavom (Brkić i Čakarun, 1998). Generalni smjer tečenja podzemne vode prati tok rijeke Save na tom području, što je smjer od zapada prema istoku/jugoistoku (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014).

3. KABINETSKI VODOISTRAŽNI RADOVI

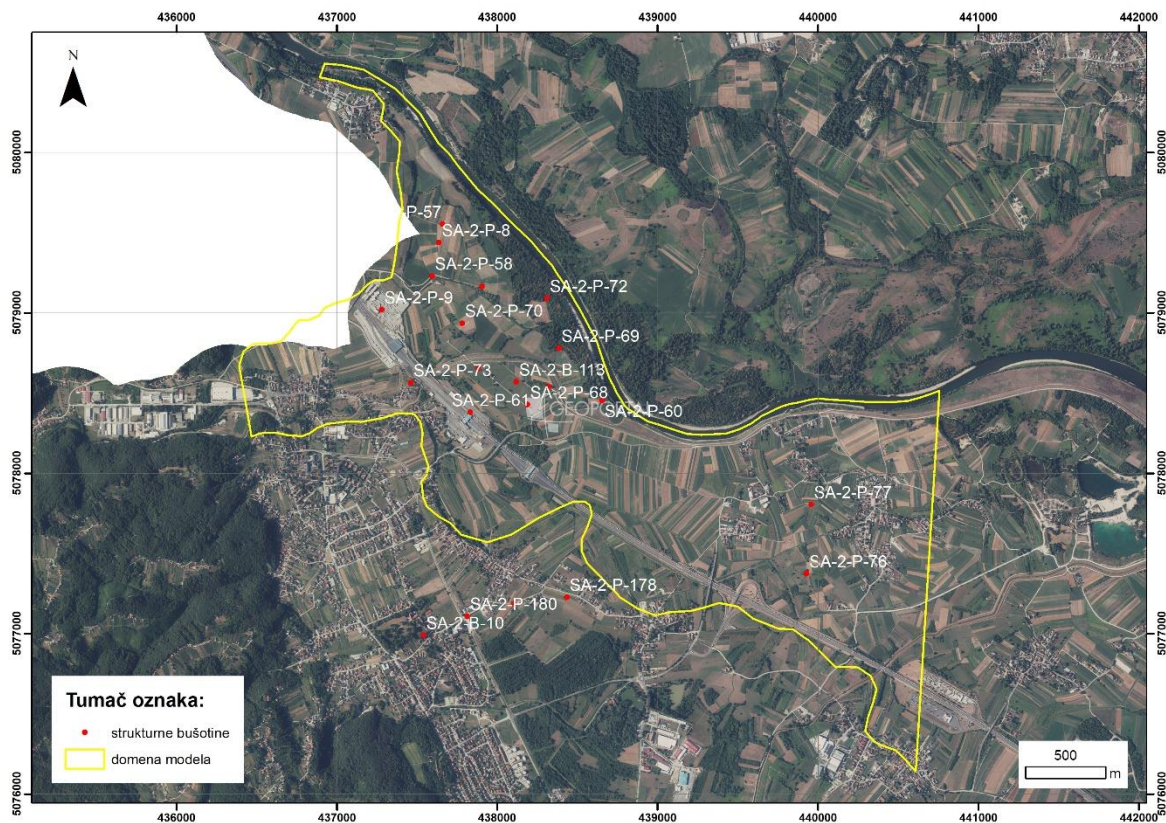
Budući da je geografski informacijski sustav (GIS) osnovni alat za organizaciju prostornih podataka, u računalnom programu *ArcMap 10.1* u okviru GIS projekta izrađeni su kartografski prikazi. Korištene su kartografske podloge preuzete s Geoportala Državne geodetske uprave Republike Hrvatske: *Hrvatska osnovna karta (HOK)*, *Topografska karta 1 : 25 000 (TK25)* i *Digitalna ortofoto karta (DOF5 2022)* izrađena na temelju avio snimaka iz 2022. godine (Državna geodetska uprava, 2024).

Za analizu saturiranog dijela vodonosnika korišteni su podaci iz baze podataka *Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske (EGPV-GIS)*: litološki stupovi strukturnih bušotina te petogodišnji vremenski nizovi razina podzemne vode samoborsko-zaprešićkog vodonosnika i vodostaja rijeke Save mjereni od 1. siječnja 2016. do 31. prosinca 2020. godine.

Za identifikaciju utjecaja crpljenja zamjenskih zdenaca na razine podzemne vode vodonosnika modelirano je tečenje podzemne vode u računalnom programu *Visual MODFLOW Flex 9.0* koji daje numeričko rješenje jednadžbe tečenja podzemne vode koristeći numeričku metodu konačnih razlika (Waterloo Hydrogeologic, 2016). Rješenje modela tečenja podzemne vode je raspodjela potencijala, tj. razina podzemne vode u prostoru i vremenu koja je grafički prikazana ekvipotencijalama (Bačani i Posavec, 2011). Domena modela diskretizirana je na ortogonalnu mrežu sastavljenu od diskretnih elemenata, a uvjet za modeliranje je kontinuiranost slojeva kroz cijelu domenu modela (Waterloo Hydrogeologic, 2016). Budući da nije rađena diskretizacija vremena u vremenske odsječke, modelirano je stacionarno tečenje.

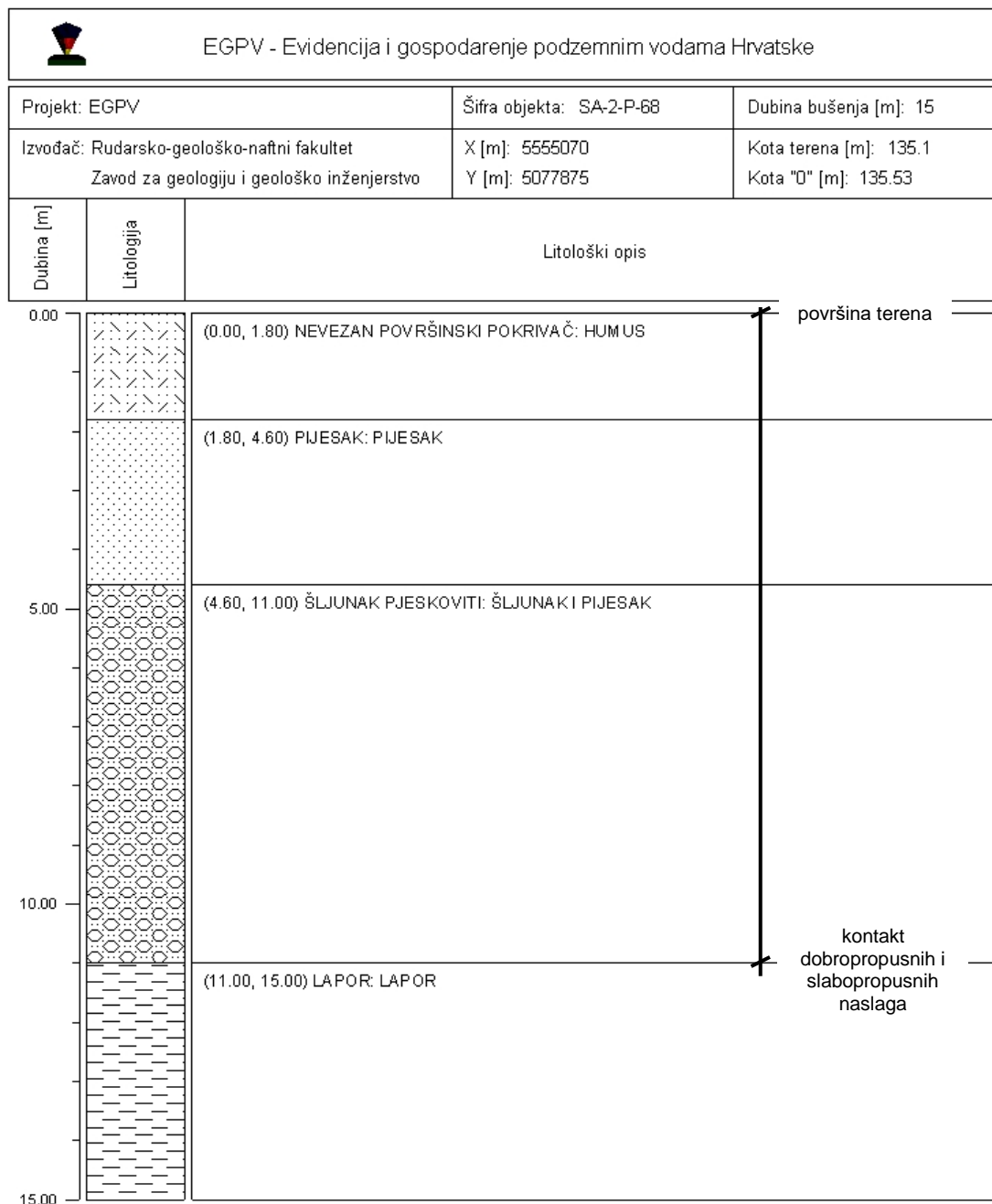
3.1. Analiza saturiranog dijela vodonosnika i određivanje lokacije zamjenskih zdenaca vodocrpilišta Bregana

Izradi karte izopaha saturiranog dijela vodonosnika prethodi izrada karte izostrata podine vodonosnika i karte ekvipotencijala. Na području istraživanja nalazi se 21 strukturna bušotina čije su lokacije prikazane na slici 3-1.



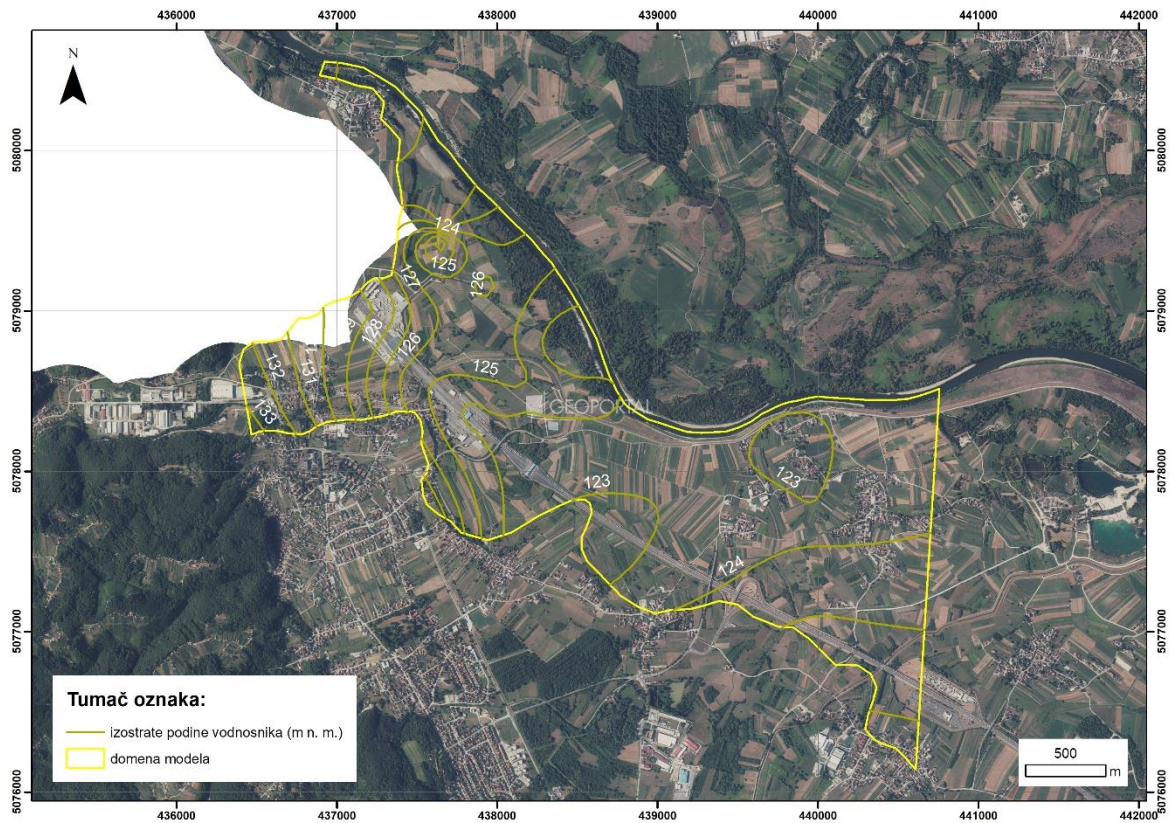
Slika 3-1. Lokacije strukturnih bušotina

Na litološkim stupovima strukturnih bušotina vidljiva je debljina šljunkovitih i pjeskovitih naslaga koja na području istraživanja prosječno iznosi 8,5 m. Na temelju litoloških stupova (slika 3-2) iščitane su dubine od površine terena do kontakta dobropropusnih šljunkovito-pjeskovitih naslaga i slabopropusnih podinskih naslaga izgrađenih od lapora, praha ili gline.



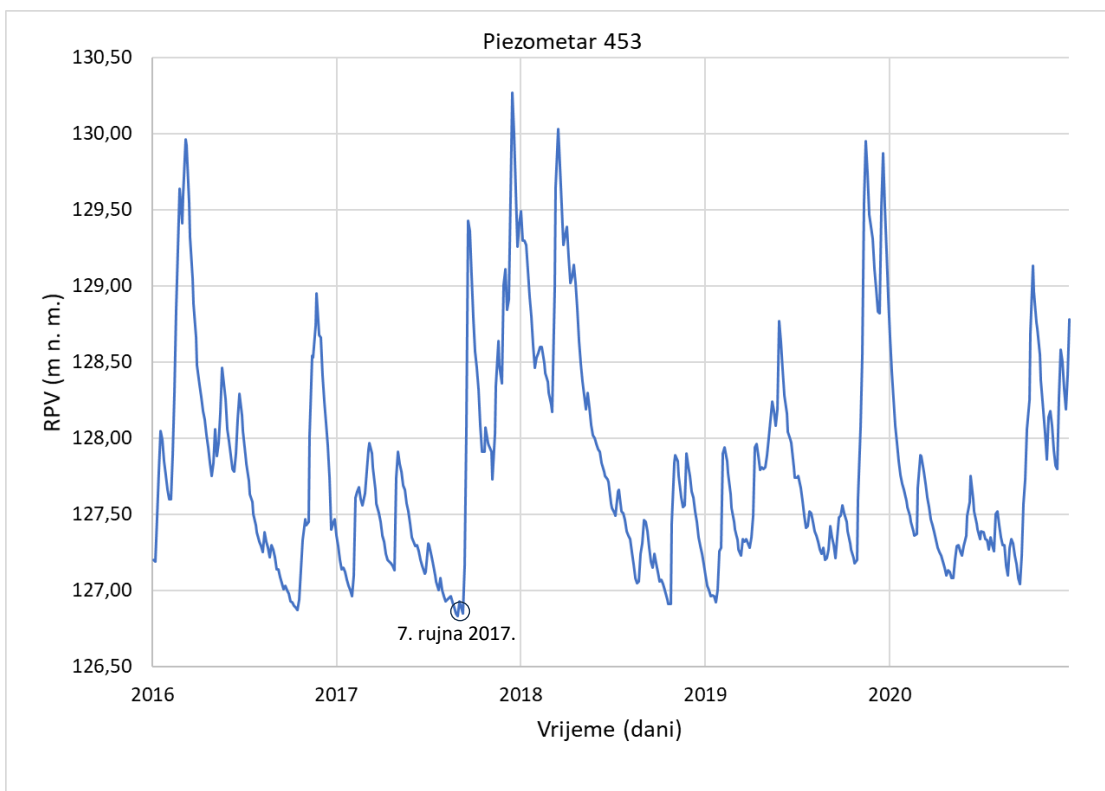
Slika 3-2. Litološki stup na području istraživanja (EGPV, 1988 – danas)

Oduzimanjem dubine do slabopropusnih naslaga od kote terena dobivena je kota podine vodonosnika. Kriging interpolacijom kota podine vodonosnika u *Surferu 8* dobivena je karta izostrata podine vodonosnika (slika 3-3).

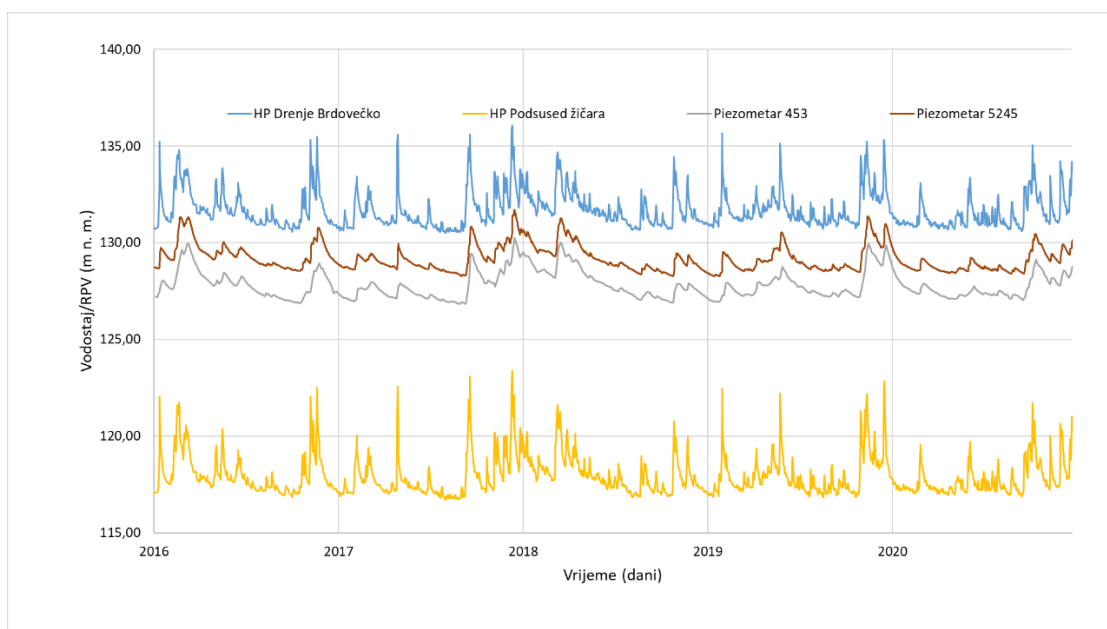


Slika 3-3. Karta izostrata podine vodonosnika

S obzirom da su za projektiranje vodocrpilišta najznačajnije niske vode, izrađena je karta ekvipotencijala niskih voda. Analizom petogodišnjih vremenskih nizova razina podzemne vode samoborsko-zaprešićkog vodonosnika mjenjenih u šest piezometara i vodostaja rijeke Save mjenjenih na hidrološkim postajama *Drenje Brdovečko* i *Podsused žičara* odabran je 7. rujna 2017. godine za datum minimalnih razina podzemne vode. Na slici 3-4 prikazan je nivogram, tj. vremenski niz razina podzemne vode (RPV) piezometra 453 jer nivogrami svih šest piezometara na jednom grafičkom prikazu nisu pregledni. Podaci su mjenjeni od 1. siječnja 2016. do 31. prosinca 2020. godine. Mjenjenja u pet piezometara obavlja Državni hidrometeorološki zavod, a u jednom piezometru Vodoopskrba i odvodnja d. o. o. Na slici 3-5 vidljiva je dobra povezanost nivograma piezometara i hidroloških postaja *Drenje Brdovečko* i *Podsused žičara* jer postoji hidraulička veza između rijeke Save i podzemne vode, prikazani su nivogrami samo dva piezometra zbog preglednosti.



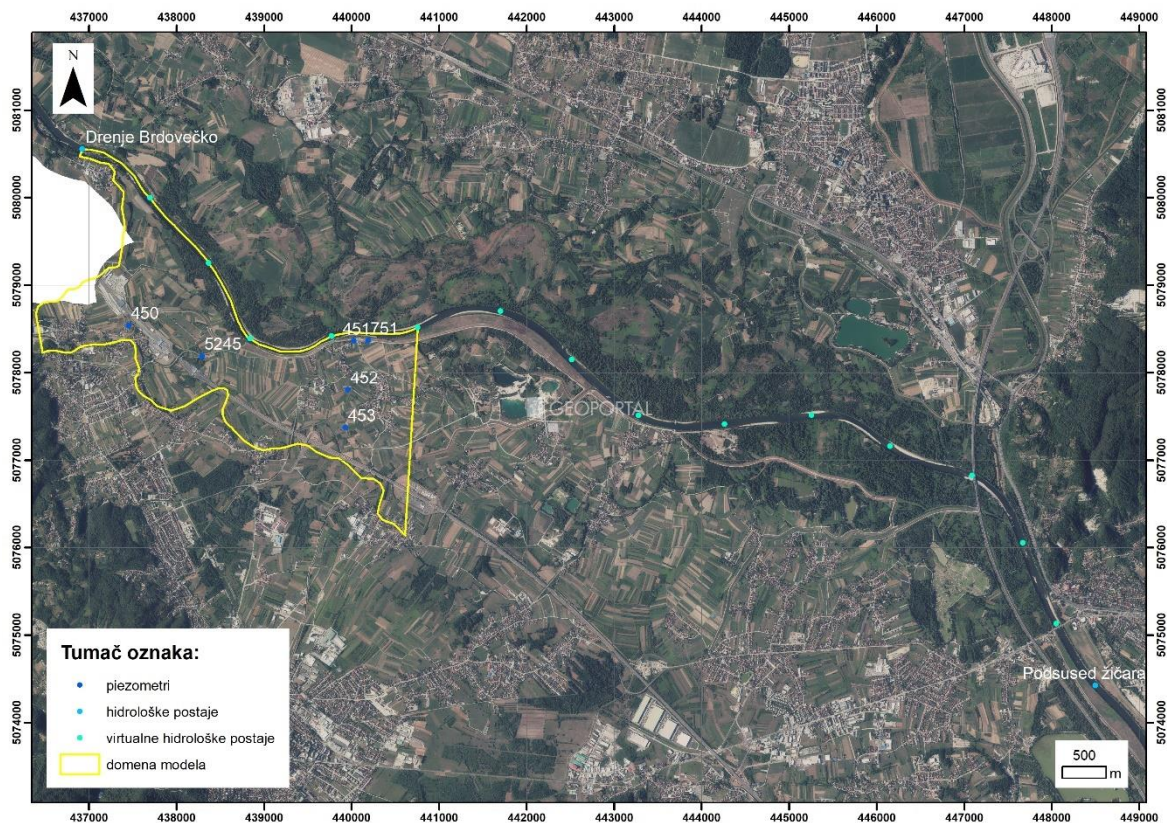
Slika 3-4. Nivogram piezometra 453



Slika 3-5. Nivogrami piezometara 453 i 5245 i hidroloških postaja (HP) *Drenje Brdovečko* i *Podsused žičara*

Da bi bio povećan broj ulaznih vrijednosti točkastih podataka za interpolaciju razina podzemne vode i vodostaja rijeke Save, bilo je potrebno između stvarnih hidroloških postaja dodati virtualne koje su međusobno udaljene 1000 m. Od uzvodne hidrološke postaje *Drenje*

Brdovečko do nizvodne Podused žičara dodano je 14 virtualnih hidroloških postaja (slika 3-6).



Slika 3-6. Lokacije piezometara i hidroloških postaja (stvarnih i virtualnih)

Između stvarnih hidroloških postaja nema inženjerskih intervencija na koritu rijeke Save pa su vodostaji virtualnih hidroloških postaja određeni linearnom interpolacijom prema formuli:

$$h_i = h_u + ((h_n - h_u)/L) \cdot L_i$$

pri čemu je:

h_i – vodostaj na i -toj virtualnoj hidrološkoj postaji (m n. m.)

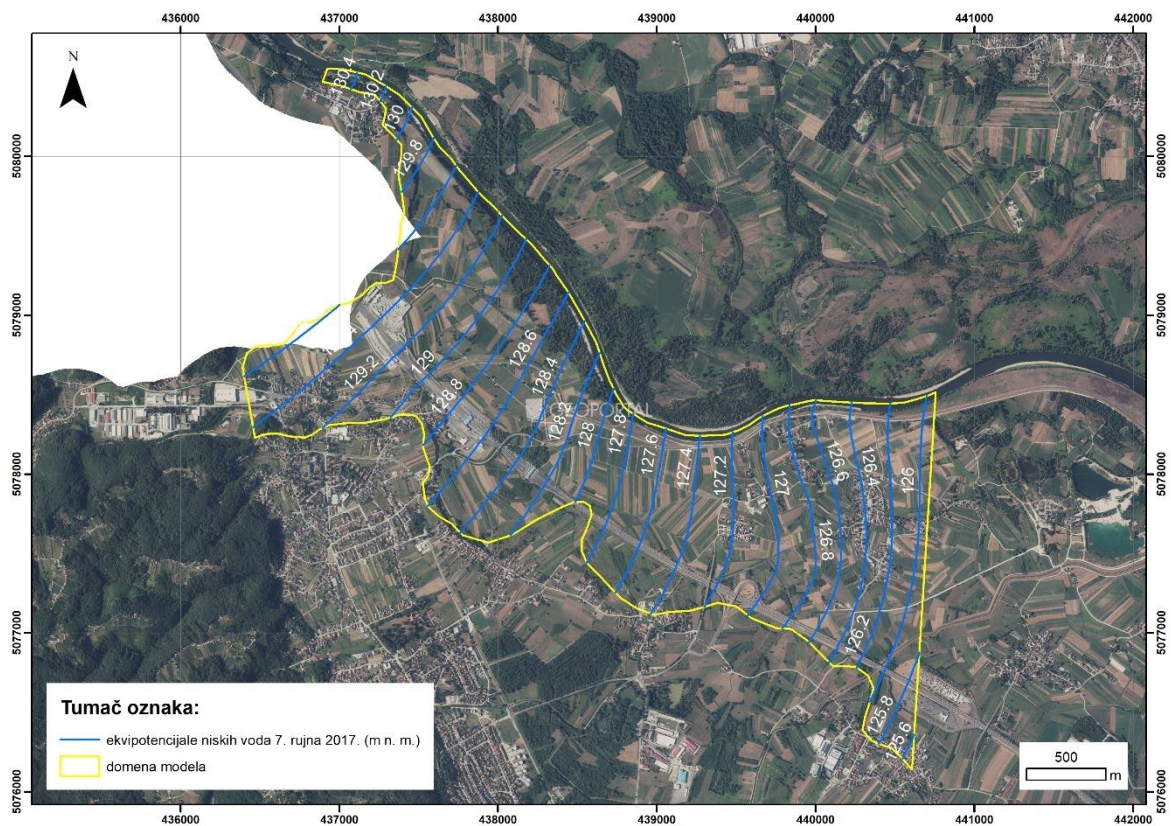
h_u – vodostaj na uzvodnoj stvarnoj hidrološkoj postaji (m n. m.)

h_n – vodostaj na nizvodnoj stvarnoj hidrološkoj postaji (m n. m.)

L – udaljenost između uzvodne i nizvodne stvarne hidrološke postaje (m)

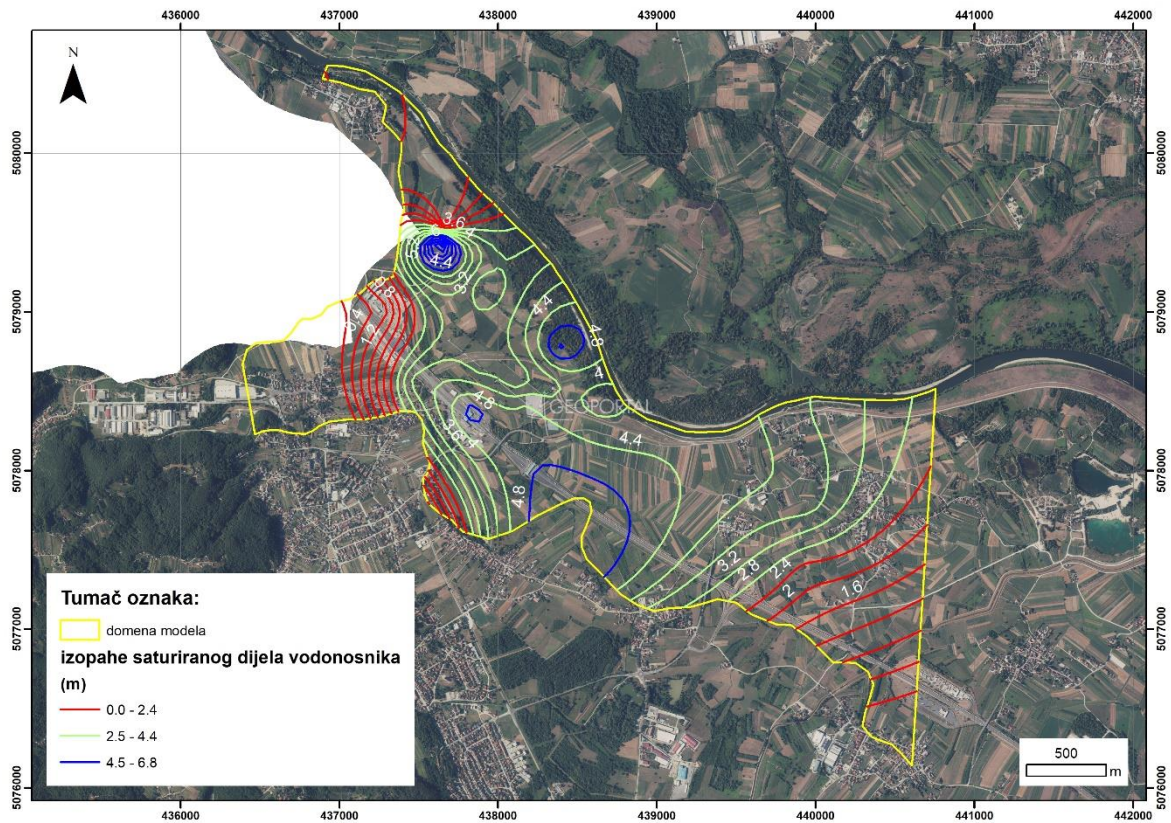
L_i – udaljenost između uzvodne stvarne hidrološke postaje i i -te virtualne hidrološke postaje (m) (RGNF, 2013).

Kriging interpolacijom razina podzemne vode i vodostaja u *Surferu 8* dobivena je karta ekvipotencijala niskih voda na datum 7. rujna 2017. godine (slika 3-7). Prvotno su za izradu karte ekvipotencijala, uz vodostaje stvarnih i virtualnih hidroloških postaja, bile uzete razine podzemne vode 14 piezometara na području istraživanja, no nakon provjere točnosti podataka, a zbog istaknutog povijanja ekvipotencijala, 8 piezometara ipak nije uzeto u obzir. Ako ne postoji crpni ili upojni zdenac ili neka druga inženjerska intervencija na području istaknutog povijanja ekvipotencijala, ono je potencijalna posljedica anomalija u naslagama vodonosnika ili pogrešno određene kote nule piezometra (Posavec, 2006).



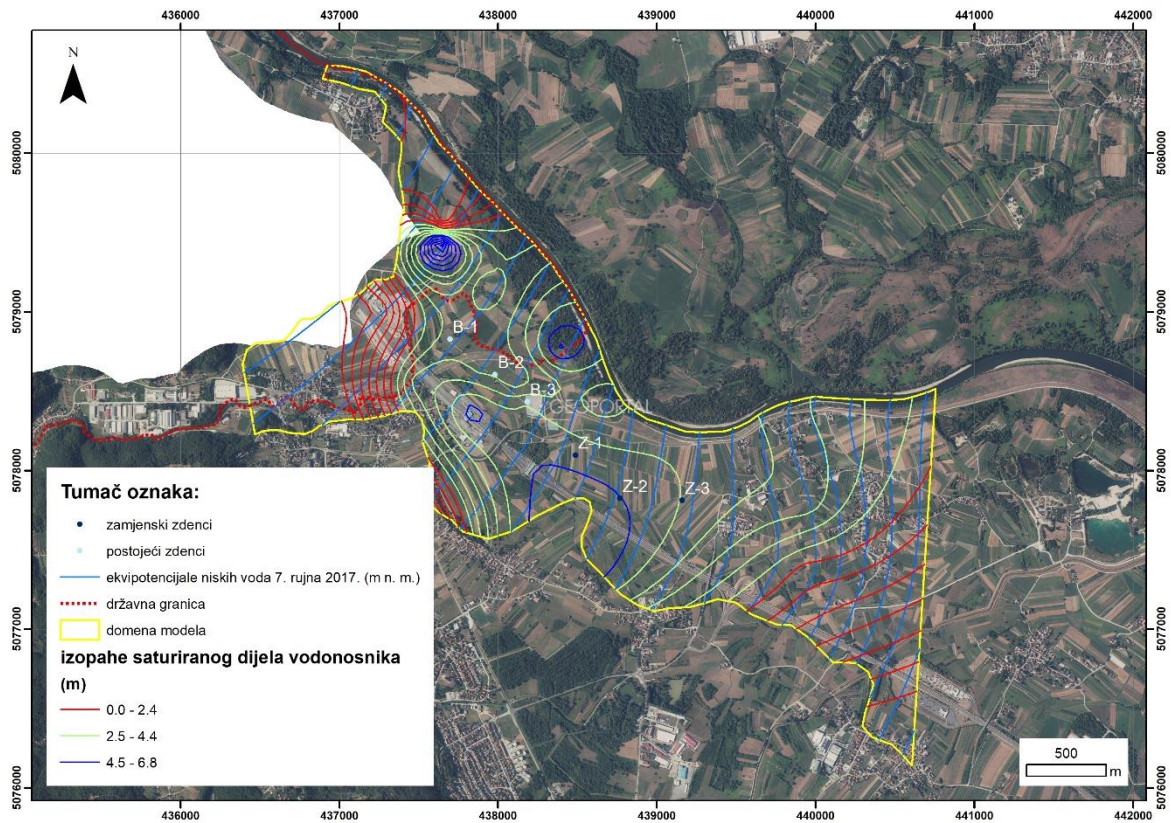
Slika 3-7. Karta ekvipotencijala niskih voda na datum 7. rujna 2017. godine

Oduzimanjem karte izostrata podine vodonosnika od karte ekvipotencijala niskih voda korištenjem naredbe Math u *Surferu 8* dobivena je karta izopaha saturiranog dijela vodonosnika na datum 7. rujna 2017. godine (slika 3-8).

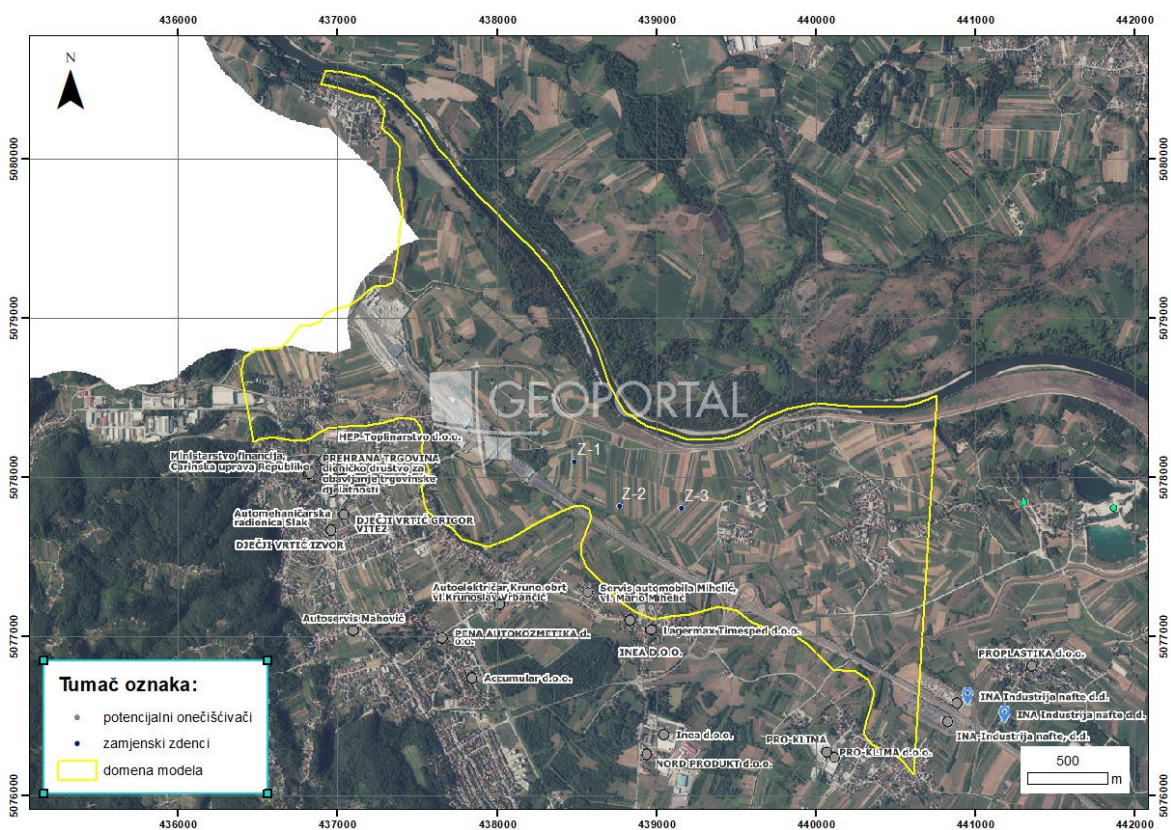


Slika 3-8. Karta izopaha saturiranog dijela vodonosnika na datum 7. rujna 2017. godine

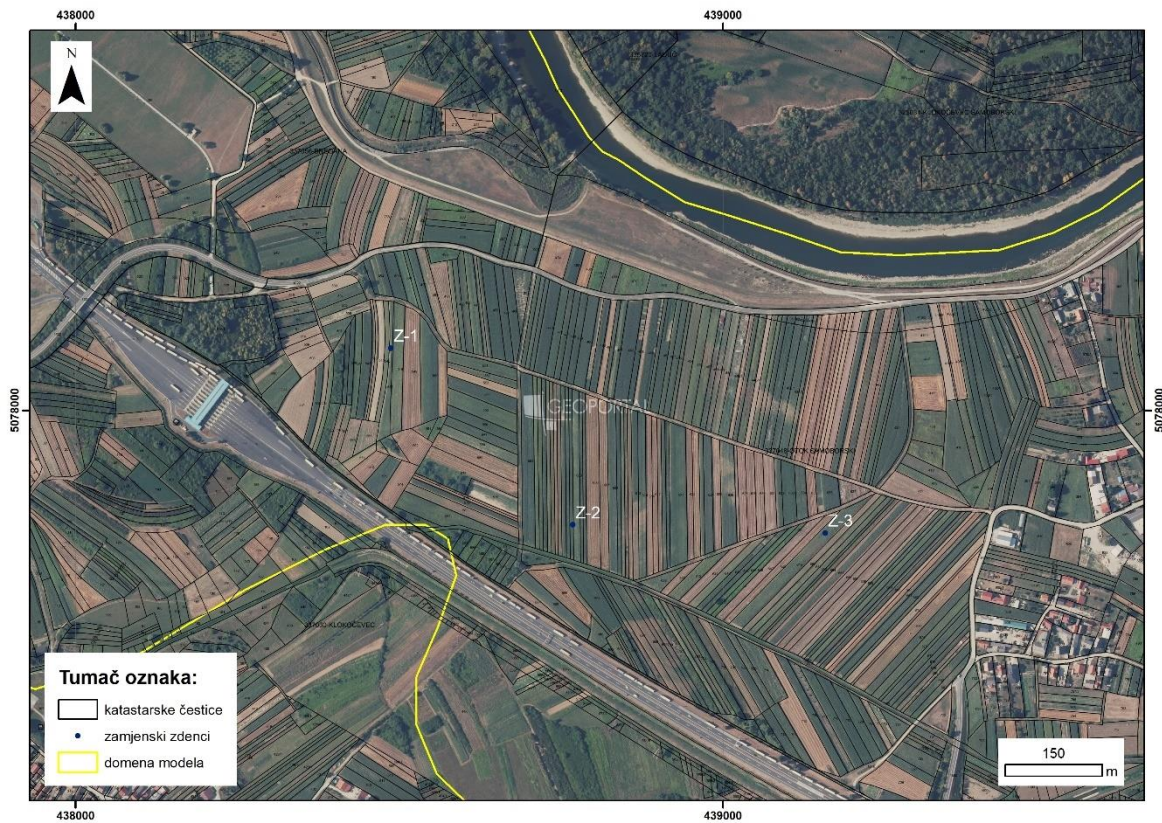
Najpogodnija lokacija za pozicioniranje zdenaca je neizgrađeno područje s većim izopahama koje u ovom slučaju iznose 4,4 – 4,8 m. Zbog tog kriterija odabrana je lokacija izvan postojećeg vodocrpilišta Bregana koja administrativno pripada naselju Samoborski Otok. Zbog ograničenog područja između autoceste i rijeke Save, zdenaci nisu pozicionirani okomito na generalni smjer tečenja niskih voda, no udaljenost između zdenaca iznosi oko 390 m čime je umanjena njihova interferencija (slika 3-9). Udaljenost zdenaca Z-1 i Z-3 od rijeke Save iznosi oko 400 m, a zdenac Z-2 je od rijeke Save udaljen oko 500 m. Lokacije potencijalnih onečišćivača označenih u *Registru onečišćivača okoliša* (Ministarstvo zaštite okoliša i zelene tranzicije, 2024) prikazane su na slici 3-10. Drugi potencijalni onečišćivači su brojne poljoprivredne površine i autocesta od koje je zdenac Z-1 udaljen oko 200 m, Z-2 oko 140 m i Z-3 oko 330 m. Nedostatak odabrane lokacije je mnoštvo katastarskih čestica u privatnom vlasništvu (Državna geodetska uprava i Ministarstvo pravosuđa, uprave i digitalne transformacije, 2024) prikazanih na slici 3-11.



Slika 3-9. Lokacija zamjenskih zdenaca



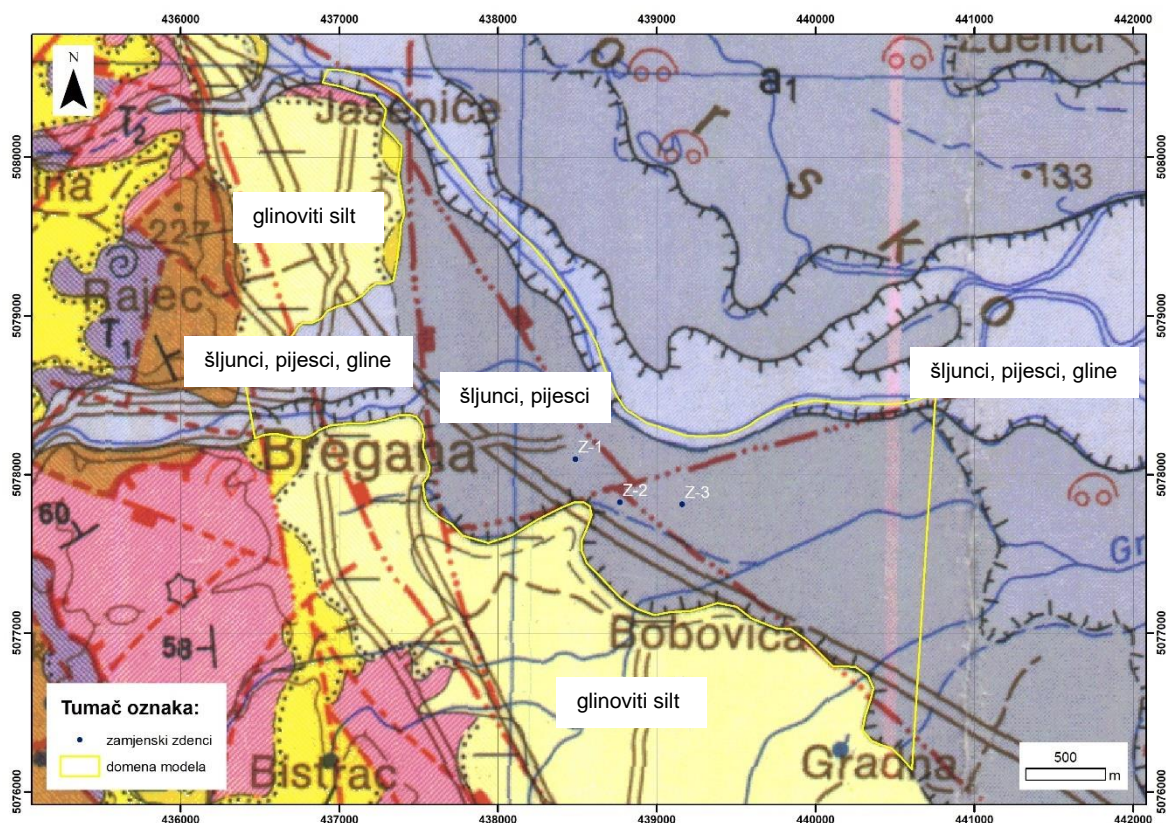
Slika 3-10. Lokacije potencijalnih onečišivača (Ministarstvo zaštite okoliša i zelene tranzicije, 2024)



Slika 3-11. Lokacija zamjenskih zdenaca u odnosu na katastarske čestice (Državna geodetska uprava i Ministarstvo pravosuđa, uprave i digitalne transformacije, 2024)

3.2. Identifikacija utjecaja crpljenja zamjenskih zdenaca na razine podzemne vode vodonosnika

Prognozni numerički model tečenja podzemne vode izrađen je u računalnom programu *Visual MODFLOW Flex 9.0*. Domena modela zauzima desno zaobalje zapadnog dijela samoborsko-zaprešićkog vodonosnika i generalno se pruža pravcem sjeverozapad – jugoistok kao i vodonosnik. Lateralno prostiranje domene modela (slika 3-12) omeđeno je rijekom Savom na sjeveroistoku, kontaktom dobropropusnih aluvijalnih naslaga i slabopropusnog glinovitog silta (Šikić et al., 1978) na sjeverozapadu i jugozapadu, a jugoistočna granica povučena je istočno od piezometara i strukturnih bušotina pozicioniranih na istočnom dijelu područja istraživanja, okomito na smjer tečenja podzemne vode. Vertikalno prostiranje domene modela određeno je podinom vodonosnika i površinom terena. Domena modela diskretizirana je na 200 redaka \times 200 stupaca čime je veličina diskretnog elementa iznosila 22 m \times 22 m, a oko lokacije zdenaca mreža je dvostruko progušćena pa je veličina diskretnog elementa iznosila 11 m \times 11 m.



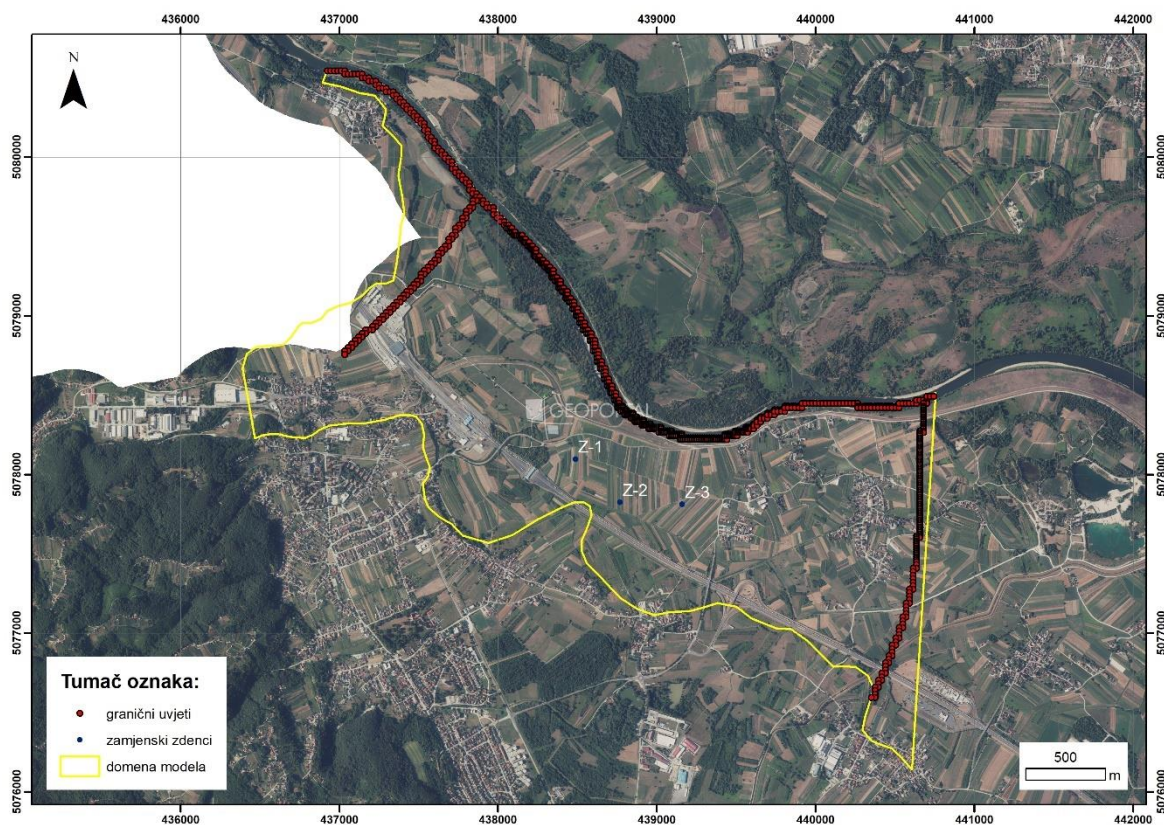
Slika 3-12. Lateralno prostiranje domene modela, podloga je isječak lista Zagreb *Osnovne geološke karte* (Šikić et al., 1978)

Parametri vodonosnika korišteni za modeliranje su:

- hidraulička vodljivost, $K_x = K_y = 0,01 \text{ m/s}$; $K_z = 0,001 \text{ m/s}$ preuzeta iz *Elaborata o zonama zaštite izvorišta Strmec, Šibice i Bregana* (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014)
- specifično davanje, $S_y = 0,2$ koje je unutar raspona za šljunkovite i pjeskovite naslage (Morris i Johnson, 1967).

Granični uvjeti (slika 3-13) predstavljaju hidrauličke uvjete na granicama domene modela (Bačani i Posavec, 2011):

- sjeverozapadna, sjeveroistočna i jugoistočna granica definirane su kao Dirichletove granice stalnog potencijala, pri čemu je sjeverozapadna granica određena ekvipotencijalom 129,4 m n. m., sjeveroistočna granica vodostajem rijeke Save, a jugoistočna ekvipotencijalom 126,0 m n. m.
- jugozapadna granica definirana je kao nepropusna granica na temelju *Osnovne geološke karte*, tj. kontakta dobropropusnih aluvijalnih naslaga i slabopropusnog glinovitog silta (Šikić et al., 1978).



Slika 3-13. Granični uvjeti domene modela

Količina vode koju zdenac može crpiti ovisi o značajkama vodonosnika i značajkama samog zdenca. Značajke zdenca ovise o promjeru zdenca, duljini i značajkama filtra te kapacitetu ugrađene crpke. Moguća crpna količina zamjenskih zdenaca izračunata je prema formuli:

$$Q = 2 r \pi \cdot L \cdot p_f \cdot v_{ul}$$

pri čemu je:

Q – crpna količina zdenca (m³/s)

r – radijus zdenca (m)

L – duljina filtra (m)

p_f – propusnost filtra (-) koja iznosi 15 – 50 %

v_{ul} – ulazna brzina vode u zdenac (m/s) koja mora biti manja od 0,03 m/s da bi trenje na otvorima filtra bilo zanemarivo (Bačani i Vlahović, 2012).

Početni uvjet bile su razine podzemne vode na datum 7. rujna 2017. godine, a simulirano crpljenje trajalo je 365 dana. U iteracijama simulacija mijenjani su radijus zdenca i duljina filtra kako bi se došlo do optimalne crpne količine od 40 l/s (tablica 3-1). Što su veći promjer zdenca te duljina i propusnost filtra, to je veća crpna količina. Prevelika crpna količina uzrokovala je sniženje razine podzemne vode do kote gornjeg ruba filtra što ne zadovoljava kriterij zadržavanja razine podzemne vode iznad kote gornjeg ruba filtra u zdencu.

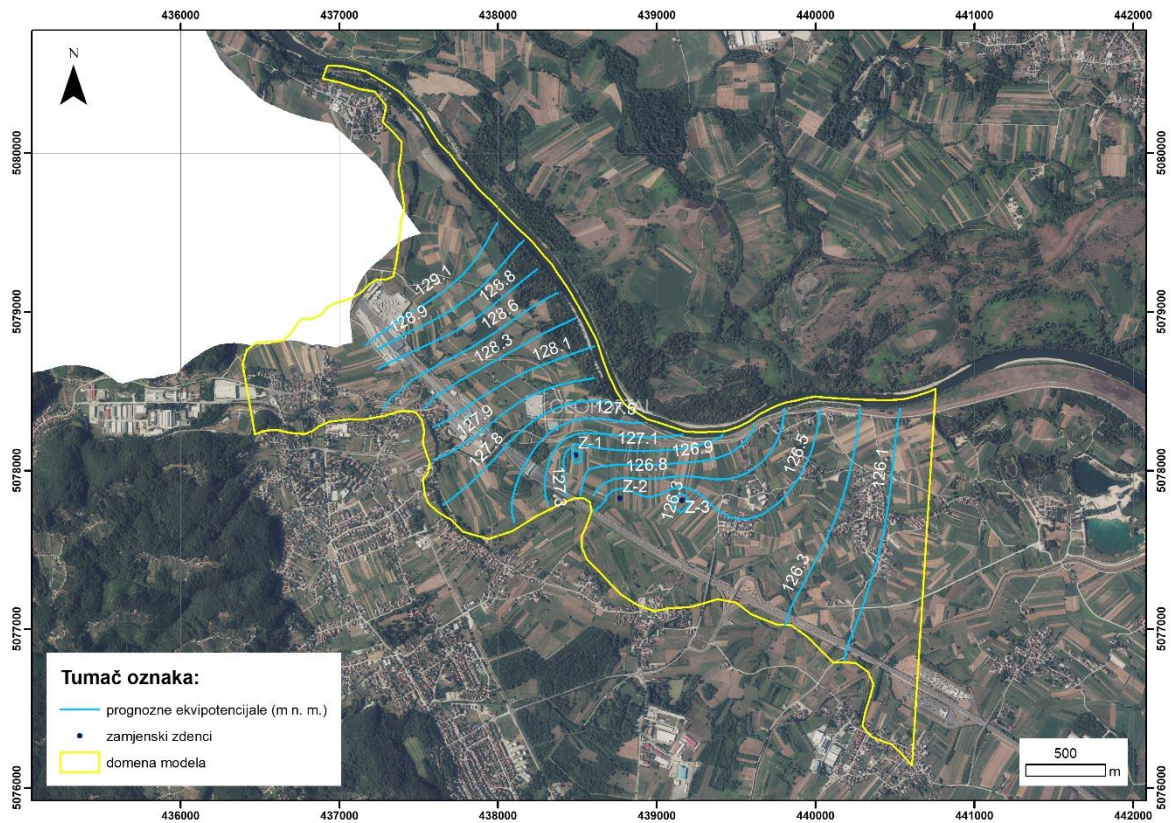
Tablica 3-1. Izračun crpne količine

simulacija	radijus zdenca (m)	duljina filtra (m)	propusnost filtra	brzina vode (m/s)	Q (m ³ /s)	Q (l/s)	Q (m ³ /dan)
1.	0,4	2,2	0,35	0,03	0,058	58	5014
2.	0,4	2,0	0,35	0,03	0,053	53	4558
3.	0,3	2,0	0,35	0,03	0,040	40	3418

Lokacijske značajke zdenaca navedene su u tablici 3-2. Kota donjeg ruba filtra jednaka je koti dna zdenca koja je određena kotom podine vodonosnika. Prognozne ekvipotencijale prikazane su na slici 3-14.

Tablica 3-2. Lokacijske značajke zdenaca

oznaka zdenca	E (m)	N (m)	kota terena (m n. m.)	kota dna zdenca (m n. m.)	kota gornjeg ruba filtra (m n. m.)	kota donjeg ruba filtra (m n. m.)	crpna količina (m ³ /dan)
Z-1	438 487	5 078 096	134,6	123,5	125,5	123,5	3418
Z-2	438 768	5 077 823	134,1	123,0	125,0	123,0	3418
Z-3	439 158	5 077 811	133,8	123,1	125,1	123,1	3418



Slika 3-14. Prognozne ekvipotencijale

Provedenom simulacijom ukupna raspoloživa crpna količina ostvariva izvedbom triju zdenaca iznosi 120 l/s. Navedenu crpnu količinu moguće je testirati pokusnim crpljenjem istražno-eksploatacijskog zdenca čime se dobivaju parametri vodonosnika kojima se rekalibrira numerički model (Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2013). Usporedbom prognoznih ekvipotencijala s kotama gornjeg ruba filtra u zdencima vidljivo je da se razine podzemne vode nalaze oko 1 m iznad kota gornjeg ruba filtra čime je zadovoljen kriterij zadržavanja razina podzemne vode iznad kota gornjeg ruba filtra u uvjetima crpljenja zdenaca tijekom niskih razina podzemne vode. Zbog male visine vode iznad kote gornjeg ruba filtra, crpku je potrebno staviti u taložnik u slabopropusnim podinskim naslagama jer je saturirani dio vodonosnika potrebno iskoristiti za instalaciju filtra.

Zdravstvena ispravnost vode za ljudsku potrošnju u zoni opskrbe Strmec, koju čine vodocrpilište Bregana zapadno od lokacije zamjenskih zdenaca i vodocrpilište Strmec istočno od lokacije zamjenskih zdenaca, utvrđena je monitoringom (Vodoopskrba i odvodnja d. o. o., 2024) pa je u ovoj fazi projektiranja pretpostavljeno da je slična situacija i na odabranoj lokaciji. Na odabranoj lokaciji trebalo bi uspostaviti novi program monitoringa količine i kakvoće podzemne vode.

4. ZAKLJUČAK

Analizom saturiranog dijela vodonosnika na temelju 21 strukturne bušotine, 6 piezometara, 2 stvarne i 14 virtualnih hidroloških postaja na području istraživanja, odabrana je lokacija zamjenskih zdenaca nakon čega je uslijedila identifikacija utjecaja crpljenja zamjenskih zdenaca na razine podzemne vode vodonosnika. Na lokaciji zamjenskih zdenaca nije izvedena ni strukturna bušotina ni piezometar pa treba uzeti u obzir nepouzdanost interpolacije ulaznih vrijednosti kota podine vodonosnika i razina podzemne vode. Numeričkim modelom prognozirana je ukupna crpna količina od 120 l/s ostvariva izvedbom triju zdenaca od kojih svaki crpi 40 l/s pri čemu se razine podzemne vode nalaze oko 1 m iznad kota gornjeg ruba filtra u zdencima. Hidraulička vodljivost i specifično davanje kao dva bitna parametra vodonosnika uzeta su iz literature na temelju litoloških opisa strukturnih bušotina. Pokusnim crpljenjem istražno-eksploatacijskog zdenca moguće je dobiti pouzdanije parametre vodonosnika na lokaciji zamjenskih zdenaca što omogućuje rekalkulaciju numeričkog modela. Odabiru same mikrolokacije istražno-eksploatacijskog zdenca prethode geofizička istraživanja poput geoelektričnih ispitivanja. Završni korak bilo bi uspostavljanje opažачke mreže za monitoring količine i kakvoće podzemne vode. Mane odabrane lokacije su mnoštvo katastarskih čestica u privatnom vlasništvu koje bi trebalo otkupiti te potencijalni onečišćivači poput poljoprivrednih površina i autoceste.

Potreba za vodom na području istraživanja ovisi o faktorima poput demografskih kretanja i razvoja gospodarskih zona, pogotovo jer se radi o području aglomeracije Grada Zagreba. Analiza troškova i koristi prethodila bi, uz brojne druge analize, realnom gospodarskom projektu koji zahtijeva temeljit i interdisciplinarni pristup.

5. POPIS LITERATURE

BAČANI, A., POSAVEC, K. 2011. *Metode operacijskih istraživanja u hidrogeologiji*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

BAČANI, A., VLAHOVIĆ, T., 2012. *Hidrogeologija: primjena u graditeljstvu*. Split: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije.

BRKIĆ, Ž., ČAKARUN, A. 1998. *Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske 1 : 100 000, Tumač za List Zagreb*. Zagreb: Institut za geološka istraživanja, 48 str.

DRŽAVNA GEODETSKA UPRAVA I MINISTARSTVO PRAVOSUĐA, UPRAVE I DIGITALNE TRANSFORMACIJE. 2024. *Pregled katastarskog plana*. URL: <https://oss.uredjenazemlja.hr/map> (26. kolovoza 2024.)

DRŽAVNA GEODETSKA UPRAVA. 2024. *Metapodaci*. URL: <https://geoportal.dgu.hr/#/menu/podaci-o-slojevima> (26. kolovoza 2024.)

EGPV – *Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske*. 1988 – danas. Projekt Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta i Hrvatskih voda, Zagreb.

HRVATSKE VODE. 2023. *Plan upravljanja vodnim područjima do 2027*. Zagreb: Hrvatske vode.

HRVATSKE VODE. 2023. *Program usklađenja monitoringa 2022. – 2027*. Zagreb: Hrvatske vode.

HRVATSKI ZAVOD ZA JAVNO ZDRAVSTVO. 2024. *Izveštaj o zdravstvenoj ispravnosti vode za ljudsku potrošnju u Republici Hrvatskoj za 2023. godinu*. Zagreb: Hrvatski zavod za javno zdravstvo.

MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ZELENE TRANZICIJE. 2024. *ENVI portal okoliša*. URL: <https://envi-metapodaci.azo.hr/> (9. rujna 2024.)

MORRIS, D. A., JOHNSON, A. I. 1967. *Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey*. USGS Water Supply Paper 1839-D.

POSAVEC, K. 2006. *Identifikacija i prognoza minimalnih razina podzemne vode zagrebačkoga aluvijalnog vodonosnika modelima recesijskih krivulja*. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET. 2013. *Zagreb – hidrogeološki istražni radovi u svrhu određivanja mogućnosti korištenja vodocrpilišta Ježdovec za javnu vodoopskrbu*. Elaborat o izvršenim radovima. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET. 2014. *Elaborat o zonama zaštite izvorišta Strmec, Šibice i Bregana*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A. 1978. *Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000, List Zagreb L33–80*. Zagreb: Institut za geološka istraživanja; Beograd: Savezni geološki institut.

ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A. 1979. *Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000, Tumač za list Zagreb L33–80*. Zagreb: Institut za geološka istraživanja; Beograd: Savezni geološki institut, 81 str.

VODOOPSKRBA I ODVODNJA D. O. O. 2024. *Kvaliteta vode za ljudsku potrošnju*. URL: <https://www.vio.hr/o-nama/vodoopskrba/kvaliteta-vode-za-ljudsku-potrosnju/1814> (19. kolovoza 2024.)

WATERLOO HYDROGEOLOGIC. 2016. *Groundwater Modeling Numerical Methods* URL: <https://www.waterloohydrogeologic.com/> (29. kolovoza 2024.)