Zone sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec

Pavić, Mirja

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:169:368538

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

ZONE SANITARNE ZAŠTITE PLANIRANOG VODOCRPILIŠTA JEŽDOVEC

Diplomski rad

Mirja Pavić

GI233

Zagreb, 2016

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko – geološko – naftni fakultet

Diplomski rad

ZONE SANITARNE ZAŠTITE PLANIRANOG VODOCRPILIŠTA JEŽDOVEC

MIRJA PAVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko – geološko – naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U ovom diplomskom radu određene su zone sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec sukladno trenutno važećem Pravilniku o uvjetima utvrđivanja zona sanitarne zaštite izvorišta (NN br. 66/11, 47/13). U teorijskom dijelu prikazane su i opisane numeričke i analitičke metode koje su poslužile kao alat na temelju čijih rezultata su, za stanje niskih i visokih voda, određene zone zaštite planiranog vodocrpilišta. Za izradu numeričkog modela korišten je računalni program Visual Modflow, a za izradu analitičkih modela računalni programi Whaem2000 i Wellz. Delineacija II. i III. zone zaštite izvršena je pomoću simulacija trasiranja čestica unatrag (engl. backward particle tracking).

Ključne riječi: vodocrpilište Ježdovec, zone sanitarne zaštite, numerička metoda, analitička metoda

Diplomski rad sadrži: 35 stranica, 1 tablicu, 16 slika i 26 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko – geološko – naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Izv. prof. dr. sc. Kristijan Posavec

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Kristijan Posavec

Prof. dr. sc. Andrea Bačani

Doc. dr. sc. Jelena Parlov

Datum obrane: 1.7.2016.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

SANITARY PROTECTION AREAS FOR PLANNED PUBLIC WATER SYSTEM JEŽDOVEC

MIRJA PAVIĆ

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

Abstract

In this thesis source water sanitary protection areas for planned public water system Ježdovec are determined in accordance with the currently valid Regulation on the conditions determining the sanitary protection zones (NN. 66/11, 47/13). In the theoretical part, numerical and analytical methods are presented and described. Based on the results of these methods, zones of water wells protection in the states of low and high water have been planned. The Visual Modflow computer program was used in creating a numerical model, and computer programs Whaem2000 and Wellz were used for the analytical model. Delineation II. and III. protection zones were done using simulation backward particle tracking.

Keywords: public water system Ježdovec, sanitary protection areas, numerical method, analytical method

Thesis contains: 35 pages, 1 tables, 16 images and 26references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Kristijan Posavec, PhD

Reviewers: Associate Professor Kristijan Posavec, PhD

Full Professor Andrea Bačani, PhD

Assistant Professor Jelena Parlov, PhD

Date of defense: July 1, 2016

SADRŽAJ:

1. UVOD 1
2. TEHNIČKI OPIS VODOZAHVATA 2
3. ISTRAŽIVANO PODRUČJE 4
3.1. Općenito 4
3.2. Geološke značajke 5
3.3. Hidrogeološke značajke 7
4. UTVRĐENE GRANICE VODONOSNIKA 9
5. ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE PRIMJENOM NUMERIČKIH METODA – METODOM KONAČNIH DIFERENCIJA 12
5.1. Općenito 12
5.2. Matematički model 14
5.3. Računalni model 15
5.4. Osnovne postavke modela istraživanog područja 15
6. ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE PRIMJENOM ANALITIČKE METODE – METODOM ANALITIČKIH ELEMENATA 18
6.1. Općenito 18
6.2. Matematički model 18
6.3. Računalni model 19
6.4. Osnovne postavke modela istraživanog područja 20
7. ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE PRIMJENOM DARCY – JEVOG ZAKONA 22
7.1. Općenito 22
7.2. Matematički model 22
7.3. Računalni model 23
7.4. Osnovne postavke modela istraživanog područja 23
8. POSTUPAK IZRADE PRIJEDLOGA ZONA SANITARNE ZAŠTITE IZVORIŠTA U SKLADU S PRAVILNIKOM O UVJETIMA ZA UTVRĐIVANJU ZONA SANITARNE ZAŠTITE IZVORIŠTA (NN BR. 66/11, 47/13) 26
9. PRIJEDLOG MJERA ZAŠTITE IZVORIŠTA 31
10. ZAKLJUČAK 32
11. LITERATURA 33

Popis slika:

Slika 2.1 Situacija planiranog vodocrpilišta Ježdovec *2*

Slika 2.2 Litološki stup na području planiranog vodocrpilišta Ježdovec *3*

Slika 3.1 Situacija istraživanog područja *4*

Slika 3.2 Prikaz litologije bušotina (pružanje profila prikazano na slici 2.1) *6*

Slika 3.3 Prikaz vrijednosti hidrauličke vodljivosti (Bačani i & Posavec 2014) zajedno s geološkom kartom, list Zagreb, OGK 1:100 000(Šikić et al., 1978). *8*

Slika 4.1 Karta ekvipotencijala za stanje niskih voda (27.8.2012. godine) *10*

Slika 4.2 Karta ekvipotencijala za stanje srednjih voda (15.6.2012. godine) *10*

Slika 4.3 Karta ekvipotencijala za stanje visokih voda (31.12.2012. godine) *11*

Slika 4.4 Hidrauličke granice modela istraživanog dijela zagrebačkog vodonosnika *11*

Slika 5.1 Izohipse reljefa šireg istraživanog područja *13*

Slika 5.2 Izostrate podine aluvijalnih krupnoklastičnih sedimenata (1. vodonosni sloj) *13*

Slika 5.3 Domena modela *15*

Slika 6.3 Shematski prikaz diskretizacije domene modela: a)metoda konačnih diferencija i b) metoda analitičkih elemenata (Brikowski, 2013) *20*

Slika 8.1 Simulirane trase za period trajanja 50 dana *28*

Slika 8.2 Simulirane trase za period trajanja 25 godina *29*

Slika 8.3 Prijedlog zona sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec *30*

Popis tablica:

Tablica 2-1. Tehnički podaci zdenaca na planiranom vodocrpilištu Ježdovec 3

Popis korištenih oznaka i odgovarajućih SI jedinica:

K	hidraulička vodljivost	(m/s)
q	specifični protok	(m/s)
i	hidraulički gradijent	(-)
v	brzina	(m/s)
n_{ef}	efektivna poroznost	(-)
n	ukupna poroznost	(-)
t	vrijeme	(s)
s, l	duljina puta	(m)
v_{ef}	efektivna brzina	(m/s)
h	piezometarska razina	(m)
Ss	specifično uskladištenje	(1/m)
Sy	specifično otpuštanje	(-)

1. UVOD

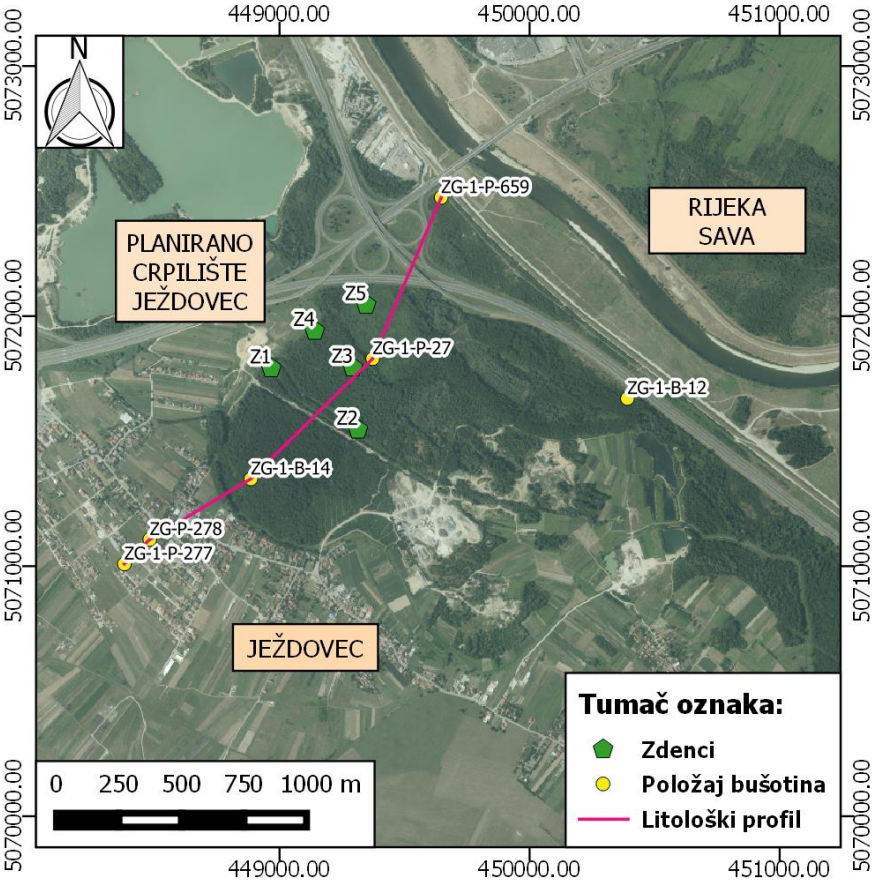
Zone sanitarne zaštite izvorišta utvrđuju se u svrhu zaštite vodonosnog sustava i pripadajućeg izvorišta od potencijalnog onečišćenja. Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta propisani su uvjeti za utvrđivanje zona sanitarne zaštite onih izvorišta koja se koriste za javnu vodoopskrbu te mjere i ograničenja koja se u njima provode (NN br. 66/11, 47/13). Cilj ovog rada je odrediti zone sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec koje se nalazi na području Grada Zagreba s desne obale rijeke Save te pripada zapadnom dijelu zagrebačkog vodonosnog sustava. Prethodno su Bačani & Posavec (2014) izradili, u obliku elaborata, prijedlog zona sanitarne zaštite vodocrpilišta Grada Zagreba kao i prijedlog zona sanitarne zaštite za vodocrpilišta koja pripadaju samoborsko – zaprešičkom vodonosniku. Također, već je ranije razmatrana mogućnost korištenja planiranog vodocrpilišta Ježdovec, a konačna ocjena i rezultati prikazani su u obliku elaborata – „Hidrogeološki istražni radovi u svrhu određivanja mogućnosti korištenja vodocrpilišta Ježdovec za javnu vodoopskrbu“ (Posavec, 2013).

U ovom radu, zone sanitarne zaštite izvorišta određene su kombinacijom rezultata metoda koje se temelje na numeričkom i analitičkom pristupu. Za izradu numeričkog modela korišten je program Modflow (McDonald & Harbaugh, 1988) te Modpath (Pollock, 1989) za trasiranje čestica, dok su analitički modeli simulirani pomoću programa Wellz i Whaem2000 (Haitjema et al., 1995).

2. TEHNIČKI OPIS VODOZAHVATA

Planirano vodocrpilište Ježdovec smjestilo bi se na području Ježdovečke šume, sjeverno od naselja Ježdovec, na desnoj obali rijeke Save (Slika 2.1). Predviđena je izgradnja 5 zdenaca do dubine od oko 107 do 108 m n.m. Zdenci su udaljeni od korita Save između 800 i 1200 m (od nasipa 400 m), te 800 do 1300 m od naselja. Trenutno izvediv maksimalni kapacitet vodocrpilišta iznosio bi 200 l/s odnosno 5 zdenaca crpilo bi kapacitetom od 40 l/s. Tehnički podaci zdenaca prikazani su u Tablici 2.1.

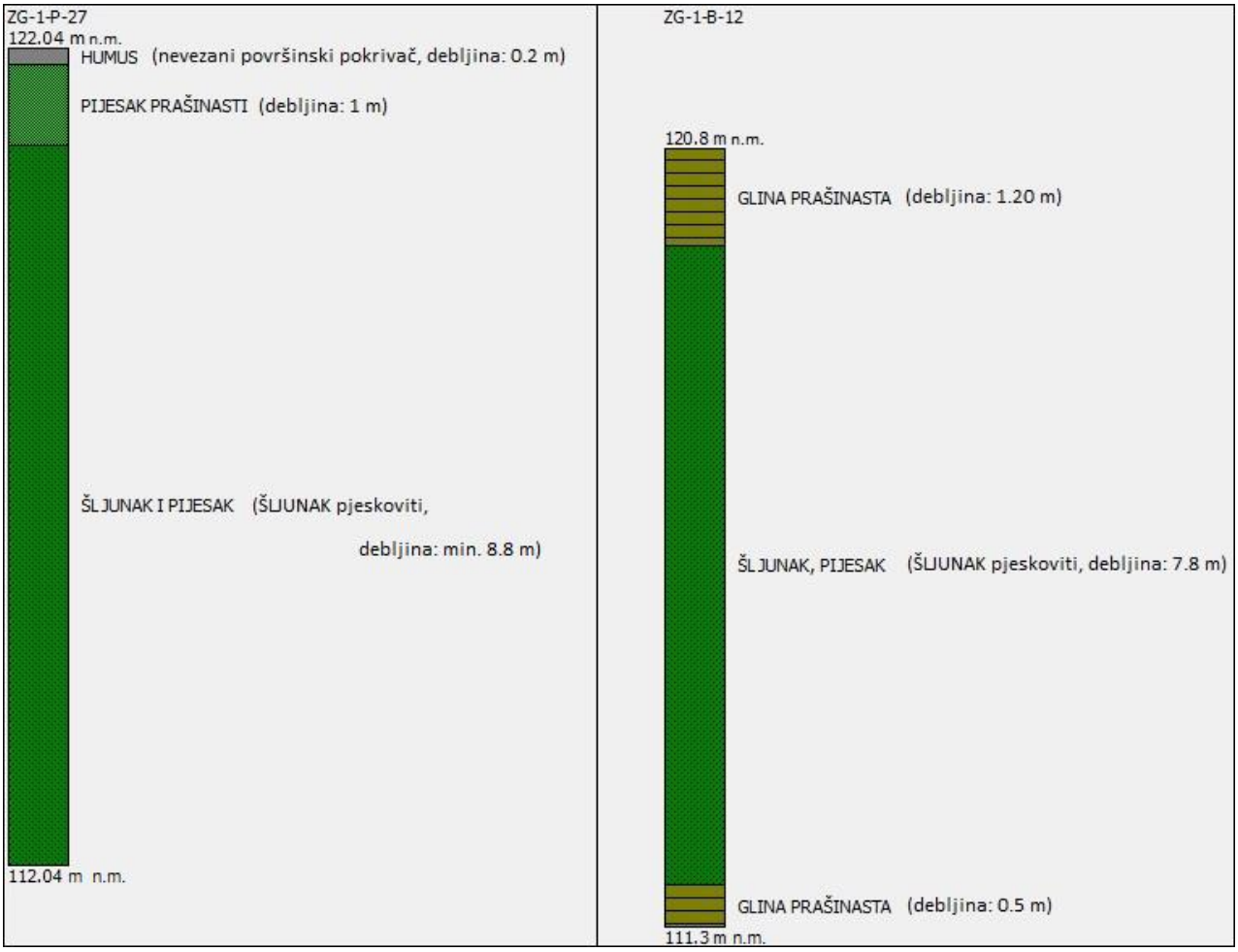
Prema litološkim podacima već postojećih bušotina zdenci zahvaćaju aluvijalni vodonosni sloj građen od pjeskovitog šljunka, koji se proteže na dubinskom intervalu od približno 1,2 metra do 11 metara. Polupropusna krovina izgrađena od prašinaste gline ili pijeska , tek mjestimično je prekrivena nevezanim površinskim materijalom (humus). Podinu čini relativno nepropusna, mjestimice prašinasta, glina. Na Slici 2.2 prikazan je karakteristični litološki stup na području planiranog vodocrpilišta Ježdovec.



Slika 2.1 Situacija planiranog vodocrpilišta Ježdovec

Tablica 2-1. Tehnički podaci zdenaca na planiranom vodocrpilištu Ježdovec

Zdenac	X koordinate	Y koordinate	Interval filtra od (m n.m.)	Interval filtra do (m n.m.)
Z1	448967,38	5071791,20	113,8	111,8
Z2	449314,23	5071545,53	113,35	111,35
Z3	449293,51	5071794,12	113,22	111,22
Z4	449141,20	5071940,83	113,6	111,6
Z5	449347,06	5072044,81	113,5	111,5

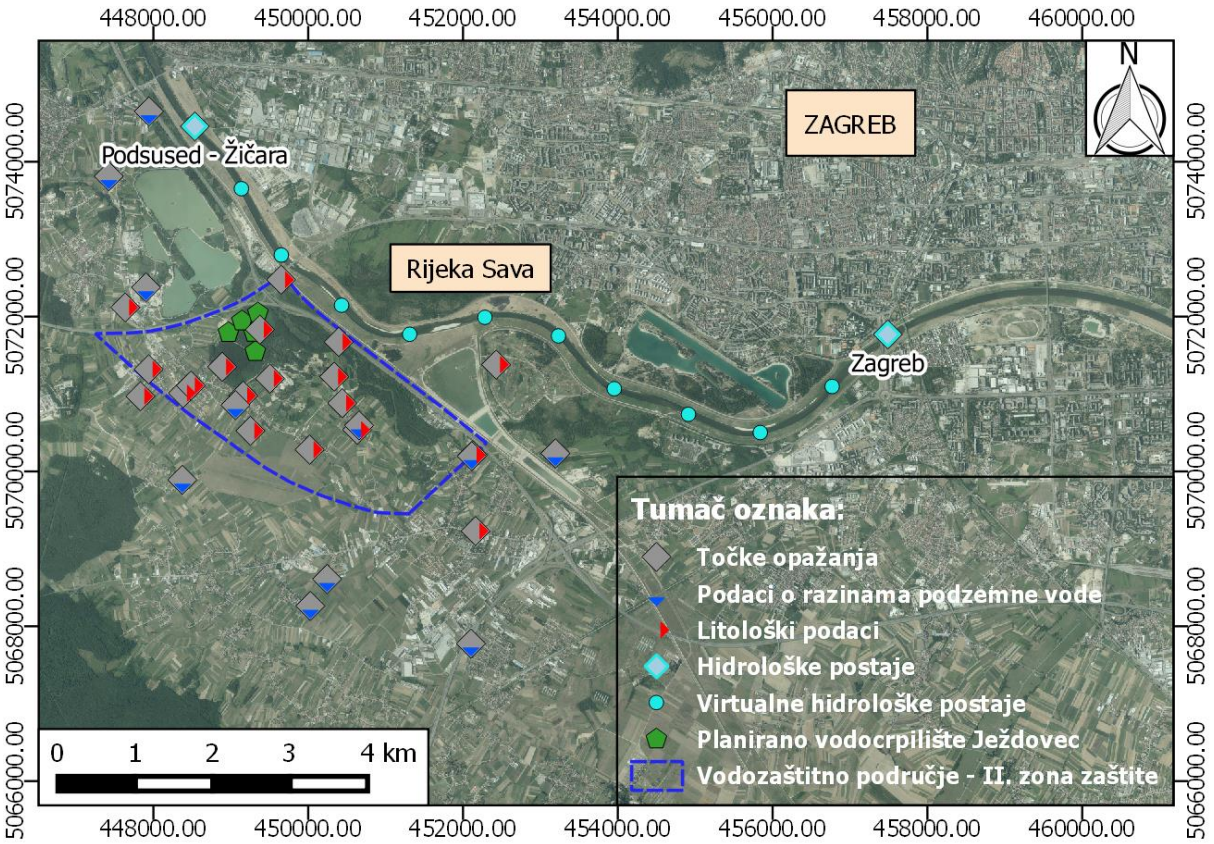


Slika 2.2 Litološki stup na području planiranog vodocrpilišta Ježdovec

3. ISTRAŽIVANO PODRUČJE

3.1. Općenito

Planirano vodocrpilište Ježdovec zahvaća vodu iz zagrebačkog vodonosnika kojeg rijeka Sava dijeli na lijevo i desno zaobalje. Zagrebački vodonosnik je izgrađen od šljunkovito – pjeskovitih naslaga saturiranih vodom koje se nalaze na području Grada Zagreba između Podsuseda na zapadu, Rugvice na istoku, Medvednice na sjeveru i Vukomeričkih Gorica na jugu (Nakić et al., 2013). Područje istraživanja, od interesa za razvoj vodocrpilišta, prostire se duž desne obale Save, pravcem sjeverozapad – jugoistok u dužini od oko 8 km, s prosječnom širinom od oko 4km. Lokacija planiranog vodocrpilišta nalazi se na zapadnom dijelu desnog zaobalja te prema trenutno važećem prostornom planu Grada Zagreba na prostoru koji se štiti pod posebnim uvjetima, vodozaštitno područje – II. zona zaštite (http://www.zzpugz.hr/wp-content/uploads/2015/02/3Bmjereuredenja-i-zastite .pdf) (Slika 3.1).



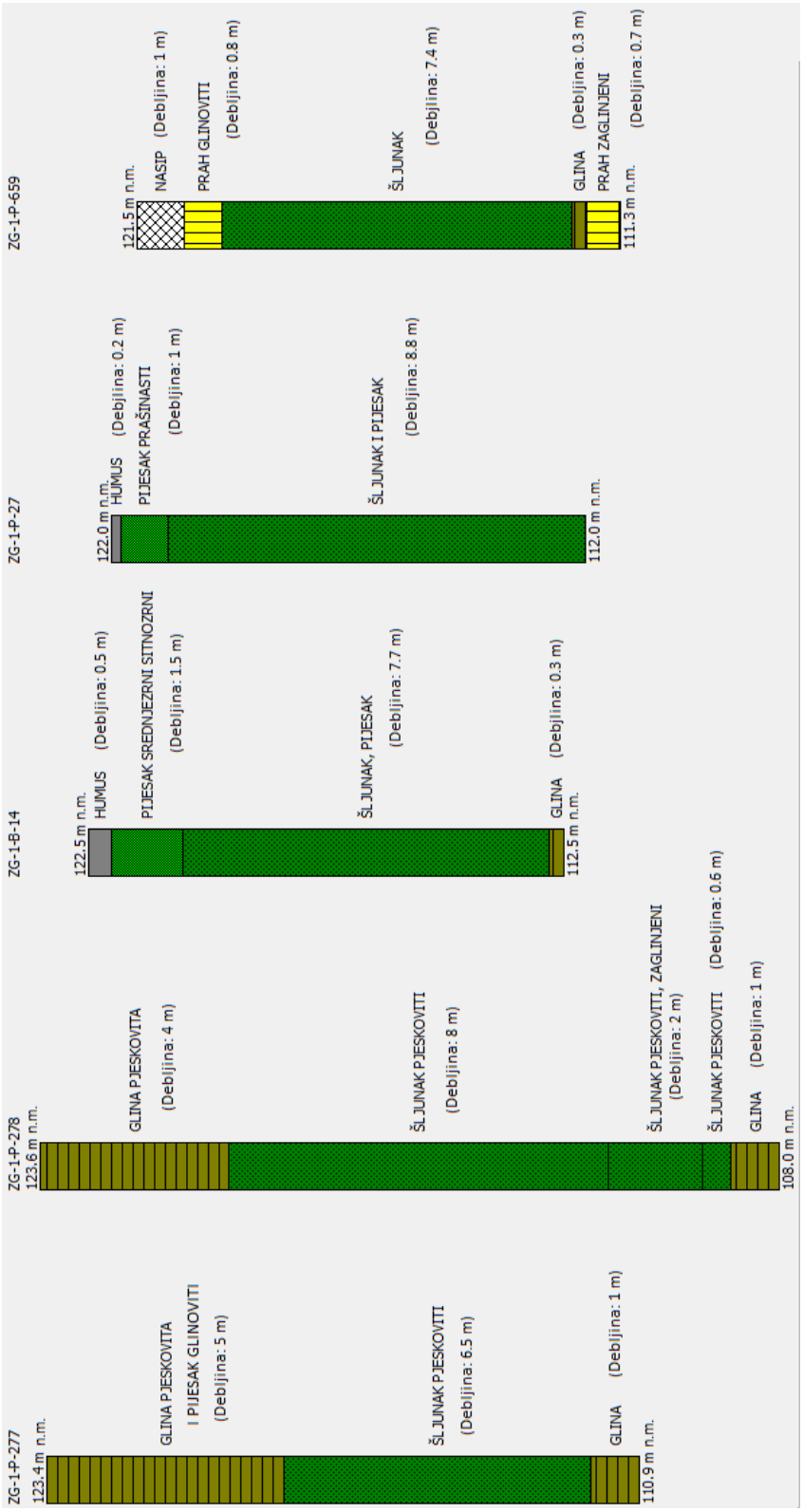
Slika 3.1 Situacija istraživanog područja

3.2. Geološke značajke

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 kvartarnih naslaga (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). Na Slici 3.2 je prikazan litološki profil užeg područja istraživanja, čija trasa je prikazana na Slici 2.1. Profil je kreiran pomoću programa Midvatten (Källgården, 2011) koristeći se već postojećim podacima iz bušotina (podaci su sastavni dio projekta Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske (EGPV)). Iz profila je vidljivo sljedeće: holocenske aluvijalne sedimente, kako je ranije spomenuto, čine uglavnom šljunci i pijesci, debljina šljunkovito – pjeskovitog vodonosnog sloja u prosjeku iznosi oko 9 metara. Površinski slabopropusni sloj je neujednačene debljine ili nije prisutan. Neposredno uz korito Save nalaze se šljunkovite naslage dok je udaljavanjem od korita rijeke Save primjetno povećanje udjela pjeskovite komponente. Slabopropusna podina se u prosjeku nalazi na oko 111 m n.m.

Zdenci planiranog vodocrpilišta zahvaćali bi vodu iz relativno tankog vodonosnog sloja, holocenskih aluvijalnih sedimenata tzv. prvog vodonosnog sloja. Prema osnovnoj geološkoj karti M 1:100000, list Zagreb, potencijalno vodocrpilište nalazi se na sedimentima prve savske terase (a1) (Slika 3.3) u čijem litološkom sastavu prevladava kruponozrnasti 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.

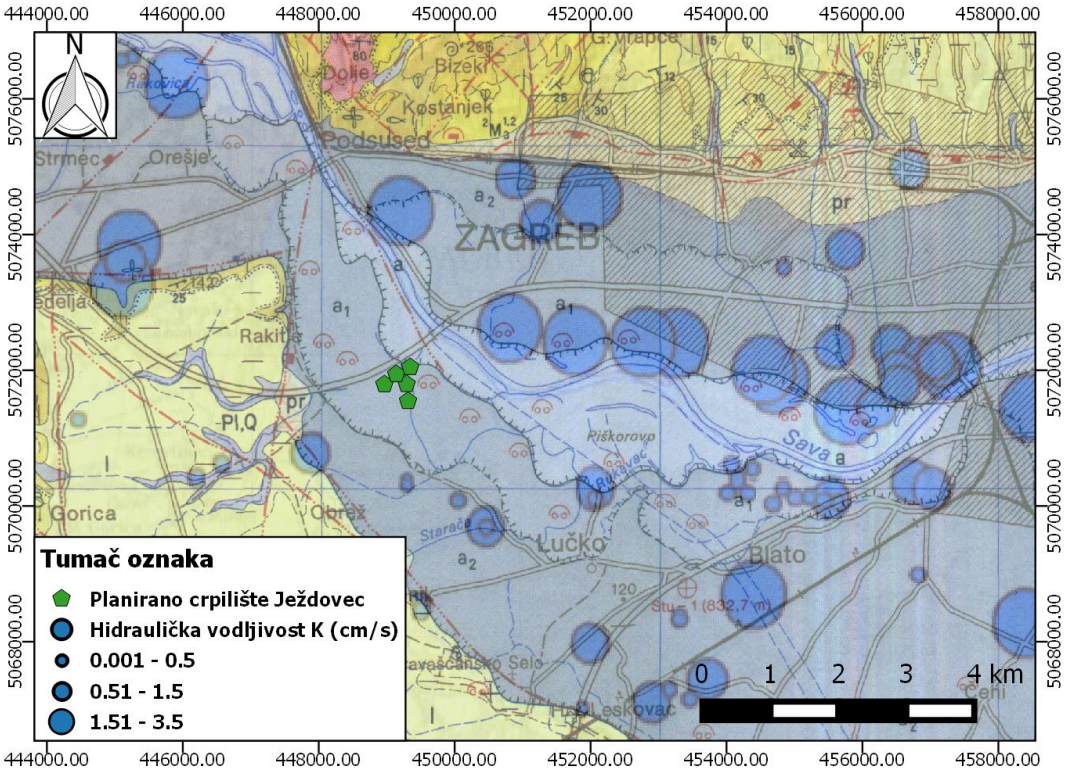


Slika 3.2 Prikaz litologije bušotina (pružanje profila prikazano na slici 2.1)

3.3. Hidrogeološke značajke

S obzirom da je istraživano područje budućeg vodocrpilišta dio veće vodonosne cjeline tj. zagrebačkog vodonosnika, za njega vrijede jednaki hidrostatski uvjeti. Vodonosnik je otvorenog tipa, što znači da krovinu vodonosnika čini vodna ploha pod atmosferskim tlakom. Isto je moguće zaključiti usporedbom bušotinskih podataka i razina podzemnih voda iz piezometara. Na području zagrebačkog vodonosnika „regionalni smjer toka podzemne vode je od zapada prema istoku tj. paralelno s rijekom Savom. Lokalni smjerovi toka podzemne vode u značajnoj mjeri ovise o vodostajima rijeke Save koja ima dominantan utjecaj na promjene razina podzemne vode. Analiza karata ekvipotencijala (Posavec, 2006) pokazala je da za vrijeme visokih vodostaja Save rijeka napaja vodonosnik na cijelom području toka kroz zagrebački vodonosnik dok za vrijeme srednjih i niskih vodostaja rijeka drenira vodonosnik na nekim dijelovima toka“ (Bačani & Posavec, 2014).

Na Slici 3.3 se nalazi prikaz mjerenih vrijednosti hidrauličkih vodljivosti zagrebačkog vodonosnika (Bačani & Posavec, 2014). Konkretnijih mjerenih vrijednosti na području planiranog vodocrpilišta nema. Stoga su za potrebe izrade numeričkih i analitičkih modela, a u svrhu određivanja zaštitnih zona, korištena mjerenja hidrauličke vodljivosti naslaga prve savske terase (a1) s lijeve strane obale rijeke Save. Ona u prosjeku iznosi između 1296 m/dan i 3024 m/dan.



Slika 3.3 Prikaz vrijednosti hidrauličke vodljivosti (Bačani i & Posavec 2014) zajedno s geološkom kartom, list Zagreb, OGK 1:100 000(Šikić et al., 1978). Tumač oznaka: a – aluvij: šljunci, pijesci i gline; a1 – najniža, prva terasa: šljunci, pijesci, podređeno gline; a2 – srednja terasa: šljunci i pijesci; pr – proluvij: šljunci, pijesci i gline; l – kopneni beskarbonatni les: glinoviti silt; lb – barski les: siltozne gline; Pl,Q – šljunci, pijesci i gline (pliopleistocen); Pl11 – lapori, laporovite gline, podređeno pijesci, pješčenjaci, šljunci i konglomerati (donji pont); 2M31,2 – vapnoviti lapori, podređeno pijesci, pješčenjaci, šljunci i konglomerati (gornji panon); 2M22 – organogeni i bioklastični vapnenci, pješčenjaci, vapnoviti i glinoviti lapori (gornji torton) (Bačani & Posavec, 2014);

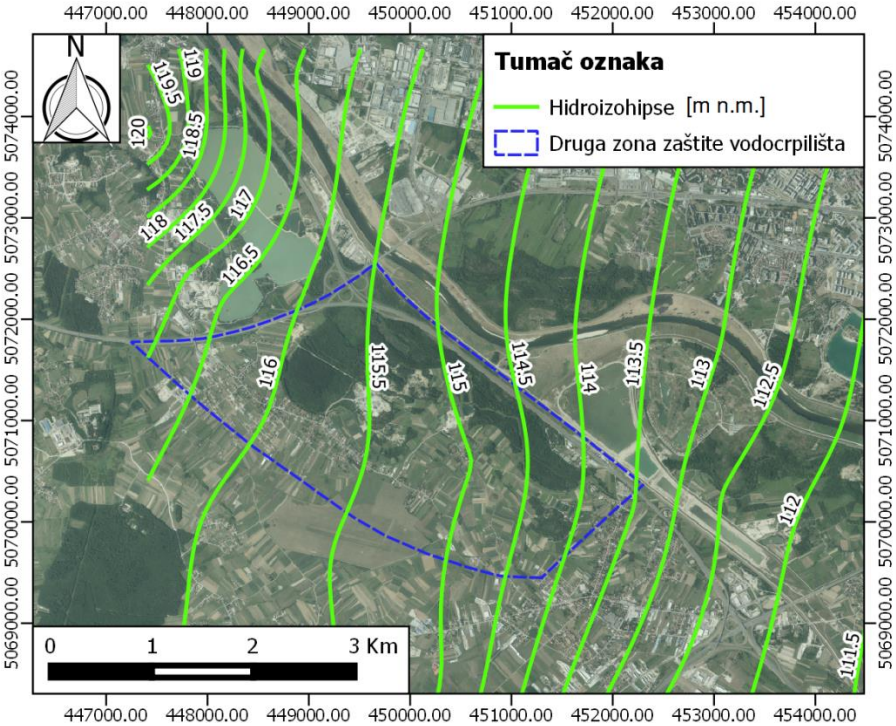
4. UTVRĐENE GRANICE VODONOSNIKA

Već je ranije navedeno da područje od interesa pripada zagrebačkom vodonosnom sastavu čije je horizontalno prostiranje određeno kvartarnim naslagama (Nakić et al., 2013).

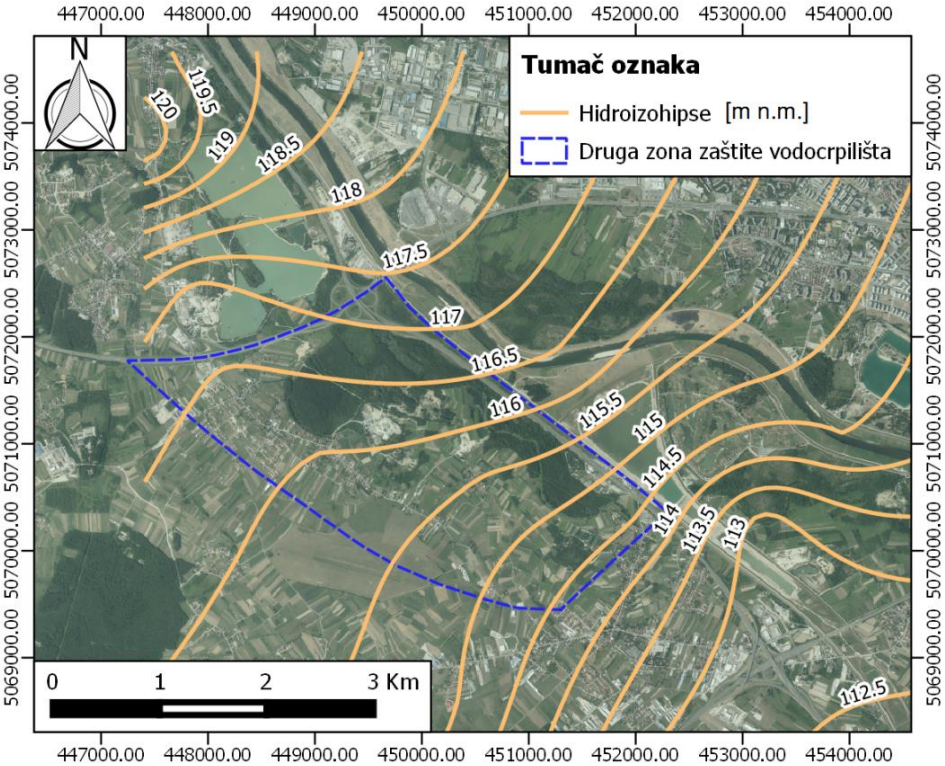
Bačani & Posavec (2014) su na temelju karata ekvipotencijala za visoke, srednje i niske razine podzemne vode analizirali dotjecanja u, odnosno iz zagrebačkog vodonosnika te su rezultati pokazali da nema značajnijeg dotjecanja na sjevernoj granici vodonosnika, zapadna granica vodonosnika definirana je kao granica dotjecanja dok je istočna granica definirana kao granica otjecanja. S obzirom na navedeno, može se zaključiti kako postoji dotjecanje iz samoborsko – zaprešićkog vodonosnika u zagrebački.

Područje istraživanja se nalazi na zapadnom rubu zagrebačkog vodonosnika te se može zaključiti kako postoji i napajanje vodonosnika iz smjera zapada, odnosno otjecanje prema istoku. Isto je vidljivo i iz konstruiranih karata ekvipotencijala (Slike 4.1 – 4.3).

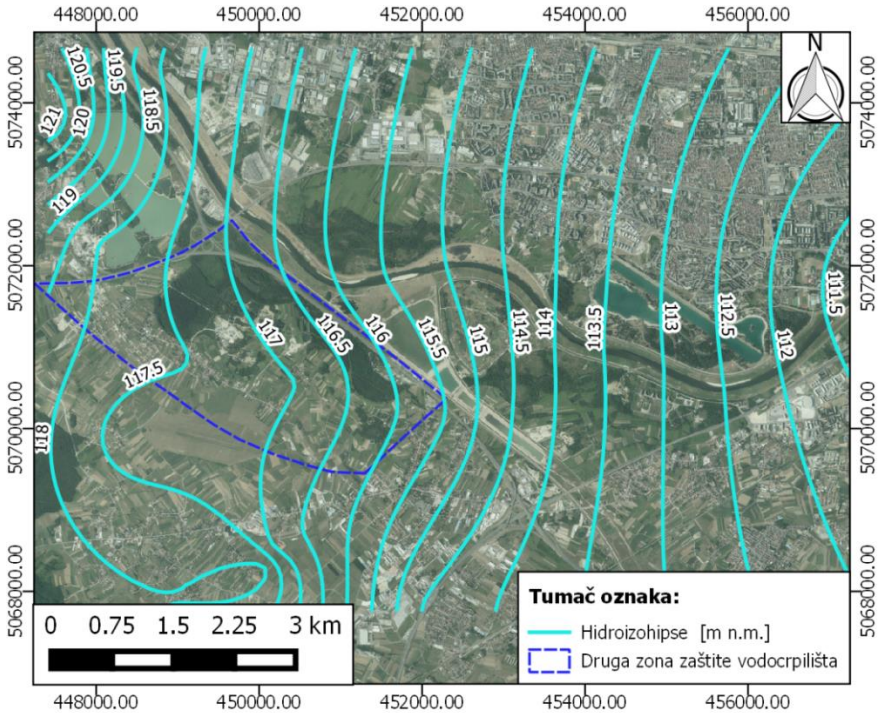
U hidrauličkom smislu, konceptualni model rubnih granica istraživanog područja opisan je na sljedeći način: rijeka Sava predstavlja granicu zadanog potencijala definiranu vodostajem, južna granica nepropusnu (strujnice okomite na ekvipotencijale) dok su zapadna granica dotjecanja te istočna granica otjecanja u konceptualnom modelu predstavljene kao granice zadanog potencijala (Slika 4.4).



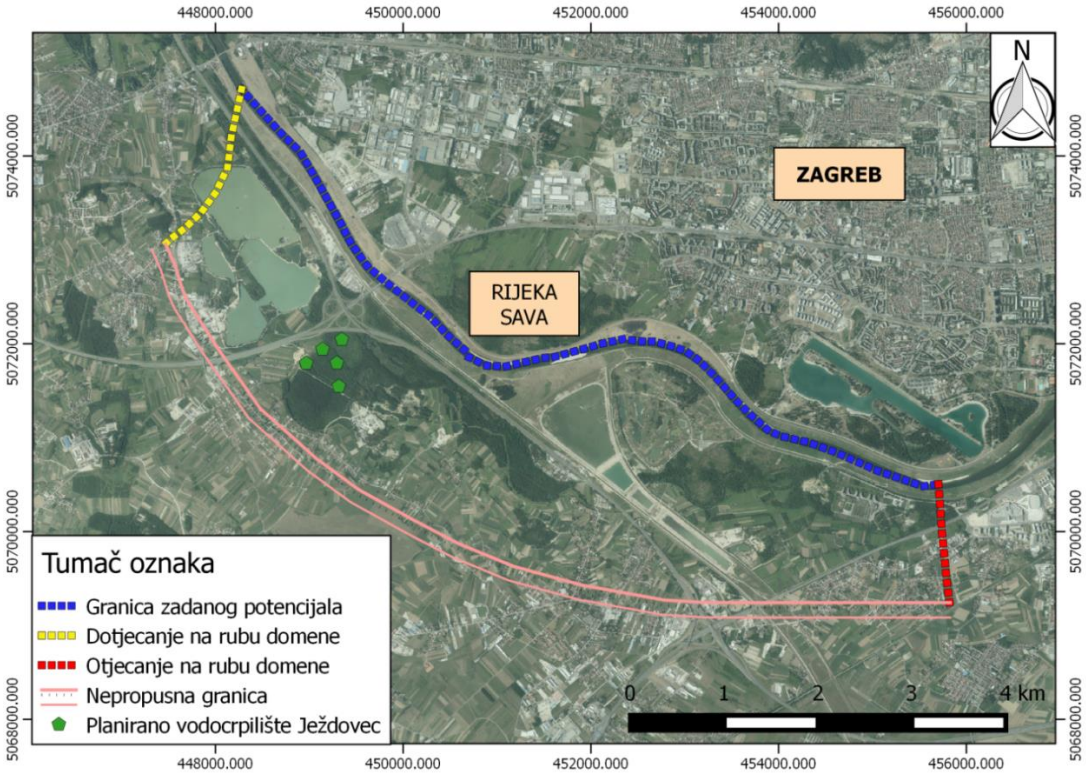
Slika 4.1 Karta ekvipotencijala za stanje niskih voda (27.8.2012. godine)



Slika 4.2 Karta ekvipotencijala za stanje srednjih voda (15.6.2012. godine)



Slika 4.3 Karta ekvipotencijala za stanje visokih voda (31.12.2012. godine)



Slika 4.4 Hidrauličke granice modela istraživanog dijela zagrebačkog vodonosnika

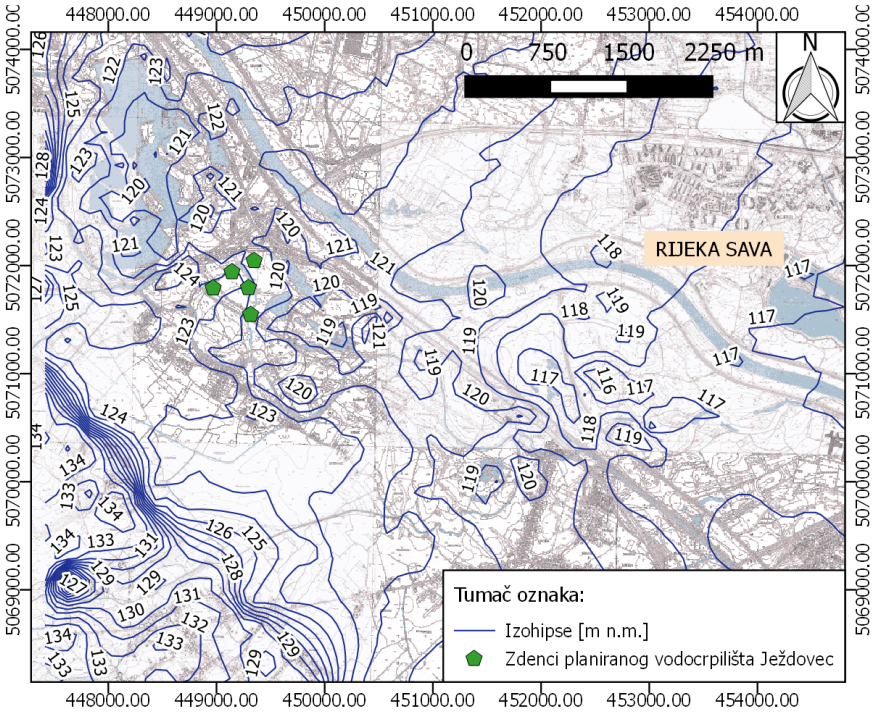
5. ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE PRIMJENOM NUMERIČKIH METODA – METODOM KONAČNIH DIFERENCIJA

5.1. Općenito

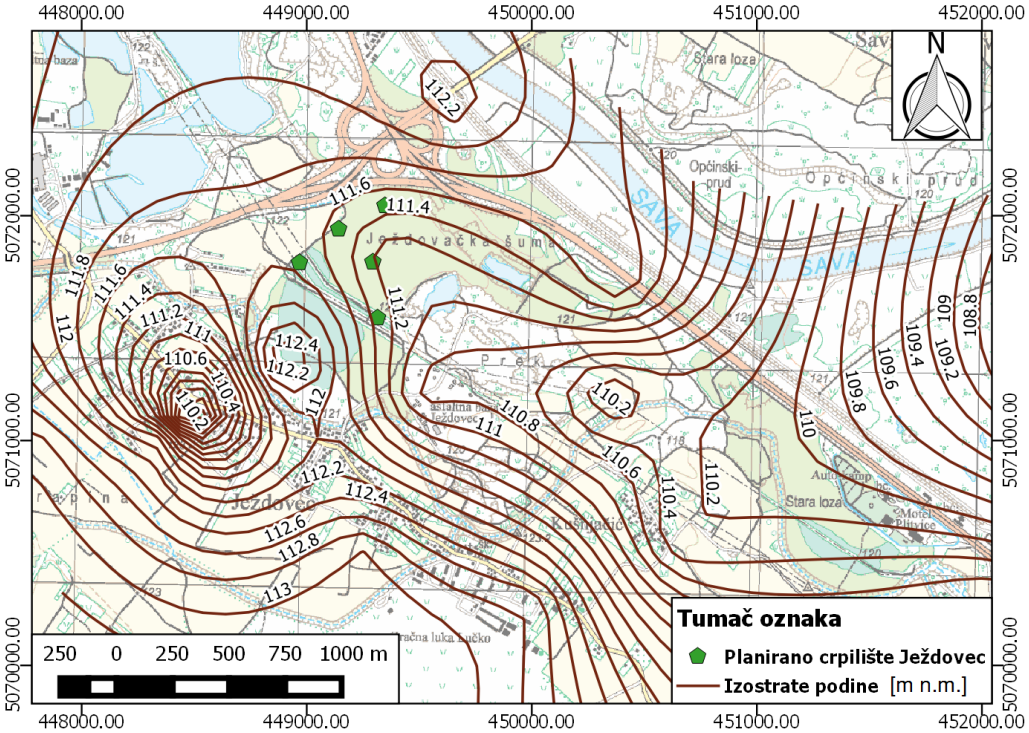
Prognozni numerički model toka podzemne vode korišten je kao osnova za izradu prijedloga granica zona sanitarne zaštite vodocrpilišta Ježdovec, za postojeće stanje izgrađenosti, dok su same granice zona sanitarne zaštite određene modelom trasiranja čestica, a koji je detaljnije opisan u poglavlju 8. Model toka podzemne vode predstavlja osnovnu podlogu za simulacije trasiranja čestica koje su provedene s ciljem procjene i određivanja zaštitnih zona vodocrpilišta, sukladno Pravilniku o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN br. 66/11).

Konceptualni model istraživanog dijela vodonosnika definiran je koristeći litološke podatke bušotina iz baze podataka projekta EGPV (projekt Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske), mjerenja razina podzemnih voda koja provodi DHMZ te Vodoopskrba i odvodnja d.o.o. u razdoblju od godinu dana (1.1.2012. – 31.12.2012.), mjerenja vodostaja rijeke Save na postajama Podsused Žičara i Zagreb (period 1.1.2012. – 31.12.2012.). Vremenski nizovi mjerenih podataka obrađeni su pomoću programa Microsoft Excel, a na temelju nivograma razina podzemnih voda izabrani su reprezentativni datumi za stanje niskih srednjih i visokih voda, te su za te datume pomoću programa Surfer, Krigging metodom interpolacije, načinjene karte ekvipotencijala (Slika 4.1 – 4.3). Kao najreprezentativniji datumi odabrani su 31.12. za visoke, 27.8. za niske vode te 15.6. za srednje vode. Pomoću programa QuantumGis, Midvatten (Källgården, 2011**)** kreirana je baza prikupljenih podataka te je program poslužio za grafički prikaz rasterskih i vektorskih podloga.

Za potrebe izrade prognoznog numeričkog modela i simulacije toka podzemne vode dodatno su izrađene karte izohipsi reljefa (Slika 5.1) te karte izostrata podine aluvijalnih sedimenata (Slika 5.2).



Slika 5.1 Izohipse reljefa šireg istraživanog područja



Slika 5.2 Izostrate podine aluvijalnih krupnoklastičnih sedimenata (1. vodonosni sloj)

5.2. Matematički model

Prema Bačani & Posavec (2014) trodimenzionalno gibanje podzemne vode konstantne gustoće kroz porozni medij može se opisati parcijalnom diferencijalnom jednadžbom:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-\ W\ =\ S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (5.1)$$

gdje su:

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

h je piezometarska razina [L];

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

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

t je vrijeme [T].

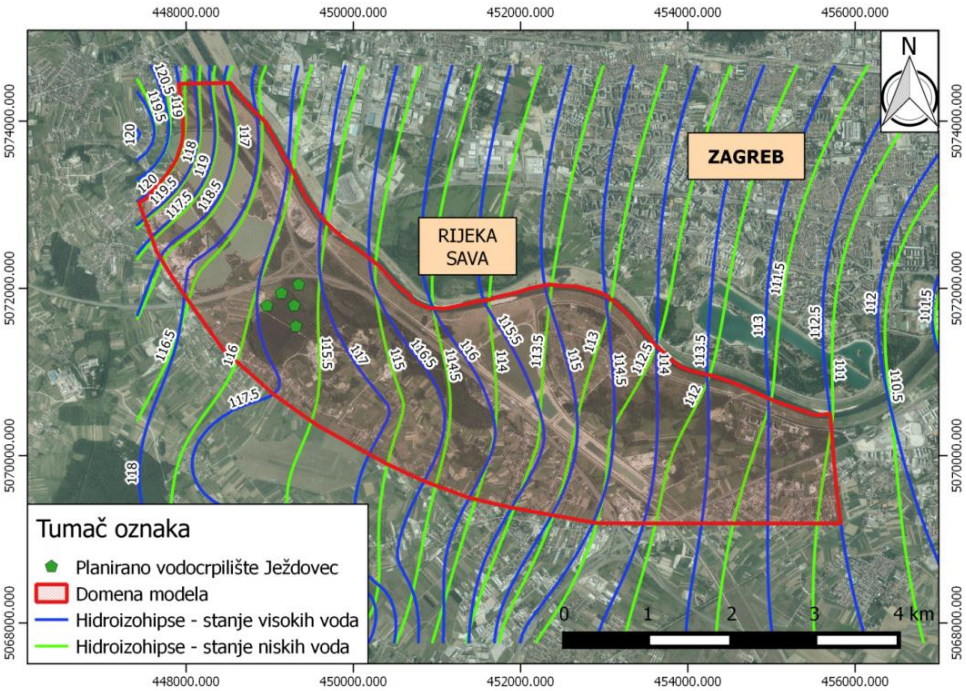
Generalno, *Ss*, K_{xx}, K_{yy} i K_{zz}mogu biti funkcije prostora (*Ss = Ss(x, y, z)*, $K_{xx} = K_{xx}(x,y,z)$, itd.), a *W* može biti funkcija prostora i vremena (*W=W(x, y, z, t)*). Jednadžba (5.1) opisuje gibanje podzemne vode u neravnotežnim uvjetima u heterogenoj i anizotropnoj poroznoj sredini, pri pretpostavci da su glavne osi hidrauličke vodljivosti paralelne s osi koordinatnog sustava. Jednadžba (5.1), 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 jednadžbom (5.1) 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 jednadžbi, 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 vrijednosti kakve bi bile dobivene analitičkim rješenjem parcijalne diferencijalne jednadžbe toka podzemne vode (Bačani & Posavec, 2014).

5.3. 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, a za simulacije trasiranja čestica korišten je program Modpath (Pollock, 1989). Programi Modflow i Modpath su sastavni dio računalnog programaVisual 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).

5.4. Osnovne postavke modela istraživanog područja

Domenu modela (Slika 5.3) prvenstveno uvjetuju holocenski sedimenti prve savske terase (šljunci, pijesci, gline). Pošto su te naslage zastupljene i šire od istraživanog područja, domena je ograničena na područje koje uglavnom obuhvaća nešto šire područje od obuhvata II. zone zaštite vodocrpilišta, sukladno prostornom planu Grada Zagreba (Slika 3.1). Nadalje, definirana je na temelju karata ekvipotencijala za niske (Slika 4.1), odnosno visoke vode (Slika 4.3) te na temelju vodostaja rijeke Save i litoloških profila. Rubni uvjeti definirani u poglavlju 4. određuju domenu modela i obrnuto.



Slika 5.3 Domena modela

Sljedeći korak predstavlja diskretizacija domene na diskretne (konačne) elemente unutar kojih se pretpostavlja da su svojstva sustava homogena (Bačani & Posavec, 2011). 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). Prosječna horizontalna diskretizacija domene modela iznosi 100 m×100 m dok je na područjima od većeg interesa (područje zdenaca) mreža dva puta gušća. Vertikalna diskretizacija domene modela bazirana je na litološkim i hidrogeološkim podacima iz kojih je vidljivo da model čini jedan vodonosni sloj.

Sukladno Pravilniku (NN 66/11), tok podzemne vode je simuliran za periode u trajanju od 50, 365 i 9125 dana, uzimajući u obzir stanje niskih i visokih voda (poglavlje 4.).

Što se tiče parametara vodonosne sredine i njihove prostorne raspodjele, na Slici 3.3 u poglavlju 3.3 nalazi se prikaz mjerenih vrijednosti hidrauličkih vodljivosti na području zagrebačkog vodonosnika. Mjerenja hidrauličkih vodljivosti na istraživanom području nema, stoga je za potrebe simulacije toka podzemne vode uzeta minimalna vrijednost hidrauličke vodljivosti naslaga prve savske terase s lijeve obale rijeke Save. Ona iznosi K = 0,015 m/s (1296 m/dan), za simulirani prvi vodonosni sloj. Pretpostavljena je izotropna sredina, odnosno jednaka vrijednost hidrauličke vodljivosti u smjerovima x, y i z. U nedostatku podataka o vrijednostima preostalih parametara vodonosnika korišteni su podaci iz literature (Spitz & Moreno, 1996). Specifično uskladištenje (Ss) iznosi 0,00001 1/m, specifično otpuštanje (Sy) iznosi 0,2, efektivna poroznost (n_{ef}) 0,14, a ukupna poroznost (n) 0,3.

Kako je ranije spomenuto, primjena numeričkih metoda zahtjeva i definiranje početnih uvjeta u domeni modela. Početni uvjeti definiraju raspodjelu potencijala (piezometarskih razina) u početno vrijeme u domeni toka (Bačani & Posavec, 2011). Tok podzemne vode se promatra kao stacionaran te je izrađena karta ekvipotencijala koja predstavlja početnu raspodjelu razina podzemne vode na datum 1.1.2012. godine.

Za izradu te karte, potreban je bio veći broj podataka tj. mjerenja duž same rijeke Save. U odnosu na relativno malu dimenziju domene modela, dostupna su mjerenja za dvije vrlo udaljene hidrološke postaje. Iz potrebe za generiranjem što kvalitetnijih početnih uvjeta, na topografskoj podlozi duž toka rijeke kreirane su virtualne hidrološke postaje međusobno udaljene 1 kilometar (Slika 3.1). Prema Bačani & Posavec (2014), vodostaj na virtualnim hidrološkim stanicama proračunava se linearnom interpolacijom između dvije susjedne hidrološke stanice. Vodostaj između početne točke (uzvodna stvarna hidrološka stanica) i završne točke (nizvodna stvarna hidrološka stanica) linearno se interpolira koristeći formulu:

$$h_i = h_p + ((h_z - h_p)/L) \times L_i \qquad (5.2)$$

gdje je:

h_i – vodostaj na i-toj virtualnoj hidrološkoj stanici [L],

h_p – vodostaj na početnoj stvarnoj hidrološkoj stanici [L],

h_z – vodostaj na završnoj stvarnoj hidrološkoj stanici [L],

L – udaljenost između početne i završne stvarne hidrološke stanice [L],

L_i – udaljenost između početne stvarne hidrološke stanice i i-te virtualne hidrološke stanice [L].

Mjerenja razina podzemnih voda i vodostaja (virtualnih i stvarnih) su interpolirana Krigging metodom kako bi se kao rezultat dobila početna raspodjela razina podzemne vode u modelu.

Granični uvjeti definirani su hidrauličkim uvjetima na granicama modela. S obzirom na matematički opis događaja na granici postroje tri tipa granica odnosno graničnih uvjeta: 1. tip (Dirichlet), 2. tip (Neuman) i 3. tip (Cauchy) (Bačani & Posavec, 2011).

Domena modela za stanje niskih i visokih voda prikazana je na Slici 5.3. Rubne granice modela opisane su u hidrauličkom smislu na sljedeći način: sjeverna, istočna i zapadna granica su definirane u modelu kao granice zadanog potencijala (1. tip) dok je južna granica nepropusna (2. tip), definirana strujnicom okomitom na ekvipotencijale (vidjeti poglavlje 4.).

6. ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE PRIMJENOM ANALITIČKE METODE – METODOM ANALITIČKIH ELEMENATA

6.1. Općenito

Za izradu prijedloga granica zona sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec, korišten je računalni program Whaem2000. Suradnjom između američke agencije za zaštitu okoliša (engl. U.S. EPA), Sveučilišta Indiana (engl. Indiana University) i Sveučilišta Minnesota (engl. the University of Minnesota) 1994. godine program je napravljen baš za potrebe određivanja zona zaštite izvorišta te i danas predstavlja jednu od često korištenih metoda.

Model toka podzemne vode predstavlja osnovnu podlogu za simulacije trasiranja čestica koje su provedene s ciljem određivanja zaštitnih zona vodocrpilišta, sukladno Pravilniku o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN br. 66/11).

U programu Whaem2000, model je konceptualno predstavljen kao jednoslojna, homogena i izotropna, horizontalna vodonosna sredina, beskonačnog rasprostiranja za koju vrijede stacionarni uvijeti toka. Konceptualni model istraživanog područja definiran je koristeći litološke i hidrogeološke podatke ranije opisane u poglavlju 5.1.

6.2. Matematički model

U poglavlju 5.2 jednadžbom (5.1) opisano je gibanje podzemne vode u ravnotežnim uvjetima u heterogenoj i anizotropnoj poroznoj sredini, pri pretpostavci da su glavne osi hidrauličke vodljivosti paralelne s osi koordinatnog sustava. Primjena analitičkih metoda zahtjeva homogenu i izotropnu sredinu ($K_x = K_y = K_z = K$) kao i pretpostavku da je tok stacionaran $\left(\frac{\partial h}{\partial t} = 0\right)$. U tom slučaju jednadžba (5.1) poprima sljedeći oblik, a naziva se još i Laplaceova jednadžba za trodimenzionalan stacionaran tok podzemne vode:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{5.3}$$

Jednadžba (5.3), zajedno s definiranim graničnim uvjetima (dotjecanjima/otjecanjima i/ili potencijalom na granicama vodonosnika) čini matematički model gibanja vode u vodonosniku (Bačani & Posvec, 2011). Za vrlo jednostavne sustave, moguća su analitička rješenja jednadžbe toka, za koje u slučaju stacionarnog toka, početnih uvjeta nema. Uz primjenu Dupuit – Forcheimer aproksimacije $\left(\frac{\partial h}{\partial z} = 0\right)$ koja zanemaruje vertikalan tok podzemne vode, trodimenizionalan tok svodi se na dvodimenzionalan, odnosno tok u horizontalnoj ravnini. Rješavanjem parcijalne diferencijalne jednadžbe uz granične uvjete dobivaju se egzaktna rješenja jednadžbe toka u obliku raspodjele potencijala (piezometarske razine) kao kontinuirane funkcije prostornih koordinata (Bačani, 2006).

Metoda analitičkih elemenata (engl. analytic element method) je jedna od metoda koje se koriste za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Ovom metodom, granični uvjeti u modelu su predstavljeni kao niz analitičkih elemenata od kojih svaki element nudi analitičko rješenje za jednadžbu toka podzemne vode, a superpozicija velikog broja individualnih rješenja pruža konačno rješenje odnosno model toka podzemne vode za cijeli sustav (Haitjema, 1995).

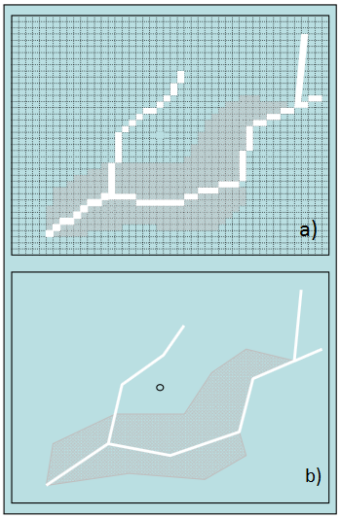
6.3. Računalni model

Za simulaciju toka podzemne vode i simulacije trasiranja čestica sa svrhom delineacije zona sanitarne zaštite vodocrpilišta, korišten je program za modeliranje toka podzemne vode Whaem2000. Predstavlja interaktivno grafičko sučelje pomoću kojeg se vrši unos ulaznih podataka, provođenje simulacija te prikaz rezultata. Whaem se sastoji od dvaju izvršnih programa: preprocesora GAEP (engl. Geographical Analytic Element Preprocessor) i modela toka CZAEM (engl. the Capture Zone Analytic Element Model). Implementacija metode analitičkih elemenata u CZAEM se može opisati kao jednostavna i osnovna jer podržava samo nekoliko osnovnih analitičkih elemenata. Ti osnovni elementi se koriste za simulacije hidroloških pojava kao što su rijeke, jezera, zdenci te jednolika infiltracija oborina (Haitjema et al., 1995).

6.4. Osnovne postavke modela istraživanog područja

Domena modela dijelom je uvjetovana glavnim postavkama računalnog programa CZAEM, a dijelom hidrauličkim uvjetima na granicama konceptualnog modela istraživanog područja. Kako je ranije spomenuto, program CZAEM je jednoslojni model ujednačene debljine, neograničenog horizontalnog rasprostiranja predviđen za simulaciju stacionarnog toka u homogenim vodonosnicima (Haitjema et al. 1995). Za potrebe usporedbe analitičkih i numeričkih metoda, horizontalno rasprostiranje domene modela definirano u poglavlju 4 ostaje isto (Slika 5.3).

Metodom analitičkih elemenata diskretizira se samo prostor oko graničnih uvjeta zadanih u modelu. Domena modela je ograničena količinom uključenih elemenata, a ne prostornim opsegom (Haitjema et al., 1995). Vertikalna diskretizacija domene modela bazirana je na kartama izopaha saturiranih debljina za stanje visokih i niskih voda, te osnovnim postavkama programa CZAEM. Na Slici 6.3 je shematski prikazana razlika između diskretizacije domene modela primjenom numeričkih metoda (a) i diskretizacija domene modela primjenom metode analitičkih elemenata (b). Bijelom bojom je shematski prikazana rijeka.



Slika 6.3 Shematski prikaz diskretizacije domene modela: a)metoda konačnih diferencija i b) metoda analitičkih elemenata (Brikowski, 2013)

Prema Pravilniku (NN 66/11), tok podzemne vode je simuliran za periode u trajanju od 50, 365 i 9125 dana, uzimajući u obzir stanje niskih i visokih voda (poglavlje 4.).
Korišteni su isti parametri vodonosne sredine kao i za izradu numeričkog modela u poglavlju 5.4 kako bi bilo moguće usporediti rezultate simulacija. U te parametre spadaju hidraulička vodljivost (K = 0,015 m/s) (Slika 3.3), debljina saturacije te ukupna poroznost.

S obzirom da je tok stacionaran, početnih uvjeta nema te su definirani samo granični uvjeti. U programu Whaem ulogu graničnih uvjeta imaju važne hidrološke pojave (rijeke, jezera, područja infiltracije oborina) koje su predstavljene u modelu kao niz analitičkih elemenata od kojih svaki element nudi analitičko rješenje za jednadžbu toka podzemne vode. 'Line – sinks (engl.)' koriste se za simulaciju graničnih uvjeta u vidu rijeka i jezera, a koje predstavljaju matematičke funkcije koje opisuju konstantni omjer ili brzinu istjecanja duž linije. Pomoću Thiemove jednadžbe, tzv. funkcije zdenca simuliraju se zdenci određene izdašnosti (Haitjema et al., 1995).

Iako je u programu samo predviđena simulacija hidroloških pojava u obliku rijeka i jezera, u ovom slučaju zbog dominantnog dotjecanja sa zapada (vidjeti poglavlje 4.) simulirana je i granica konstantnog potencijala na zapadu te ona na istoku. Tako su granični uvjeti slični onima definiranim u poglavlju 5.4.

7. ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE PRIMJENOM DARCY – JEVOG ZAKONA

7.1. Općenito

Osnovu za izradu prijedloga zona sanitarne zaštite čini karta izolinija sniženja odnosno karta hidroizohipsi dobivena pomoću računalnog programa Wellz. Nadalje, primjenom Darcy-jevog zakona, bez upotrebe računala, dobivene su raspodjele efektivnih brzina koje su poslužile za procjenu samih granica zona sanitarne zaštite, sukladno Pravilniku o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN br. 66/11).

Model toka podzemne vode predstavlja osnovnu podlogu za simulacije trasiranja čestica koje su provedene s ciljem određivanja zaštitnih zona vodocrpilišta.

Konceptualni model u programu Wellz je predstavljen kao jednoslojna, homogena i izotropna vodonosna sredina, neograničenog horizontalnog rasprostiranja za koju vrijede stacionarni uvjeti toka. Konceptualni model istraživanog područja definiran je koristeći litološke i hidrogeološke podatke ranije opisane u poglavlju 5.1. Za potrebe usporedbe analitičkih i numeričkih metoda, horizontalno rasprostiranje domene modela definirano u poglavlju 4. jednako je i za ovaj slučaj (Slika 5.3). Granični uvjeti u modelu simulirani su imaginarnim zdencima uz upotrebu programa Autocad (Autodesk, 1982).

7.2. Matematički model

Primjena analitičkih metoda zahtjeva homogenu i izotropnu sredinu kao i pretpostavku da je tok stacionaran $\left(\frac{\partial h}{\partial t} = 0\right)$. U tom slučaju tok podzemne vode opisujemo Laplaceovom jednadžbom (5.3). Kako bismo dobili matematički model gibanja vode u vodonosniku, potrebno je definirati i granične uvjete. U slučaju stacionarnog toka, početnih uvjeta nema (Bačani & Posavec, 2011).

Uz primjenu Dupuit – Forcheimer aproksimacije $\left(\frac{\partial h}{\partial z} = 0\right)$ koja zanemaruje vertikalan tok podzemne vode, trodimenizionalan tok svodi se na dvodimenzionalan, odnosno tok u horizontalnoj ravnini te je moguće primijeniti Darcy-jev zakon.

7.3. Računalni model

Za simulaciju toka podzemne vode sa svrhom delineacije zona zaštite planiranog vodocrpilišta, korišten je računalni program Wellz. Program kao izlazni podatak daje kartu izolinija sniženja nastalih uslijed crpljenja zdenaca određenom crpnom količinom za zadano vrijeme. To je program koji simulacijom imaginarnih (zrcalnih) zdenaca ograničava neograničeni jednoslojni model te time imaginarni zdenci imaju ulogu rubnih uvjeta.

7.4. Osnovne postavke modela istraživanog područja

Domena modela dijelom je uvjetovana glavnim postavkama računalnog programa Wellz. Program pretpostavlja neograničenu jednoslojnu homogenu sredinu u kojoj vladaju stacionarni uvjeti toka. Stoga je domena, simulacijom imaginarnih zdenaca, ograničena na manje područje, jednako onom korištenom za izradu numeričkog i analitičkog modela toka (poglavlje 4. i 5.4). Domena modela (Slika 5.3) nije diskretizirana jer to ne podržava računalni program.

Tok podzemne vode odnosno crpljenja grupe zdenaca simulirani su za vrijeme u trajanju od 50, 365 i 9125 dana, sukladno Pravilniku o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN br. 66/11), za stanje niskih i visokih voda.

Korišteni su isti parametri vodonosne sredine kao i za izradu prognoznih numeričkih modela u poglavlju 5.4 pomoću programa Modflow, kako bi bilo moguće usporediti rezultate simulacija. U te parametre spadaju hidraulička vodljivost (K = 0,015 m/s), debljina saturacije 4,5 – 5 m , ukupna poroznost 0,3 i efektivna poroznost 0,14.

S obzirom da se zdenci planiranog vodocrpilišta nalaze u blizini prirodne bočne granice, a u modelu se žele koristiti analitičko rješenje, koja pretpostavljaju neograničeni sloj, problem se rješava imaginarnim (zrcalnim) zdencima. Granični uvjeti modela simulirani su imaginarnim zdencima. Granice konstantnog potencijala simulirane su upojnim zrcalnim zdencima dok je nepropusna granica simulirana crpnim zdencima (Bačani & Posavec, 2011).

7.5. Matematička podloga korištena za procjenu zona zaštite vodocrpilišta

Na temelju dobivenih karata ekvipotencijala tj. sniženja izračunate su promjene potencijala na putu – hidraulički gradijenti ($i = dh/dl$) nužni za izračun tzv. Darcyjeve brzine odnosno specifičnog protoka q (Bačani, 2006). Prema Darcyjevom zakonu (Darcy, 1956):

$$q = K * i = -K * (dh/dl) \tag{7.1}$$

gdje su:

K – hidraulička vodljivost (m/s)

h – piezometarska razina (m)

l – duljina puta (m)

$i = dh/dl$ – hidraulički gradijent, promjena potencijala na promatranom putu (-)

U vektorskom obliku jednadžba (7.1) glasi:

$$\vec{q} = -Kgradh \tag{7.2}$$

gdje su:

K – hidraulička vodljivost (m/s)

h – piezometarska razina (m)

Kako je ranije spomenuto, primjenom Dupuit – Formaicherove aproksimacije, dimenzija toka je svedena na dvodimenzionalan horizontalan tok.

U tom je slučaju, prema Bačani (2006), specifični protok jednak:

$$\vec{q}_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \tag{7.3}$$

$$\vec{q}_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \tag{7.4}$$

gdje su:

Kx, Ky – hidraulička vodljivost u x i y smjeru,

$\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}$ – promjena potencijala (gradijent) u x i y smjeru;

Stvarna ili efektivna brzina kretanja čestica (jednadžba 7.5) dobiva se dijeljenjem tzv. Darcyjeve prividne brzine $\vec{q}$ s efektivnom poroznosti n_{ef}, a naziva se Dupuitovom (1863) efektivnom brzinom. Iako se naziva stvarnom brzinom ne predstavlja stvarnu brzinu mikroskopskog gibanja čestica tekućine kroz vijugavi šuplji prostor. To je ustvari neka osrednjena vrijednost brzine gibanja $\overrightarrow{v_{ef}}$ vode unutar šupljina elementarnog obujma poroznog medija (Urumović, 2003).

$$\vec{q} = n_{ef}\overrightarrow{v_{ef}} \tag{7.5}$$

Primjenom jedne od elementarnih jednadžbi gibanja klasične mehanike (7.6) dobiveno je vrijeme koje je čestici potrebno da pređe određeni put određenom brzinom te je sukladno Pravilniku (NN 66/11) izračunato vrijeme zadržavanja čestica u podzemlju za različito vrijeme trajanja simulacija.

Iznos brzine je derivacija puta po vremenu (Kittel et al., 1973):

$$v = ds/dt \tag{7.6}$$

gdje su:

s – pređeni put (duljina pređene putanje) do trenutka *t*, računajući od nekog početnog trenutka ili položaja (m),

t – vrijeme (s).

8. POSTUPAK IZRADE PRIJEDLOGA ZONA SANITARNE ZAŠTITE IZVORIŠTA U SKLADU S PRAVILNIKOM O UVJETIMA ZA UTVRĐIVANJU ZONA SANITARNE ZAŠTITE IZVORIŠTA (NN BR. 66/11, 47/13)

Svaka od ranije obrađenih triju metoda je izabrana i korištena u svrhu simulacije trasiranja čestica s ciljem određivanja zaštitnih zona planiranog vodocrpilišta Ježdovec. Sve tri metode se u suštini temelje na sličnom principu koji je objašnjen dalje u tekstu.

Za simulacije trasiranja čestica numeričkom metodom (poglavlje 5.) korišten je računalni program Modpath (Pollock, 1989), a za simulacije trasiranja čestica analitičkom metodom programi Whaem2000 (poglavlje 6.) i Wellz (poglavlje 7.). Podlogu svakog modela trasiranja čestica zapravo čini model toka i raspodjela efektivnih brzina toka podzemne vode (Bačani & Posavec, 2011). Glavni cilj simulacije toka podzemne vode, na kojem se temelji model trasiranja čestica, je kao izlazne parametre dobiti što preciznije raspodjele efektivnih brzina toka podzemne vode u domeni modela (Haitjema et al., 1995). Programi Modpath i Whaem koriste jednadžbe trasiranja čestica koje se temelje na pretpostavci da se sve čestice otopine kreću efektivnom brzinom toka podzemne vode. Za izračun efektivne brzine toka podzemne vode u domeni modela neophodan je parametar efektivne poroznosti n_{ef}. Tako se na temelju rezultata modela toka i prostorne raspodjele efektivne poroznosti kreira raspodjela efektivnih brzina toka podzemne vode u domeni modela. Na istom principu se temelji model trasiranja čestica dobiven klasičnim analitičkim proračunom pomoću programa 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 kako je to propisano Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011).

Delineacija II. i III. zone zaštite vodocrpilišta Ježdovec, kako je to definirano Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011), izvršena je koristeći rezultate simulacija trasiranja čestica unatrag (engl. backward particle tracking). Prema trenutno važećem Pravilniku, III. zona zaštite obuhvaća područje izvan granice II. zone do izračunate granice područja napajanja za minimalno vrijeme zadržavanja vode u podzemlju u trajanju od 25 godina horizontalnog toka, dok II. zona zaštite obuhvaća područje izvan granice

I. zone do linije od koje podzemna voda ima minimalno vrijeme zadržavanja u podzemlju od 50 dana prije ulaska u vodozahvatni objekt. I. zona zaštite mora biti udaljena od građevina za zahvat vode najmanje 10 m na sve strane i mora biti ograđena. Na Slikama 8.1 i 8.2 prikazani su rezultati simulacija trasiranja čestica za visoke i niske vode dobiveni primjenom numeričkih i analitičkih metoda.

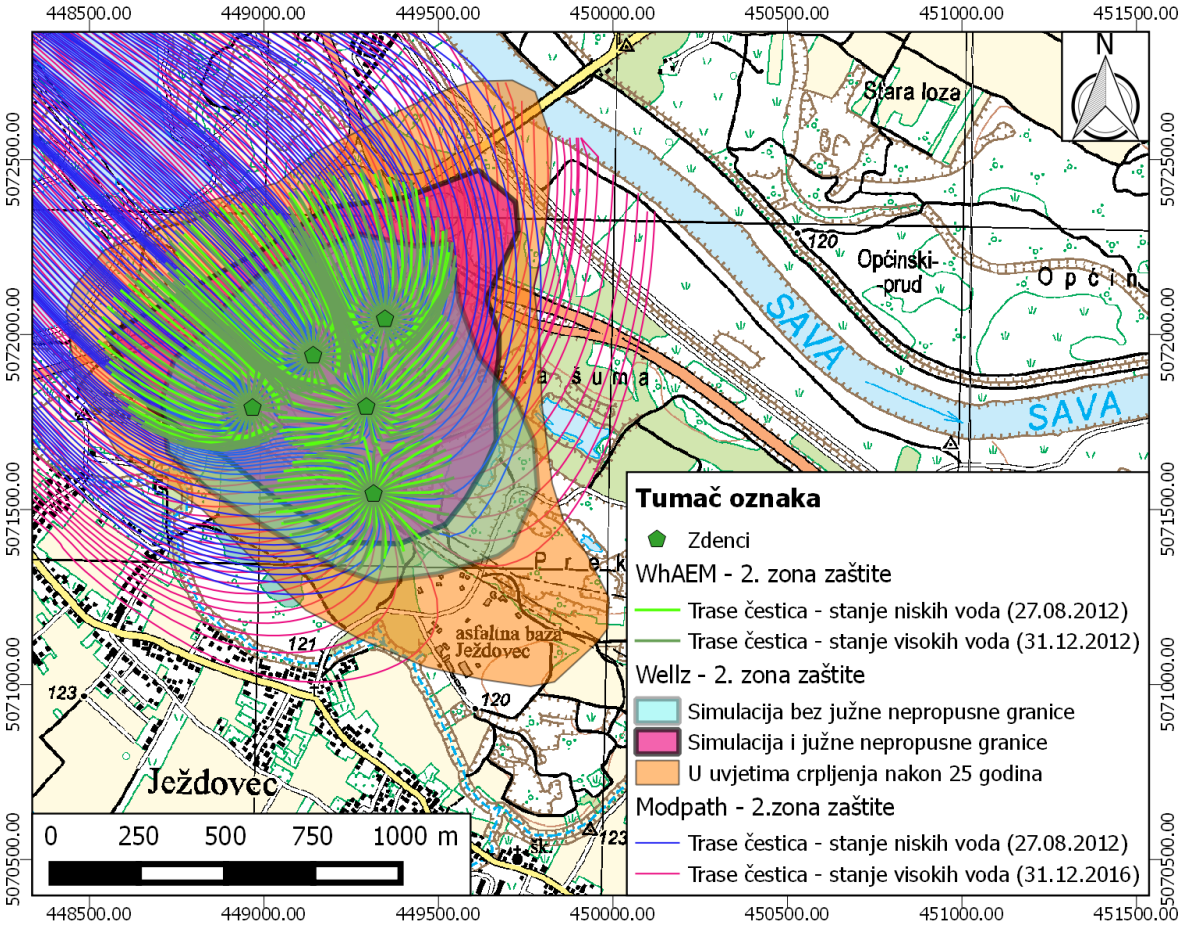
Za izradu I. zone zaštite korišteni su katastarski planovi (M 1:1000) te HOK 5000.

Za izradu II. zone zaštite korišteni su rezultati simulacija trasiranja čestica za visoke i niske vode, topografska podloga TK 1:25000 te katastarski planovi (1:10000). Također su primijenjene sljedeće smjernice, preuzete iz Elaborata o zaštiti vodocrpilišta Grada Zagreba (Bačani & Posavec, 2014.):

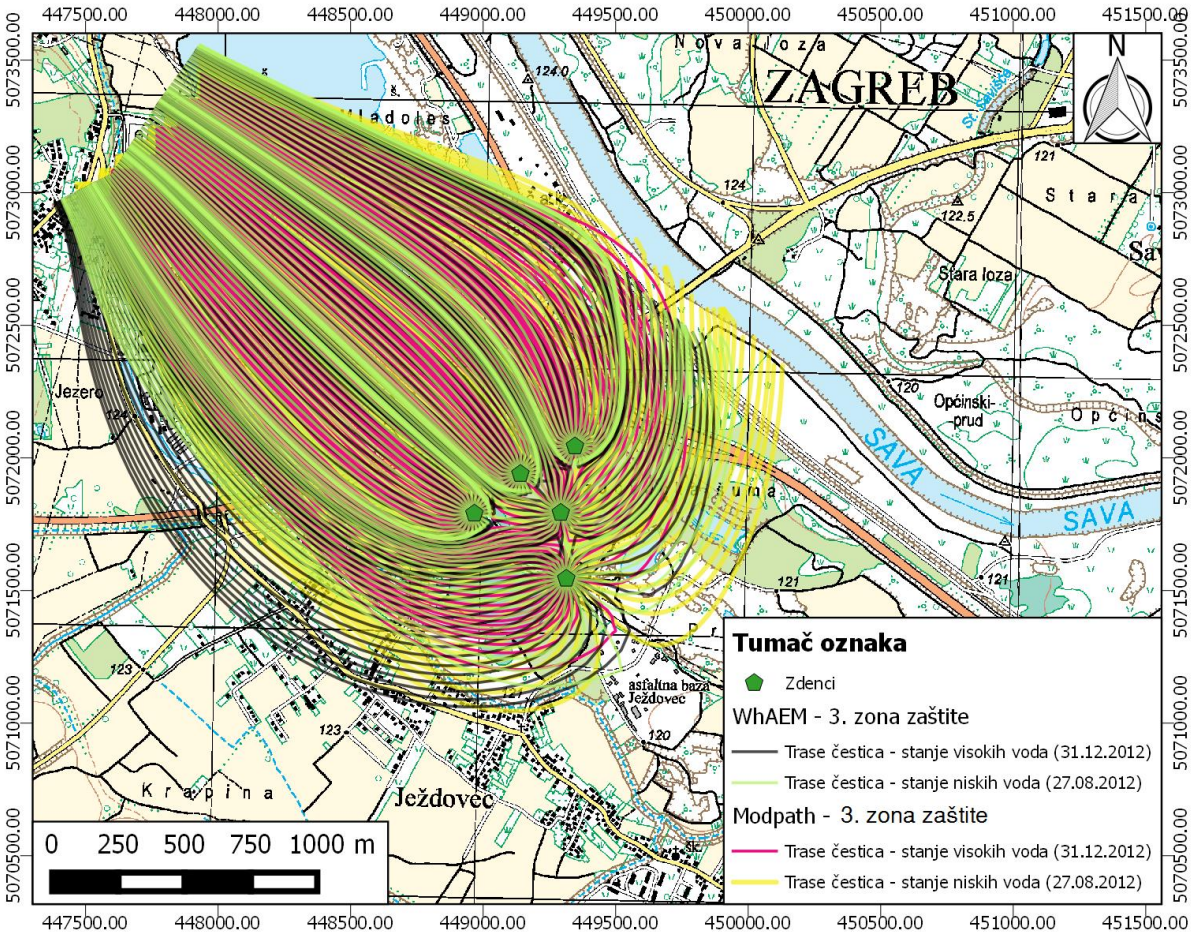
a) II. zona zaštite treba biti veća od II. zone dobivene simulacijama trasiranja čestica za visoke i niske vode (faktor sigurnosti)

b) Granica II. zone zaštite treba ići prometnicama ili putovima zbog mogućnosti lakšeg označavanja i uočavanja oznaka.

Za izradu III. zone zaštite također su korišteni rezultati simulacija trasiranja čestica za visoke i niske vode, te topografska podloga TK 1:25000. Kod delineacije granice III. zone sanitarne zaštite također se držalo dogovorenih smjernica da granica III. zone zaštite ide prometnicama ili putovima zbog mogućnosti lakšeg označavanja i uočavanja oznaka.



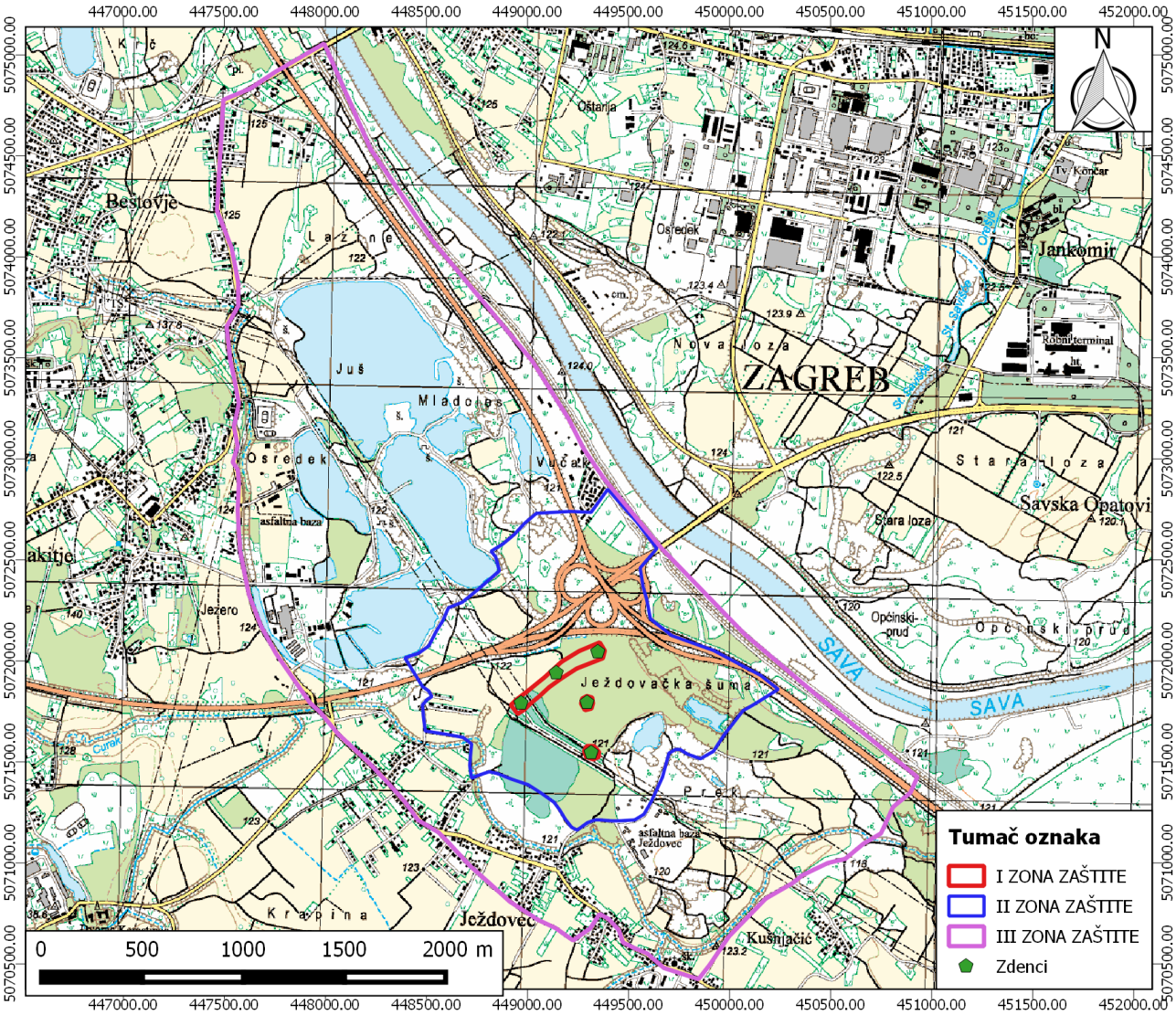
Slika 8.1 Simulirane trase za period trajanja 50 dana



Slika 8.2 Simulirane trase za period trajanja 25 godina

8.1. Grafički prikaz prijedloga granica zona sanitarne zaštite vodocrpilišta Ježdovec

Prijedlog zona sanitarne zaštite vodocrpilišta Ježdovec načinjen je u skladu s Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011), na način koji je ranije opisano u poglavlju 8. Grafički prikaz prijedloga granica zona vodocrpilišta Ježdovec prikazan je na Slici 8.3.



Slika 8.3 Prijedlog zona sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec

9. PRIJEDLOG MJERA ZAŠTITE IZVORIŠTA

Mjere zaštite izvorišta definirane su Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/11) i Pravilnikom o izmjenama pravilnika o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 47/13).

Prema trenutno važećem Pravilniku, III. zona sanitarne zaštite izvorišta sa zahvaćanjem vode iz vodonosnika s međuzrnskom poroznosti utvrđuje se osobito radi smanjenja rizika onečišćenja podzemne vode od teško razgradivih opasnih i onečišćujućih tvari.

II. zona sanitarne zaštite izvorišta sa zahvaćanjem voda iz vodonosnika s međuzrnskom poroznosti utvrđuje se radi smanjenja rizika od onečišćenja podzemnih voda patogenim mikroorganizmima i drugih štetnih utjecaja koji se mogu pojaviti tijekom zadržavanja vode u podzemlju.

I. zona sanitarne zaštite izvorišta sa zahvaćanjem voda iz vodonosnika s međuzrnskom poroznosti utvrđuje se radi zaštite izvorišta, vodozahvatnih građevina i njihove neposredne okolice od bilo kakvog oštećenja, onečišćenja vode te drugih slučajnih ili namjernih štetnih utjecaja.

Prema članku 35. trenutno važećeg Pravilnika, unutar zona sanitarne zaštite provode se mjere aktivne i pasivne zaštite izvorišta. Mjere aktivne zaštite su monitoring kakvoće vode na priljevnom području izvorišta i poduzimanje aktivnosti za poboljšanje stanja voda, a osobito: gradnja vodnih građevina za javnu vodoopskrbu i odvodnju otpadnih voda, uvođenje čistih proizvodnji, organiziranje ekološke poljoprivredne proizvodnje, ugradnja spremnika opasnih i onečišćujućih tvari s dodatnom višestrukom zaštitom i druge mjere koje poboljšavaju stanje voda. Mjere pasivne zaštite su zabrane propisane pravilnikom (NN 47/13) u člancima 1. i 2. Za drugu i treću zonu zaštite te zabrane propisane pravilnikom (NN 66/11) u člancima 15 i 16. Za prvu zonu zaštite.

10. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu procijenjene su zone sanitarne zaštite planiranog vodocrpilišta Ježdovec, prema trenutno važećem Pravilniku o uvjetima utvrđivanja zona sanitarne zaštite izvorišta (NN br. 66/11, 47/13) koristeći pritom metode koje se baziraju na numeričkom i analitičkom pristupu. Analizirani su podaci razina podzemnih voda i vodostaja za razdoblje od 1.1.2012. do 31.1.2012. godine na temelju kojih su, uz litološke podatke bušotina, kreirani numerički i analitički modeli toka podzemne vode. Kreiranje modela toka podzemne vode je prvi korak nužan za provedbu simulacija trasiranja čestica unatrag (engl. backward particle tracking), a pomoću kojih su određene granice propisanih zona sanitarne zaštite.

Program Wellz zbog svojih ograničenja nije korišten za delineaciju treće zone zaštite. Iz rezultata simulacija trasiranja čestica unatrag vidimo kako se oni dobiveni pomoću računalnog programa Whaem i rezultati trasiranja izračunati bez upotrebe računala sasvim dobro poklapaju (II. zona zaštite). Vidljiva su manja odstupanja, uglavnom posljedica preciznosti svake od metoda. Kao najbrža metoda kojom su dobiveni pouzdani rezultati pokazala se metoda analitičkih elemenata odnosno rezultati dobiveni pomoću programa Whaem. Zbog većeg broja ulaznih parametara i potrebne obrade podataka koje zahtjeva program Visual Modflow za kreiranje numeričkog modela, ova metoda je nešto sporija, ali na račun vremena, dobivaju se točniji i kvalitetniji rezultati. Prvenstveno, jer program Whaem pretpostavlja jednoslojnu, homogenu, izotropnu vodonosnu sredinu te stacionaran tok.

Program Visual Modflow je u daleko većoj prednosti što se tiče mogućnosti opisa heterogenosti sustava u modelu, opisivanja rubnih i početnih uvjeta te mogućnosti simulacije i nestacionarnog toka što za analitičke metode nije moguće.

S obzirom da se radi o geometrijski vrlo jednostavnom vodonosniku – jednoslojna sredina, bez većih litoloških promjena, moguće je s dozom sigurnosti primijeniti i rezultate dobivene analitičkim pristupom odnosno pomoću programa Whaem.

Također zaključujem, da je moguće s vrlo jednostavnim računalnim programom (Wellz) koji simulira samo crpljenje grupe zdenaca dobiti za ovakav model relativno dobre rezultate. Veliki nedostatak te metode je vrijeme koje ona oduzima jer se svaki hidraulički gradijent te svaka efektivna brzina računa bez upotrebe računala.

11. LITERATURA

Bačani, A. (2006): Hidrogeologija 1. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu

Bačani, A., Posavec, K.(2011): Metode operacijskih istraživanja u hidrogeologiji. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Brikowski, T. (2013): Introduction to the Analytic Element Method. GEOS-5311 Lecture Notes URL: http://www.utdallas.edu/~brikowi/Teaching/Applied_Modeling/GroundWater/ Lecture notes/analytic_element.pdf (15.06.2016, 15:40)

Darcy, H. P.G. (1956): Les fontaines publiques de la Ville de Dijon: Paris, Victor Dalmont

Dupuit, J. (1863): Études théoriques et partiques sur le mouvment de seaux dans les canaux découverts et átravers les terrain sperméables. Dunod, 2me ed., 1 – 364, Paris

Haitjema, H.M.(1995): Analytic element modeling of groundwater flow. SAD, Academic Press, str. 1 – 100.

Haitjema H.M., Strack, O.D.L., Kraemer S.R.(1995): Demonsteration of wellhead analytic element method for wellhead protection. EPA/600/SR-94/210

Kittel, C., Knight, W. D., Ruderman, M. A.(1973): Mechanics, Berkeley Physics Course, Volume 1, Second Edition. McGraw-Hill, New York, str. 58 – 75.

Källgården, J.(2011): Midvatten plugin for QuantumGis, URL:http://hydrogeotools.blogs pot.hr (20.6.2016, 16:35)

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W.(1988): A modularthree – dimensional finite-difference ground - water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water - Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p.

Nakić, Z., Ružičić, S., Posavec, K., Mileusnić, M., Parlov, J., Bačani, A., Durn, G.(2013): Conceptual model for groundwater status and risk assessment – case study of the Zagreb aquifer system. GeologicaCroatica, 66/1, str. 55-76.

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.

Posavec, K. (2006): Identifikacija i prognoza minimalnih razina podzemne vode zagrebačkoga aluvijalnog vodonosnika modelima recesijskih krivulja. Doktorska disertacija. RGN fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Spitz, K., Moreno, J. (1996): A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling, Compilation of hydrogeologic parameters. John Wiley and Sons, New York.

Šikić, K., Basch, O., Šimunić, A. (1978): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 – list Zagreb. Institut geoloških istraživanja Zagreb

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

Šimunić, A., Basch, O. (1975): Stratigrafija kvartarnih sedimenata Zagrebačkog Posavlja.Geol. vjesnik, 28, Zagreb

Urumović, K. (2003): Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 113 – 154, Zagreb

Elaborati i projekti

Bačani, A., Posavec, K., (2014): Elaborat o zonama zaštite izvorišta Grada Zagreba, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo.

Bačani, A., Posavec, K., (2014b): Elaborat o zonama zaštite izvorišta Strmec, Šibice i Bregana, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo.

EGPV – Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske (1999): Ujednačavanje baze znanja i grafičke baze za dolinski dio Save. Fond dokumentacije Hrvatskih voda.

Posavec, K., (2013): Zagreb – hidrogeološki istražni radovi u svrhu određivanja mogućnosti korištenja vodocrpilišta Ježdovec za javnu vodoopskrbu, Zagreb

Službeni dokumenti

Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta, Narodne novine 66, od 15.6.2011.
Pravilnik o izmjenama pravilnika o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta, Narodne novine 47, od 19.4.2013.

Web izvori

Prostorni plan Grada Zagreba; http://www.zzpugz.hr/wpcontent/uploads/2015/02/3B_mjere_uredenja-i-zastite.pdf (20.6.2016, 8:30)

Autodesk (1982): About Autodesk; URL: http://www.autodesk.com/company (20.6.2016, 9:30)