

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

**ZALIHE PODZEMNE VODE ZAGREBAČKOG
VODONOSNIKA**

Diplomski rad

Marta Poropat

GI-180

Zagreb, 2016.

ZALIHE PODZEMNE VODE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

Marta Poropat

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

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je određivanje stalnih i promjenjivih zaliha podzemne vode zagrebačkog vodonosnika za 2013. godinu. Za izradu 3D modela i izračun zaliha korišten je program Surfer. Analizom podataka o litološkim profilima bušotina izrađen je model podine vodonosnog sloja. Na temelju podataka o minimalim i maksimalnim razinama podzemne vode u 2013. godine izrađeni su modeli vodne plohe za visoke i niske vode. Za volumen stalnih zaliha podzemne vode dobivena je vrijednost od $2,1 \times 10^9 \text{ m}^3$ te za promjenjive zalihe $1,5 \times 10^8 \text{ m}^3$. Nakon usporedbe dobivenog volumena promjenjivih zaliha podzemne vode zagrebačkoga vodonosnika s ukupnom crpnom količinom u promatranoj godini koja iznosi $8,9 \times 10^7 \text{ m}^3$, zaključuje se da crpne količine zbog izuzetno vlažne godine nisu premašile promjenjive zalihe.

Ključne riječi: zagrebački vodonosnik, stalne zalihe, promjenjive zalihe

Diplomski rad sadrži: 22 stranica, 5 tablica, 9 slika, 5 priloga i 14 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Mentorica: Prof. dr. sc. Andrea Bačani

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Andrea Bačani
Izv. prof dr. sc. Kristijan Posavec
Doc. dr. sc. Dario Perković

Datum obrane: 26. rujna 2016.

GROUNDWATER RESOURCES OF ZAGREB AQUIFER

Marta Poropat

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

The aim of this Thesis is the determination of permanent and seasonal groundwater resources of the Zagreb aquifer in 2013. 3D models and volume calculations are made with the use of Surfer software. Lithological profile data is analysed in order to define the impermeable layer underlying the aquifer. Water table surface models are created based on the minimum and maximum groundwater levels in the observed year. After the calculations, permanent resources are defined as $2,1 \times 10^9$, and seasonal resources as $1,5 \times 10^8 \text{ m}^3$. The obtained value for seasonal resources is compared with the total pumping rate in the observed area in 2013, which is $8,9 \times 10^7 \text{ m}^3$. It is concluded that as a result of exceptionally wet year the pumping volume did not exceed the seasonal groundwater resources.

Keywords: Zagreb aquifer, permanent resources, seasonal resources

Thesis contains: 22 pages, 5 tables, 9 figures, 5 enclosures and 14 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Supervisor: Full Professor Andrea Bačani, PhD

Reviewers: Full Professor Andrea Bačani, PhD
Associate Professor Kristijan Posavec, PhD
Assistant Professor Dario Perković, PhD

Date of defense: September 26th, 2016

Zahvaljujem....

Mentorici prof. dr. sc. Andrei Bačani na predloženoj temi, strpljenju i savjetima tijekom izrade diplomskog rada. Članovima komisije izv. prof. dr. sc. Kristijanu Posavcu i doc. dr. sc. Dariju Perkoviću na pregledu rada te prijedlozima.

Obitelji na podršci.

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Značajke istraživanog područja	2
2.1	Opći podaci o vodonosniku.....	2
2.2	Geološke značajke	3
2.3	Hidrogeološke značajke	4
3	Metoda procjene zaliha podzemnih voda.....	7
3.1	Izrada digitalnog modela podine vodonosnog sloja	8
3.2	Izrada digitalnih modela vodne plohe za niske i visoke vode.....	8
3.3	Izračunavanje volumena saturiranog dijela vodonosnog sloja	11
3.4	Izračunavanje stalnih i promjenjivih zaliha podzemne vode	13
4	Procjena stalnih zaliha podzemne vode	15
5	Procjena promjenjivih zaliha podzemne vode.....	17
6	Zaključak.....	20
7	Literatura.....	21

Popis tablica

Tablica 4-1. Volumen između podine vodonosnika i najnižih razina podzemne vode	16
Tablica 4-2. Podaci za izračun stalnih zaliha podzemne vode	16
Tablica 5-1. Volumen vodonosnika između najniže i najviše razine podzemne vode	18
Tablica 5-2. Podaci za izračun promjenjivih zaliha podzemne vode	18
Tablica 5-3. Crpne količine za glavna crpilišta na području grada Zagreba 2013. godine..	19

Popis slika

Slika 2-1. Istraživano područje	2
Slika 2-2. Geološka karta zagrebačkog područja (Bačani i Šparica, 2001)	4
Slika 2-3. Profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006)	5
Slika 3-1. 3D model podine vodonosnog sloja.....	8
Slika 3-2. 3D model minimalnih razina podzemnih voda u 2013. godini	9
Slika 3-3. 3D model maksimalnih razina podzemnih voda u 2013. godini	10
Slika 4-1. 3D prikaz podine i minimalnih razina podzemne vode	15
Slika 5-1. 3D prikaz minimalnih i maksimalnih razina podzemne vode	17
Slika 5-2. Usporedba promjenjivih zaliha i količina crpljenja u 2013. godini.....	19

Popis priloga

Prilog 1. Prostorni raspored litoloških bušotina

Prilog 2. Prostorni raspored piezometara

Prilog 3. Izostrate podine vodonosnog sloja

Prilog 4. Ekvipotencijale minimalnih razina podzemne vode

Prilog 5. Ekvipotencijale maksimalnih razina podzemne vode

1 Uvod

Zagrebački vodonosnik čine šljunkovito-pjeskovite naslage saturirane vodom koje se nalaze na području Grada Zagreba između Podsuseda i Rugvice. Smješten je između Medvednice na sjeveru i Vukomeričkih Gorica na jugu. Zajedno sa samoborsko-zaprešićkim vodonosnikom predstavlja strateške zalihe Republike Hrvatske. Podzemna voda vodonosnika temelj je vodoopskrbe grada, a zahvaća se na šest aktualnih crpilišta.

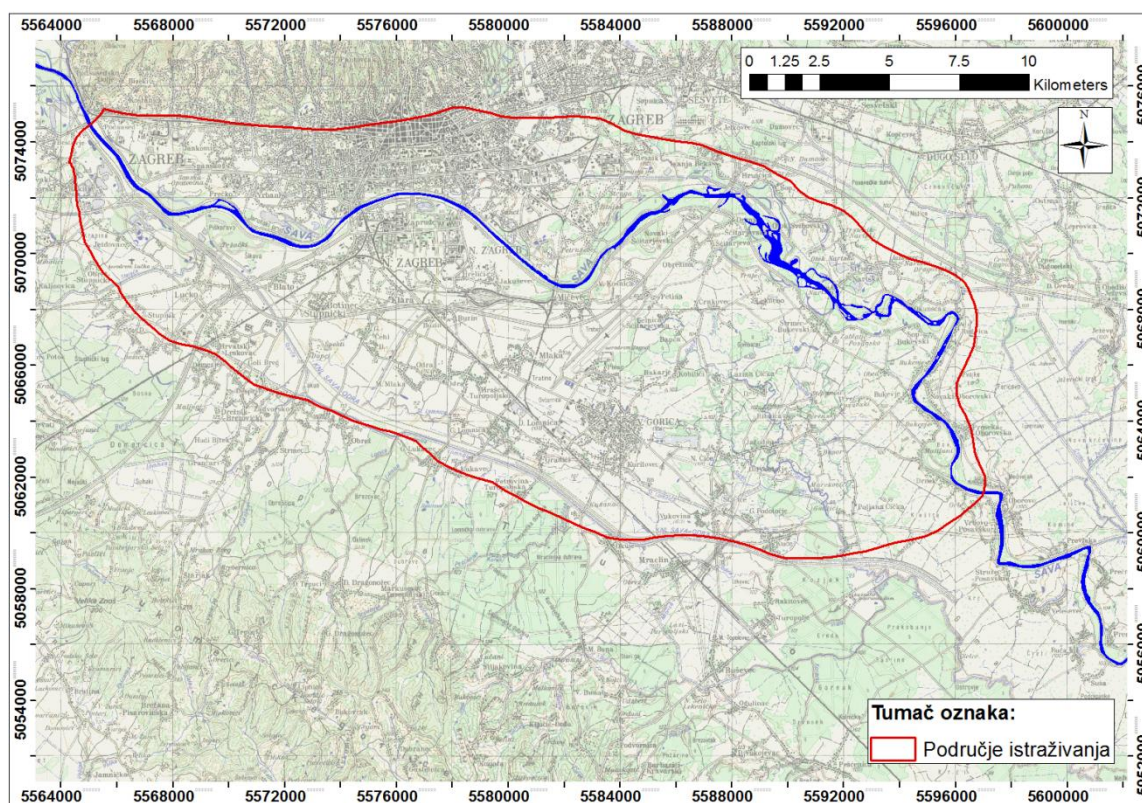
Cilj ovoga rada bio je izračun stalnih i promjenjivih zaliha podzemne vode zagrebačkog vodonosnika za 2013. godinu. Korišteni su podaci o litološkim profilima bušotina za definiranje podine vodonosnika te podaci o minimalnim i maksimalnim razinama podzemne vode u 2013. godini. Podaci su preuzeti iz hidrogeološke baze podataka projekta *Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske (EGPV)*, koji provodi Rudarsko-geološko-naftni fakultet u suradnji s Hrvatskim vodama. Podaci o vodostajima preuzeti su iz baze podataka HIS2000 (Hidrološkog informacijskog sustava) Državnog hidrometeorološkog zavoda.

U radu je prikazan kratak pregled geoloških i hidrogeoloških značajki područja istraživanja. U programu Surfer izrađeni su digitalni modeli podine i vodne plohe za visoke i niske vode, odnosno karte izostrata podine vodonosnog sloja te ekvipotencijala za minimalne i maksimalne razine podzemne vode. Na temelju njih izvršen je izračun volumena saturiranog sloja te u konačnici procjena stalnih i promjenjivih zaliha podzemne vode. Dobiveni volumen promjenjivih zaliha uspoređen je s podacima o crpnim količinama navedene godine na istraživanom području.

2 Značajke istraživanog područja

2.1 Opći podaci o vodonosniku

Zagrebački vodonosnik smješten je na području Grada Zagreba te dijelom na području Zagrebačke županije. Vodonosnikom protječe rijeka Sava. Prostire se od Podsuseda na zapadu do Rugvice na istoku te od Medvednice na sjeveru do Vukomeričkih Gorica na jugu. (Slika 2-1). Vodonosnik se proteže uz rijeku Savu dužinom od oko 30 km u smjeru sjeverozapad-jugoistok. Njegova prosječna širina iznosi između 10 i 15 km, a obuhvaća površinu od oko 350 km².



Slika 2-1. Istraživano područje

Vodonosnik je temelj vodoopskrbe grada Zagreba. Podzemna voda zahvaća se na šest aktualnih crpilišta. Za vrijeme dužih sušnih perioda u vodoopskrbu se uključuju i manja crpilišta koja su inače isključena iz vodoopskrbe.

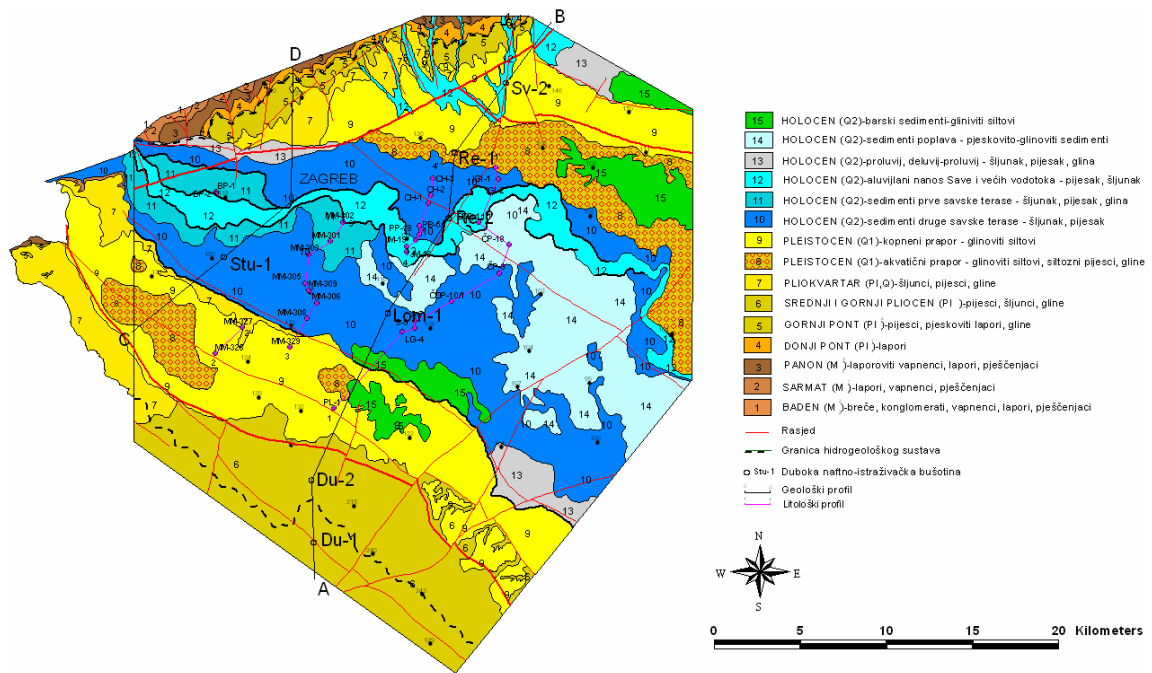
2.2 Geološke značajke

Zagrebački vodonosnik čine srednje i gornje pleistocenske te holocenske naslage. U profilu razlikujemo dva vodonosna sloja, koja su nastala u različitim uvjetima taloženja. Dublji vodonosni sloj dominantno čine jezersko–barske naslage, dok je plići sloj pretežito zastupljen aluvijalnim naslagama rijeke Save.

Dublji vodonosni sloj taložen je u srednjem i gornjem pleistocenu. To područje je tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena bilo jezersko i močvarno. Okolno gorje (Medvednica, Marijagorička Brda i Žumberačko gorje) bilo je kopno podložno intenzivnoj eroziji i denudaciji. Uslijed tih procesa trošeni materijal s raznim udjelima šljunka, pijeska, praha i gline transportiran je i taložen u jezerima i močvarama (Velić & Saftić, 1991).

Plići vodonosni sloj taložen je tijekom holocena. Početkom holocena, klimatski i tektonski procesi omogućili su prodor i formiranje rijeke Save čime je započeo transport materijala s područja Alpa (Velić i Durn, 1993). Zbog čestih klimatskih promjena te tektonske aktivnosti transport materijala bio je promjenjivog intenziteta. Za vrijeme toplih i vlažnih razdoblja transport materijala je bio intenzivniji nego za vrijeme suhih i hladnih razdoblja. Na procese taloženja također su utjecali i tektonski pokreti (Velić et al., 1999). Posljedica takvih uvjeta taloženja je izrazita heterogenost i anizotropija vodonosnika te neujednačena debljina naslaga.

Gledano u tlocrtu, aluvijalne naslage se na sjeveru naslanjaju na proluvijalne, pretežito glinovite naslage, koje prelaze u slabopropusne tercijarne naslage južnih obronaka Medvednice. Na jugu se zagrebački vodonosnik naslanja na klastične sedimente Stupničke terase koji pak bočno prelaze u naslage gornje paludinskih slojeva koji izgrađuju sjeverne padine Vukomeričkih Gorica. Rasprostranjenost površinskih naslaga prikazana je na geološkoj karti zagrebačkog područja (Slika 2-2).



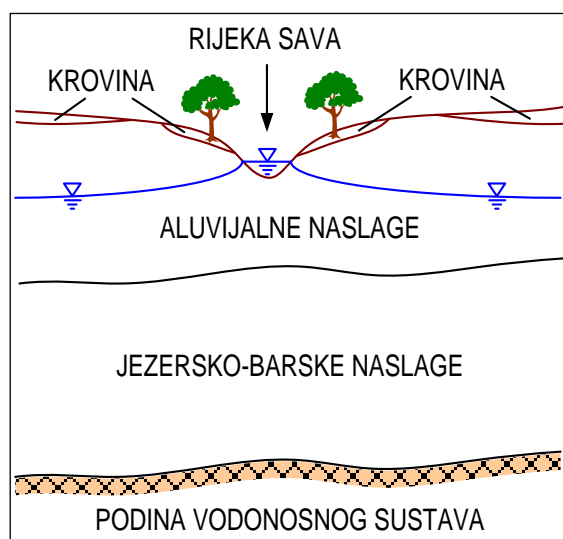
Slika 2-2. Geološka karta zagrebačkog područja (Bačani i Šparica, 2001)

2.3 Hidrogeološke značajke

Zagrebački vodonosnik je otvoreni vodonosnik, što znači da je predstavljen saturiranim dijelom propusnog sloja koji se proteže od nepropusne podine do vodne plohe pod atmosferskim tlakom. Krovinu vodonosnika čine slabo propusne naslage koje su ili vrlo male debljine, svega nekoliko metara, ili su potpuno odsutne. Tek se u jugoistočnom dijelu ili u rubnim područjima vodonosnika povećava debljina slabo propusne krovine i do petnaestak metara. Podinu vodonosnog sustava izgrađuju slabopropusne naslage.

Debljine vodonosnika su raznolike, a kreću se od nekoliko metara pa sve do otprilike 100 m. Zagrebački vodonosnik sastoji se od dva vodonosna sloja povezana u jednu hidrauličku cjelinu. Oba vodonosnika predstavljaju vrlo dobro propusne otvorene vodonosnike (Slika 2-3).

Rubne granice vodonosnika čine nepropusna granica na sjeveru, granica dotjecanja na zapadu, granica dotjecanja na jugu te granica otjecanja na istoku. Generalni smjer toka podzemne vode je od zapada prema istoku/ jugoistoku (Posavec, 2006).



Slika 2-3. Profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006)

Napajanje vodonosnika se u najvećoj mjeri ostvaruje (1) infiltracijom iz rijeke Save; (2) infiltracijom oborina; (3) infiltracijom iz propusne vodoopskrbne i kanalizacijske mreže; (4) dotjecanjem po zapadnoj granici iz susjednog samoborskog vodonosnika; te (5) dotjecanjem po južnoj granici vodonosnika s područja Vukomeričkih Gorica. (Bačani i Posavec, 2009).

Uspoređujući nivograme Save s nivogramima razina podzemne vode mjerenih na piezometrima u neposrednoj blizini Save duž cijelog toka na istraživanom području zapaža se izuzetno dobra povezanost vodostaja Save i razina podzemne vode. Na temelju vodne bilance zaključuje se da za 1998. godinu doprinos Save u obnavljanju količina podzemne vode iznosi oko 73% (Miletić i Bačani, 1999).

Analizom karata ekvipotencijala utvrđeno je da Sava za vrijeme visokih voda napaja vodonosnik duž cijelog toka na istraživanom području. Za vrijeme srednjih i niskih voda na pojedinim dijelovima toka dolazi do dreniranja vodonosnika što nepovoljno utječe na razine podzemne vode, a time i na raspoložive količine za vrijeme dužih sušnih razdoblja (Posavec, 2006).

Od 1950. do sredine 1993. godine razine podzemne vode su u prosjeku opadale 1-2 m svakih 10 godina (Bačani i Posavec, 2009). Trend je nakratko zaustavljen izgradnjom vodnih stuba na rijeci Savi kod termoelektrane Zagreb. Glavni razlozi opadanja razina podzemne vode su: (1) izgradnja nasipa duž rijeke Save za obranu od poplava koji

onemogućavaju plavljenje zaobalnog područja, a time i infiltraciju u vodonosnik, (2) snižavanje korita rijeke Save uzrokovano izgradnjom akumulacija uzvodno na rijeci Savi, te (3) sve većom eksploatacijom podzemne vode za potrebe vodoopskrbe grada Zagreba. Volumen stalnih zaliha podzemne vode na području zagrebačkog vodonosnika u razdoblju od 1977. do 2007. godine smanjio se za 7%. (Bačani i Posavec, 2009a).

Hidraulička vodljivost je izrazito velika i u zapadnim dijelovima vodonosnika prelazi 3000 m/dan. Prema istoku opada pa tako kod Črnkovca iznosi oko 2000 m/dan, a nešto istočnije i manje od 1000 m/dan (Urumović i Mihelčić, 2000). Transmisivnost vodonosnika doseže najveće vrijednosti na području Črnkovca (50000 m²/dan) zbog visokih iznosa hidrauličke vodljivosti i debljine vodonosnog sloja (Brkić i Biondić, 2000).

3 Metoda procjene zaliha podzemnih voda

Zalihe podzemnih voda dijele se na stalne (temeljne) te promjenjive (sezonske).

Stalne zalihe podzemne vode u otvorenom vodonosniku predstavljaju volumen vode koji se nalazi unutar vodonosnog sloja ispod najnižeg zabilježenog vodostaja.

Promjenjive (sezonske) zalihe su one koje se nalaze u području kolebanja razine podzemne vode. One predstavljaju volumen vode koji tijekom vlažnog perioda godine puni vodonosnik, a određuje se kao volumen vode koji se nalazi u području između najnižeg i najvišeg izmjerene vodostaja u promatranom vremenskom razdoblju (Miletić i Heinrich-Miletić, 1985; Bačani i Posavec, 2009a).

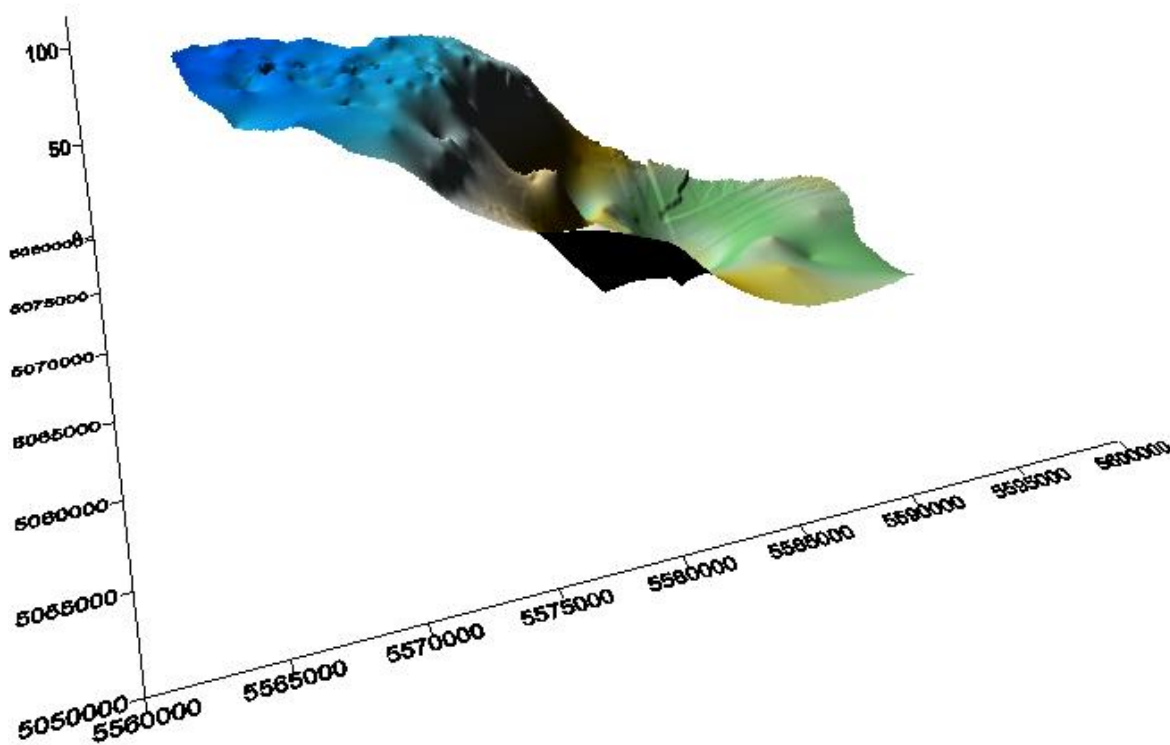
Procjena zaliha podzemnih voda provedena je u nekoliko koraka:

- (1) izrada digitalnog modela podine vodonosnog sloja,
- (2) izrada digitalnog modela vodne plohe za minimalne i maksimalne razine podzemnih voda,
- (3) izračun volumena saturiranog dijela vodonosnog sloja, te
- (4) procjena stalnih i promjenjivih zaliha podzemne vode.

3.1 Izrada digitalnog modela podine vodonosnog sloja

Za izradu modela podine vodonosnog sloja korišteni su bušotinski podaci (litološki stupovi) dobiveni prilikom izrade zdenaca, piezometara i dubljih istražnih bušotina. Podaci su obrađeni u programu Microsoft Excel.

Nakon kreiranja datoteke s podacima o podini vodonosnika, pomoću programa Surfer interpolirane su karte izostrata podine (Slika 3-1). Za procjenu vrijednosti regionaliziranih varijabli u točkama mreže korišten je postupak *kriging*.



Slika 3-1. 3D model podine vodonosnog sloja

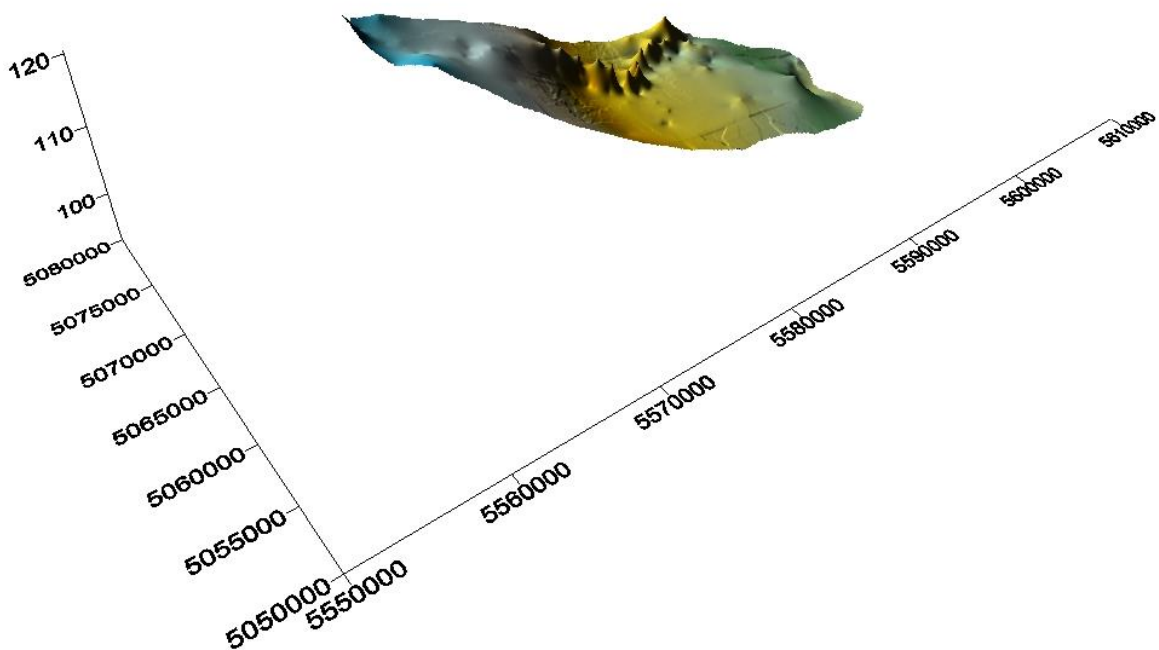
3.2 Izrada digitalnih modela vodne plohe za niske i visoke vode

Da bi odredili datum najniže odnosno najviše zabilježene razine podzemne vode u vodonosniku, pregledani su podaci piezometara na području vodonosnika. Kao referentni datum odabran je onaj s najučestalijim pojavljivanjem niskih odnosno visokih voda u

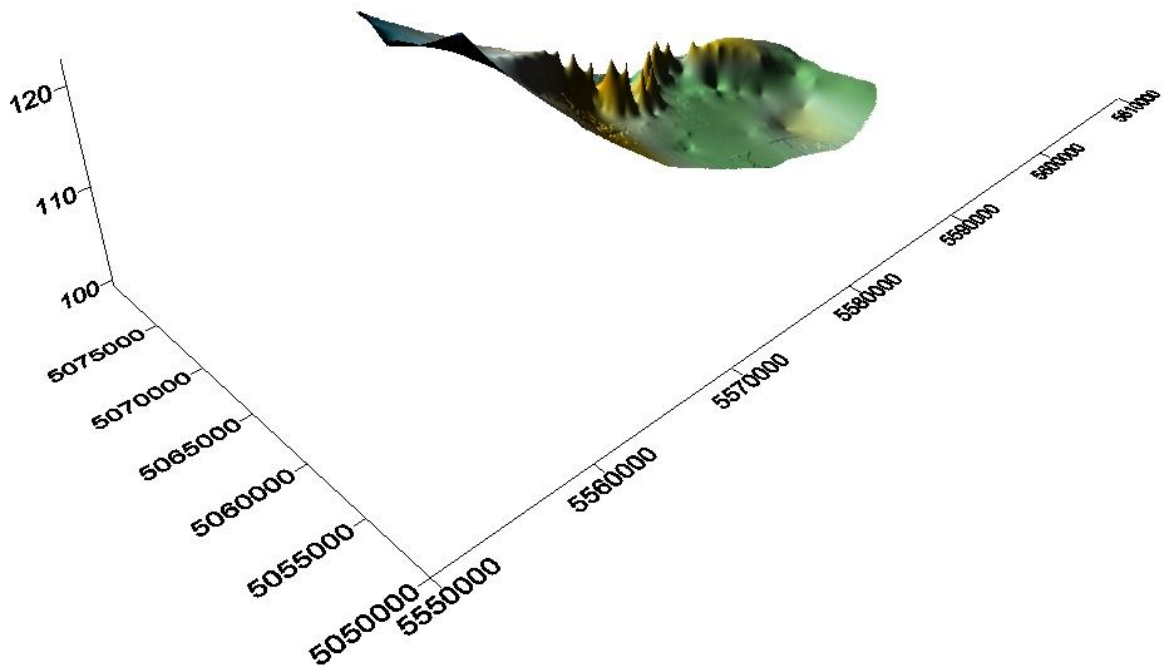
različitim dijelovima vodonosnika. Za datum niskih voda odabran je 9.9.2013., a za datum visokih voda 4.4.2013. godine.

Nakon određivanja referentnih datuma izdvojene su razine podzemne vode na navedene datume. Zagrebački vodonosnik je hidraulički povezan s rijekom Savom, pa je iz tog razloga u interpolaciju potrebno uključiti i mjerenja vodostaja rijeke. Budući da su bili dostupni samo podaci o vodostajima s pet hidroloških postaja, metodom linearnog gradijenta interpolirane su vrijednosti vodostaja na dodatne 63 točke.

Nakon kreiranja datoteka s popisom razina podzemne vode za odabrane datume, pomoću programa Surfer metodom *kriging* interpolirane su karte ekvipotencijala niskih (Slika 3-2) te visokih voda (Slika 3-3).



Slika 3-2. 3D model minimalnih razina podzemnih voda u 2013. godini



Slika 3-3. 3D model maksimalnih razina podzemnih voda u 2013. godini

3.3 Izračunavanje volumena saturiranog dijela vodonosnog sloja

Za izračunavanje volumena pomoću programa Surfer potrebno je definirati donju i gornju graničnu površinu. Izračunata su dva volumena: (1) volumen stalno saturiranog dijela sloja i (2) volumen sezonski saturiranog dijela vodonosnog sloja. Za izračun stalno saturiranog dijela vodonosnika za donju je površinu određena podina vodonosnika, a za gornju ekvipotencijale minimalnih razina podzemne vode. Za izračun sezonski saturiranog dijela vodonosnika kao donja i gornja površina definirane su karte ekvipotencijala minimalnih i maksimalnih razina podzemne vode.

Volumen ispod neke površine, odnosno funkcije $f(x, y)$ matematički se definira kao dvostruki integral:

$$\int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} f(x, y) dx dy \quad (3-1)$$

Volumen se računa tako da se prvo integrira preko x (stupci) da bi se dobio volumen ispod individualnih redova. Nakon toga integrira se preko y (retci) da bi se dobio ukupni volumen ispod površine.

Za numeričku integraciju u programu Surfer korištene su tri metode: trapezno pravilo, Simpsonovo pravilo te Simpsonovo 3/8 pravilo. U nastavku su prikazane formule na kojima se one zasnivaju.

Trapezno pravilo

Uzorak koeficijenata je $\{1, 2, 2, 2, \dots, 2, 2, 1\}$.

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{\Delta x}{2} [(f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n))] \quad (3-2)$$

$$A_i \approx \frac{\Delta x}{2} [(G_{i,1} + 2G_{i,2} + 2G_{i,3} + \dots + 2G_{i,n-1} + G_{i,n})] \quad (3-3)$$

$$V \approx \frac{\Delta y}{2} [(A_1 + 2A_2 + 2A_3 + \dots + 2A_{n-1} + A_n)] \quad (3-4)$$

Simpsonovo pravilo

Uzorak koeficijenata je $\{1,4,2,4,2,4,2, \dots, 4,2,1\}$.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{\Delta x}{3} [(f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + \dots + 4f(x_{n-1}) + f(x_n))] \quad (3-5)$$

$$A_i \approx \frac{\Delta x}{3} [(G_{i,1} + 4G_{i,1} + 2G_{i,2} + 4G_{i,3} + \dots + 4G_{i,n-1} + G_{i,n})] \quad (3-6)$$

$$V \approx \frac{\Delta y}{3} [(A_1 + 4A_2 + 2A_3 + 4A_4 + \dots + 4A_{n-1} + A_n)] \quad (3-7)$$

Simpsonovo 3/8 pravilo

Uzorak koeficijenata je $\{1,3,3,2,3,3,2, \dots, 3,3,2,1\}$.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{3\Delta x}{8} [(f(x_0) + 3f(x_1) + 3f(x_2) + 2f(x_3) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n))] \quad (3-8)$$

$$A_i \approx \frac{3\Delta x}{8} [(G_{i,1} + 3G_{i,1} + 3G_{i,2} + 2G_{i,3} + \dots + 2G_{i,n-1} + G_{i,n})] \quad (3-9)$$

$$V \approx \frac{3\Delta y}{8} [(A_1 + 3A_2 + 3A_3 + 2A_4 + \dots + 2A_{n-1} + A_n)] \quad (3-10)$$

gdje je:

Δx – mrežni razmak stupca

Δy – mrežni razmak retka

$G_{i,j}$ – vrijednost čvora mreže u retku i i stupcu j

A_i – volumen ispod retka i

V – ukupni volumen ispod površine.

Razlika u rezultatima dobivenim trima metodama pokazuje točnost izračuna, a ovisi o gustoći mreže. Što su volumeni izračunati pomoću različitih metoda sličniji, to je stvarni volumen bliže dobivenih vrijednosti. Konačni volumen se izražava kao prosjek tih triju vrijednosti.

3.4 Izračunavanje stalnih i promjenjivih zaliha podzemne vode

Da bi se izračunale stalne i promjenjive zalihe podzemnih voda potrebno je odgovarajući volumen pomnožiti s prosječnom vrijednosti efektivne poroznosti. Efektivna poroznost (n_{ef}) odnosi se na dio volumena pornog prostora u kojemu su pore međusobno povezane, a voda u njima može sudjelovati u toku.

Dva su načina određivanja prostorne raspodjele efektivne poroznosti vodonosnika. Razlikuju se u kompleksnosti pristupa, a posljedično i u točnosti konačnih rezultata.

Prvi način je korištenje srednje vrijednosti podataka o efektivnoj poroznosti, ili za cijeli vodonosni sustav ili za pojedini sloj vodonosnog sustava. Drugi način je kreiranje zonalne prostorne raspodjele metodama interpolacije na osnovu varijacija mjerenih vrijednosti efektivne poroznosti.

Zagrebački vodonosnik sastoji se od dva vodonosna sloja, odnosno dvije zone. Efektivna poroznost varira od 10 do 15%. Kako bi se pojednostavio izračun, primijenjen je pristup srednje vrijednosti podataka, te je za računanje korištena vrijednost efektivne poroznosti od 12%.

Da bi se izračunale stalne zalihe podzemnih voda potrebno je volumen saturiranog dijela vodonosnika kod minimalne zabilježene razine za promatranu godinu pomnožiti s prosječnom vrijednosti efektivne poroznosti.

Stalne zalihe izračunate su prema formuli:

$$V_{st} = V_{sat} \cdot n_{ef} \quad (3-11)$$

gdje je:

V_{st} – ukupni volumen stalnih zaliha za promatranu godinu

V_{sat} – volumen saturiranog dijela vodonosnog sloja

n_{ef} – prosječna efektivna poroznost ($n_{ef} = 0,12$).

Kod izračunavanja promjenjivih zaliha podzemnih voda potrebno je volumen između minimalne i maksimalne zabilježene razine podzemnih voda za promatranu godinu pomnožiti s prosječnom vrijednosti efektivne poroznosti.

Promjenjive zalihe su izračunate su prema formuli:

$$V_{pr} = V_{max-min} \cdot n_{ef} \quad (3-12)$$

gdje je:

V_{pr} – volumen promjenjivih zaliha podzemnih voda

$V_{max-min}$ – volumen između minimalnih i maksimalnih razina podzemne vode za promatranu godinu

n_{ef} – prosječna efektivna poroznost.

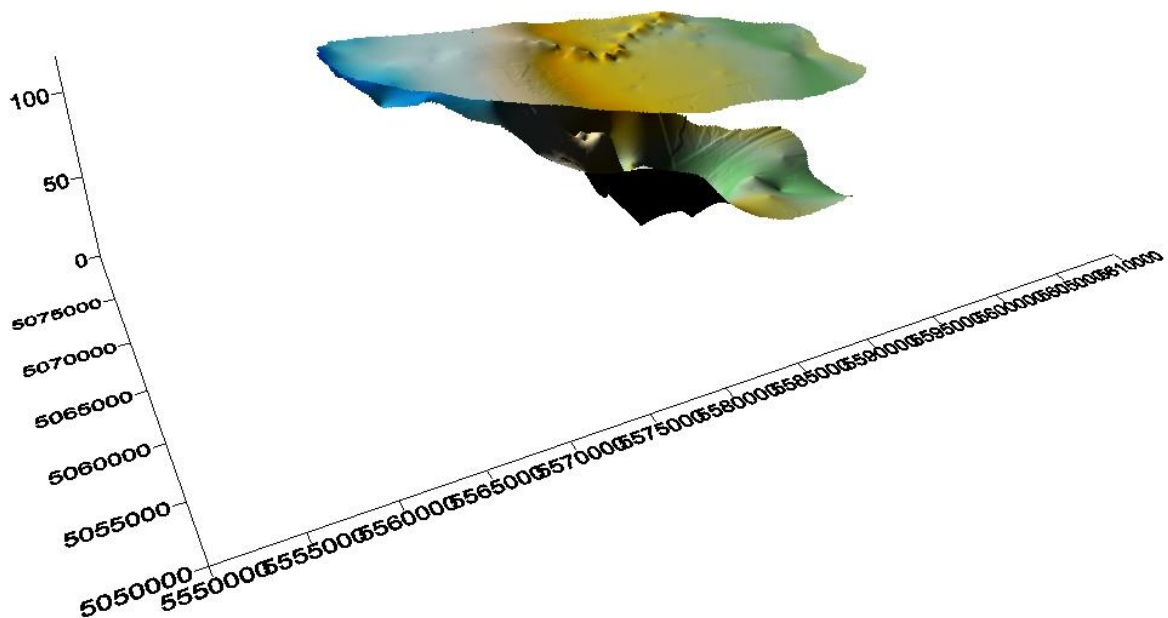
4 Procjena stalnih zaliha podzemne vode

Procjena stalnih i promjenjivih zaliha podzemnih voda rađena je za 2013. godinu.

Podaci potrebni za izračunavanje stalnih zaliha su

- (1) datum s najnižim zabilježenim razinama podzemnih voda za 2013. godinu,
- (2) karte ekvipotencijala za datume s najnižim zabilježenim razinama podzemnih voda za promatranu godinu,
- (3) karte izostrata podine, te
- (4) prosječna vrijednost efektivne poroznosti.

Volumen potreban za računanje stalnih zaliha dobiva se preklapanjem karte izostrata podine i ekvipotencijala niskih voda u programu Surfer (Slika 4-1). U tablici 4-1. prikazani su volumeni dobiveni trima metodama integracije. Za daljnje računanje korištena je njihova srednja vrijednost.



Slika 4-1. 3D prikaz podine i minimalnih razina podzemne vode

Tablica 4-1. Volumen između podine vodonosnika i najnižih razina podzemne vode

Volumen od podine vodonosnika do minimalnih razina podzemne vode (m³)	
Trapezno pravilo	17.465.907.130,776
Simpsonovo pravilo	17.461.705.460,634
Simpsonovo 3/8 pravilo	17.468.199.631,15
Srednja vrijednost	17.465.270.740,9

Izračunati volumen vodonosnog sloja množi se sa pripadajućom efektivnom poroznošću da bi se dobio volumen stalnih zaliha podzemnih voda (Tablica 4-2).

Tablica 4-2. Podaci za izračun stalnih zaliha podzemne vode

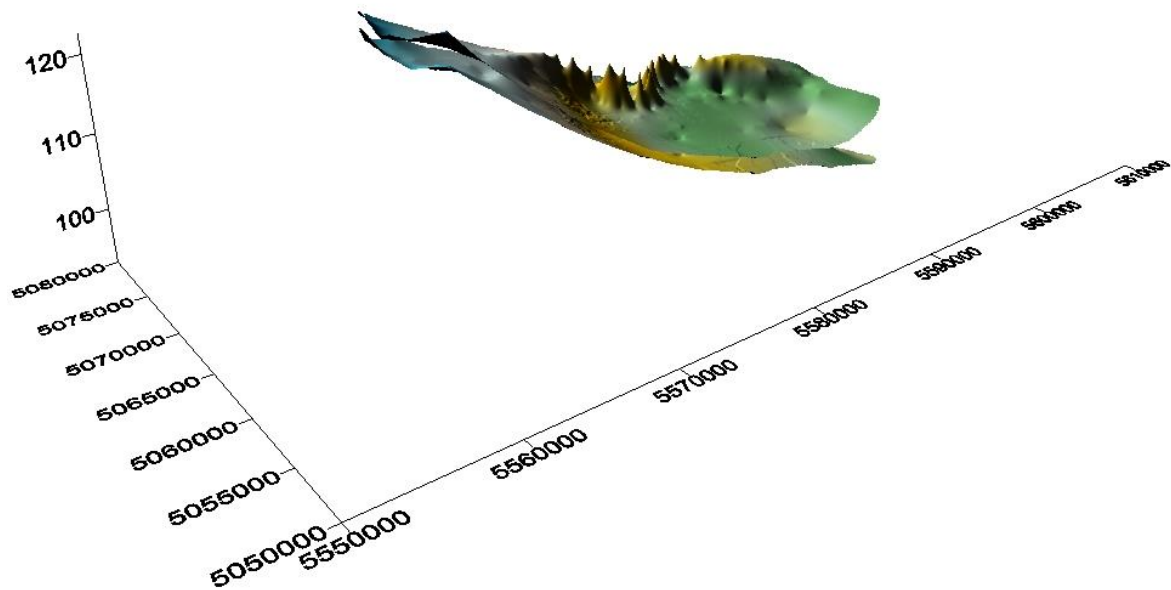
Saturirani volumen vodonosnog sloja (m³)	Efektivna poroznost	Stalne zalihe (m³)
17.465.270.740,9	0,12	2.095.832.488,9

5 Procjena promjenjivih zaliha podzemne vode

Podaci korišteni za izračunavanje promjenjivih zaliha su:

- (1) datumi za najniže i najviše zabilježene razine podzemnih voda 2013. godine,
- (2) karte ekvipotencijala za najniže i najviše zabilježene razine podzemnih voda, te
- (3) prosječna vrijednost efektivne poroznosti.

Volumen vodonosnika potreban za određivanje promjenjivih zaliha podzemnih voda izračunat je na osnovu karata ekvipotencijala za najniže i najviše zabilježene razine u razmatranoj godini (Slika 5-1).



Slika 5-1. 3D prikaz minimalnih i maksimalnih razina podzemne vode

U Tablici 5-1. prikazani su rezultati proračuna volumena za korištene tri metode dobiveni u programu Surfer.

Tablica 5-1. Volumen vodonosnika između najniže i najviše razine podzemne vode

Volumen između maksimalnih i minimalnih razina podzemne vode (m³)	
Trapezno pravilo	1.249.080.413,6358
Simpsonovo pravilo	1.248.727.222,0678
Simpsonovo 3/8 pravilo	1.249.269.623,2417
Srednja vrijednost	1.249.025.752,98

Kao i kod određivanja stalnih zaliha, izračunati volumen množi se s prosječnom vrijednosti efektivne poroznosti za prvi vodonosni sloj da bi se dobile promjenjive zalihe podzemnih voda (Tablica 5-2).

Tablica 5-2. Podaci za izračun promjenjivih zaliha podzemne vode

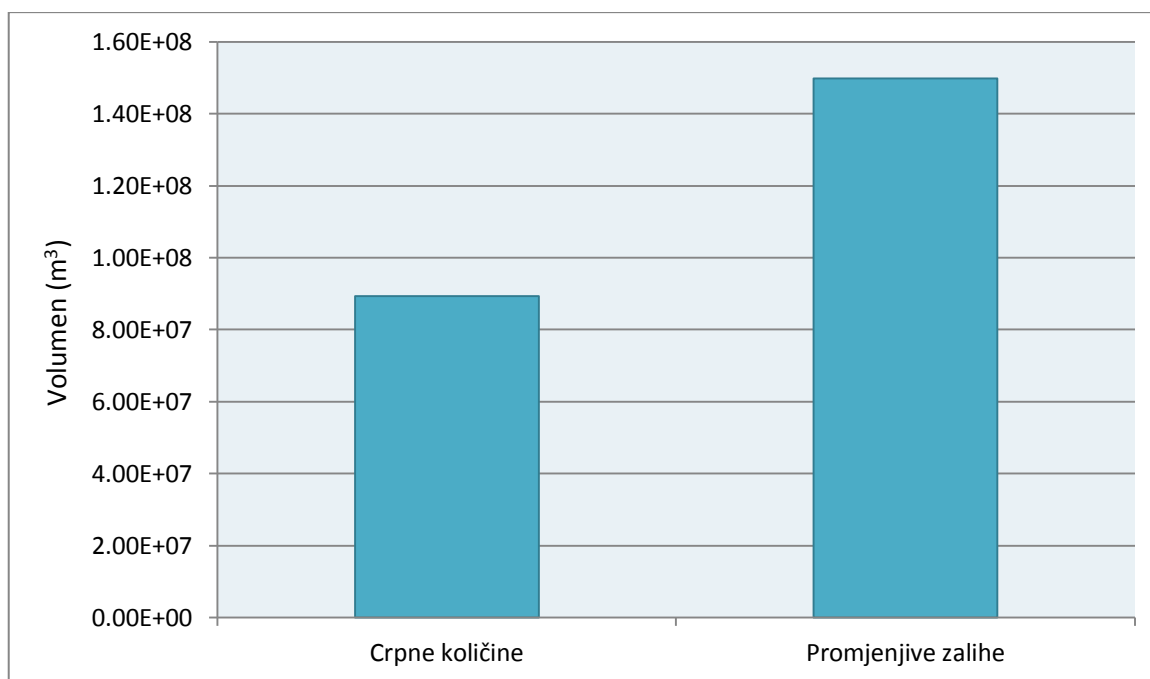
Saturirani volumen vodonosnog sloja (m³)	Efektivna poroznost	Promjenjive zalihe (m³)
1.249.025.752,98	0,12	149.883.090,358

Izračunate vrijednosti promjenjivih zaliha podzemne vode uspoređene su sa podacima o crpljenju na području grada Zagreba za 2013. godinu (Tablica 5-3). Korišteni su podaci s glavnih crpilišta: Mala Mlaka, Petruševac, Sašnjak, Zapruđe i Žitnjak.

Tablica 5-3. Crpne količine za glavna crpilišta na području grada Zagreba 2013. godine

	Mala Mlaka	Petruševac	Sašnjak	Zaprude	Žitnjak
Crpne količine (m³)	25.074.845	31.102.165	22.791.570	8.873.320	1.515.010
Ukupno	89.356.910				

Na slici 5-2. prikazana je usporedba vrijednosti količina crpljenja i volumena promjenjivih zaliha. Vidljivo je da 2013. godine crpne količine nisu premašile promjenjive zalihe podzemne vode.



Slika 5-2. Usporedba promjenjivih zaliha i količina crpljenja u 2013. godini

6 Zaključak

U ovom su radu izrađeni modeli podine zagrebačkog vodonosnika te vodne plohe kod minimalnih i maksimalnih razina podzemnih voda, s ciljem određivanja stalnih i promjenjivih zaliha podzemnih voda u 2013. godini. Kao rezultat rada dobivene su karte izostrata podine te ekvipotencijala niskih i visokih voda. Za interpolaciju karata izostrata podine te ekvipotencijala korišten je računalni program Surfer. Pomoću istog programa izvršen je i proračun volumena stalnih i promjenjivih zaliha.

Prilikom računanja u obzir nije uzeta činjenica da se zagrebački vodonosnik sastoji od dva vodonosna sloja različite efektivne poroznosti. Zbog korištenja srednje vrijednosti efektivne poroznosti za oba sloja prilikom izračuna moguće je odstupanje od realne vrijednosti stalnih zaliha podzemne vode.

Za volumen stalnih zaliha podzemne vode dobivena je vrijednost od $2,1 \times 10^9 \text{ m}^3$ te za promjenjive zalihe $1,5 \times 10^8 \text{ m}^3$. Nakon usporedbe dobivenih volumena promjenjivih zaliha podzemne vode zagrebačkoga vodonosnika s ukupnom crpnom količinom u 2013. godini koja iznosi $8,9 \times 10^7 \text{ m}^3$, zaključuje se da crpne količine 2013. godine nisu premašile promjenjive zalihe. Kolić (2008) uspoređuje godišnje sezonske zalihe i godišnje količine crpljenja za razdoblje od 1996. do 2006. godine i zaključuje da u većini godina crpljenje premašuje sezonske zalihe tj. da se vodonosnik precrpljuje. Izuzetak su bile vlažne godine godine s nadprosječnom količinom oborina, što je također slučaj i s 2013. godinom.

Zbog rasta broja stanovnika u gradu Zagrebu nužno je zadovoljiti sve veće potrebe za vodoopskrbom te se kao problem u sušnim godinama javlja precrpljivanje. Ako se crpi količina vode koja premašuje sezonske zalihe, taj dio crpljene vode se nadomješta iz stalnih zaliha. Rezultati dobiveni ovim radom mogu se upotrijebiti u svrhu daljnjeg planiranja upravljanja vodnim zalihama na zagrebačkom području.

7 Literatura

Bačani, A. & Šparica, M. (2001): Geology of the Zagreb aquifer system. 9th International Congress of the geological society of Greece. (26.-28. September, 2001). Proceedings, vol XXXIV, No 5, 1973-1979, Athens.

Bačani A. i Posavec K. (2009): Elaborat zaštitnih zona vodocrpilišta Velika Gorica. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb. 77 p.

Bačani A. i Posavec K. (2009a): Vodoistražni radovi za potrebe implementacije Okvirne direktive o vodama u dijelu koji se odnosi na kvantitativno stanje voda na zagrebačkom i samoborskom području. Stručni elaborat Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilišta u Zagrebu.

Brkić, Ž. i Biondić, B. (2000): Savski vodonosnik i njegove hidrogeološke značajke. Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima, zbornik radova, okrugli stol, Slavonski Brod.

DHMZ, Sektor za hidrologiju: HIS2000 – Baza hidroloških podataka.

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

Miletić, P. & Heinrich-Miletić, M. (1985): Metodološki pristup istraživanju i gospodarenju rezervama podzemnih voda, str.92. Jugoslavenski komitet svjetskih kongresa za naftu, Nafta, Zagreb.

Miletić, P. i Bačani, A. (1999): EGPV: Izrada bilansa. Knjiga 4, četvrti dio, RGN fakultet, Zagreb.

Kolić, D. (2008): Stalne i promjenjive zalihe podzemne vode Zagrebačkoga aluvijalnog vodonosnika. Diplomski rad. RGN fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

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

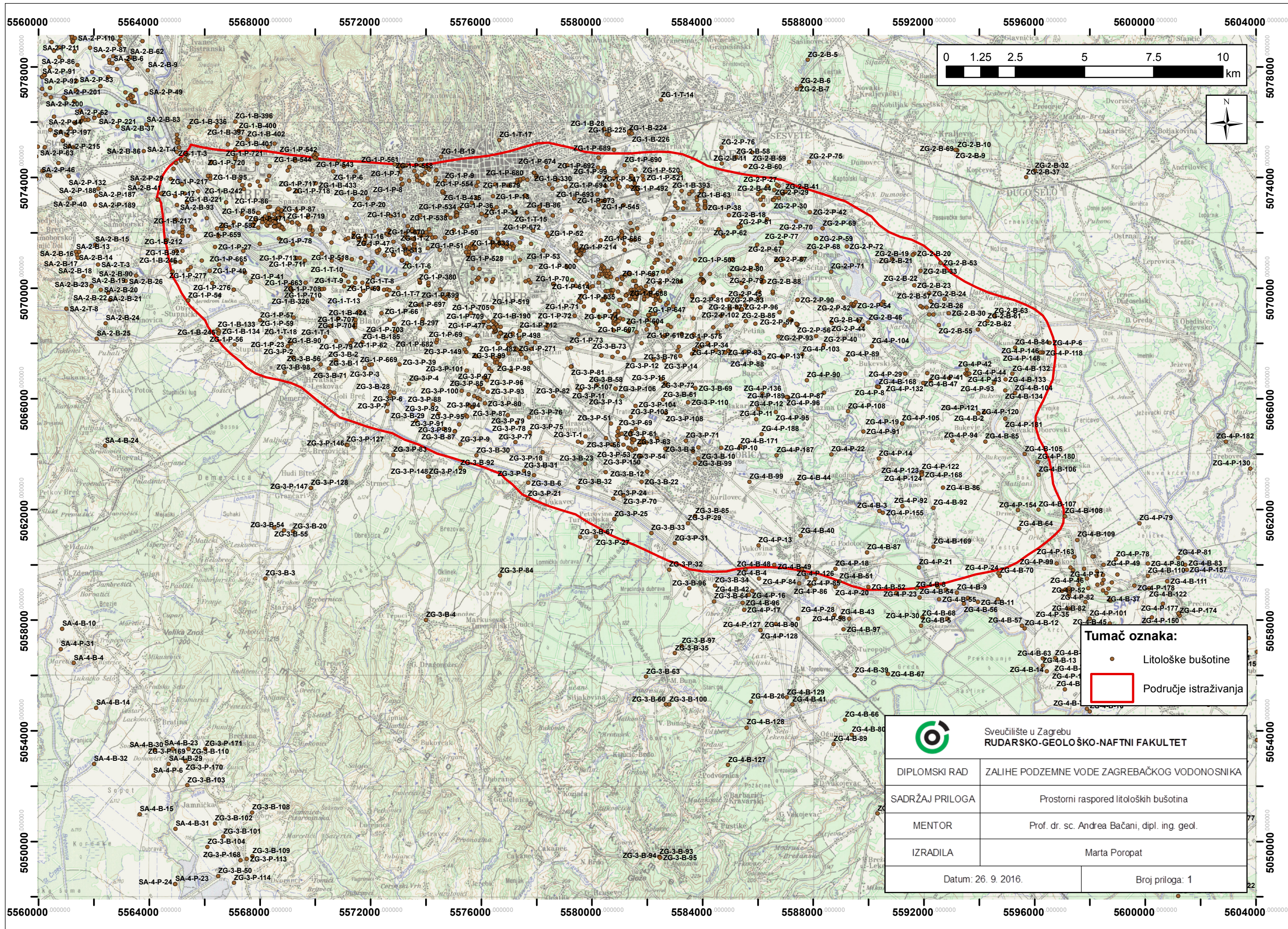
Urumović, K. i Mihelčić, D. (2000): Podzemne vode savskoga vodonosnika. Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima, zbornik radova, okrugli stol, Slavonski Brod.

Velić, J. & Saftić, B. (1991): Subsurface Spreading and Facies Characteristics of Middle Pleistocene Deposits between Zaprešić and Samobor. *Geološki vjesnik*, 44, 69–82.

Velić, J. & Durn, G. (1993): Alternating Lacustrine-Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases during Quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia. *Geologia Croatica*, vol. 46, no. 1, p. 71–90.

Velić, J., B. Saftić & T. Malvić: (1999): Lithologic Composition and Stratigraphy of Quaternary Sediments in the Area of the “Jakuševac” Waste Depository (Zagreb, Northern Croatia). *Geologia Croatica*, vol. 52, no. 2, p. 119–130.

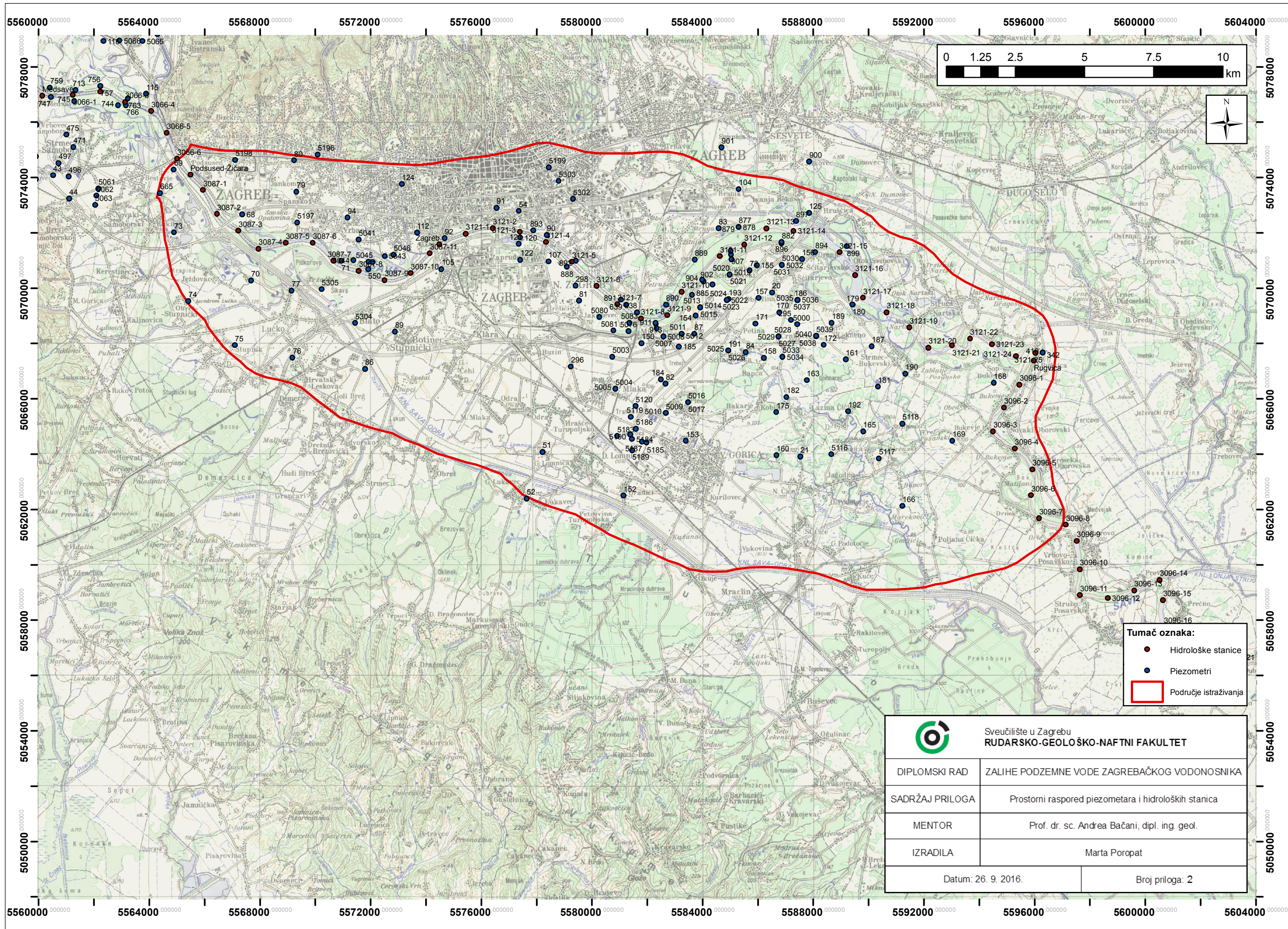
PRILOZI



Tumač oznaka:

- Litološke bušotine
- Područje istraživanja

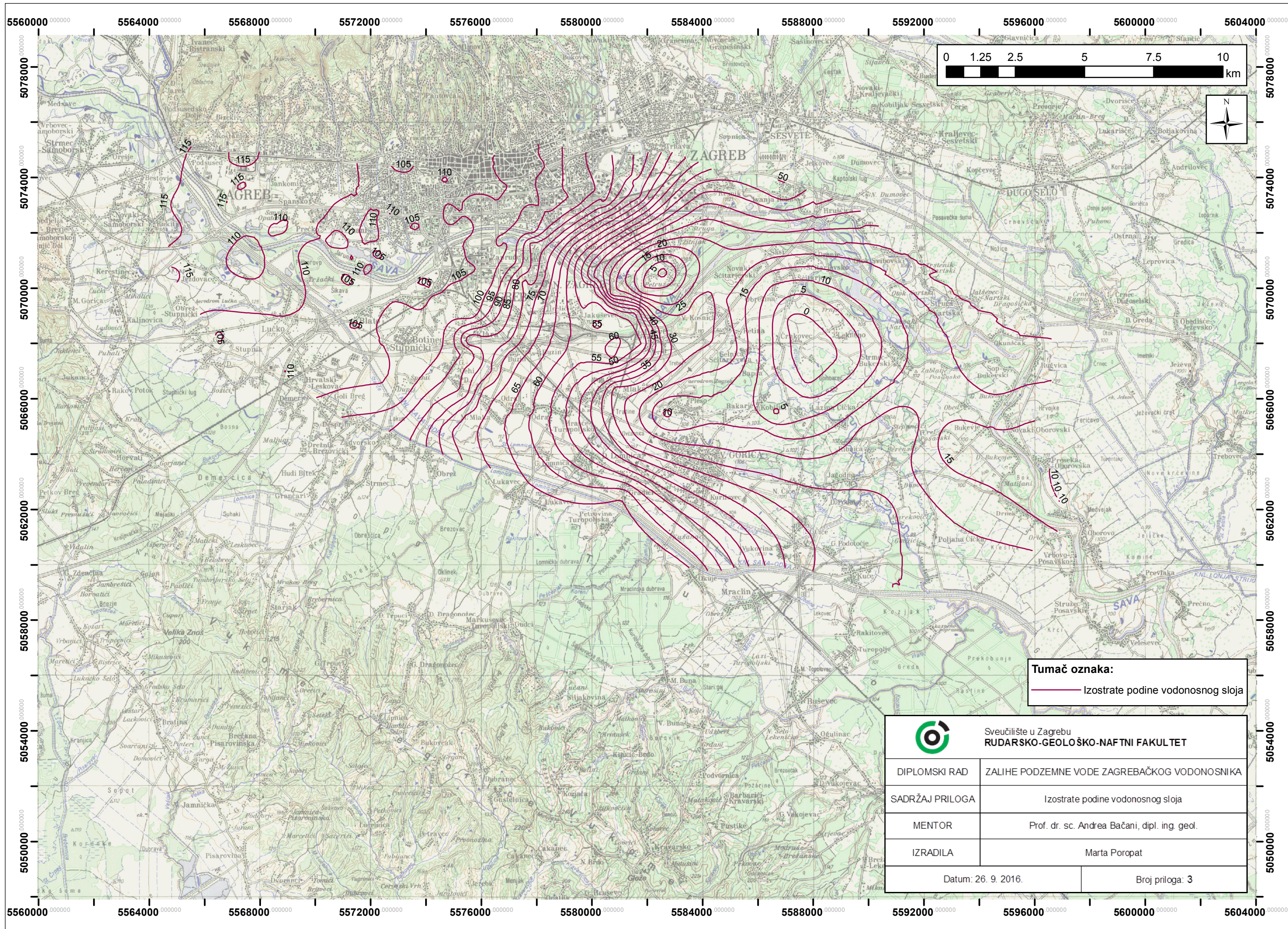
Sveučilište u Zagrebu RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET	
DIPLOMSKI RAD	ZALIHE PODZEMNE VODE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA
SADRŽAJ PRILOGA	Prostorni raspored litoških bušotina
MENTOR	Prof. dr. sc. Andrea Bačani, dipl. ing. geol.
IZRADILA	Marta Poropat
Datum: 26. 9. 2016.	
Broj priloga: 1	





Tumač oznaka:

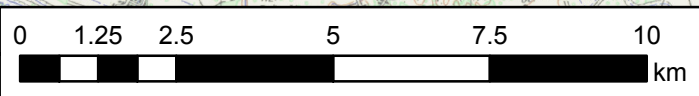
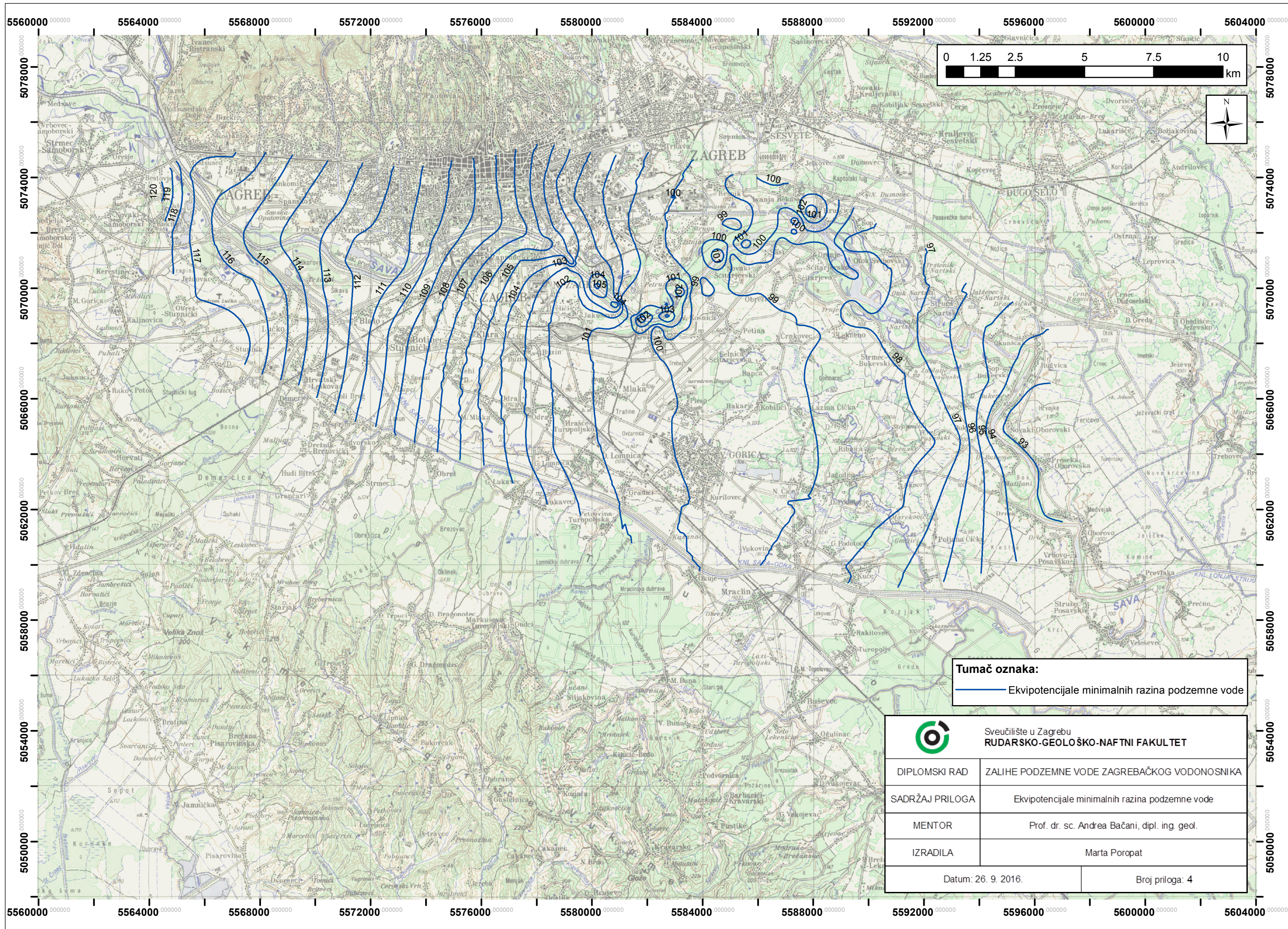
- Hidrološke stanice
- Piezometri
- Područje istraživanja


Sveučilište u Zagrebu RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET	
DIPLOMSKI RAD	ZALIHE PODZEMNE VODE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA
SADRŽAJ PRILOGA	Prostorni raspored piezometara i hidroloških stanica
MENTOR	Prof. dr. sc. Andrea Bačani, dipl. ing. geol.
IZRADILA	Marta Poropat
Datum: 26. 9. 2016.	
Broj priloga: 2	




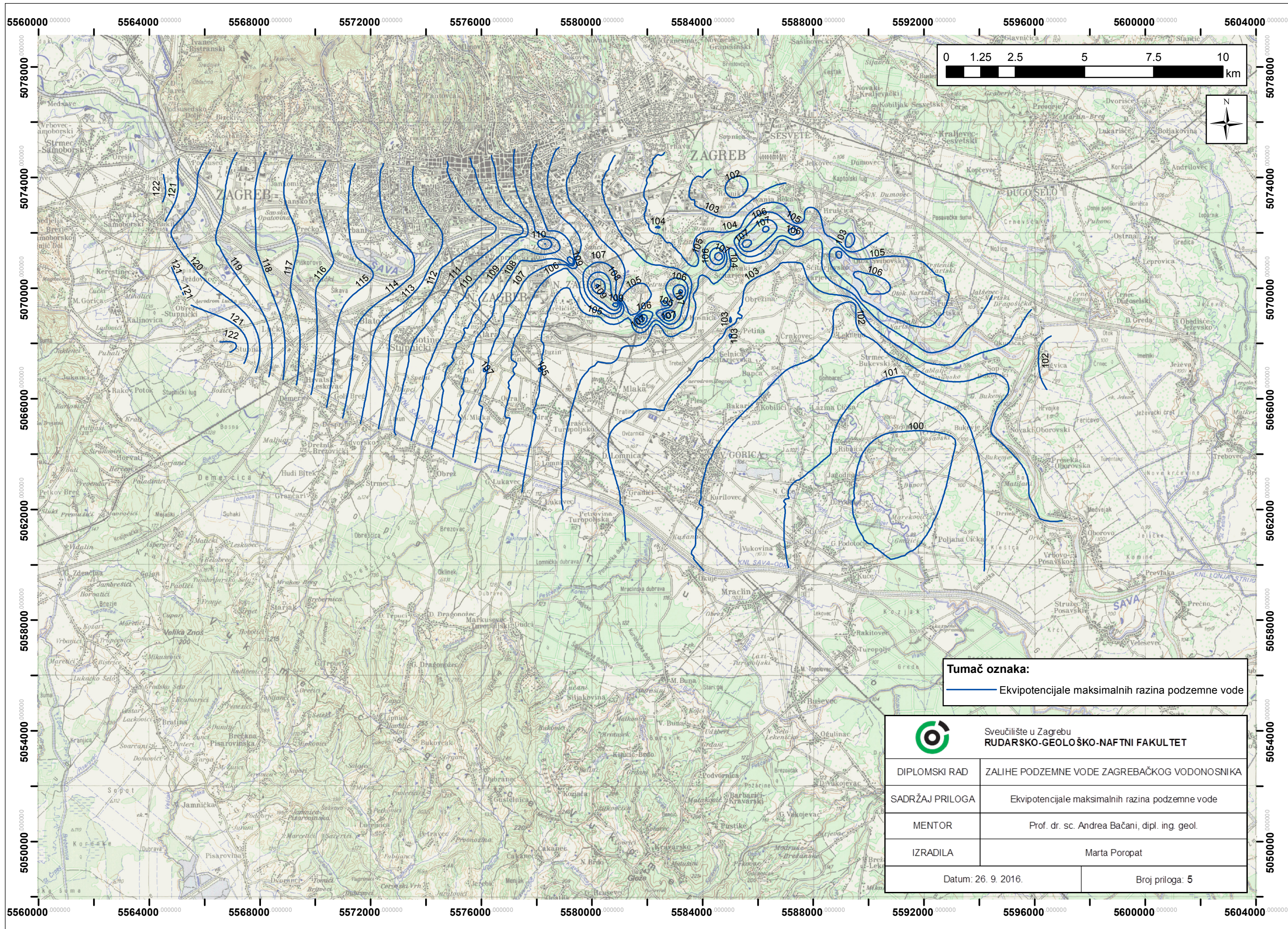
Tumač oznaka:
 Izostrate podine vodonosnog sloja

 Sveučilište u Zagrebu RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET	
DIPLOMSKI RAD	ZALIHE PODZEMNE VODE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA
SADRŽAJ PRILOGA	Izostrate podine vodonosnog sloja
MENTOR	Prof. dr. sc. Andrea Bačani, dipl. ing. geol.
IZRADILA	Marta Poropat
Datum: 26. 9. 2016.	
Broj priloga: 3	




Tumač oznaka:
 Ekvipotencijale minimalnih razina podzemne vode

 Sveučilište u Zagrebu RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET	
DIPLOMSKI RAD	ZALIHE PODZEMNE VODE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA
SADRŽAJ PRILOGA	Ekvipotencijale minimalnih razina podzemne vode
MENTOR	Prof. dr. sc. Andrea Bačani, dipl. ing. geol.
IZRADILA	Marta Poropat
Datum: 26. 9. 2016.	
Broj priloga: 4	



Tumač oznaka:
 Ekvipotencijale maksimalnih razina podzemne vode

 Sveučilište u Zagrebu RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET	
DIPLOMSKI RAD	ZALIHE PODZEMNE VODE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA
SADRŽAJ PRILOGA	Ekvipotencijale maksimalnih razina podzemne vode
MENTOR	Prof. dr. sc. Andrea Bačani, dipl. ing. geol.
IZRADILA	Marta Poropat
Datum: 26. 9. 2016.	
Broj priloga: 5	