

# Hidrogeološki odnosi na sjeveroistočnom rubu zagrebačkog vodonosnika

---

**Karlović, Igor**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*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:169:780487>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-16**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**HIDROGEOLOŠKI ODNOSI NA SJEVEROISTOČNOM  
RUBU ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA**

Diplomski rad

Igor Karlović  
GI-160

Zagreb, 2015.

## HIDROGEOLOŠKI ODNOSI NA SJEVEROISTOČNOM RUBU ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

Igor Karlović

**Diplomski rad je izraden:** Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni-fakultet

Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### SAŽETAK

Zadatak ovog diplomskog rada bio je detaljnije opisati hidrogeološke odnose na sjeveroistočnom rubu zagrebačkog vodonosnika. Na istraživanom području izvedena su četiri nova zdenca: IW-1, IW-2, PW-1 i PW-2. Krajem 2014. te početkom 2015. godine izvedena su pokusna crpljenja na spomenuta četiri zdenca. Na temelju rezultata pokusnih crpljenja određeni su hidrogeološki parametri vodonosnika i hidraulički parametri zdenaca. Za istraživano područje utvrđene su sljedeće prosječne vrijednosti hidrogeoloških parametara: transmisivnost  $T = 3,62 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, koeficijent uskladištenja  $S = 3,71 \times 10^{-5}$  i hidraulička vodljivost  $K = 4,47 \times 10^{-3}$  m/s. Jednadžbe sniženja u zdenacima glase:  $s = 20,504 Q + 93,501 Q^2$  (IW-2);  $s = 25,915 Q + 69,289 Q^2$  (IW-1);  $s = 18,803 Q + 462,74 Q^2$  (PW-1);  $s = 20,657 Q + 112,1 Q^2$  (PW-2). Kemijske analize uzoraka vode iz svih zdenaca ukazale su na povišene koncentracije željeza, odnosno u svim uzorcima koncentracija je premašila maksimalnu dozvoljenu koncentraciju (MDK) za pitku vodu. Pretpostavlja se da se radi o prirodno povišenom sadržaju željeza, svojstvenom vodonosnicima taloženim u reduktivnim uvjetima. Visoke koncentracije željeza te smještaj zdenaca na istraživanom području ukazuju da je zahvaćen drugi vodonosni sloj građen od dominantno jezersko-barskih naslaga.

**Ključne riječi:** zagrebački vodonosnik, zdenac, pokusno crpljenje, kakvoća podzemne vode

**Diplomski rad sadrži:** 31 stranicu, 10 tablica, 19 slika, 11 priloga i 22 reference

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Diplomski rad pohranjen:** Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

**Mentor:** Doc. dr. sc. Jelena Parlov, RGNF

**Ocjenjivači:** Doc. dr. sc. Jelena Parlov, RGNF  
Prof. dr. sc. Andrea Bačani, RGNF  
Doc. dr. sc. Dario Perković, RGNF

**Datum obrane:** 17.7.2015.

## HYDROGEOLOGICAL RELATIONSHIPS ON THE NORTH-EASTERN EDGE OF THE ZAGREB AQUIFER

Igor Karlović

**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 aim of this thesis was to provide a detailed description of the hydrogeological relationships on the north-eastern edge of the Zagreb aquifer. Four new wells were drilled in the investigated area: IW-1, IW-2, PW-1 and PW-2. Pumping tests on these four wells were performed at the end of 2014 and the beginning of 2015. Based on the results of the pumping tests, the hydrogeological parameters of the aquifer and the hydraulic parameters of wells were determined. The following average values of hydrogeological parameters were defined for the investigated area: transmissivity  $T = 3,62 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, storage coefficient  $S = 3,71 \times 10^{-5}$  and hydraulic conductivity  $K = 4,47 \times 10^{-3}$  m/s. Drawdown equations in the wells are as follows:  $s = 20,504 Q + 93,501 Q^2$  (IW-2);  $s = 25,915 Q + 69,289 Q^2$  (IW-1);  $s = 18,803 Q + 462,74 Q^2$  (PW-1);  $s = 20,657 Q + 112,1 Q^2$  (PW-2). The chemical analyses of water samples from all wells have shown the elevated iron concentration, i.e. iron concentration exceeds the maximum permissible concentration (MPC) for drinking water in all samples. It is assumed that the elevated iron content is due to natural causes, which is typical for sediments deposited in reductive conditions. High iron concentration and the location of the wells in the investigated area indicate that these wells were drilled in the second aquifer, with the predominantly lacustrine-marshy deposits.

**Keywords:** Zagreb aquifer, well, pumping test, groundwater quality

**Thesis contains:** 31 pages, 10 tables, 19 figures, 11 appendices and 22 references

**Original in:** Croatian

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

**Supervisor:** Assistant Professor Jelena Parlov, PhD

**Reviewers:** Assistant Professor Jelena Parlov, PhD  
Full Professor Andrea Bačani, PhD  
Assistant Professor Dario Perković, PhD

**Date of defense:** 17<sup>th</sup> of July, 2015

## SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Geografski smještaj istraživnog područja.....	2
3. Geološke značajke šireg područja.....	4
4. Hidrogeološke značajke šireg područja.....	7
5. Hidrogeološki odnosi na sjeveroistočnom rubu vodonosnika.....	10
5.1. Podaci o izvedenim zdencima.....	10
5.2. Litološki profil istraživnog područja.....	11
5.3. Analiza podataka pokusnih crpljenja zdenaca.....	13
5.3.1. Hidrogeološki parametri vodonosnika.....	14
5.3.2. Hidraulički parametri zdenca.....	20
5.4. Kakvoća podzemne vode.....	25
6. Zaključak.....	27
7. Literatura.....	29

## POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Podaci razlike sniženja za jedan logaritamski ciklus ( $\Delta s$ ), crpne količine ( $Q$ ) te debljine vodonosnog sloja ( $m$ ) kod pokusnog crpljenja zdenca PW-1 .....	17
Tablica 5-2. Podaci razlike sniženja za jedan logaritamski ciklus ( $\Delta s$ ), crpne količine ( $Q$ ) te debljine vodonosnog sloja ( $m$ ) kod pokusnog crpljenja zdenca PW-2 .....	18
Tablica 5-3. Podaci potrebni za izračun koeficijenta uskladištenja vodonosnika .....	18
Tablica 5-4. Podaci razlike sniženja za jedan logaritamski ciklus ( $\Delta s'$ ) te crpna količina ( $Q$ ).....	18
Tablica 5-5. Sumarni prikaz hidrogeoloških parametara vodonosnika .....	19
Tablica 5-6. Podaci ukupnog sniženja u zdencu ( $s$ ) i crpne količine ( $Q$ ) te omjer sniženja u zdencu i crpne količine ( $s/Q$ ).....	21
Tablica 5-7. Podaci ukupnog sniženja u zdencu ( $s$ ) i crpne količine ( $Q$ ) te omjer sniženja u zdencu i crpne količine ( $s/Q$ ).....	22
Tablica 5-8. Podaci ukupnog sniženja u zdencu ( $s$ ) i crpne količine ( $Q$ ) te omjer sniženja u zdencu i crpne količine ( $s/Q$ ).....	23
Tablica 5-9. Podaci ukupnog sniženja u zdencu ( $s$ ) i crpne količine ( $Q$ ) te omjer sniženja u zdencu i crpne količine ( $s/Q$ ).....	24
Tablica 5-10. Koncentracije željeza u analiziranim uzorcima .....	25

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Granice zagrebačkog vodonosnika (Bačani et al., 2010).....	2
Slika 2-2. Topografska karta užeg istraživanog područja M 1:25.000 .....	3
Slika 3-1. Geološka karta istraživanog područja (OGK Zagreb, Šikić et al., 1977; OGK Ivanić Grad, Basch, 1981).....	5
Slika 4-1. Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006).....	7
Slika 4-2. Karta izopaha aluvijalnog vodonosnika (preuzeto iz EGPV, 1999).....	8
Slika 4-3. Karta izopaha vodonosnog sustava (preuzeto iz EGPV, 1999).....	8
Slika 4-4. Karta izobata kvartarnog pokrova (preuzeto iz EGPV, 1999).....	9
Slika 5-1. Smještaj zdenaca u odnosu na geološku građu prema OGK list Ivanić Grad .....	10
Slika 5-2. Shematski litološki profil istraživanog područja .....	12
Slika 5-3. Debljine krovine na istraživanom području .....	13
Slika 5-4. Prostiranje aluvijalnog vodonosnika na sjeveroistočnom rubu zagrebačkog vodonosnika.....	13
Slika 5-5. Dijagram vrijeme – dubina do vode za crpljenje zdenca PW-1 .....	16
Slika 5-6. Dijagram vrijeme – dubina do vode za crpljenje zdenca PW-2 .....	17
Slika 5-7. Grafički prikaz zaostalog sniženja $s'$ u odnosu na $t/t'$ .....	19
Slika 5-8. Grafički prikaz pravca $s/Q = CQ + A$ s pripadajućom jednačinom za zdenac IW-2 .....	21
Slika 5-9. Grafički prikaz pravca $s/Q = CQ + A$ s pripadajućom jednačinom za zdenac IW-1 .....	22
Slika 5-10. Grafički prikaz pravca $s/Q = CQ + A$ s pripadajućom jednačinom za zdenac PW-1 .....	23
Slika 5-11. Grafički prikaz pravca $s/Q = CQ + A$ s pripadajućom jednačinom za zdenac PW-2 .....	24
Slika 5-12. Koncentracije željeza u zdencima PW-1, PW-2, IW-1 i IW-2.....	26

## POPIS PRILOGA

PRILOG 1. Litološki i tehnički profil zdenca IW-1

PRILOG 2. Litološki i tehnički profil zdenca IW-2

PRILOG 3. Litološki i tehnički profil zdenca PW-1

PRILOG 4. Litološki i tehnički profil zdenca PW-2

PRILOG 5. Podaci pokusnog crpljenja stalnom crpnom količinom u zdencu PW-1

PRILOG 6. Podaci pokusnog crpljenja stalnom crpnom količinom u zdencu PW-2

PRILOG 7. Podaci zaostalog sniženja u vremenu te izračunat omjer  $t/t'$

PRILOG 8. Podaci pokusnog crpljenja u koracima u zdencu IW-1

PRILOG 9. Podaci pokusnog crpljenja u koracima u zdencu IW-2

PRILOG 10. Podaci pokusnog crpljenja u koracima u zdencu PW-1

PRILOG 11. Podaci pokusnog crpljenja u koracima u zdencu PW-2



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

$T$  – transmisivnost ( $\text{m}^2/\text{dan}$ ) ili ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\Delta s$  – razlika sniženja za jedan logaritamski ciklus (m)

$Q$  – količina crpljenja ( $\text{m}^3/\text{dan}$ ), ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ili (l/s)

$\Delta s'$  – razlika zaostalog sniženja nakon prestanka crpljenja za jedan logaritamski ciklus (m)

$K$  – hidraulička vodljivost ( $\text{m}/\text{dan}$ ) ili ( $\text{m}/\text{s}$ )

$m$  – debljina vodonosnog sloja (m)

$S$  – koeficijent uskladištenja (-)

$R_p$  – udaljenost piezometra od osi crpljenoga zdenca (m)

$s$  – ukupno sniženje u zdencu (m)

$s/Q$  – specifično sniženje ( $\text{s}/\text{m}^2$ )

$A$  – konstanta linearnih gubitaka ( $\text{dan}/\text{m}^2$ )

$C$  – konstanta nelinearnih gubitaka ( $\text{dan}^2/\text{m}^5$ )

## 1. Uvod

Cilj ovog diplomskog rada bio je detaljnije opisati hidrogeološke odnose na sjeveroistočnom rubu zagrebačkog vodonosnika.

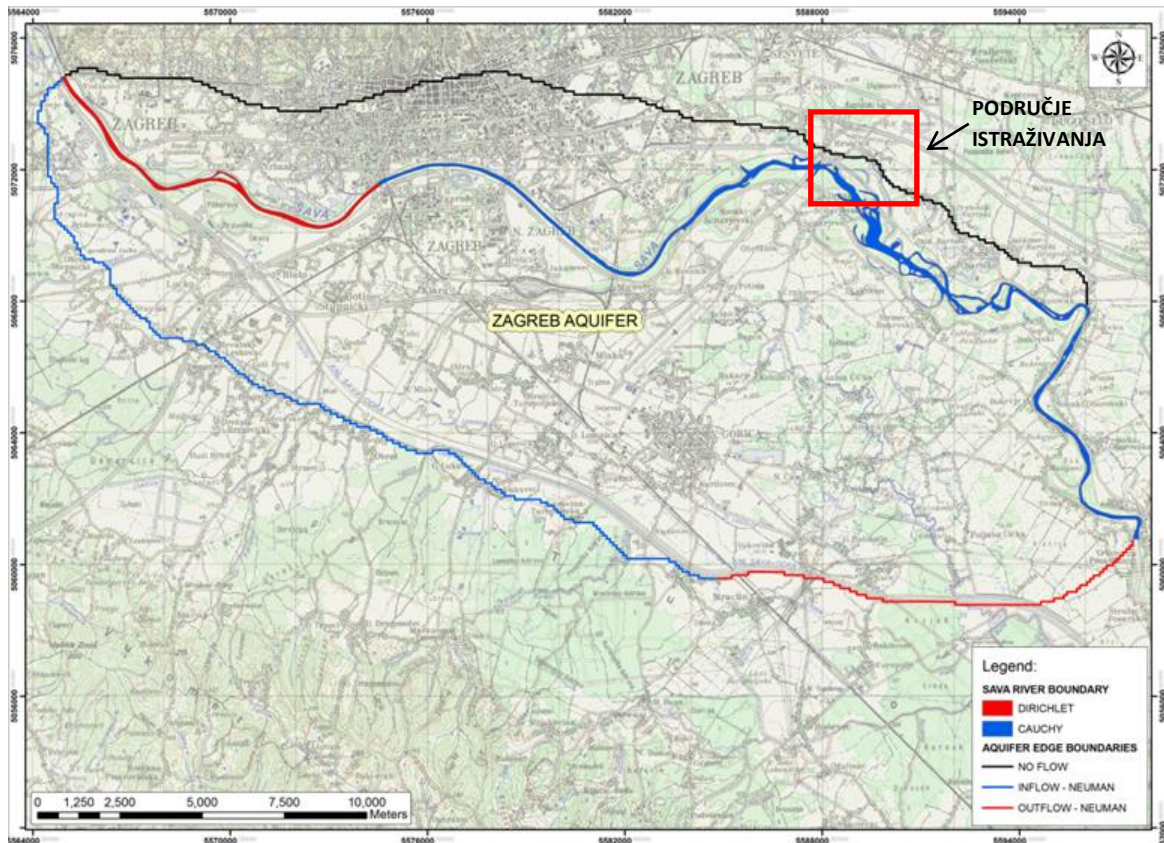
Rad je obuhvatio opis geoloških i hidrogeoloških značajki zagrebačkog vodonosnika u cijelosti, dok su za opis hidrogeoloških odnosa na užem području istraživanja prvenstveno korišteni podaci o četiri novo izvedena zdenca: IW-1, IW-2, PW-1 i PW-2. Na temelju litoloških stupova zdenaca izrađen je shematski litološki profil. Interpretirani su podaci provedenih pokusnih crpljenja zdenaca, čime su određeni parametri vodonosnika i parametri zdenaca.

Podaci pokusnog crpljenja obrađeni su u računalnom programu Microsoft Excel te su dobiveni dijagrami dubina do vode - vrijeme, dijagram povrat razine vode - vrijeme te dijagrami specifično sniženje - crpna količina koji su poslužili za izračun parametara vodonosnika, odnosno parametara zdenaca.

U radu su pregledane i obrađene kemijske analize sirove vode iz svih izvedenih zdenaca, koje je proveo Zavod za javno zdravstvo Varaždinske županije, kako bi se dobio generalni uvid u kakvoću podzemne vode na istraživanom području.

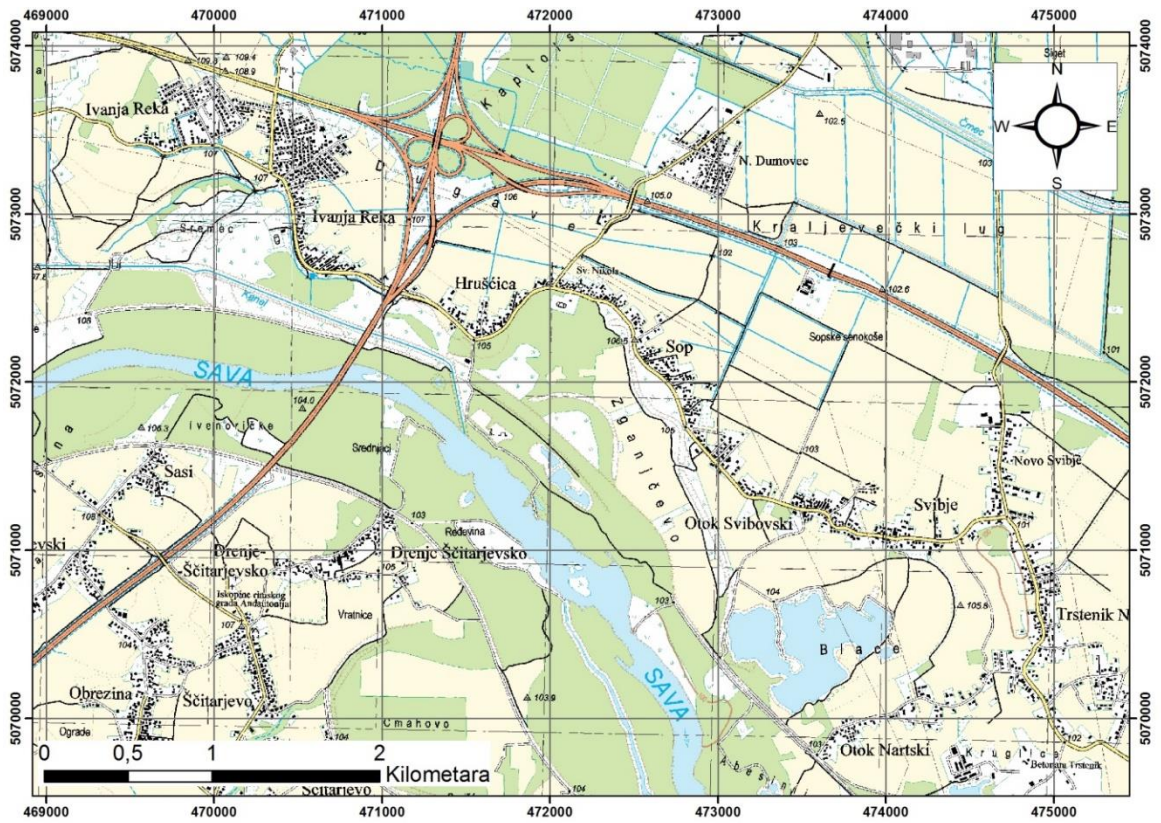
## 2. Geografski smještaj istraživanog područja

Zagrebački vodonosnik nalazi se na području Grada Zagreba između Podsuseda na zapadu, Medvednice na sjeveru, Vukomeričkih Gorica na jugu i Rugvice na istoku (Slika 2-1). Vodonosnik se proteže duž rijeke Save pravcem sjeverozapad-jugoistok u dužini oko 30 km. Njegova prosječna širina iznosi između 10 i 15 km.



Slika 2-1. Granice zagrebačkog vodonosnika (Bačani et al., 2010)

U ovom radu detaljnije je opisan sjeveroistočni rub zagrebačkog vodonosnika, odnosno područje u blizini naselja Hrušćica i Sop (Slika 2-2).



Slika 2-2. Topografska karta užeg istraživanog područja M 1:25.000

### 3. Geološke značajke šireg područja

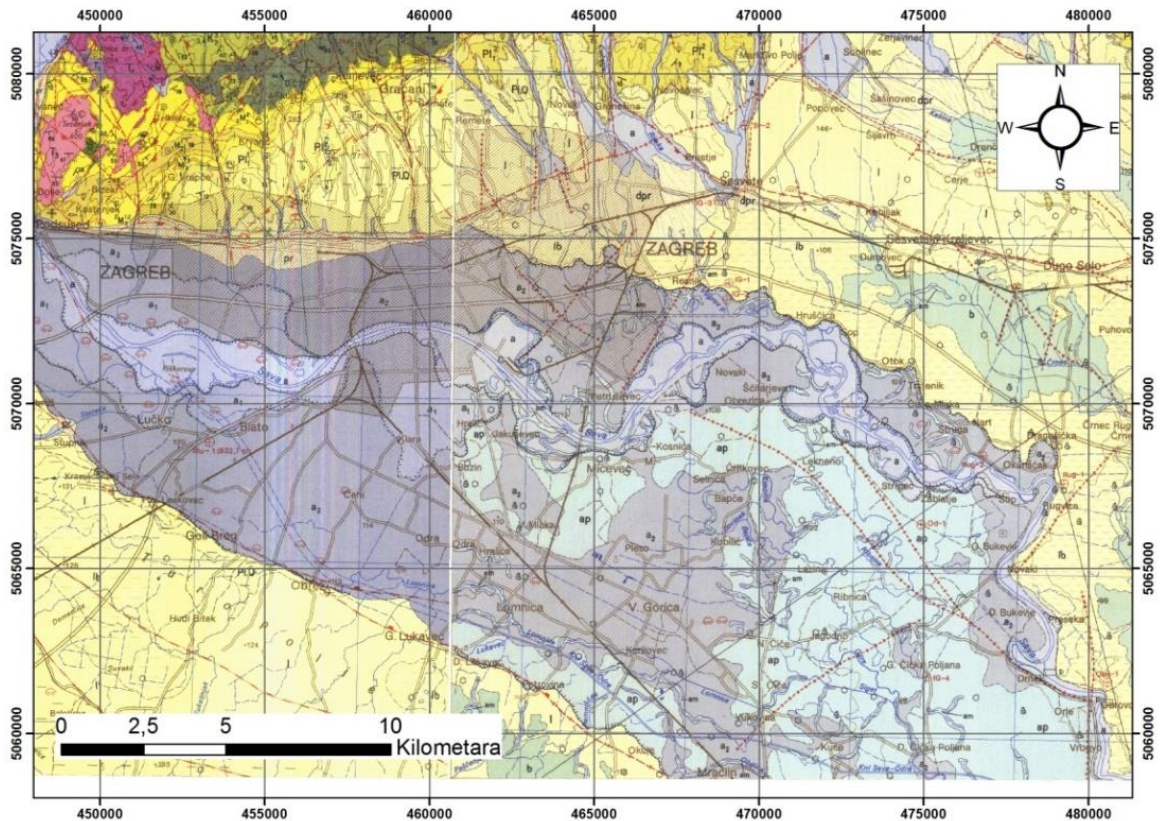
Zagrebački vodonosnik čine kvartarni sedimenti taloženi tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena te holocena. Tijekom pleistocena na tom su području prevladavala jezera i močvare, a okolno gorje (Medvednica, Marijagorička Brda i Žumberačko gorje) bilo je kopno podložno intenzivnoj eroziji i denudaciji. Trošeni materijal nošen je potocima i taložen u jezerima i močvarama (Velić i Saftić, 1991). Početkom holocena, klimatski i tektonski procesi omogućili su prodor rijeke Save čime je započeo transport materijala s područja Alpa (Velić i Durn, 1993). Transport materijala bio je intenzivan za vrijeme toplih i vlažnih razdoblja, dok se za vrijeme hladnih i suhih razdoblja intenzitet smanjivao. Osim klimatskih promjena, tektonski pokreti također su utjecali na procese taloženja (Velić et al., 1999). Zbog takvih uvjeta taloženja, vodonosnik je heterogen i anizotropan te neujednačene debljine naslaga.

Gledano u tlocrtu, aluvijalne naslage se na sjeveru naslanjaju na proluvijalne, pretežito glinovite naslage, koje bočno prelaze u slabopropusne tercijarne naslage južnih obronaka Medvednice (Slika 3-1). Na zapadu je zagrebački vodonosnik u kontaktu sa samoborskim vodonosnikom. Istočni rub sustava je izlazni, ali zbog smanjenih propusnosti ograničenog protoka. Na jugu zagrebački vodonosnik se naslanja na klastične sedimente Stupničke terase koji pak bočno prelaze u naslage gornje paludinskih slojeva koji izgrađuju sjeverne padine Vukomeričkih Gorica.

Šire područje istraživanja, prikazano na Slici 3-1, izgrađeno je od naslaga velikog stratigrafskog raspona, od trijasa do kvartara. Opis kartiranih jedinica zagrebačkog područja preuzet je iz Tumača za OGK list Zagreb (Šikić et al., 1979).

Srednji trijas ( $T_2$ ) dominantno izgrađuju dolomiti. Podređeno postoje tanke zone i leće vapnenca, dolomitičnog vapnenca i šejla. Maksimalna debljina srednjotrijaskih naslaga ne prelazi 500 metara.

Najzastupljeniji litološki član gornjeg trijasa ( $T_3$ ) je dolomit. Najmlađi dio gornjotrijaskih naslaga sastoji se od izmjene dolomita, sivih vapnenaca i dolomitiziranih vapnenaca. Ponegdje postoje proslojci tamnosivih do crnih šejlova. Debljina gornjeg trijasa može se procijeniti na oko 800 metara.



Slika 3-1. Geološka karta istraživanog područja (OGK Zagreb, Šikić et al., 1977; OGK Ivanić Grad, Basch, 1981)

*Tumač oznaka: a – aluvij; a<sub>1</sub> – najniža terasa; a<sub>2</sub> – srednja terasa; pr – proluvij; l – kopneni beskarbonatni les; lb – barski les; Pl, Q – plioleistocen; Pl<sub>1</sub><sup>1</sup> – donji pont; <sup>2</sup>M<sub>3</sub><sup>1,2</sup> – gornji panon; <sup>2</sup>M<sub>2</sub><sup>2</sup> – gornji torton; T<sub>3</sub> – gornji trijas; T<sub>2</sub> – srednji trijas*

Gornjotortonske naslage (<sup>2</sup>M<sub>2</sub><sup>2</sup>) izgrađene su pretežno od priobalnih i plitkovodnih marinskih sedimenata. To su organogeni i bioklastični vapnenci, pješčenjaci, vapnoviti i glinoviti lapori. Debljina gornjotortonskih naslaga varira na pojedinim područjima. Najčešće se kreće u vrijednostima 150 do 300 metara.

Gornji panon (<sup>2</sup>M<sub>3</sub><sup>1,2</sup>) obilježavaju vapnoviti lapori te podređeno pijesci, pješčenjaci, šljunci i konglomerati. Debljina gornjopanonskih sedimenata, ovisno o području, kreće se od 150 do 300 metara.

Najčešći sedimenti donjeg pontu (Pl<sub>1</sub><sup>1</sup>) su lapori različitih nijansa sive boje. S padom karbonatne komponente prelaze u laporovite gline. Unutar lapora mogu se nalaziti proslojci glinovitih pijesaka. Debljina donjopontskih naslaga se kreće između 80 i 150 metara.

Pliokvartarne naslage (Pl, Q) izgrađene su od šljunaka, pijesaka i glina pomiješanih u različitim omjerima. Rjeđe se mogu naći ulošci pješčenjaka i konglomerata. Pretpostavlja se da debljina ovih naslaga ne premašuje 150 metara.

Barski les (Ib) nastao je nasipavanjem lesa u bare. Tu se silt, koji je donosio vjetar, miješao s organogeno – barskim sedimentima. Barski les je plavičastosive i zelenkastosive boje te ima dosta veliki postotak kalcijevog karbonata. Najvećim dijelom su naslage barskog lesa prekrivene mlađim aluvijalnim sedimentima.

Kopneni beskarbonatni les (I) predstavlja glinoviti silt, žute, sivožute ili žutosmeđe boje te sadrži vrlo mali postotak kalcijevog karbonata. Po granulometrijskom sastavu ne razlikuje se mnogo od barskog lesa.

Proluvijalne naslage (pr) razvijene su uglavnom u obliku krupnozrnatih šljunaka, koji su pomiješani s pijeskom i glinom.

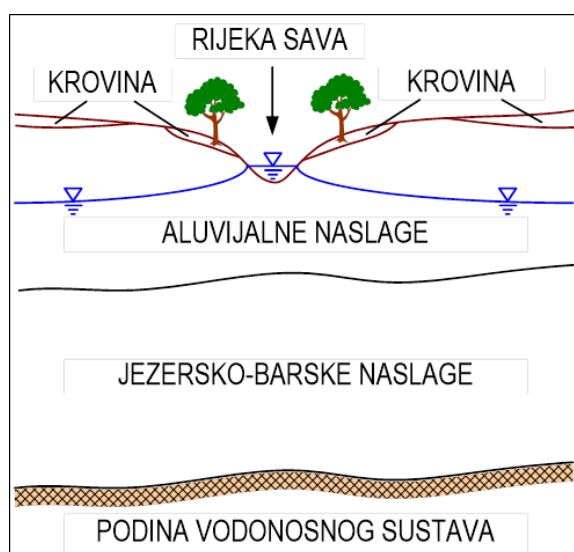
Druga savska terasa ( $a_2$ ) nastala je usijecanjem Save u aluvijalne sedimente, koje je prije nanijela. Sastoji se od izmjene krupnozrnih šljunaka i pijesaka, s povećanjem udjela pijeska idući nizvodno, odnosno u smjeru jugoistoka.

Prva savska terasa ( $a_1$ ) je mlađa holocenska akumulacijska terasa rijeke Save. Postanku ove terase prethodilo je razdoblje erozije i denudacije tijekom kojeg se Sava usjekla u naslage druge savske terase ( $a_2$ ), a potom je ponovno istaložila šljunak, pijesak i podređeno glinu. Naslage ove terase nalaze se za oko 0,5 - 2 metara niže u odnosu na drugu savsku terasu ( $a_2$ ).

Aluvijalni nanos recentnih tokova Save (a) predstavlja najmlađu holocensku akumulacijsku terasu rijeke Save u okolici Zagreba. Postanku ove terase prethodilo je razdoblje erozije i denudacije tijekom kojeg se Sava usjekla u naslage prethodne holocenske terase ( $a_1$ ), a potom je ponovno istaložila pijesak i glinu, podređeno i šljunak. Naslage ove terase nalaze se za oko 1 - 1,5 metar niže u odnosu na prvu savsku terasu ( $a_1$ ).

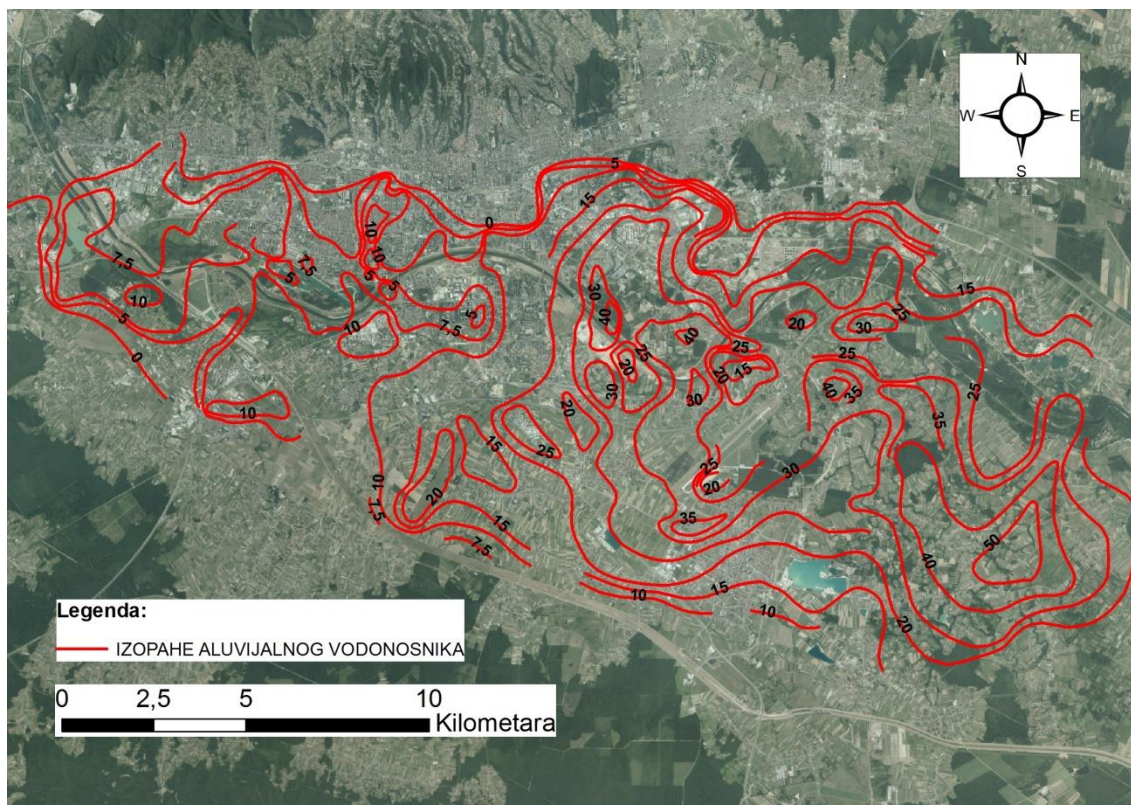
#### 4. Hidrogeološke značajke šireg područja

Zagrebački vodonosnik čine dva vodonosna sloja: gornji vodonosni sloj s dominantno aluvijalnim naslagama rijeke Save i donji vodonosni sloj s dominantno jezersko-barskim naslagama (Slika 4-1). Aluvijalne naslage sastoje se od čestica pretežito karbonatnog sastava koje su porijeklom iz alpskog područja, dok dublje naslage nastale spiranjem i taloženjem materijala s okolnog gorja sadrže čestice pretežito siliciklastičnog sastava. Debljina prvog vodonosnog sloja kreće se od 5 m na zapadu do 50 m na području Črnkovca (Slika 4-2), dok se ukupna debljina vodonosnog sustava kreće od 5 m na zapadu do 100 m na području Črnkovca (Slika 4-3). Slabopropusna krovina izgrađena je od gline, organske gline, praha te pijeska sa glinom i prahom (Čakarun, 1981). Neposredno uz Savu krovina većinom nije prisutna, dok udaljavanjem od Save raste debljina slabopropusnih naslaga (Slika 4-4). Na jugoistočnom dijelu i u rubnim predjelima debljina krovine raste i do 15 metara. Podinu vodonosnog sustava čine slabo propusne glinovito i glinovito - prašinate naslage.

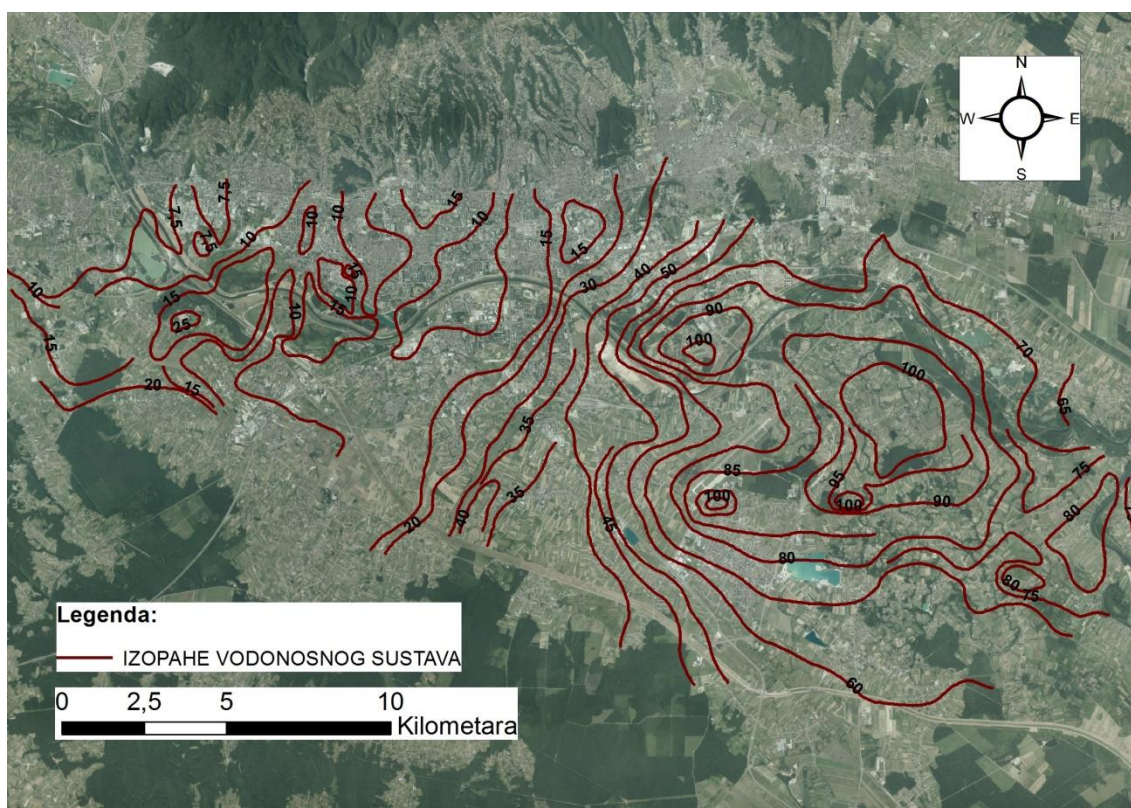


Slika 4-1. Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006)

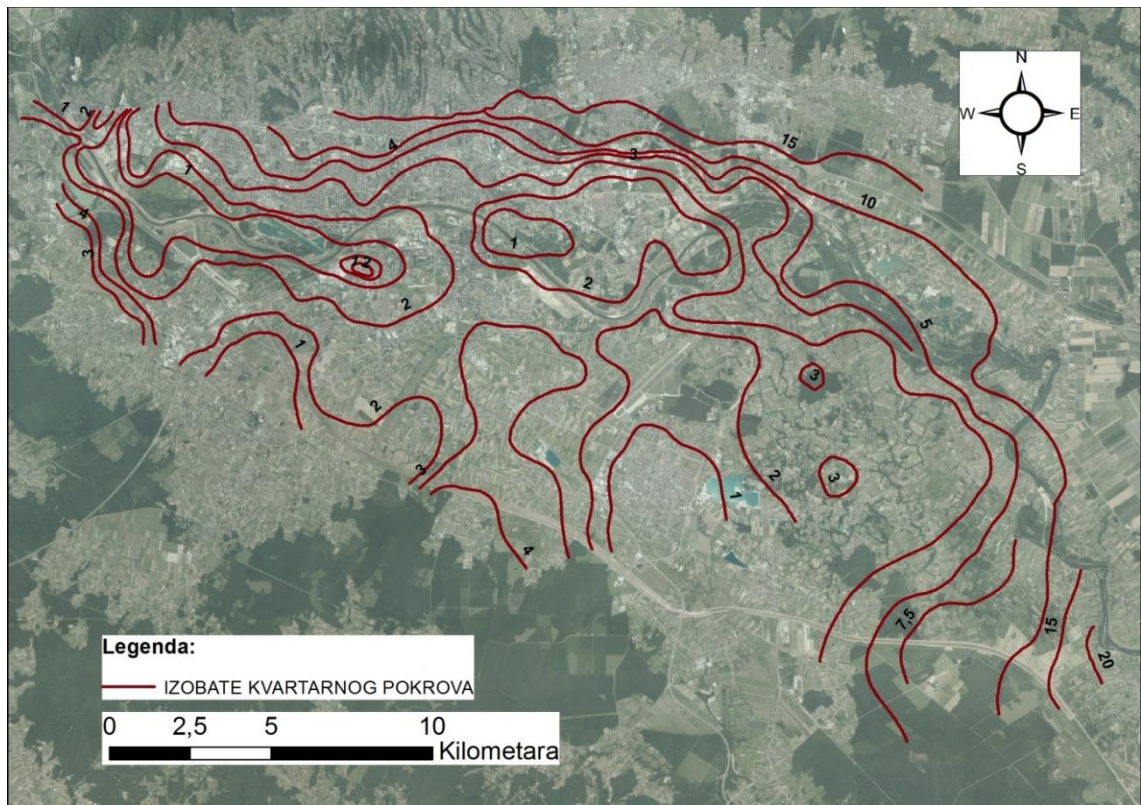




Slika 4-2. Karta izopaha aluvijalnog vodonosnika (preuzeto iz EGPV, 1999)



Slika 4-3. Karta izopaha vodonosnog sustava (preuzeto iz EGPV, 1999)



Slika 4-4. Karta izobata kvartarnog pokrova (preuzeto iz EGPV, 1999)

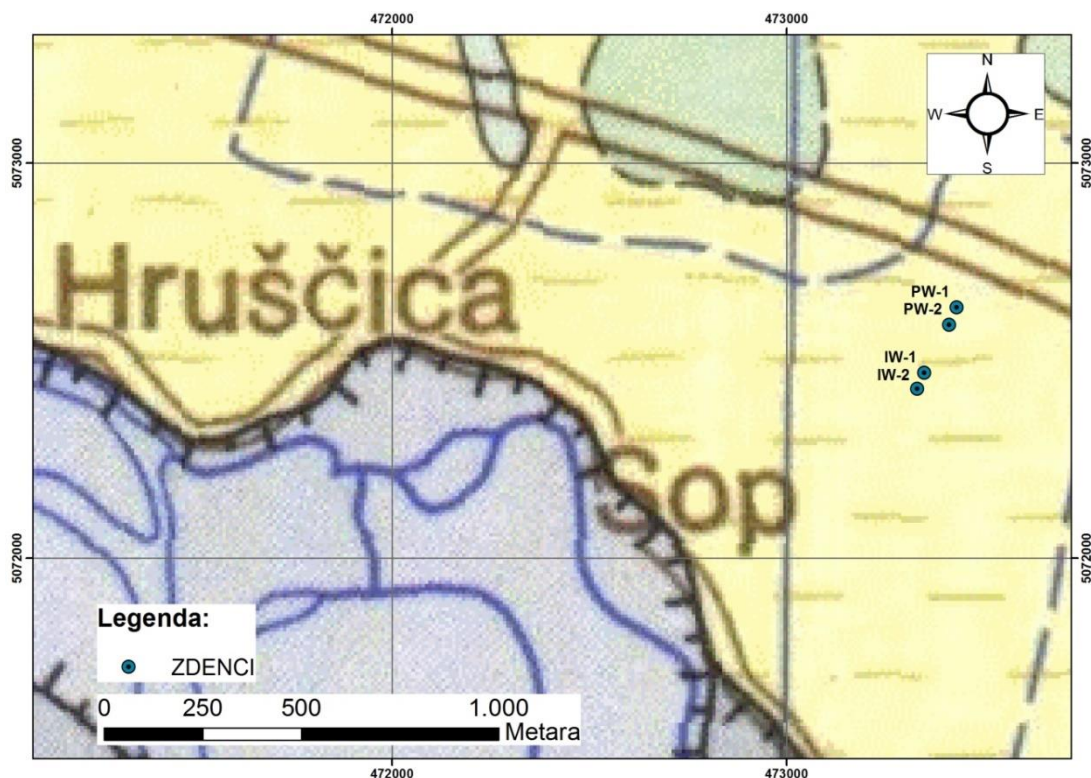
Zagrebački vodonosnik je otvoreni vodonosnik što znači da mu gornju granicu saturacije čini vodno lice pod atmosferskim tlakom. Generalni smjer toka podzemne vode je od zapada prema istoku/jugoistoku. Napajanje vodonosnika se u najvećoj mjeri ostvaruje: infiltracijom iz rijeke Save, infiltracijom oborina, infiltracijom iz propusne vodoopskrbne i kanalizacijske mreže, dotjecanjem po zapadnoj granici iz susjednog samoborskog vodonosnika te dotjecanjem po južnoj granici vodonosnika s područja Vukomeričkih Gorica (Slika 2-1). Miletić i Bačani (1999) temeljem vodne bilance za 1998. godinu zaključuju da doprinos Save u obnavljanju količina podzemne vode iznosi oko 73%.

Sava je svojim koritom usječena u aluvijalne holocenske naslage koje dominantno čine šljunci izrazito visoke hidrauličke vodljivosti. Idući od sjeverozapada prema jugoistoku opada veličina zrna u vodonosnicima. U zapadnim predjelima vodonosnika hidraulička vodljivost je vrlo visoka i premašuje 3000 m/dan, dok dalje 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 m<sup>2</sup>/dan) zbog visokih iznosa hidrauličke vodljivosti i debljine vodonosnog sloja (Brkić i Biondić, 2000).

## 5. Hidrogeološki odnosi na sjeveroistočnom rubu vodonosnika

### 5.1. Podaci o izvedenim zdencima

Na istraživanom području izvedena su četiri zdenca: IW-1, IW-2, PW-1 i PW-2. Zdenca IW-1 i IW-2 izvedeni su krajem 2014. godine, dok su zdenca PW-1 i PW-2 izvedeni početkom 2015. godine (FIL.B.IS. projekt, 2015). Slika 5-1 prikazuje prostorni položaj zdenaca u odnosu na geološku građu prema OGK list Ivanić Grad (Basch, 1981). Na slici je vidljivo da su zdenca smješteni u barskom lesu (lb), izvan granice površinskog pojavljivanja aluvijalnih naslaga, odnosno izvan granica zagrebačkog vodonosnika. Litološki i tehnički stupovi navedenih zdenaca prikazani su u Prilozima 1 do 4. Prosječna dubina bušenja svih zdenaca iznosi oko 30 metara. Na istraživanom području prosječna nabušena debljina krovine iznosi oko 15 metara. Krovinske naslage predstavljene su izmjenom prahovite gline i treseta. Ispod krovinskih naslaga nalazi se paket naslaga predstavljen izmjenom pijesaka i šljunaka, te je u taj interval ugrađena filtarska konstrukcija. Prilikom bušenja registrirana je razina podzemne vode na dubini od 3 do 7 metara.



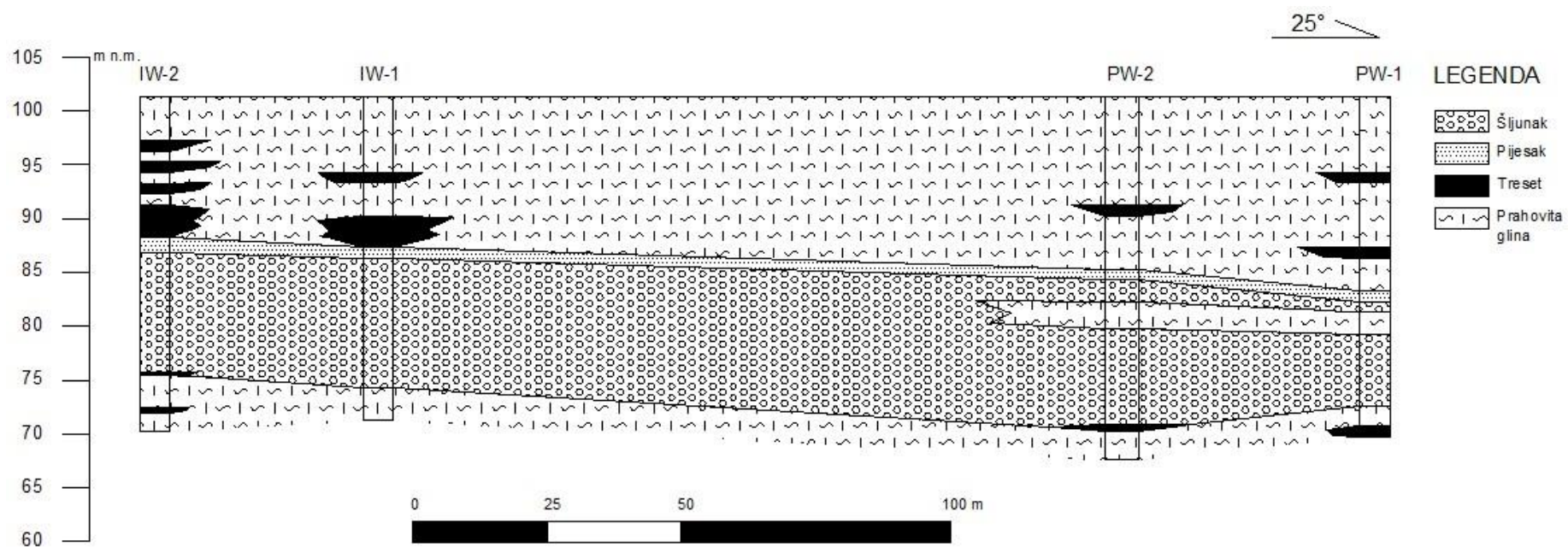
Slika 5-1. Smještaj zdenaca u odnosu na geološku građu prema OGK list Ivanić Grad

## 5.2. Litološki profil istraživnog područja

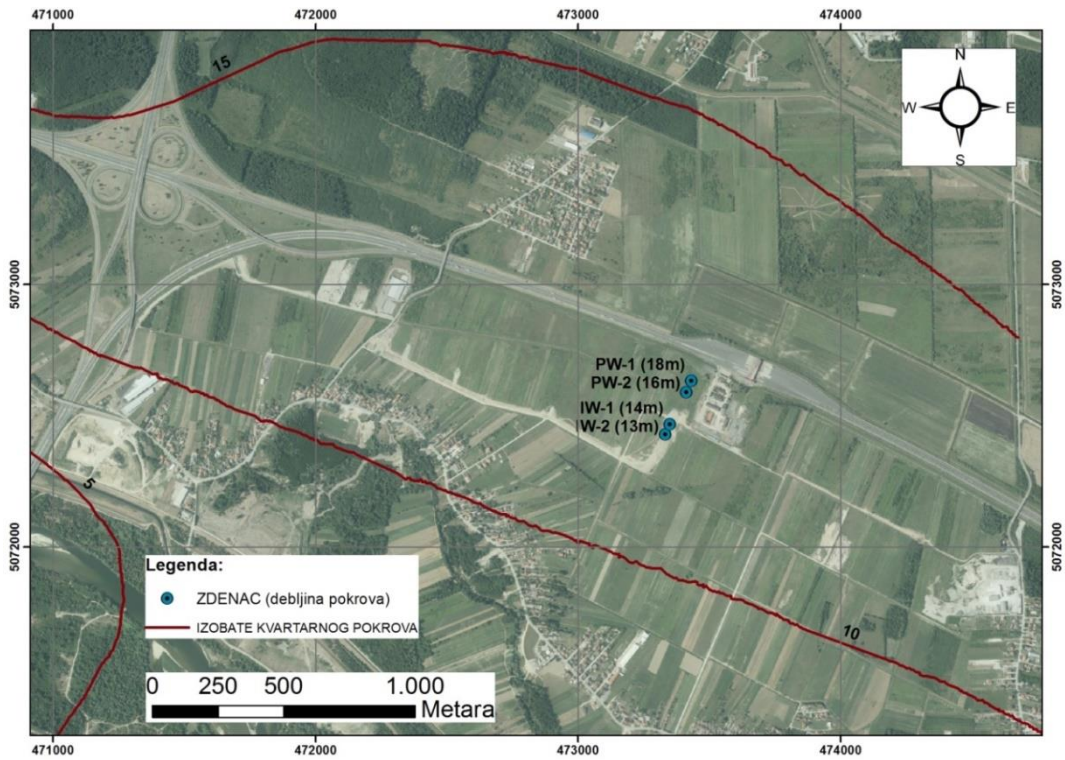
Na temelju litoloških stupova zdenaca prikazanih u Prilozima 1 do 4, izrađen je pojednostavljeni litološki profil istraživnog područja (Slika 5-2). Na profilu je vidljivo da su na istraživnom području prisutne velike debljine krovine (od 13 do 18 metara). Slika 5-3 prikazuje isječak karte izobata kvartarnog pokrova zagrebačkog vodonosnika (EGPV, 1999) s položajem novo izvedenih bušotina. Debljina krovine u ranijim istraživanjima procijenjena je u rasponu od 10 do 15 metara, a novijim istraživanjima i izvedenim bušotinama (IW-1, IW-2, PW-1 i PW-2) utvrđene su debljine od 13 do 18 metara. Treba napomenuti da se debljine krovine ne poklapaju i zbog razlike u mjerilu istraživanja. Naime, karta izobata kvartarnog pokrova (Slika 4-4) je rađena za cijeli vodonosnik, dok nove bušotine prikazuju detaljnije, ali lokalne odnose.

Čakarun (1981) ističe da debljina pokrivača naglo raste prema istoku: Sesvetama – Ivanja Reci i Trsteniku gdje mjestimice prelazi 15 m, što je u skladu s novim podacima. Na temelju profila istraživnog područja (Slika 5-2) može se podržati gore navedena tvrdnja.

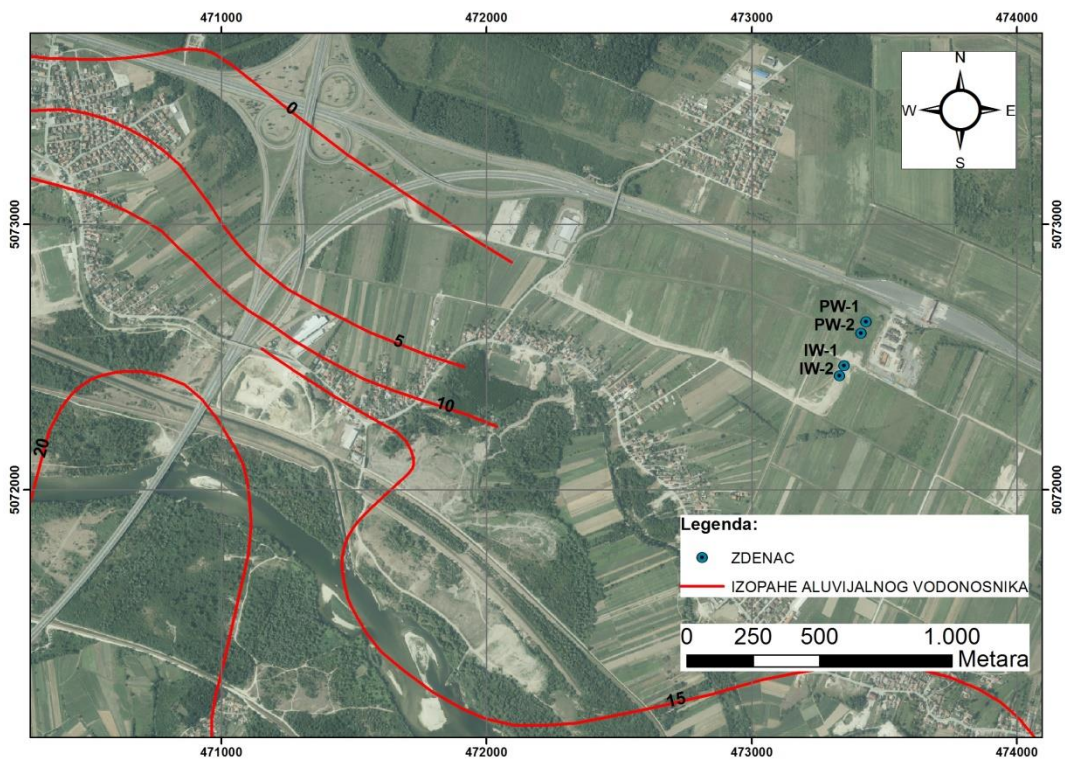
Na profilu je, uz velike debljine krovine, vidljivo smanjenje debljine propusnog šljunkovitog sloja prema sjeveroistoku te vodonosni sloj daljnjim udaljavanjem od bušotina najvjerojatnije isklinjava. Slika 5-4 prikazuje isječak karte izopaha aluvijalnog vodonosnika (EGPV, 1999) na njegovom sjeveroistočnom rubu. Vidljiv je izostanak aluvijalnih naslaga na području izvedenih zdenaca, i prema OGK i prema karti izopaha. Razlog tome može biti nepostojanje podataka, odnosno bušotina na tom području.



Slika 5-2. Shematski litološki profil istraživanog područja



Slika 5-3. Debljine krovine na istraživanom području



Slika 5-4. Prostiranje aluvijalnog vodonosnika na sjeveroistočnom rubu zagrebačkog vodonosnika

### 5.3. Analiza podataka pokusnih crpljenja zdenaca

Završetkom pokusnog crpljenja dobiveni su podaci potrebni za izračun parametara vodonosnika te hidrauličkih parametara zdenaca. Crpljenje s konstantom crpnom količinom potrebno je za proračun vrijednosti transmisivnosti vodonosnika, koja se koristi za daljnje izračune hidrauličke vodljivosti. Crpljenje u koracima s promjenom crpne količine koristi se za izračunavanje parametara zdenaca, točnije njegovih linearnih i nelinearnih gubitaka. Podaci za određivanje gore navedenih parametara obrađeni su pomoću računalnog programa Microsoft Excel.

#### 5.3.1. Hidrogeološki parametri vodonosnika

Za proračun transmisivnosti vodonosnika korištena je Jacob – Cooperova metoda (Jacob, 1940; Cooper i Jacob, 1946; preuzeto iz Bačani, 2006) prema kojoj izraz za transmisivnost glasi:

$$T = \frac{2,3 Q}{4 \pi \Delta s} \quad (5-1)$$

gdje je:

$T$  – transmisivnost (m<sup>2</sup>/dan)

$\Delta s$  – razlika sniženja za jedan logaritamski ciklus (m)

$Q$  – količina crpljenja (m<sup>3</sup>/dan)

Za provjeru izračunate vrijednosti transmisivnosti po Jacob – Cooperovoj metodi izračunata je vrijednost transmisivnosti po Theisovoj metodi povratka razine na temelju podataka „zaostalog sniženja“ nakon prestanka crpljenja, prema kojoj izraz za transmisivnost glasi (preuzeto iz Bačani, 2006):

$$T = \frac{2,3 Q}{4 \pi \Delta s'} \quad (5-2)$$

gdje je:

$T$  – transmisivnost ( $\text{m}^2/\text{dan}$ )

$\Delta s'$  – razlika zaostalog sniženja nakon prestanka crpljenja za jedan logaritamski ciklus (m)

$Q$  – količina crpljenja ( $\text{m}^3/\text{dan}$ )

Hidraulička vodljivost može se odrediti prema izrazu:

$$K = \frac{T}{m} \quad (5-3)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/dan)

$T$  – transmisivnost ( $\text{m}^2/\text{dan}$ )

$m$  – debljina vodonosnog sloja (m)

Koeficijent uskladištenja dobiva se analitički preko jednadžbe (Bačani, 2006):

$$S = \frac{2,25 T t_0}{R_p^2} \quad (5-4)$$

gdje je:

$S$  – koeficijent uskladištenja (-)

$T$  – transmisivnost ( $\text{m}^2/\text{dan}$ )

$t_0$  – presjecište projiciranog pravca za piezometarsku bušotinu s nultim sniženjem

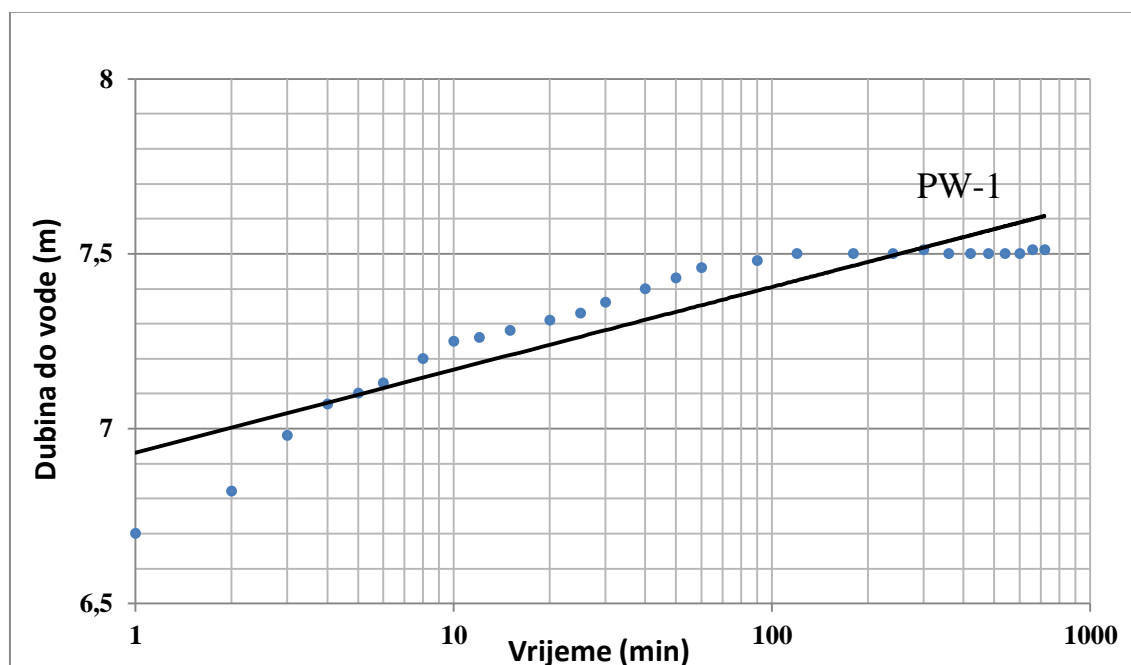
$R_p$  – udaljenost piezometra od osi crpljenoga zdenca (m)



Programom Microsoft Excel načinjeni su polulogaritamski dijagrami kod kojih os apscise predstavlja vrijeme proteklo od početka crpljenja u logaritamskoj skali, dok je dubina do vode prikazana u linearnom mjerilu na osi ordinate. Dijagrami su načinjeni za zdence PW-1 (Slika 5-5) i PW-2 (Slika 5-6). Također je načinjen polulogaritamski dijagram kod kojeg os apscise predstavlja omjer vremena proteklog od početka crpljenja i vremena nakon prestanka crpljenja u logaritamskoj skali, dok je „zaostalo“ sniženje nakon prestanka crpljenja prikazano u linearnom mjerilu na osi ordinate (Slika 5-7).

Pokusno crpljenje sa stalnom crpnom količinom izvedeno je u zdencima PW-1 i PW-2. Tijekom pokusnog crpljenja zdenca PW-2 mjereno je sniženje u zdencu PW-1, koji je poslužio kao opažačka bušotina pa je za taj slučaj izračunato uskladištenje vodonosnika. Također je mjereno povrat razine vode te je Theisovom metodom povratka razine izračunata transmisivnost.

Pokusno crpljenje sa stalnom crpnom količinom u zdencu PW-1 izvedeno je 23.02.2015. godine. Crpljenje je izvedeno u trajanju od 12 sati sa crpnom količinom od 52 l/s (FIL.B.IS. projekt, 2015). Učinak crpljenja opažao se mjerenjem sniženja u crpljenom zdencu. Brojčani podaci crpne količine i sniženja u vremenu tijekom pokusnog crpljenja zdenca PW-1 prikazani su u Prilogu 5.



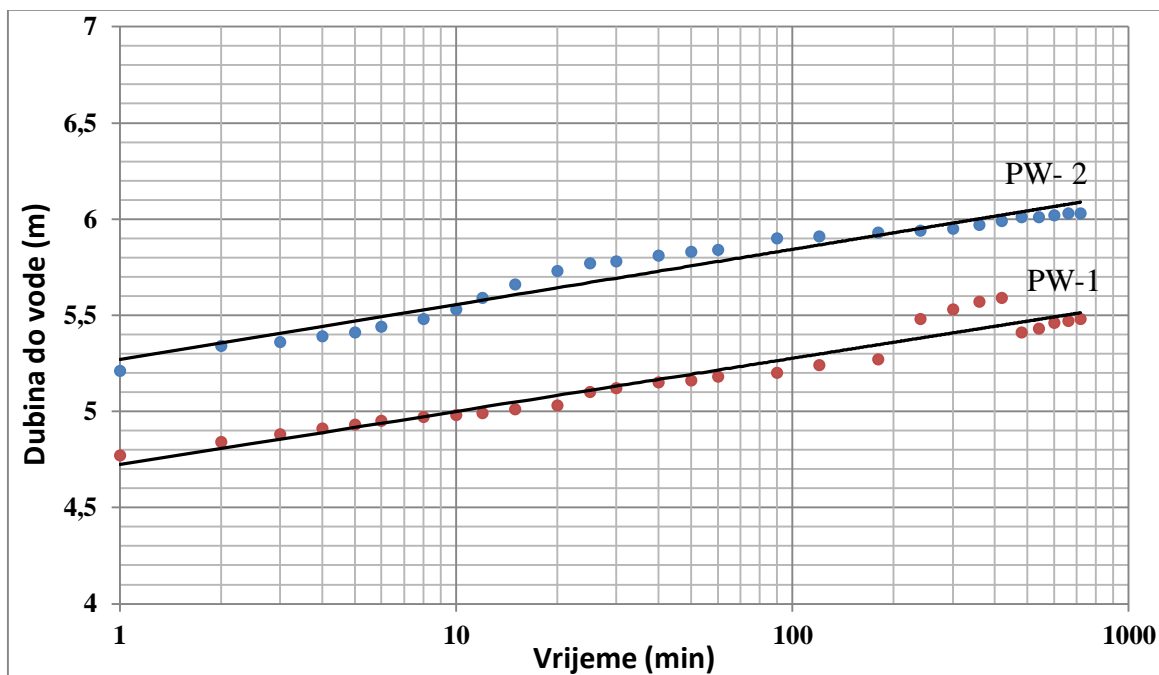
Slika 5-5. Dijagram vrijeme – dubina do vode za crpljenje zdenca PW-1

Vrijednosti pojedinih veličina potrebnih za izračun parametara nalaze se u Tablici 5-1, dok se rezultati proračuna hidrogeoloških parametara dobiveni jednadžbama (5-1) i (5-3) nalaze u Tablici 5-5.

Tablica 5-1. Podaci razlike sniženja za jedan logaritamski ciklus ( $\Delta s$ ), crpne količine ( $Q$ ) te debljine vodonosnog sloja ( $m$ ) kod pokusnog crpljenja zdenca PW-1

Zdenac	$t_1$ (min)	$t_2$ (min)	$\Delta s$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$m$ (m)
PW-1	10	100	0,4	0,052	8

Pokusno crpljenje sa stalnom crpnom količinom u zdencu PW-2 izvedeno je 02.03.2015. godine. Crpljenje je izvedeno u trajanju od 12 sati sa crpnom količinom od 52 l/s, a nakon toga se mjerio povrat razine vode u trajanju od tri sata (FIL.B.IS. projekt, 2015). Učinak crpljenja opažao se mjerenjem sniženja u crpljenom zdencu i zdencu PW-1 koji je poslužio kao opažačka bušotina. Brojčani podaci crpne količine i sniženja u vremenu tijekom pokusnog crpljenja zdenca PW-2 prikazani su u Prilogu 6.



Slika 5-6. Dijagram vrijeme – dubina do vode za crpljenje zdenca PW-2

Vrijednosti pojedinih veličina potrebnih za izračun parametara nalaze se u Tablici 5-2 i 5-3, dok se rezultati proračuna hidrogeoloških parametara dobiveni jednadžbama (5-1), (5-3) i (5-4) nalaze u Tablici 5-5.

Tablica 5-2. Podaci razlike sniženja za jedan logaritamski ciklus ( $\Delta s$ ), crpne količine ( $Q$ ) te debljine vodonosnog sloja ( $m$ ) kod pokusnog crpljenja zdenca PW-2

Zdenac	$t_1$ (min)	$t_2$ (min)	$\Delta s$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$m$ (m)
PW-2	10	100	0,275	0,052	8
PW-1	10	100	0,280	0,052	8

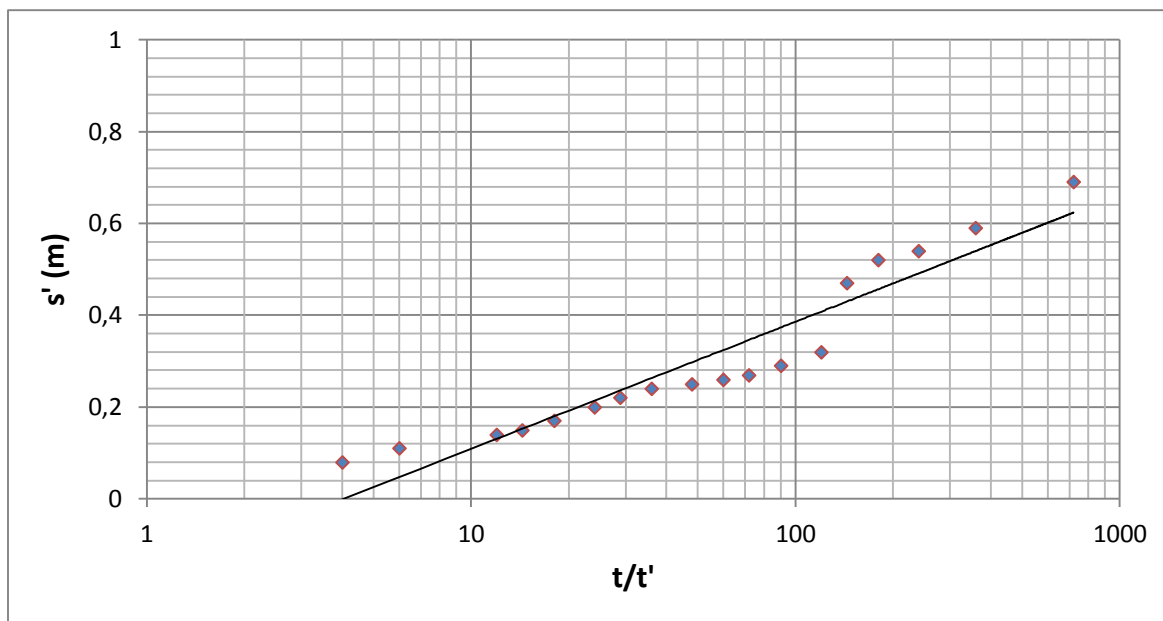
Tablica 5-3. Podaci potrebni za izračun koeficijenta uskladištenja vodonosnika

$t_0$ (min)	$T$ (m <sup>2</sup> /s)	$R_p$ (m)
1,1	$3,4 \times 10^{-2}$	47,6

Theisovu metodu povratka razine koristimo kao kontrolu vrijednosti transmisivnosti dobivene na temelju podataka za vrijeme crpljenja. Podaci koji su potrebni za izračun transmisivnosti prema Theisovoj metodi prikazani su u Tablici 5-4 i na Slici 5-7. Transmisivnost dobivena jednadžbom (5-2) nalazi se u Tablici 5-5. Podaci zaostalog sniženja u vremenu te izračunat omjer  $t/t'$  prikazani su u Prilogu 7.

Tablica 5-4. Podaci razlike sniženja za jedan logaritamski ciklus ( $\Delta s'$ ) te crpna količina ( $Q$ )

$t_1$ (min)	$t_2$ (min)	$\Delta s'$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
10	100	0,275	0,052



Slika 5-7. Grafički prikaz zaostalog sniženja  $s'$  u odnosu na  $t/t'$

Tablica 5-5. Sumarni prikaz hidrogeoloških parametara vodonosnika

Oznaka zdenca	Pokusno crpljenje	Metoda interpretacije	Transmisivnost ( $m^2/s$ )	Hidraulička vodljivost (m/s)	Uskladištenje*
PW-1	sa stalnom crpnom količinom	Jacob-Cooper	$4,15 \times 10^{-2}$	$4,96 \times 10^{-3}$	
PW-2	sa stalnom crpnom količinom	Jacob-Cooper	$3,46 \times 10^{-2}$	$4,33 \times 10^{-3}$	
PW-1	sa stalnom crpnom količinom	Jacob-Cooper	$3,40 \times 10^{-2}$	$4,25 \times 10^{-3}$	$3,71 \times 10^{-5}$
PW-2	povrat	Theis-povrat	$3,46 \times 10^{-2}$	$4,33 \times 10^{-3}$	
<b>Srednja vrijednost</b>			<b><math>3,62 \times 10^{-2}</math></b>	<b><math>4,47 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>3,71 \times 10^{-5}</math></b>

\*Tijekom pokusnih crpljenja zdenaca nisu mjerena sniženja u piezometrima pa nije bilo moguće izračunati uskladištenje vodonosnika, osim pri crpljenju zdenca PW-2 kod kojeg je zdenac PW-1 korišten kao opažačka bušotina

Provedenim pokusnim crpljenjima utvrđeni su prosječni hidrogeološki parametri vodonosnog sloja (Tablica 5-5). Prosječna transmisivnost iznosi  $3,62 \times 10^{-2} m^2/s$ , hidraulička vodljivost  $4,47 \times 10^{-3} m/s$ , a uskladištenje  $3,71 \times 10^{-5}$ . Ukoliko se dobivene

vrijednosti usporede s ranijim istraživanjima, primjerice pokusnim crpljenjima provedenim na području budućeg crpilišta Kosnica (Rožić, 2012), gdje je utvrđena hidraulička vodljivost u iznosu od približno 3000 m/dan, može se uočiti razlika za jedan red veličine. Na tom području testiran je sloj do dubine od oko 25 metara, koji odgovara gornjem, odnosno aluvijalnom vodonosnom sloju. Na temelju toga može se zaključiti da šljunkoviti sloj na sjeveroistočnom rubu zagrebačkog vodonosnika, istraživani u ovom radu, odgovara donjem vodonosnom sloju, odnosno sitnozrnatijim jezersko-barskim naslagama s nižom hidrauličkom vodljivošću.

### 5.3.2. Hidraulički parametri zdenca

Parametri zdenca definirani su parametrima linearnih gubitaka u vodonosniku i nelinearnih gubitaka na rubu konstrukcije zdenca. Kako bi se oni mogli odrediti primjenjuje se pokusno crpljenje u koracima kako bi se ostvarili uvjeti za rješenje kvadratne jednadžbe.

Jednadžba ukupnog sniženja u zdencu jednaka je (Bačani, 2006):

$$s = AQ + CQ^2 \quad (5-5)$$

gdje je:

$s$  – ukupno sniženje u zdencu (m)

$A$  – konstanta linearnih gubitaka (dan/m<sup>2</sup>)

$C$  – konstanta nelinearnih gubitaka (dan<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>)

$Q$  – crpna količina (m<sup>3</sup>/dan)

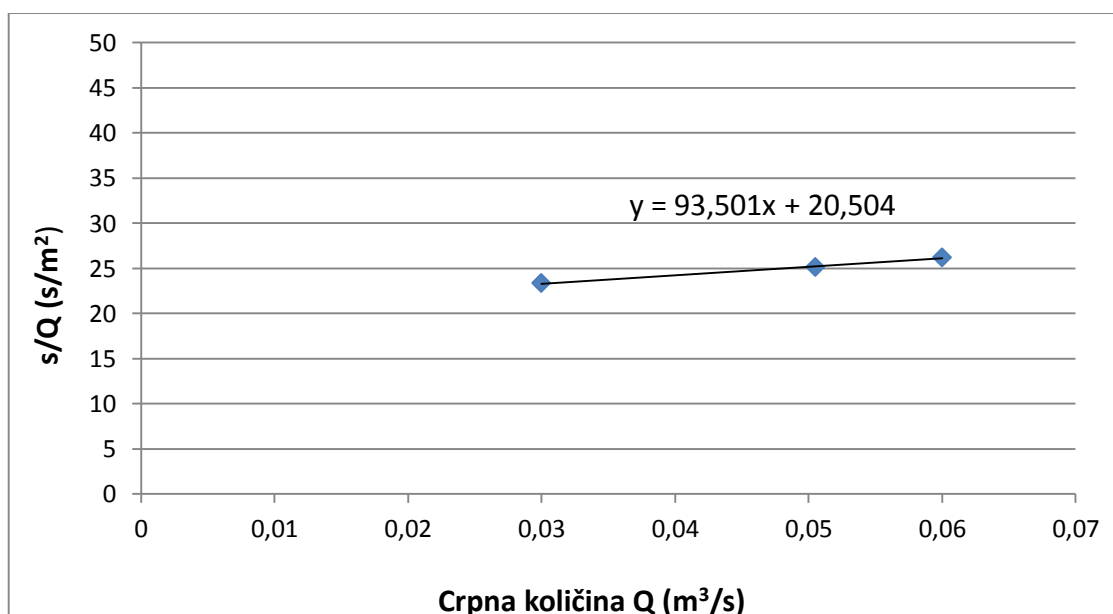
Prilagodбом jednadžbe ukupnog sniženja u zdencu  $s = AQ + CQ^2$ , dobiven je oblik koji odgovara jednadžbi pravca tj.  $s/Q = CQ + A$ . Omjer sniženja i crpne količine naziva se specifično sniženje. Konstanta  $A$  predstavlja odsječak pravca  $s/Q-Q$  na ordinati, a konstanta  $C$  je tangens kuta što ga pravac  $s/Q-Q$  zatvara s apscisom.

Pokusno crpljenje u koracima izvedeno je u zdencima PW-1, PW-2, IW-1 i IW-2. Za određivanje jednadžbe sniženja u zdencima korišteni su podaci sniženja i crpnih količina tijekom crpljenja u koracima.

Pokusno crpljenje u koracima u zdencu IW-2 izvedeno je dana 20.12.2014. godine. Hidraulički parametri zdenca IW-2 proračunati su na temelju crpljenja u koracima s tri različite crpne količine ( $Q_1 = 30,0$  l/s;  $Q_2 = 50,5$  l/s i  $Q_3 = 60,0$  l/s) u trajanju dva sata za svaki korak (FIL.B.IS. projekt, 2015). Rezultati crpljenja u koracima sa sniženjima prikazani su u tablici (Prilog 9). Brojčane vrijednosti omjera sniženja i crpnih količina nalaze se u Tablici 5-6, a grafički prikaz na Slici 5-8.

Tablica 5-6. Podaci ukupnog sniženja u zdencu ( $s$ ) i crpne količine ( $Q$ ) te omjer sniženja u zdencu i crpne količine ( $s/Q$ )

$s$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$s/Q$ (s/m <sup>2</sup> )
0,7	0,03	23,33
1,27	0,0505	25,25
1,57	0,06	26,17



Slika 5-8. Grafički prikaz pravca  $s/Q = CQ + A$  s pripadajućom jednadžbom za zdenac IW-2

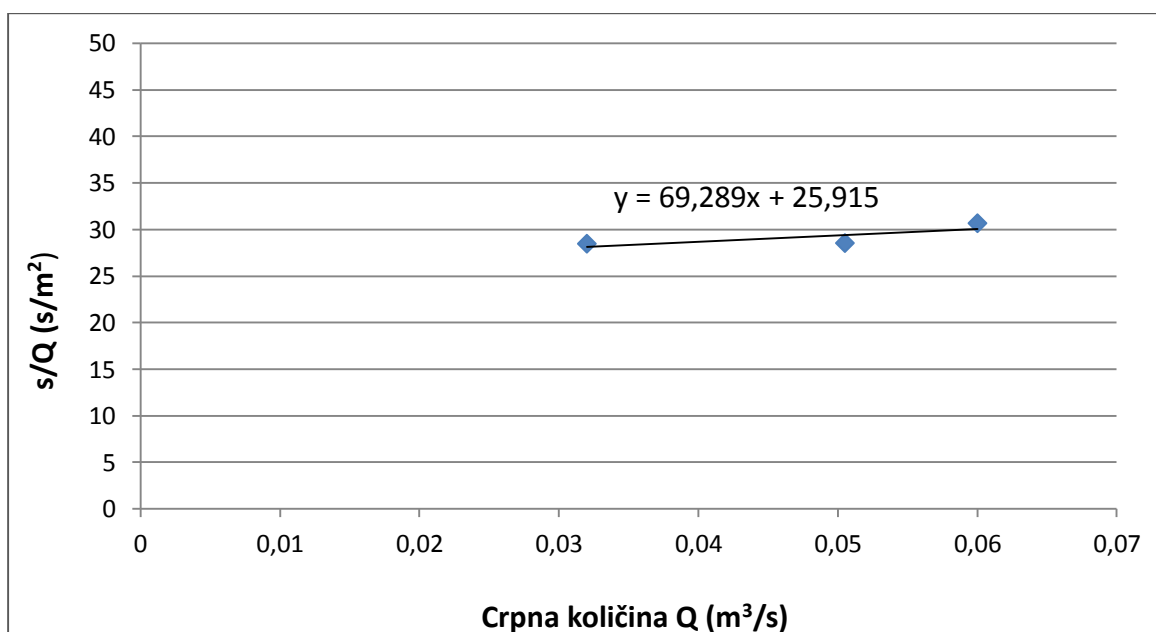
Temeljem izračuna dobivena je sljedeća jednadžba ukupnog sniženja u zdencu IW-2:

$$s = 20,504 Q + 93,501 Q^2 \text{ (za } Q \text{ u m}^3/\text{s)}$$

Pokusno crpljenje u koracima u zdencu IW-1 izvedeno je dana 29.12.2014. godine. Hidraulički parametri zdenca IW-1 proračunati su na temelju crpljenja u koracima s tri različite crpne količine ( $Q_1 = 32,0$  l/s;  $Q_2 = 50,5$  l/s i  $Q_3 = 60,0$  l/s) u trajanju dva sata za svaki korak (FIL.B.IS. projekt, 2015). Rezultati crpljenja u koracima sa sniženjima prikazani su u tablici (Prilog 8). Brojčane vrijednosti omjera sniženja i crpnih količina nalaze se u Tablici 5-7, a grafički prikaz na Slici 5-9.

Tablica 5-7. Podaci ukupnog sniženja u zdencu ( $s$ ) i crpne količine ( $Q$ ) te omjer sniženja u zdencu i crpne količine ( $s/Q$ )

$s$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$s/Q$ (s/m <sup>2</sup> )
0,91	0,032	28,44
1,44	0,0505	28,51
1,84	0,06	30,67



Slika 5-9. Grafički prikaz pravca  $s/Q = CQ + A$  s pripadajućom jednadžbom za zdenac IW-1

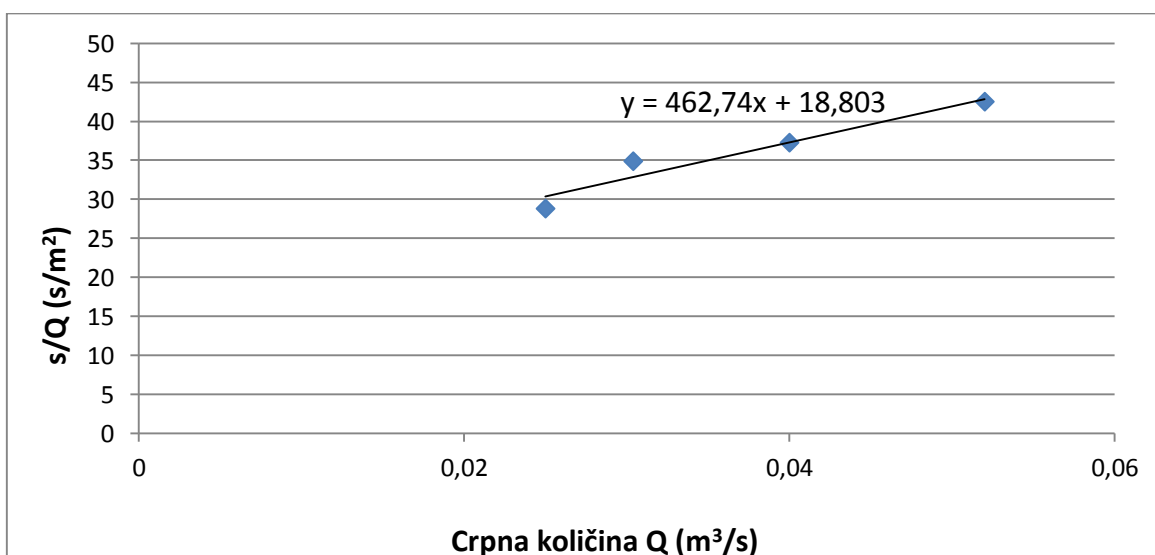
Temeljem izračuna dobivena je sljedeća jednadžba ukupnog sniženja u zdencu IW-1:

$$s = 25,915 Q + 69,289 Q^2 \text{ (za } Q \text{ u m}^3/\text{s)}$$

Pokusno crpljenje u koracima u zdencu PW-1 izvedeno je dana 22.02.2015. godine. Hidraulički parametri zdenca PW-1 proračunati su na temelju crpljenja u koracima s četiri različite crpne količine ( $Q_1 = 25,0$  l/s;  $Q_2 = 30,4$  l/s;  $Q_3 = 40,0$  l/s i  $Q_4 = 52,0$  l/s), a vremenski interval za svaki korak iznosio je tri sata (FIL.B.IS. projekt, 2015). Rezultati crpljenja u koracima sa sniženjima prikazani su u tablici (Prilog 10). Brojčane vrijednosti omjera sniženja i crpnih količina nalaze se u Tablici 5-8, a grafički prikaz na Slici 5-10.

Tablica 5-8. Podaci ukupnog sniženja u zdencu ( $s$ ) i crpne količine ( $Q$ ) te omjer sniženja u zdencu i crpne količine ( $s/Q$ )

$s$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$s/Q$ (s/m <sup>2</sup> )
0,72	0,025	28,80
1,06	0,0304	34,87
1,49	0,04	37,25
2,21	0,052	42,50



Slika 5-10. Grafički prikaz pravca  $s/Q = CQ + A$  s pripadajućom jednadžbom za zdenac PW-1



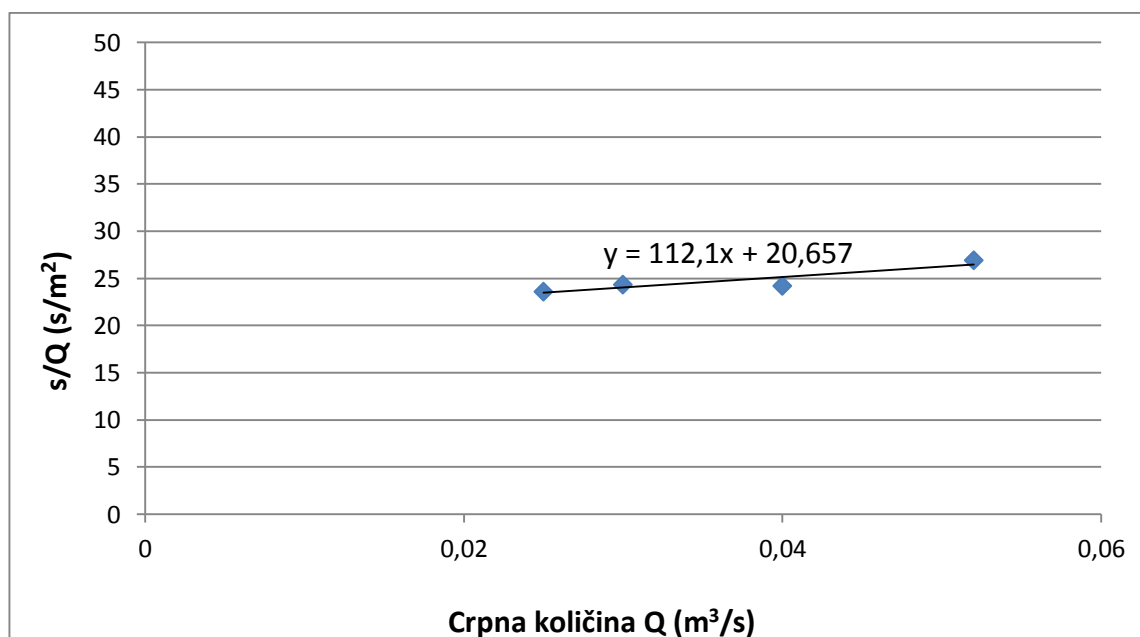
Temeljem izračuna dobivena je sljedeća jednadžba ukupnog sniženja u zdencu PW-1:

$$s = 18,803 Q + 462,74 Q^2 \text{ (za } Q \text{ u m}^3/\text{s)}$$

Pokusno crpljenje u koracima u zdencu PW-2 izvedeno je dana 01.03.2015. godine. Hidraulički parametri zdenca PW-2 proračunati su na temelju crpljenja u koracima s četiri različite crpne količine ( $Q_1 = 25,0$  l/s;  $Q_2 = 30$  l/s;  $Q_3 = 40,0$  l/s i  $Q_4 = 52,0$  l/s), a vremenski interval za svaki korak iznosio je tri sata (FIL.B.IS. projekt, 2015). Rezultati crpljenja u koracima sa sniženjima prikazani su u tablici (Prilog 11). Brojčane vrijednosti omjera sniženja i crpnih količina nalaze se u Tablici 5-9, a grafički prikaz na Slici 5-11.

Tablica 5-9. Podaci ukupnog sniženja u zdencu ( $s$ ) i crpne količine ( $Q$ ) te omjer sniženja u zdencu i crpne količine ( $s/Q$ )

$s$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$s/Q$ (s/m <sup>2</sup> )
0,59	0,025	23,60
0,73	0,03	24,33
0,97	0,04	24,25
1,4	0,052	26,92



Slika 5-11. Grafički prikaz pravca  $s/Q = CQ + A$  s pripadajućom jednadžbom za zdenac PW-2

Temeljem izračuna dobivena je sljedeća jednadžba ukupnog sniženja u zdencu PW-2:

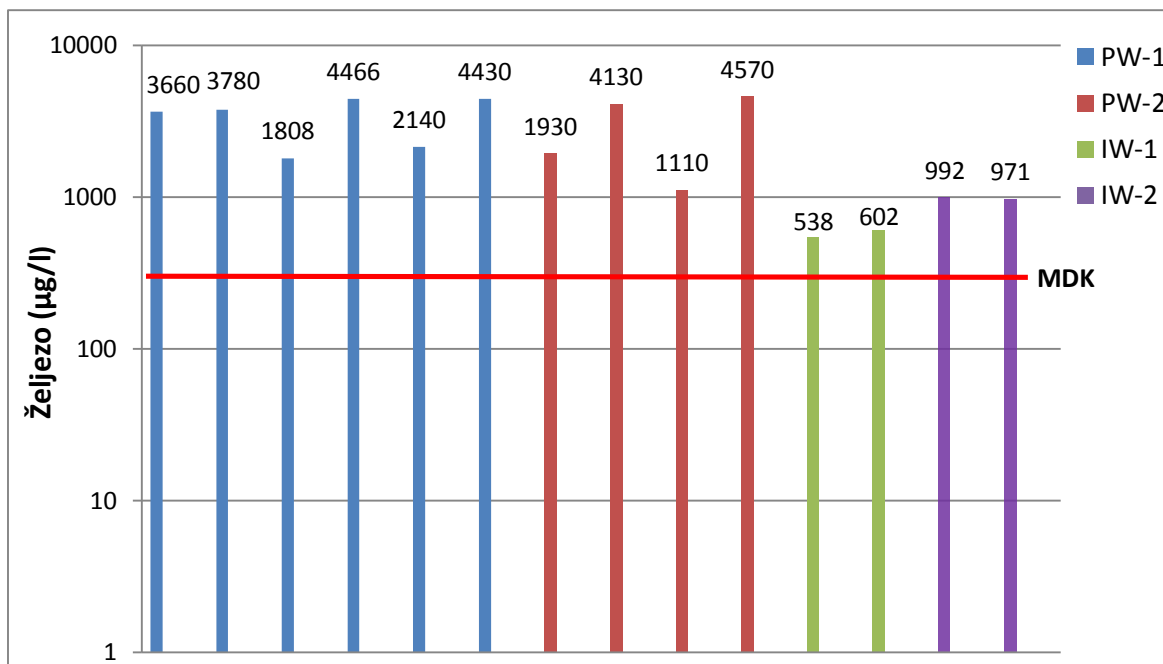
$$s = 20,657 Q + 112,1 Q^2 \text{ (za } Q \text{ u m}^3/\text{s)}$$

#### 5.4. Kakvoća podzemne vode

U Zavodu za javno zdravstvo Varaždinske županije u nekoliko navrata provedene su kemijske analize vode iz svih objekata (FIL.B.IS. projekt, 2015). Temeljem provedenih analiza željezo je izdvojeno kao jedini parametar koji je prisutan u povišenim koncentracijama. Pregledom svih podataka kemijske analize vode je utvrđeno da koncentracije željeza u svim uzorcima premašuju maksimalno dozvoljenu koncentraciju (MDK), prema Pravilniku o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (NN 125/13). Vrijednosti sadržaja željeza u ispitivanim zdencima prikazane su u Tablici 5-10 i na Slici 5-12.

Tablica 5-10. Koncentracije željeza u analiziranim uzorcima

Oznaka zdenca	Oznaka uzorka	Vrijednost Fe (µg/l)	MDK (µg/l)	Napomena
PW-1	V 00335/15	3660	200	
	V 00334/15	3780	200	
	V 00442/15	1808	200	POSLIJE FILTRACIJE
	V 00441/15	4466	200	PRIJE FILTRACIJE
	V 00473/15	2140	200	POSLIJE FILTRACIJE
	V 00472/15	4430	200	PRIJE FILTRACIJE
PW-2	V 00333/15	1930	200	
	V 00332/15	4130	200	
	V 00475/15	1110	200	POSLIJE FILTRACIJE
	V 00474/15	4570	200	PRIJE FILTRACIJE
IW-1	V 00331/15	538	200	
	V 00330/15	602	200	
IW-2	V 00329/15	992	200	
	V 00328/15	971	200	



Slika 5-12. Koncentracije željeza u zdencima PW-1, PW-2, IW-1 i IW-2

Zagrebački vodonosnik je otvoreni vodonosnik sastavljen od dva vodonosna sloja. U gornjem sloju prevladavaju oksidativni uvjeti u kakvima se očekuju relativno mali sadržaji otopljenog željeza u podzemnoj vodi što je posljedica oksidacije željeza i njegovog taloženja (Nakić, 2003). Pod pretpostavkom da se ne radi o antropogenom zagađenju, malo je vjerojatno da podzemna voda u oksidativnim uvjetima sadrži velik sadržaj otopljenog željeza, što primjerice potvrđuju niske koncentracije u prvom vodonosnom sloju crpilišta Mala Mlaka i Zapruđe (Bačani, 2011). Dakle, povišene koncentracije željeza mogu biti prirodnog podrijetla, ako su vezane za vodu iz reduktivne sredine (Brkić et al., 2009), što upućuje na zaključak da je moguće da povećanjem dubine dolazi do promjene oksidacijsko-redukcijskih uvjeta u podzemlju te otapanja željezovitih oksida i hidroksida. Na promatranom području, odnosno sjeveroistočnom rubu zagrebačkog vodonosnika, podzemna voda je pod tlakom, što se vidi i na stupovima (Prilozi 1 i 2). Dakle, vodonosnik u tom dijelu nije otvorenog tipa, te su zbog veće debljine krovine mogući reduktivni uvjeti, a povišene koncentracije željeza (Slika 5-12) omogućuju uvjeti u sloju koji ukazuju da se radi o dubljim jezersko-barskim naslagama koje predstavljaju donji vodonosni sloj.

## 6. Zaključak

U okviru ovog diplomskog rada detaljno su razrađeni hidrogeološki odnosi na sjeveroistočnom rubu zagrebačkog vodonosnika. Na istraživanom području izvedena su četiri zdenca: IW-1, IW-2, PW-1 i PW-2. Na temelju provedene interpretacije podataka prikupljenih tijekom pokusnih crpljenja zdenaca određene su vrijednosti hidrogeoloških parametara vodonosnika i hidrauličkih parametara zdenaca.

Transmisivnost testiranog vodonosnog sloja kreće se u rasponu od  $3,46 \times 10^{-2}$  do  $4,15 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, s prosječnom vrijednošću  $T = 3,62 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Hidraulička vodljivost kreće se u rasponu od  $4,33 \times 10^{-3}$  do  $4,96 \times 10^{-3}$  m/s, s prosječnom vrijednošću  $K = 4,47 \times 10^{-3}$  m/s.

Koeficijent uskladištenja vodonosnog sloja iznosi  $S = 3,71 \times 10^{-5}$ .

Jednadžba sniženja u zdencu IW-2 glasi:  $s = 20,504 Q + 93,501 Q^2$  (za  $Q$  u m<sup>3</sup>/s).

Jednadžba sniženja u zdencu IW-1 glasi:  $s = 25,915 Q + 69,289 Q^2$  (za  $Q$  u m<sup>3</sup>/s).

Jednadžba sniženja u zdencu PW-1 glasi:  $s = 18,803 Q + 462,74 Q^2$  (za  $Q$  u m<sup>3</sup>/s).

Jednadžba sniženja u zdencu PW-2 glasi:  $s = 20,657 Q + 112,1 Q^2$  (za  $Q$  u m<sup>3</sup>/s).

Na temelju litoloških stupova zdenaca izrađen je shematski profil istraživanog područja. Na profilu je, uz velike debljine krovine, vidljivo smanjenje debljine propusnog šljunkovitog sloja prema sjeveroistoku te vodonosni sloj daljnjim udaljavanjem od bušotina najvjerojatnije isklinjava.

Kemijska analiza sirove vode iz zdenaca pokazala je da je voda slabije kvalitete zbog povišenih koncentracija željeza. Koncentracije željeza iznad MDK (200 µg/l) utvrđene su u svim uzorcima, stoga podzemna voda ne zadovoljava kriterije Pravilnika o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (NN 125/13). Pretpostavlja se da se radi o prirodno povišenom sadržaju, svojstvenom vodonosnicima taloženim u reduktivnim uvjetima, a ne o antropogenom zagađenju.

Usporedbom OGK i karte izobata aluvijalnog vodonosnika s prostornim položajem zdenaca vidljivo je da zdenci ne zahvaćaju aluvijalni vodonosni sloj. Na temelju smještaja zdenaca na obje karte te povišene koncentracije željeza na istraživanom području može se zaključiti da je novo izvedenim zdencima zahvaćen dublji vodonosni sloj, odnosno da testirani sloj pripada donjem vodonosnom sloju s dominantno jezersko-barskim naslagama.

## 7. Literatura

BAČANI, A., 2006. *Hidrogeologija I*. Zagreb: Udžbenici sveučilišta u Zagrebu.

BAČANI, A., POSAVEC, K., PARLOV, J., ŽUBČIĆ, M., KOVAČ, Z., PLETIKOSIĆ, N., BEDENICKI, N., KLANFAR, M., DVORABIĆ, A., 2010. *Prva faza izrade programa mjera za zaštitu i sanaciju u zonama zaštite izvorišta*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

BAČANI, B., 2011. *Kakvoća podzemne vode zagrebačkog vodonosnika*. Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

BASCH, O., 1981. *Osnovna geološka karta 1:100 000, list Ivanić Grad L 33–81*. Geološki zavod Zagreb, 1969-1976. Savezni geološki zavod, Beograd.

BRKIĆ, Ž., BIONDIĆ, B., 2000. *Savski vodonosnik i njegove hidrogeološke značajke*. Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima, zbornik radova, okrugli stol, Slavonski Brod.

BRKIĆ, B., LARVA, O., MARKOVIĆ, T., 2009. *Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda u panonskom dijelu Republike Hrvatske*. Hrvatski geološki institut, Zagreb.

COOPER, H.H., JACOB C.E., 1946. *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history*. Trans. Am. Geophys. Union, 27, 526-534.

ČAKARUN, I., 1981. *Hidrogeološki odnosi u prisavskoj ravnici na dionici granica SR Slovenije - Rugvica*. Fond stručnih dokumenata Geološkog zavoda, Zagreb.

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

FIL.B.IS. PROJEKT, d.o.o., 2015. *Izvyještaj o izradi dva istražno – eksploatacijska zdenca, dva istražno – upojna zdenca te pet istražnih bušotina za potrebe geotermalnog sustava dizalica topline na lokalitetu Rugvica*. Fond stručnih dokumenata FIL.B.IS. projekt d.o.o. Zagreb.

JACOB, C.E., 1940. *On the flow of water in an elastic artesian aquifer*. Trans. Am. Geophys. Union, 27, 2, 198-205.

MILETIĆ, P., BAČANI, A., 1999. EGPV: *Izrada bilansa*. Knjiga 4, četvrti dio, Fond stručnih dokumenata Hrvatskih voda i Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Zagreb.

NAKIĆ, Z., 2003. *Uzroci i posljedice promjene kakvoće podzemne vode na zagrebačkom području*. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni 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.

*Pravilnik o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju* (Narodne novine 125/13).

ROŽIĆ, R., 2012. *Hidrogeološka istraživanja na području crpilišta Kosnica*. Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A., 1977. *Osnovna geološka karta 1:100 000, list Zagreb L 38–80*. Institut za geološka istraživanja Zagreb, 1972. Savezni geološki zavod, Beograd.

ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A., 1979. *Osnovna geološka karta 1:100 000, Tumač za list Zagreb L 33-80*. Institut za geološka istraživanja Zagreb, 1972. Savezni geološki zavod, Beograd.

URUMOVIĆ, K., 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.

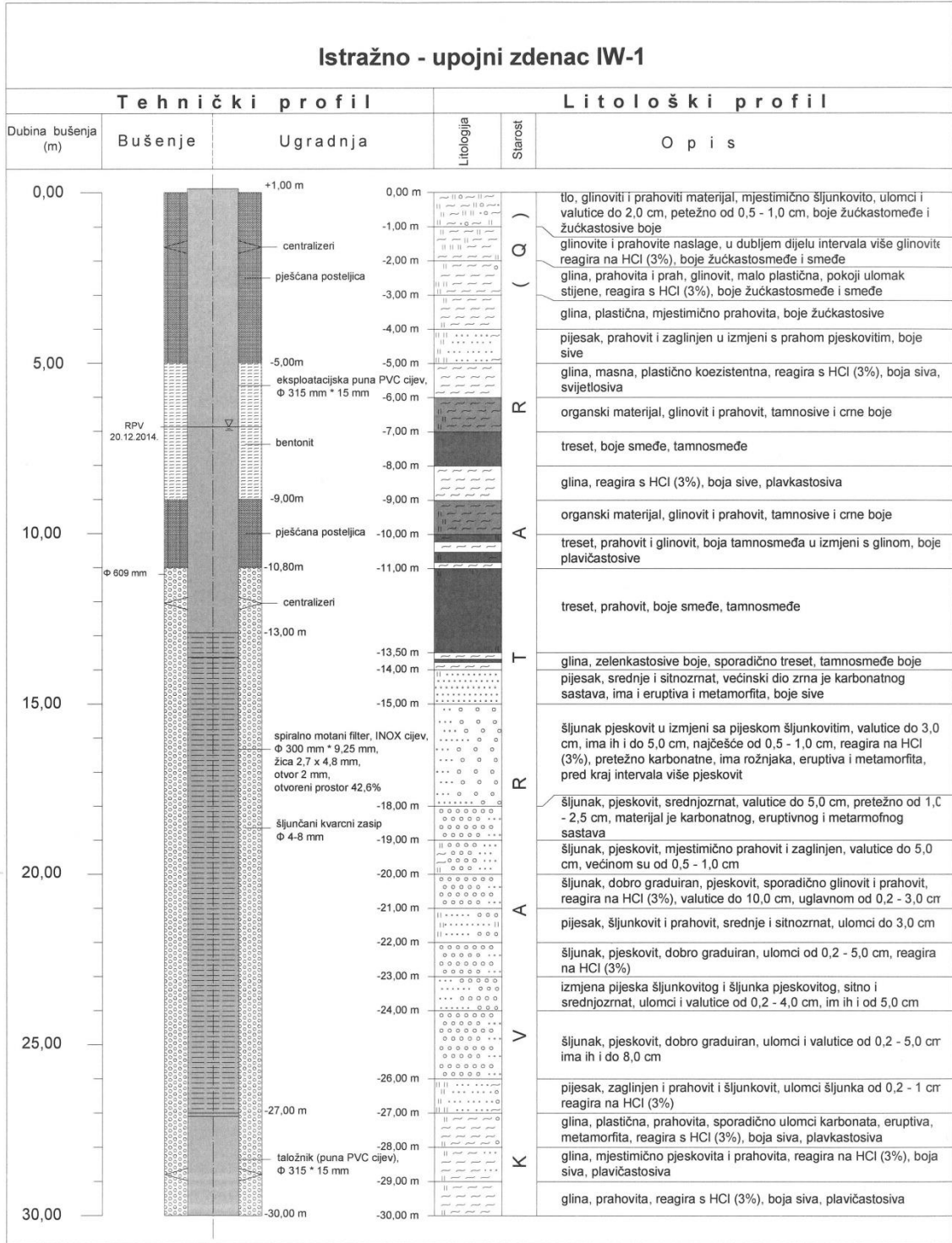
VELIĆ, J., DURN, G., 1993. *Alternating Lacustrine-Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases during Quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia*. Geologia Croatica, 46, 1, 71–90.

VELIĆ, J., SAFTIĆ, B., MALVIĆ, T., 1999. *Lithologic Composition and Stratigraphy of Quaternary Sediments in the Area of the “Jakuševac” Waste Depository (Zagreb, Northern Croatia)*. Geologia Croatica, 52, 2, 119–130.

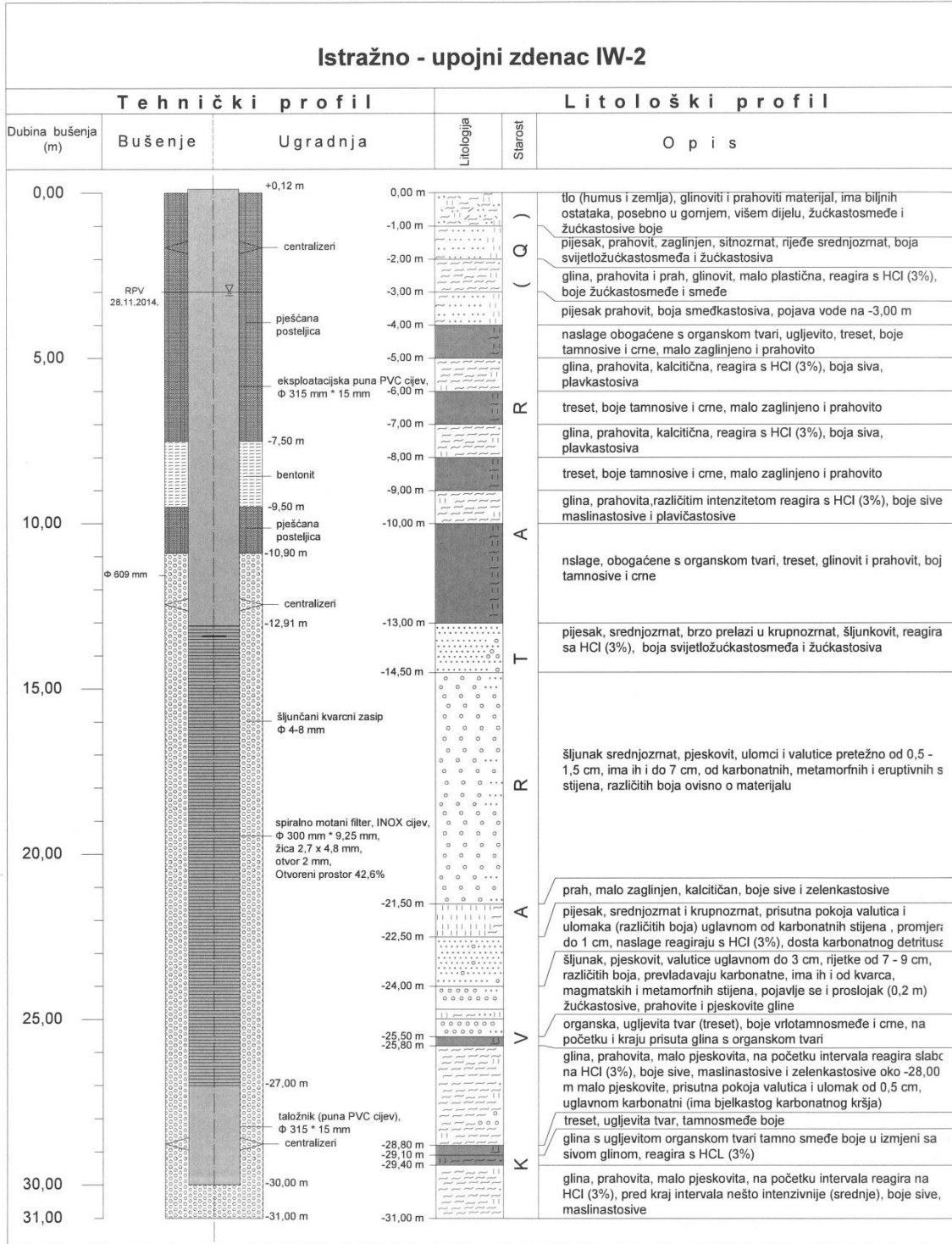


# PRILOZI

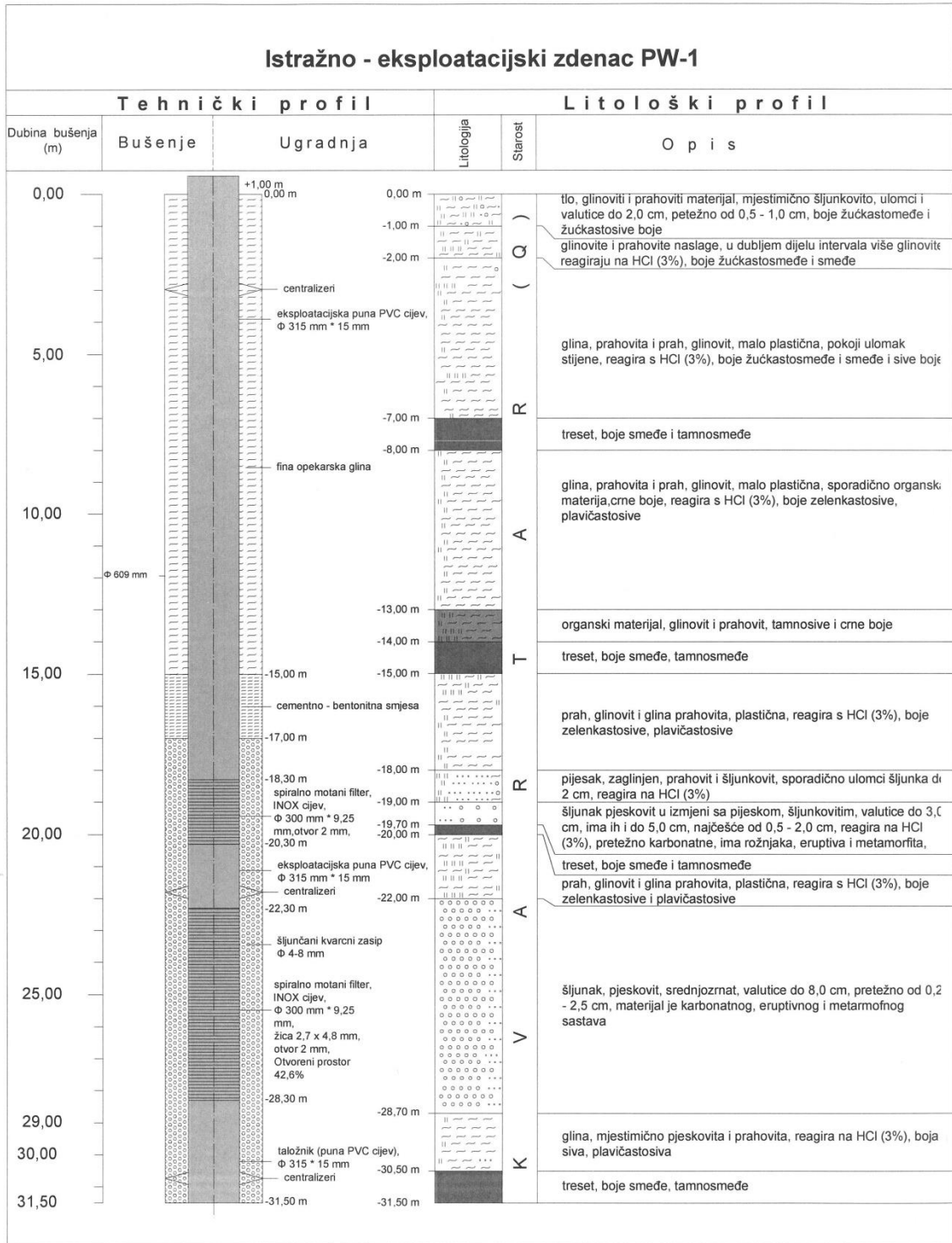
PRILOG 1. Litološki i tehnički stup zdenca IW-1



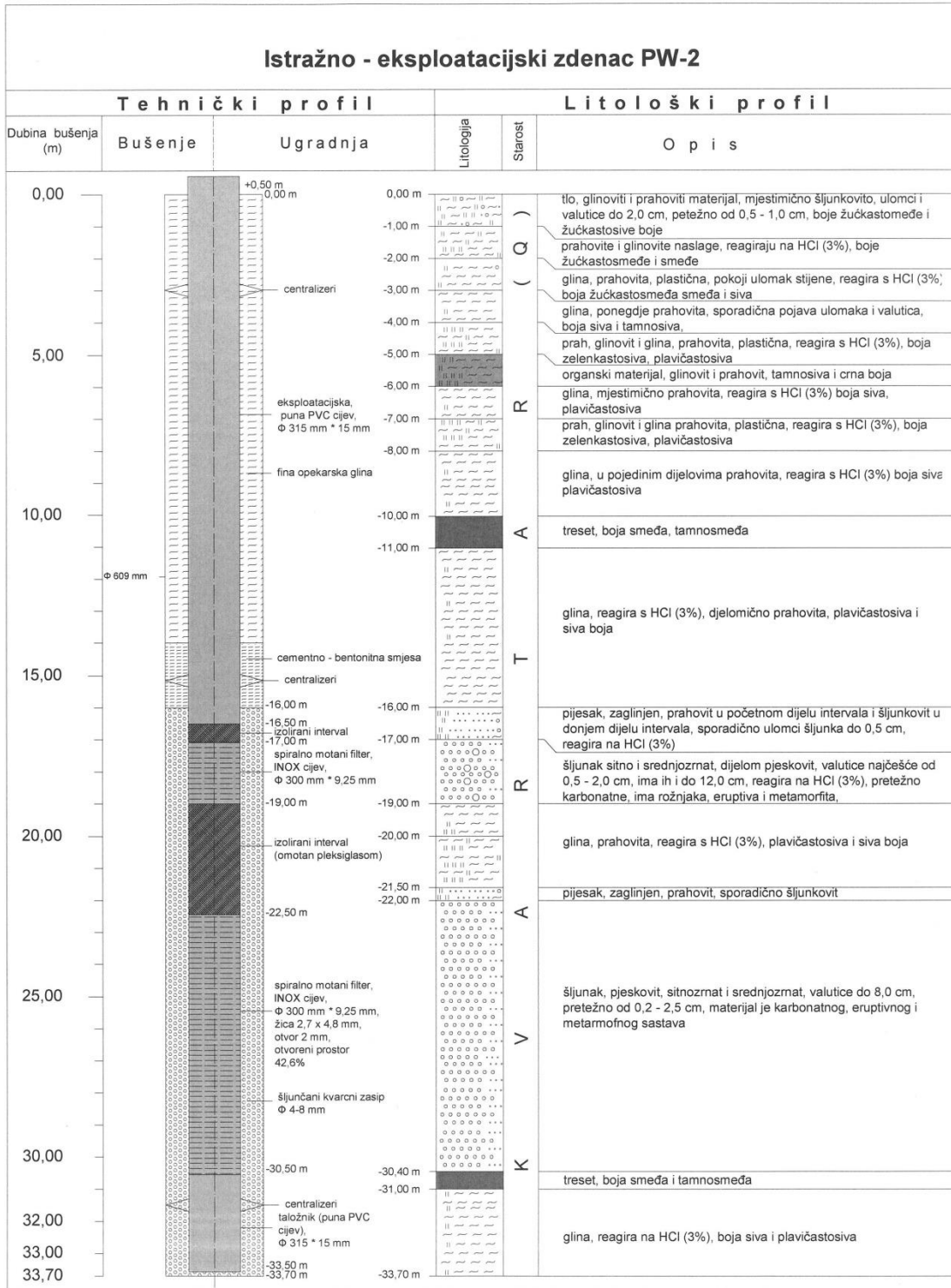
PRILOG 2. Litološki i tehnički stup zdenca IW-2



PRILOG 3. Litološki i tehnički stup zdenca PW-1



PRILOG 4. Litološki i tehnički stup zdenca PW-2



PRILOG 5. Podaci pokusnog crpljenja stalnom crpnom količinom u zdencu PW-1

Vrijeme (min)	Izdašnost $Q$ (l/s)	Dubina do vode (m)	Sniženje (m)
0	52	5,46	0,00
1	52	6,70	1,24
2	52	6,82	1,36
3	52	6,98	1,52
4	52	7,07	1,61
5	52	7,10	1,64
6	52	7,13	1,67
8	52	7,20	1,74
10	52	7,25	1,79
12	52	7,26	1,80
15	52	7,28	1,82
20	52	7,31	1,85
25	52	7,33	1,87
30	52	7,36	1,90
40	52	7,40	1,94
50	52	7,43	1,97
60	52	7,46	2,00
90	52	7,48	2,02
120	52	7,50	2,04
180	52	7,50	2,04
240	52	7,50	2,04
300	52	7,51	2,05
360	52	7,50	2,04
420	52	7,50	2,04
480	52	7,50	2,04
540	52	7,50	2,04
600	52	7,50	2,04
660	52	7,51	2,05
720	52	7,51	2,05

PRILOG 6. Podaci pokusnog crpljenja stalnom crpnom količinom u zdencu PW-2

Vrijeme (min)	Izdašnost $Q$ (l/s)	Dubina do vode (m)		Sniženje (m)	
		PW-2	PW-1	PW-2	PW-1
0	52	4,32	4,51	0	0
1	52	5,21	4,77	0,89	0,26
2	52	5,34	4,84	1,02	0,33
3	52	5,36	4,88	1,04	0,37
4	52	5,39	4,91	1,07	0,40
5	52	5,41	4,93	1,09	0,42
6	52	5,44	4,95	1,12	0,44
8	52	5,48	4,97	1,16	0,46
10	52	5,53	4,98	1,21	0,47
12	52	5,59	4,99	1,27	0,48
15	52	5,66	5,01	1,34	0,50
20	52	5,73	5,03	1,41	0,52
25	52	5,77	5,10	1,45	0,59
30	52	5,78	5,12	1,46	0,61
40	52	5,81	5,15	1,49	0,64
50	52	5,83	5,16	1,51	0,65
60	52	5,84	5,18	1,52	0,67
90	52	5,90	5,20	1,58	0,69
120	52	5,91	5,24	1,59	0,73
180	52	5,93	5,27	1,61	0,76
240	52	5,94	5,48	1,62	0,97
300	52	5,95	5,53	1,63	1,02
360	52	5,97	5,57	1,65	1,06
420	52	5,99	5,59	1,67	1,08
480	52	6,01	5,41	1,69	0,90
540	52	6,01	5,43	1,69	0,92
600	52	6,02	5,46	1,70	0,95
660	52	6,03	5,47	1,71	0,96
720	52	6,03	5,48	1,71	0,97

PRILOG 7. Podaci zaostalog sniženja u vremenu te izračunat omjer  $t/t'$

$t'$ (min)	$t$ (min)	$t/t'$	Sniženje (m)
0	720		1,71
1	720	720	0,69
2	720	360	0,59
3	720	240	0,54
4	720	180	0,52
5	720	144	0,47
6	720	120	0,32
8	720	90	0,29
10	720	72	0,27
12	720	60	0,26
15	720	48	0,25
20	720	36	0,24
25	720	28,8	0,22
30	720	24	0,20
40	720	18	0,17
50	720	14,4	0,15
60	720	12	0,14
120	720	6	0,11
180	720	4	0,08



PRILOG 8. Podaci pokusnog crpljenja u koracima u zdencu IW-1

Vrijeme (min)	Izdašnost $Q$ (l/s)	Dubina do vode (m)	Sniženje (m)
0	32	4,82	0,00
1	32	5,17	0,35
2	32	5,48	0,66
3	32	5,49	0,67
4	32	5,50	0,68
5	32	5,51	0,69
6	32	5,52	0,70
8	32	5,57	0,75
10	32	5,59	0,77
15	32	5,62	0,80
20	32	5,63	0,81
25	32	5,66	0,84
30	32	5,67	0,85
60	32	5,69	0,87
90	32	5,71	0,89
120	32	5,73	0,91
1	50,5	6,15	1,33
2	50,5	6,16	1,34
3	50,5	6,17	1,35
4	50,5	6,18	1,36
5	50,5	6,18	1,36
6	50,5	6,19	1,37
8	50,5	6,19	1,37
10	50,5	6,20	1,38
15	50,5	6,21	1,39
20	50,5	6,21	1,39
25	50,5	6,22	1,40
30	50,5	6,23	1,41
60	50,5	6,24	1,42
90	50,5	6,25	1,43
120	50,5	6,26	1,44

1	60	6,46	1,64
2	60	6,57	1,75
3	60	6,61	1,79
4	60	6,61	1,79
5	60	6,61	1,79
6	60	6,61	1,79
8	60	6,62	1,80
10	60	6,63	1,81
15	60	6,63	1,81
20	60	6,64	1,82
25	60	6,65	1,83
30	60	6,65	1,83
60	60	6,66	1,84
90	60	6,66	1,84
120	60	6,66	1,84

PRILOG 9. Podaci pokusnog crpljenja u koracima u zdencu IW-2

Vrijeme (min)	Izdašnost $Q$ (l/s)	Dubina do vode (m)	Sniženje (m)
0	30	4,57	0,00
1	30	5,03	0,46
2	30	5,10	0,53
3	30	5,13	0,56
4	30	5,16	0,59
5	30	5,17	0,60
6	30	5,19	0,62
8	30	5,22	0,65
10	30	5,23	0,66
15	30	5,26	0,69
20	30	5,26	0,69
25	30	5,26	0,69
30	30	5,27	0,70
60	30	5,29	0,72
90	30	5,27	0,70
120	30	5,27	0,70
1	50,5	5,63	1,06
2	50,5	5,67	1,10
3	50,5	5,69	1,12
4	50,5	5,72	1,15
5	50,5	5,73	1,16
6	50,5	5,74	1,17
8	50,5	5,75	1,18
10	50,5	5,77	1,20
15	50,5	5,77	1,20
20	50,5	5,78	1,21
25	50,5	5,78	1,21
30	50,5	5,80	1,23
60	50,5	5,82	1,25
90	50,5	5,83	1,26
120	50,5	5,84	1,27

1	60	5,86	1,29
2	60	6,07	1,50
3	60	6,08	1,51
4	60	6,09	1,52
5	60	6,10	1,53
6	60	6,10	1,53
8	60	6,10	1,53
10	60	6,10	1,53
15	60	6,12	1,55
20	60	6,13	1,56
25	60	6,13	1,56
30	60	6,13	1,56
60	60	6,14	1,57
90	60	6,14	1,57
120	60	6,14	1,57

PRILOG 10. Podaci pokusnog crpljenja u koracima u zdencu PW-1

Vrijeme (min)	Izdašnost $Q$ (l/s)	Dubina do vode (m)	Sniženje (m)
0	25	5,47	0,00
1	25	6,01	0,54
2	25	6,01	0,54
3	25	6,02	0,55
4	25	6,04	0,57
5	25	6,04	0,57
6	25	6,05	0,58
8	25	6,06	0,59
10	25	6,07	0,60
12	25	6,08	0,61
15	25	6,09	0,62
20	25	6,10	0,63
25	25	6,12	0,65
30	25	6,14	0,67
40	25	6,14	0,67
50	25	6,15	0,68
60	25	6,16	0,69
90	25	6,18	0,71
120	25	6,18	0,71
180	25	6,19	0,72
1	30,4	6,46	0,99
2	30,4	6,46	0,99
3	30,4	6,46	0,99
4	30,4	6,46	0,99
5	30,4	6,46	0,99
6	30,4	6,47	1,00
8	30,4	6,47	1,00
10	30,4	6,47	1,00
12	30,4	6,47	1,00
15	30,4	6,48	1,01
20	30,4	6,49	1,02

25	30,4	6,49	1,02
30	30,4	6,49	1,02
40	30,4	6,49	1,02
50	30,4	6,50	1,03
60	30,4	6,50	1,03
90	30,4	6,50	1,03
120	30,4	6,51	1,04
180	30,4	6,53	1,06
1	40	6,88	1,41
2	40	6,88	1,41
3	40	6,88	1,41
4	40	6,88	1,41
5	40	6,88	1,41
6	40	6,88	1,41
8	40	6,88	1,41
10	40	6,88	1,41
12	40	6,88	1,41
15	40	6,89	1,42
20	40	6,89	1,42
25	40	6,90	1,43
30	40	6,90	1,43
40	40	6,91	1,44
50	40	6,91	1,44
60	40	6,92	1,45
90	40	6,92	1,45
120	40	6,93	1,46
180	40	6,96	1,49
1	52	7,47	2,00
2	52	7,47	2,00
3	52	7,47	2,00
4	52	7,47	2,00
5	52	7,47	2,00
6	52	7,48	2,01
8	52	7,48	2,01
10	52	7,49	2,02

12	52	7,49	2,02
15	52	7,49	2,02
20	52	7,49	2,02
25	52	7,50	2,03
30	52	7,51	2,04
40	52	7,53	2,06
50	52	7,55	2,08
60	52	7,57	2,10
90	52	7,59	2,12
120	52	7,65	2,18
180	52	7,78	2,21

PRILOG 11. Podaci pokusnog crpljenja u koracima u zdencu PW-2

Vrijeme (min)	Izdašnost $Q$ (l/s)	Dubina do vode (m)	Sniženje (m)
0	25	4,40	0,00
1	25	4,63	0,23
2	25	4,88	0,48
3	25	4,88	0,48
4	25	4,88	0,48
5	25	4,89	0,49
6	25	4,90	0,50
8	25	4,92	0,52
10	25	4,92	0,52
12	25	4,92	0,52
15	25	4,95	0,55
20	25	4,95	0,55
25	25	4,97	0,57
30	25	4,97	0,57
40	25	4,98	0,58
50	25	4,98	0,58
60	25	4,98	0,58
90	25	4,98	0,58
120	25	4,99	0,59
180	25	4,99	0,59
1	30	5,06	0,66
2	30	5,07	0,67
3	30	5,08	0,68
4	30	5,08	0,68
5	30	5,09	0,69
6	30	5,09	0,69
8	30	5,09	0,69
10	30	5,10	0,70
12	30	5,10	0,70
15	30	5,10	0,70
20	30	5,10	0,70



25	30	5,11	0,71
30	30	5,11	0,71
40	30	5,11	0,71
50	30	5,11	0,71
60	30	5,12	0,72
90	30	5,13	0,73
120	30	5,13	0,73
180	30	5,13	0,73
1	40	5,27	0,87
2	40	5,29	0,89
3	40	5,30	0,90
4	40	5,30	0,90
5	40	5,30	0,90
6	40	5,31	0,91
8	40	5,31	0,91
10	40	5,32	0,92
12	40	5,32	0,92
15	40	5,32	0,92
20	40	5,33	0,93
25	40	5,33	0,93
30	40	5,33	0,93
40	40	5,34	0,94
50	40	5,35	0,95
60	40	5,35	0,95
90	40	5,36	0,96
120	40	5,36	0,96
180	40	5,37	0,97
1	52	5,66	1,26
2	52	5,68	1,28
3	52	5,68	1,28
4	52	5,68	1,28
5	52	5,69	1,29
6	52	5,70	1,30
8	52	5,70	1,30
10	52	5,70	1,30

12	52	5,70	1,30
15	52	5,70	1,30
20	52	5,70	1,30
25	52	5,72	1,32
30	52	5,73	1,33
40	52	5,74	1,34
50	52	5,75	1,35
60	52	5,76	1,36
90	52	5,78	1,38
120	52	5,80	1,40
180	52	5,80	1,40