

# Interpretacija podataka pokusnog crpljenja zdenca ZČ-1 na području budućeg crpilišta Črnkovec

---

**Mađarac, Darjan**

**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:169:888155>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

**INTERPRETACIJA PODATAKA POKUSNOG CRPLJENJA ZDENCA ZČ-1 NA  
PODRUČJU BUDUĆEG CRPILIŠTA ČRNKOVEC**

Diplomski rad

Darjan Mađarac

GI 114

Zagreb, 2016.

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

INTERPRETACIJA PODATAKA POKUSNOG CRPLJENJA ZDENCA ZČ-1 NA PODRUČJU  
BUDUĆEG CRPILIŠTA ČRNKOVEC

DARJAN MAĐARAC

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Zdenac ZČ-1 je izveden s ciljem postupne izgradnje i širenja vodoopskrbe na prostoru budućeg vodocrpilišta Črnkovec. Lokacija je unaprijed određena na temelju hidrogeoloških istraživanja gdje je utvrđeno da istražni prostor zdenca izgrađuju naslage uglavnom ujednačenog litološkog sastava. Cilj ovog diplomskog rada bio je odrediti hidrogeološke parametre vodonosnog sloja te parametre zdenca na temelju interpretacije podataka pokusnih crpljenja. Za istraživano područje utvrđene su sljedeće prosječne vrijednosti hidrogeoloških parametara: transmisivnost  $T = 6,05 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$  i hidraulička vodljivost  $K = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ . Jednadžba sniženja u zdencu glasi:  $s = 5,8113Q + 27,566Q^2$ . Na temelju dobivenih podataka zaključilo se da je zdenac dobro izveden. Analizom vode utvrđeno je da broj koliformnih bakterija premašuje dozvoljeni iznos pa je vodu prije puštanja u sustav vodoopskrbe nužno tretirati.

Ključne riječi: crpilište Črnkovec, pokusno crpljenje, izvedba zdenca, kakvoća podzemne vode

Diplomski rad sadrži: 27 stranica, 20 slika, 3 tablice, 2 priloga, 17 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Voditeljica: Prof. dr. sc. Andrea Bačani, RGNF

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Andrea Bačani, RGNF

Doc. dr. sc. Jelena Parlov, RGNF

Doc. dr. sc. Dario Perković, RGNF

Datum obrane: 26. rujan 2016.

INTERPRETATION OF TEST PUMPING WELL ZČ-1 IN THE AREA OF FUTURE WELL  
FIELD ČRNKOVEC

DARJAN MAĐARAC

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Department of Geology and Geological Engineering

Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Abstract

Well ZČ-1 was designed with a goal of development and expansion of water supply system in the area of the future well Črnkovec. The location of construction was chosen based on hydrogeologic studies where it was determined that this area around the well is formed from mostly uniform lithological deposits. Main goal of this thesis was to determine the hydrogeological parameters of the aquifer and parameters of well by interpretation of test pumping data. The following average values of hydrogeological parameters were defined for the investigated area: transmissivity  $T = 6,05 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$  and hydraulic conductivity  $K = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ . Drawdown equation in the well is:  $s = 5,8113Q + 27,566Q^2$ . Determination was based on the data obtained and final results showed that the well was conquered. Water analysis showed that coliform bacteria exceed the allowed amount, and that the water must be treated before introduced to the water supply system.

Keywords: Well-field Črnkovec, pumping test, well construction, the quality of groundwater

Thesis contains: 27 pages, 20 figures, 3 tables, 2 enclosures, 17 references.

Original language: Croatian

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

University of Zagreb, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Andrea Bačani, Full Professor

Reviewers: PhD Andrea Bačani, Full Professor

PhD Jelena Parlov, Assistant Professor

PhD Dario Perković, Assistant Professor

Date of defence: September 26, 2016.

## Sadržaj

1	UVOD .....	1
2	OPĆE, GEOLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA.....	2
2.1	Opći podaci o vodonosniku .....	2
2.2	Geološke značajke vodonosnika .....	3
2.3	Hidrogeološke značajke vodonosnika .....	6
3	CRPILIŠTE ČRNKOVEC – UŽA LOKACIJA .....	9
3.1	Podaci o izvedenom zdencu ZČ - 1 .....	9
3.2	Analiza podataka pokusnog crpljenja .....	11
3.2.1	Hidrogeološki parametri vodonosnika.....	12
3.2.2	Hidraulički parametri zdenca.....	19
3.2.3	Crpni kapacitet istražno – eksploatacijskog zdenca .....	22
3.2.4	Kakvoća podzemne vode.....	24
4	ZAKLJUČAK .....	25
5	LITERATURA.....	26

## Popis slika

Slika 1.1. Situacija vodocrpilišta Črnkovec – uža lokacija (preuzeto iz Posavec i Bačani, 2015).....	1
Slika 2.1. Prostorni smještaj zagrebačkog vodonosnika (preuzeto iz Posavec, 2006) .....	2
Slika 2.2. Geološka karta zagrebačkog područja (preuzeto iz Bačani i Šparica, 2001) .....	3
Slika 2.3. Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (preuzeto iz Posavec, 2006)	4
Slika 2.4. Izopahe aluvija (preuzeto iz Bačani i dr., 2005).....	4
Slika 2.5. Izopahe vodonosnog sustava (preuzeto iz Bačani i dr., 2005) .....	5
Slika 2.6. Izopahe vodonosnog sustava (preuzeto iz Bačani i dr., 2005) .....	5
Slika 2.7. Hidroizohipse visokih voda na dan 23.11.2010. (preuzeto iz Bačani i dr., 2005)	6
Slika 2.8. Hidroizohipse niskih voda na dan 7.9.2000. (preuzeto iz Bačani i dr., 2005) .....	7
Slika 3.1. Dijagram odnosa razine podzemne vode u vremenu prilikom crpljenja u koracima .....	10
Slika 3.2. Dijagram odnosa razine podzemne vode u vremenu prilikom crpljenja stalnom crpnom količinom.....	11
Slika 3.3. Dijagram „vrijeme-sniženje“ u bušotini D-1 .....	14
Slika 3.4. Dijagram „vrijeme-sniženje“ u zdencu ZČ-1 .....	15
Slika 3.5. Dijagram zaostalog sniženja u piezometru D-1 .....	17
Slika 3.6. Dijagram zaostalog sniženja u zdencu ZČ-1 .....	17
Slika 3.7. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti zagrebačkog vodonosnika (preuzeto iz Posavec i Bačani, 2015).....	18
Slika 3.8. Dijagram sniženja u odnosu na vrijeme kod crpljenja u koracima s: (a) isprekidanim koracima, (b) uzastopnim koracima (Misstear i dr., 2006).....	19
Slika 3.9. Komponente sniženja razine vode u zdencu (prema Delleur, 1999); $s_z$ je sniženje u zdencu, $r_z$ je radijus zdenca, a $s_1$ , $s_2$ i $s_3$ su komponente sniženja .....	20
Slika 3.10. Grafička analiza ekvivalentnog specifičnog sniženja i ekvivalentne izdašnosti istražno – eksploatacijskog zdenca ZČ-1 prema podacima iz tablice .....	22
Slika 3.11. Dijagram $s=f(Q)$ i pojedine vrste gubitaka za crpljenje u istražno eksploatacijskom zdencu ZČ-1.....	23

## Popis tablica

Tablica 3.1. Podaci pokusnog crpljenja u koracima.....	21
Tablica 3.2. Karakteristike istražno – eksploatacijskog zdenca ZČ – 1 .....	23
Tablica 3.3. Koliformne bakterije u vodonosniku .....	24

## Popis priloga

Prilog 1 Tehnički i litološki profil istražno-eksploatacijskog zdenca ZČ-1 (preuzeto iz izvještaja, FIL.B.IS. Projekt d.o.o., 2014)

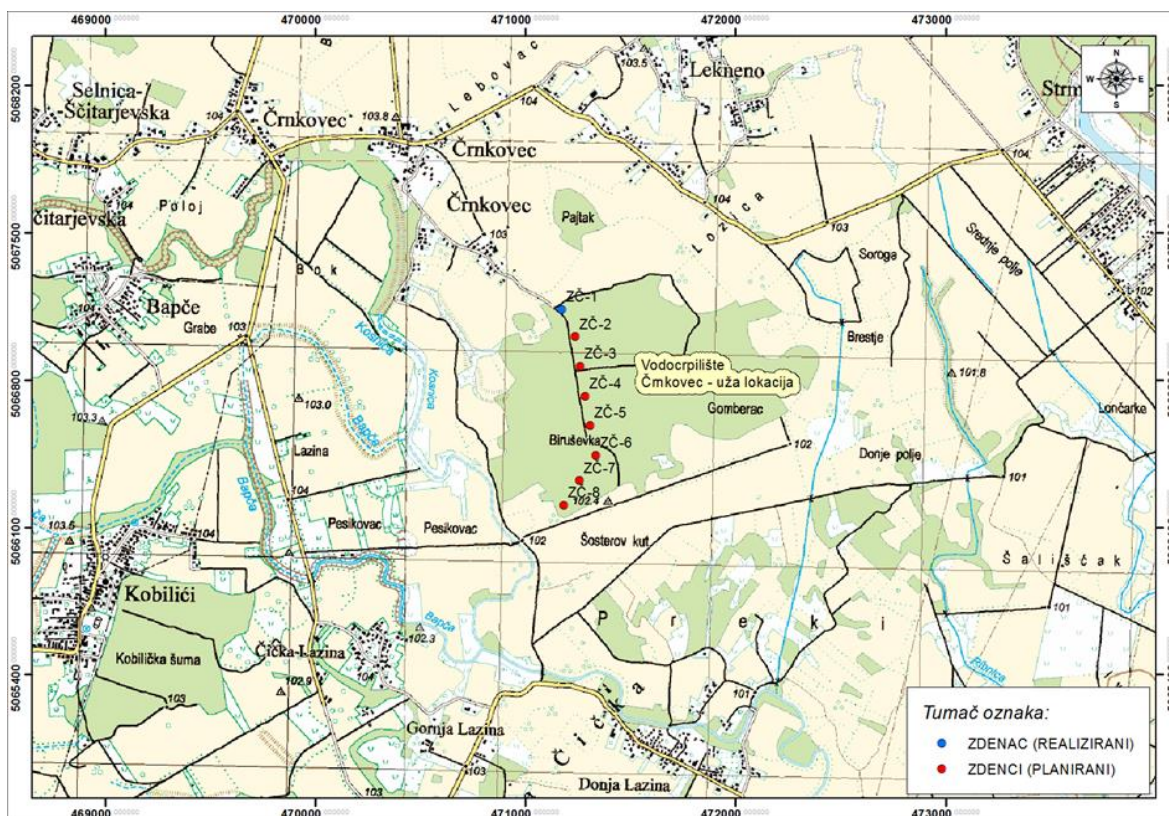
Prilog 2 Podaci o pokusnom crpljenju

## Popis korištenih oznaka

Veličina i svojstvo	Simbol	Osnovna jedinica	Dodatne jedinice
protok, crpna količina	Q	m <sup>3</sup> /s	l/s
hidraulička vodljivost	K	m/s	m/dan
koeficijent uskladištenja	S	bezdimenzijska	
debljina	b	m	
vrijeme	t	s	dan, min
transmisivnost	T	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /dan
sniženje	s	m	
parametar linearnih gubitaka u vodonosniku	B	s/m <sup>2</sup>	
parametar nelinearnih gubitaka u zdenačkom zacjevljenju	C	s <sup>2</sup> /m <sup>5</sup>	
efektivni radijus zdenca	R <sub>z</sub>	m	

## 1 UVOD

Istražno – eksploatacijski zdenac ZČ-1 izveden je s ciljem postupne izgradnje novog crpilišta Črnkovec – uža lokacija za potrebe vodoopskrbe Grada Zagreba. Predviđena je izvedba 8 zdenaca pojedinačnog kapaciteta 150 l/s (sl. 1.1.). Za sada je izveden zdenac ZČ-1. Izvela ga je tvrtka FIL.B.IS. projekt d.o.o. između sredine rujna i početka studenog 2014. godine. Nakon izvedbe zdenca provedeno je pokusno crpljenje stalnim kapacitetom i „u koracima“. Vodocrpilište Črnkovec – uža lokacija s predviđenih 8 zdenaca u cijelosti je smješteno u šumi Biruševka između naselja Črnkovec i Lekneno na sjeveru, naselja Čička Lazina na zapadu te naselja Gornja Lazina i Donja Lazina na jugu (sl. 1.1.).



Slika 1.1. Situacija vodocrpilišta Črnkovec – uža lokacija (preuzeto iz Posavec i Bačani, 2015)

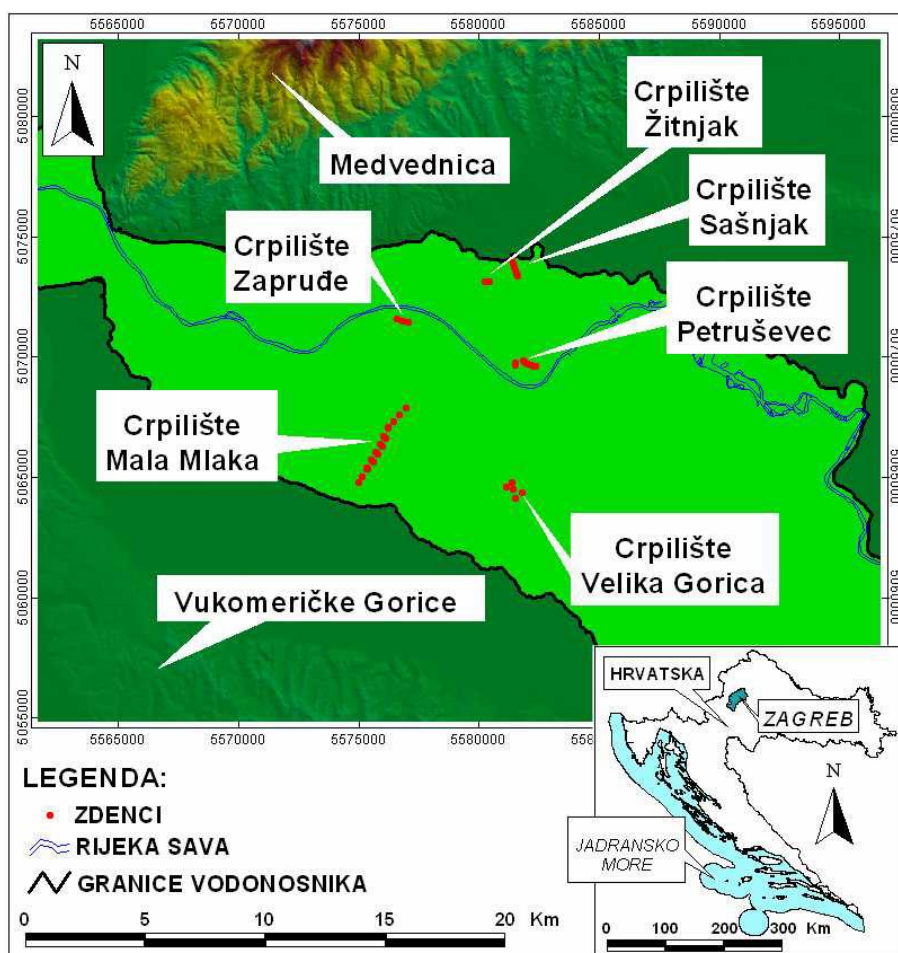
U sklopu ovog diplomskog reinterpetirani su podaci pokusnog crpljenja s ciljem određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika i hidrauličkih značajki zdenca.



## 2 OPĆE, GEOLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

### 2.1 Opći podaci o vodonosniku

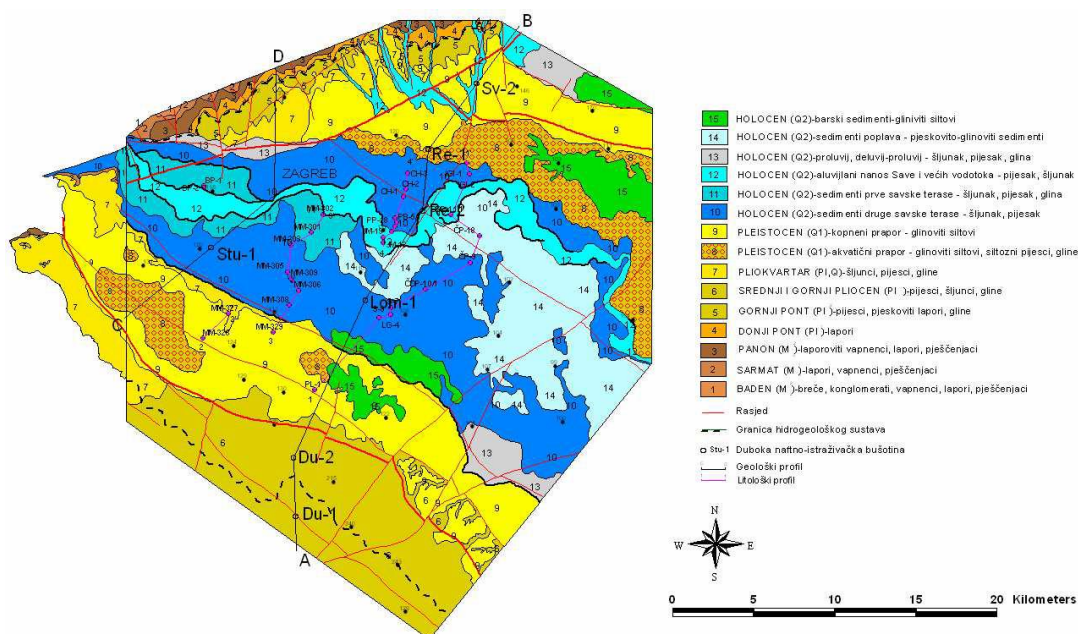
Zagrebački vodonosnik prostire se oko 30 km pravcem sjeverozapad-jugoistok, a čine ga šljunkovito-pjeskovite naslage saturirane vodom koje se nalaze na području između Medvednice na sjeveru, Podsuseda na zapadu, Vukomeričkih Gorica na jugu i Rugvice na istoku. Vodonosnikom protječe rijeka Sava koja ga dijeli na lijevo i desno zaobalje. Podzemna voda vodonosnika temelj je vodoopskrbe grada, a zahvaćena je na šest aktualnih crpilišta prikazanih na slici 2.1. Za vrijeme dugih sušnih perioda u vodoopskrbu se uključuju i manja crpilišta koja su inače isključena iz vodoopskrbe. Vodonosnik obuhvaća površinu od cca 350 km<sup>2</sup>. Podzemna voda koristi se za opskrbu pitkom vodom oko 850.000 stanovnika.



Slika 2.1. Prostorni smještaj zagrebačkog vodonosnika (preuzeto iz Posavec, 2006)

## 2.2 Geološke značajke vodonosnika

Zagrebački vodonosni sustav je kvartarni sustav koji čine srednje i gornjo pleistocenske te holocenske taložine. To područje je tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena bilo jezersko i močvarno, 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 promjenjivog intenziteta zbog čestih klimatskih promjena. Za vrijeme toplih i vlažnih perioda bio je intenzivan, dok se njegova intenzivnost smanjivala za vrijeme suhih i hladnih perioda. Osim klimatskih promjena, tektonski pokreti također su utjecali na procese taloženja (Velić et al., 1999). Posljedica takvih uvjeta taloženja je izrazita heterogenost i anizotropija vodonosnika te neujednačena debljina naslaga. Ako gledamo u tlocrtu, aluvijalne naslage se na sjeveru naslanjaju na proluvijalne, uglavnom glinovite naslage, koje zatim prelaze u slabopropusne tercijarne naslage južnih obronaka Medvednice (slika 2.2.). Istočni rub sustava je izlazni, ali je ograničenog protoka zbog smanjenih propusnosti. Na zapadnom rubu je komunikacija zagrebačkog vodonosnika sa samoborskim slaba zbog male kontaktne površine. Na jugu, zagrebački vodonosnik se naslanja na klastične sedimentne Stupničke terase koji pak bočno prelaze u naslage gornjopaludinskih slojeva koji izgrađuju sjeverne padine Vukomeričkih gorica.



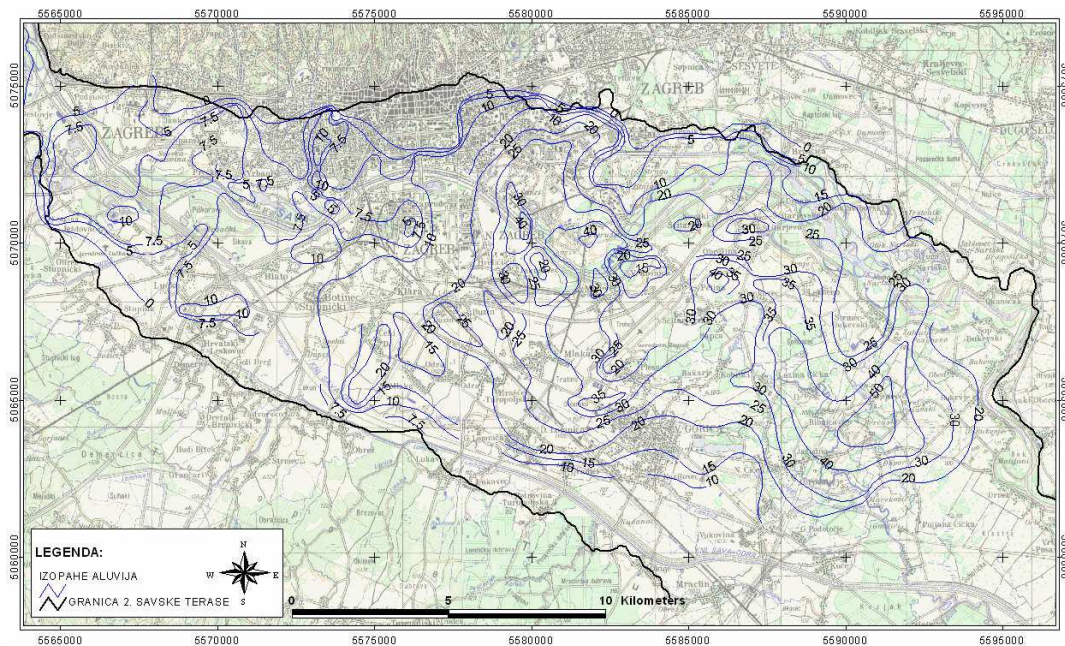
Slika 2.2. Geološka karta zagrebačkog područja (preuzeto iz Bačani i Šparica, 2001)

U profilu se razlikuju dva vodonosna sloja: prvi vodonosni sloj s dominantno aluvijalnim naslagama rijeke Save i drugi vodonosni sloj s dominantno jezersko-barskim naslagama (slika 2.3.).

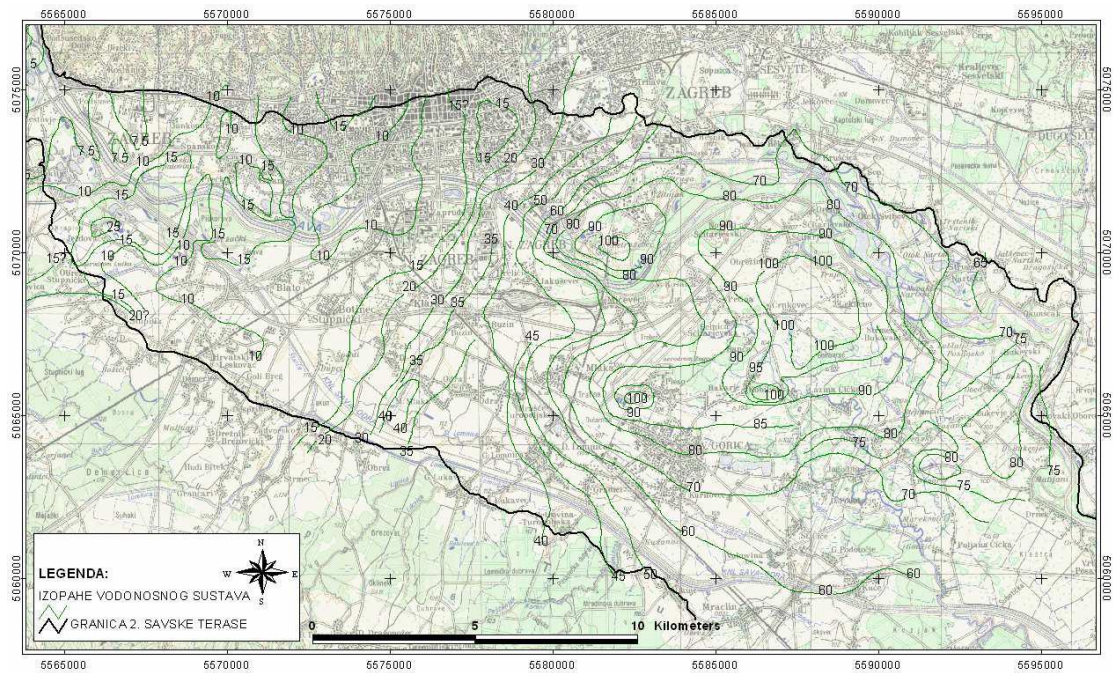


Slika 2.3. Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (preuzeto iz Posavec, 2006)

Debljina prvog vodonosnog sloja kreće se od 5 metara na zapadu do 50 metara na području Črnkovca (slika 2.4.), dok se ukupna debljina vodonosnog sustava kreće od 5 m na zapadu do 100 m na području Črnkovca (slika 2.5.).

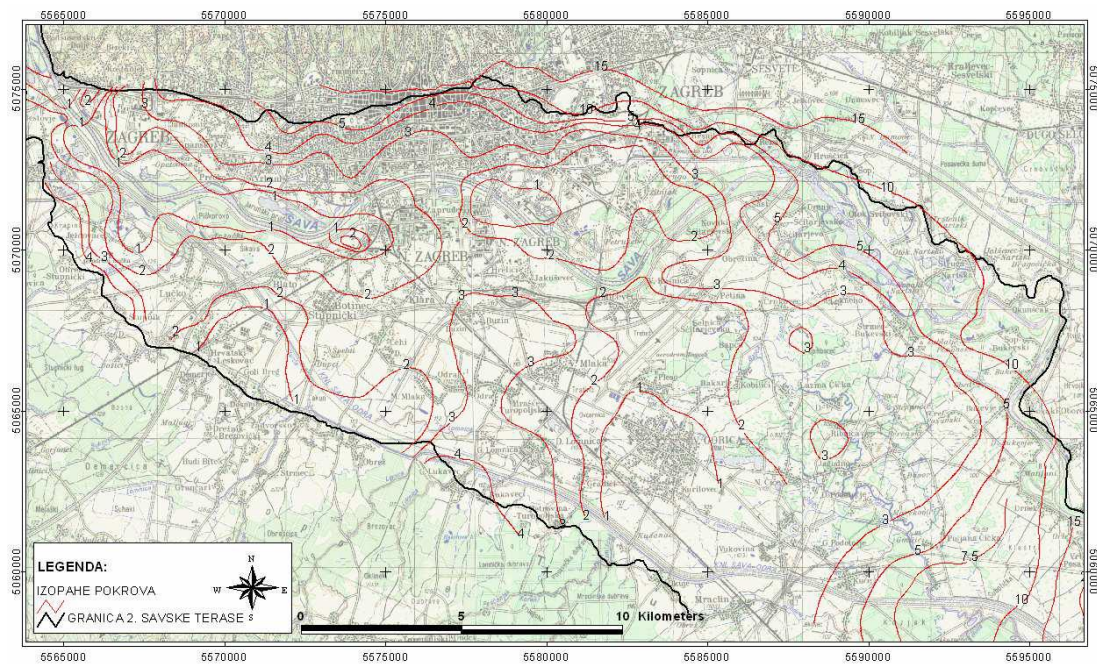


Slika 2.4. Izopahе aluvija (preuzeto iz Bačani i dr., 2005)



Slika 2.5. Izopahe vodonosnog sustava (preuzeto iz Bačani i dr., 2005)

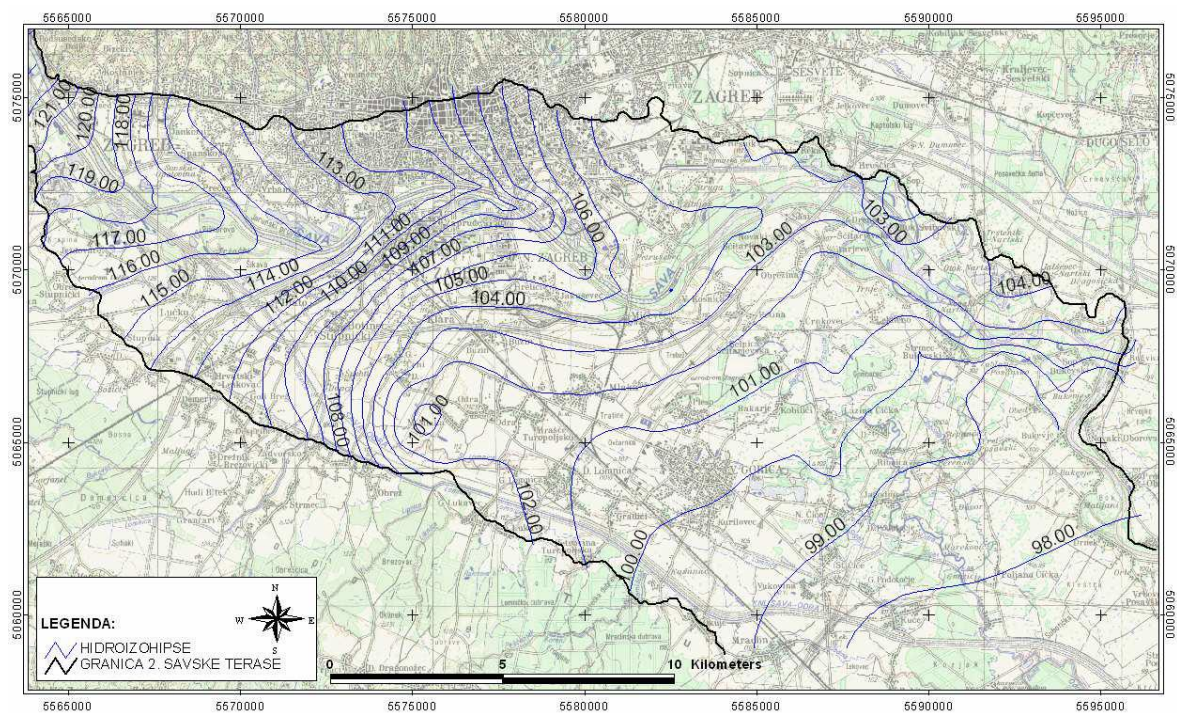
Slabo propusna krovina ili nije prisutna ili pak doseže debljinu od svega nekoliko metara na većem dijelu vodonosnog sustava, a tek se u jugoistočnom dijelu ili u rubnim predjelima povećava i do petnaestak metara (slika 2.6.). Prirodno tanki pokrov je dodatno devastiran i on više ne predstavlja zaštitu od zagađenja s površine. Podinu vodonosnog sustava čine slabo propusne naslage.



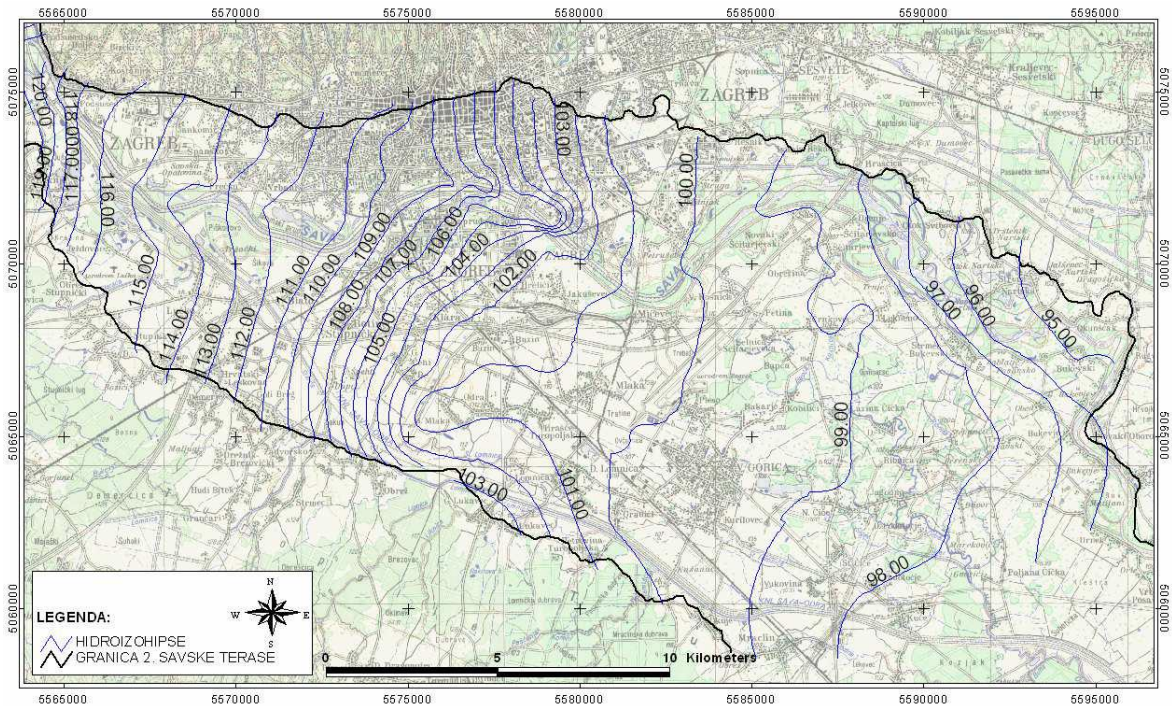
Slika 2.6. Izopahe vodonosnog sustava (preuzeto iz Bačani i dr., 2005)

### 2.3 Hidrogeološke značajke vodonosnika

Zagrebački vodonosnik je otvoreni vodonosnik što znači da njegovu gornju granicu saturacije čini vodna ploha pod atmosferskim tlakom. Rubne granice vodonosnika u hidrauličkom smislu čine nepropusna granica na sjeveru, granica dotjecanja na zapadu, granica dotjecanja na jugu (slabe i ne do kraja poznate propusnosti), te granica otjecanja na istoku. Generalni smjer toka podzemne vode je od zapada prema istoku/jugoistoku. Napajanje vodonosnika se generalno 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. Krovinu vodonosnika čini vodna ploha koja je u kontaktu s rijekom Savom. Analizom karata ekvipotencijala utvrđeno je da Sava za vrijeme visokih voda napaja vodonosnik duž cijelog toka na istraživanom području (slika 2.7.), dok za vrijeme srednjih i niskih voda na pojedinim dijelovima toka dolazi do dreniranja vodonosnika (slika 2.8.).



Slika 2.7. Hidroizohipse visokih voda na dan 23.11.2010. (preuzeto iz Bačani i dr., 2005)



Slika 2.8. Hidroizohipse niskih voda na dan 7.9.2000. (preuzeto iz Bačani i dr., 2005)

Sava je svojim koritom usječena u aluvijalne holocenske naslage koje su dominantno zastupljene šljuncima izrazito visoke hidrauličke vodljivosti. 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 kako hidrauličke vodljivosti tako i debljine vodonosnog sloja (Brkić i Biondić, 2000). Uspoređujući nivograme Save s nivogramima razina podzemne vode mjenjenih na piezometrima u neposrednoj blizini Save, duž cijelog toka na istraživanom području zapaža se izuzetno dobra povezanost vodostaja Save i razina podzemne vode.

Analiza kretanja razina podzemne vode u razdoblju od 1950. godine tj. od kada mjerenja traju pa do danas pokazala je da su razine podzemne vode od 1950. godine opadale sve do sredine 1993. godine u prosjeku 1 do 2 m svakih 10 godina na području cijelog vodonosnika (Posavec, 2006). Početkom devedesetih godina prošlog stoljeća trend opadanja razina nakratko je zaustavljen izgradnjom vodnih stuba na rijeci Savi kod termoelektrane-toplane (TE–TO) Zagreb i to na području uzvodno od vodnih stuba, no ubrzo nakon izgradnje trend opadanja je nastavljen sličnim intenzitetom. Razlozi opadanja razina podzemne vode mogu se najvećim dijelom potražiti u (1) izgradnji nasipa za obranu od poplava duž rijeke Save koji su spriječili povremena plavljenja zaobalnog područja, a

time i potencijalnu infiltraciju vode s poplavljenih područja u vodonosnik; (2) procesu snižavanja korita rijeke Save koje je najvećim dijelom uzrokovano izgradnjom akumulacija na Savi uzvodno od Zagreba, regulacijom pritoka i šljunčarenjem iz korita Save (Bonacci i Trninić, 1986), a za posljedicu ima snižavanje vodostaja rijeke Save; te u (3) sve većoj eksploataciji podzemne vode za potrebe vodoopskrbe Grada Zagreba. Ukupna crpna količina na zagrebačkim crpilištima se od 1983. godine, kada je iznosila oko 3300 l/s, povećala do danas na oko 4700 l/s, dok je 1993. godine iznosila oko 4000 l/s što znači da se kontinuirano povećavala za oko 700 l/s svakih 10 godina (Posavec, 2006). To povećanje crpne količine nije povezano samo s ubrzanim razvojem grada i povećanjem broja stanovnika, nego i sa sve starijom vodoopskrbnom mrežom čiji procijenjeni gubici prema podacima Vodoopskrbe i odvodnje d.o.o. (2003) iznose oko 40%.

### 3 CRPILIŠTE ČRNKOVEC – UŽA LOKACIJA

#### 3.1 Podaci o izvedenom zdenecu ZČ - 1

Na istražnom području budućeg vodocrpilišta Črnkovec – uža lokacija izbušen je jedan istražno – eksploatacijski zdenac ZČ – 1 do 30 metara dubine. Dosadašnjim istraživanjima ustanovljeno je da istražni prostor izgrađuju naslage uglavnom ujednačenog litološkog sastava.

Bušenju se pristupilo metodom kopanja uz utiskivanje pomoćnog zacjevljenja (laviranjem) promjera 1 metar do konačne dubine od 30 metara i vađenja materijala grajferom i sondom. Dubina bušenja određena je prema dnevniku bušenja strukturno – piezometarskih bušotina koje su izbušene u neposrednoj blizini mikrolokacije istražno – eksploatacijskog zdenca ZČ – 1.

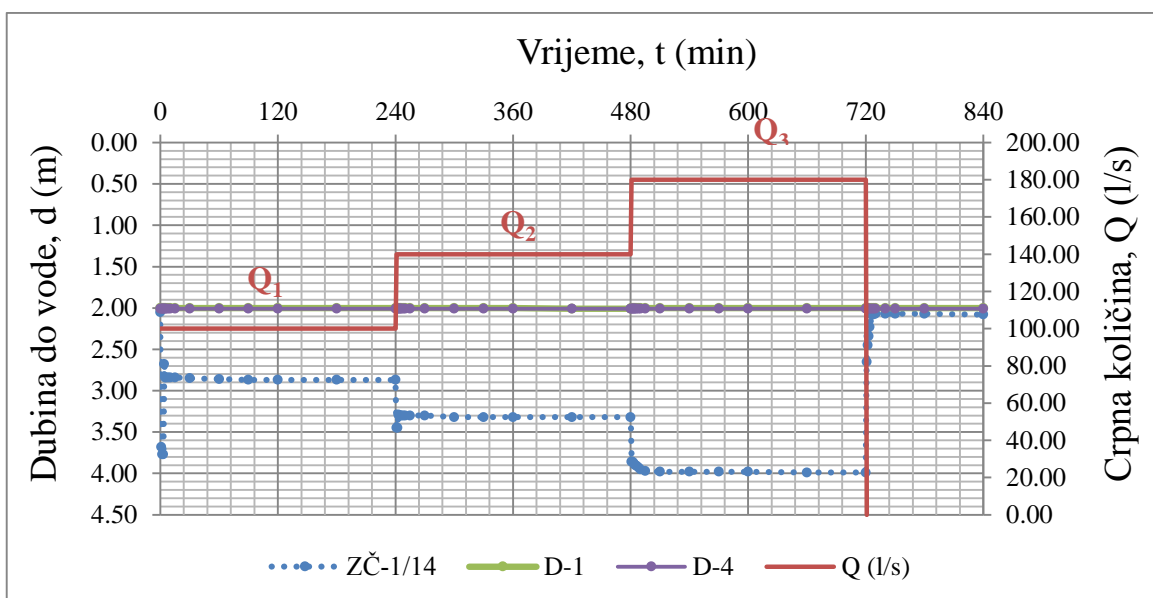
Tehnička konstrukcija zdenca određena je prema litološkom profilu nabušenih naslaga (prilog 1). U površinskom intervalu nabušene su glinovite i prahovite naslage, a nakon toga nabušeni su pjeskoviti šljunci i nešto manje šljunkoviti pijesci. Ponegdje su naslage prahovite a u intervalu između 21. i 24. metra dubine su više manje zaglinjene pa mjestimice prelaze u šljunkovite, pjeskovite i prahovite gline. Puna eksploatacijske cijevi postavljene su u intervalima od 0,7 metara iznad kote terena do 10 metara dubine i od 20,5 metara do 24 metra dubine, a taložnik je postavljen na 27. metru dubine sve do kraja bušotine. Između dva intervala punih cijevi postavljene su filtarske sekcije. Filter mora biti perforiran odnosno imati otvore koji osiguravaju male ulazne brzine vode u zdenac. U pravilu ulazna brzina mora biti manja od 3 cm/s (Bačani, 2006), jer su kod te brzine, otpori izazvani trenjem na otvorima filtra značajni. Veličina otvora na filtru određuje se prema veličini zrna koji izgrađuje vodonosni sloj. Ulazak vode kroz otvore filtra zdenca olakšan je ukoliko se ukloni materijal vodonosnog sloja oko filtra i nadomjesti umjetno građuiranim grubljim materijalom, tj. šljunčanim zasipom. Za izbor šljunčanog zasipa odabran je granulati od 5,6 – 8 mm. Podizanje i vađenje zaštitnih kolona vršeno je uz istovremeno šljunčanje prstenastog prostora (između tehničke konstrukcije i zaštitnih kolona). Iznad šljunčanog zasipa (-2,0 m) do nulte kote terena postavljen je glineni čep (prilog 1).

Zdenac se osvaja tako da se crpi malim kapacitetom sve dok voda ne postane potpuno bistra a nakon toga povećava se crpna količina, što ponovo zamuti vodu i ponavlja se postupak tako dugo dok se ne postigne kapacitet koji je predviđen za testiranje. Čišćenje i



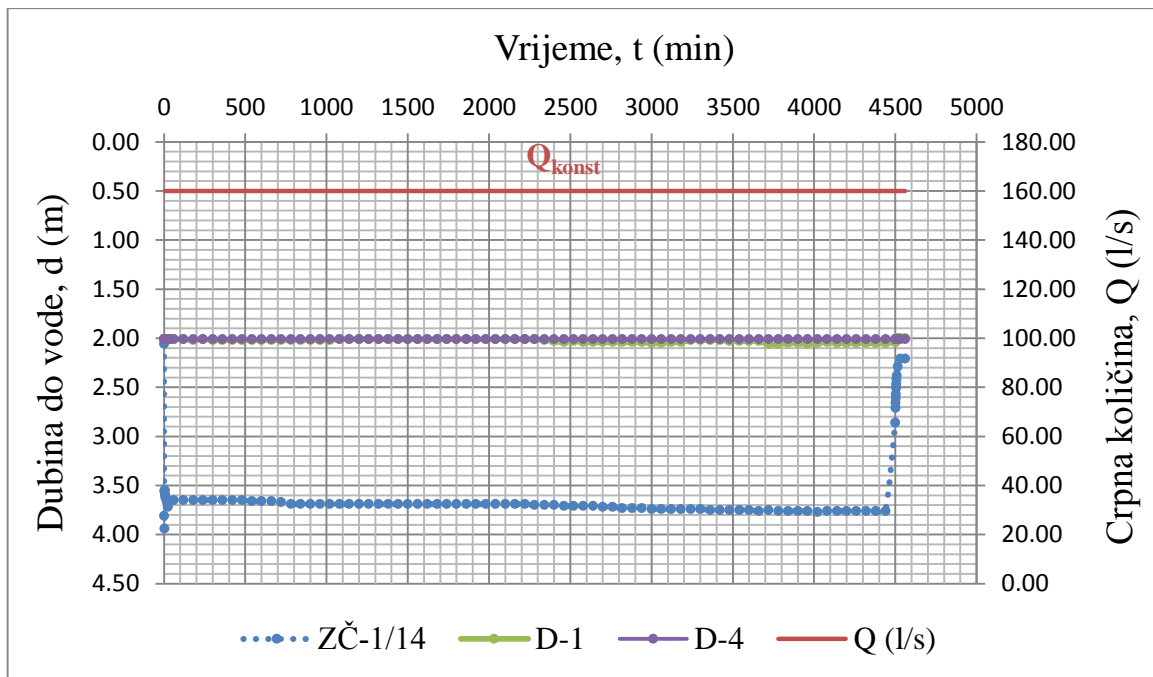
osvajanje zdenca provodilo se uz miran rad kompresora s postupnim povećanjem dubine urona airlifta do taložnika. Po spuštanju airlifta u taložnik započelo se s promjenjivim radom kompresora - „šutiranjem“. Zatim je u zdenac ugrađen sektorski ispirać dužine 0,8 metara kojim je nastavljeno osvajanje. Na kraju osvajanja voda je bila bistra i bez primjesa sitnozrnatih frakcija.

Po završenom postupku osvajanja, testirani zdenac je stavljen 24 sata u stanje mirovanja, te je nakon toga izvedeno pokusno crpljenje. Crpljenje u istražnom eksploatacijskom zdencu ZČ-1 započeto je s crpljenjem u koracima:  $Q_1 = 100,00$  l/s;  $Q_2 = 140,00$  l/s i  $Q_3 = 180,00$  l/s i mjerenjem povrata razine podzemne vode. Svaki korak je trajao 4 sata (slika 3.1.). Prije početka crpljenja sa stalnom crpnom količinom razina podzemne vode vratila se u inicijalno stanje.



Slika 3.1. Dijagram odnosa razine podzemne vode u vremenu prilikom crpljenja u koracima

Nakon toga započeto je crpljenje sa stalnom količinom  $Q_{konst.} = 160,00$  l/s, a trajalo je 72 sata (slika 3.2.). Za vrijeme pokusnog crpljenja stalnom količinom praćena je razina vode na strukturno – piezometarskoj bušotini D-1 koja je udaljena 25 metara te na strukturno – piezometarskoj bušotini D-4 koja je udaljena 300-tinjak metara od istražno-eksploatacijskog zdenca ZČ-1.



Slika 3.2. Dijagram odnosa razine podzemne vode u vremenu prilikom crpljenja stalnom crpnom količinom

Crpljena voda je odvođena tlačnim cjevovodom promjera 0,4 m u smjeru juga u dužini od 200 metara. Iscrpljenu vodu moramo odvoditi tako da se ona ne može procijediti natrag u vodonosni sloj. To se može postići odvođenjem vode kroz cijevi i njenim upuštanjem u kanal ili prirodni vodotok, koji nije u hidrauličkoj vezi s testiranim vodonosnim slojem (Bačani, 2006). Prilikom izvođenja pokusnog crpljenja oscilacije u razini podzemne vode u zdencu mjerene su ručnim mjeračem.

Pred kraj crpljenja uzet je uzorak vode za bakteriološku – fizikalno – kemijsku analizu vode (C analiza), a nakon završetka crpljenja, nastavio se pratiti povrat razine podzemne vode u trajanju od 1 sat nakon čega je došlo do ustaljenja razine podzemne vode na statički nivo 0,16 metara niži nego prije početka pokusnog crpljenja.

### 3.2 Analiza podataka pokusnog crpljenja

Princip na kojem se temelji pokusno crpljenje sastoji se u tome, što se iz zdenca koji ima filterski dio u vodonosnom sloju koji želimo testirati, crpi voda određenim kapacitetom kroz određeno vrijeme. Učinak crpljenja na potencimetrijsku plohu (piezometarsku visinu) opaža se mjerenjem sniženja u crpljenom zdencu i opažaćkim bušotinama tj. piezometrima (Bačani, 2006).

Pokusno crpljenje je zamišljeno tako da se prikupe podaci nužni za određivanje hidrauličkih parametara zdenca i parametara vodonosnika u neposrednom susjedstvu zdenca. Vrlo važan dio pokusnog crpljenja je mjerenje razine podzemne vode kako u zdencu tako i u okolnim piezometrima. Kako nivo vode uglavnom naglo opada u prvih sat vremena, u tom periodu mjerenja su vrlo gusta, a s trajanjem crpljenja povećava se razmak između potrebnih očitavanja.

Podaci prikupljeni tijekom crpljenja stalnom količinom korišteni su za identifikaciju hidrogeoloških parametara vodonosnika, a podaci prikupljeni za vrijeme crpljenja u koracima su korišteni za određivanje linearnih (formacijskih) i nelinearnih gubitaka zdenca. Glavni podaci koji se prikupljaju pri pokusnom crpljenju su: crpna količina ( $Q$ ), razina ili dubina do vode u zdencu ili piezometru ( $h$ ), vrijeme opažanja (trenutno i ukupno od početka crpljenja) ( $t$ ), te udaljenost od zdenca ( $r$ ). Zajedničke pretpostavke (početni i granični uvjeti) svih grafoanalitičkih metoda koje se najčešće koriste u praksi za izračun parametara vodonosnika i zdenca su sljedeće: vodonosnik je homogen i izotropan, jednolike debljine i beskonačnog prostiranja, vodno lice je prije početka crpljenja horizontalno, radijus zdenca je zanemarivo mali (voda u zdencu nema utjecaj na razvoja konusa depresije), zdenac u potpunosti penetrira vodonosnik po cijeloj dubini, tok je radijalan, laminaran, a oslobađanje vode iz vodonosnika je trenutno. U praksi je često slučaj da neke od navedenih pretpostavki nisu ispunjene.

### **3.2.1 Hidrogeološki parametri vodonosnika**

Glavni cilj crpljenja sa stalnom količinom je određivanje parametara vodonosnika: transmisivnosti, hidrauličke vodljivosti i koeficijenta uskladištenja. Kada crpljenje završi, razina vode u zdencu i opažaćkim bušotinama počinje se vraćati na početnu razinu. U idealnim uvjetima krivulja povrata razine vode odgovara inverznoj krivulji sniženja pri crpljenju, te se može analizirati istim metodama.

Hidrogeološki parametri proračunati su korištenjem podataka dobivenih mjerenjem promjena razine podzemne vode u istražno – eksploatacijskom zdencu ZČ – 1 i piezometru D-1 stalnom crpnom količinom i povratka razine podzemne vode nakon prestanka crpljenja. U piezometru D-4 nije bilo sniženja tj. nije registriran utjecaj crpljenja. Za izračun hidrogeoloških parametara vodonosnika koristit će se Jacob-Cooperova metoda i Theisova metoda povratka razine.

## Jacob-Cooperova metoda

Prema Jacob – Cooperovoj metodi izraz za transmisivnost glasi (Bačani, 2006):

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi\Delta s} \quad (3.1)$$

gdje su:

$T$  - transmisivnost ( $m^2/dan$ )

$\Delta s$  – razlika sniženja za 1 logaritamski ciklus (m)

$Q$  - količina crpljenja ( $m^3/dan$ )

Izraz za uskladištenje glasi:

$$S = \frac{2,25Tt_0}{r^2} \quad (3.2)$$

pri čemu su:

$S$  - uskladištenje (-)

$T$  - transmisivnost ( $m^2/dan$ )

$t_0$  - vrijeme u kojem je sniženje  $s=0$  (dan)

$r$  - udaljenost piezometra od zdenca (m)

Hidraulička vodljivost se može odrediti prema izrazu:

$$K = \frac{T}{m} \quad (3.3)$$

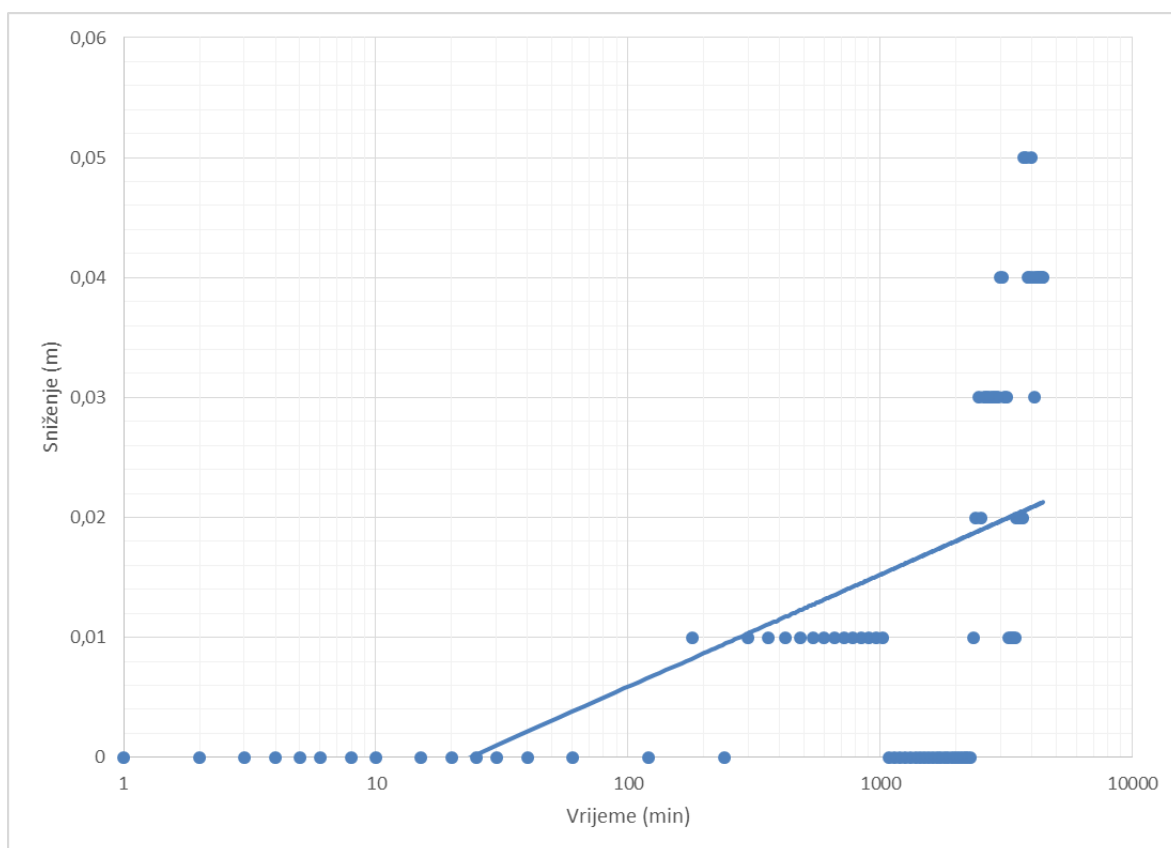
gdje su:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s)

$m$  – debljina vodonosnog sloja (m)

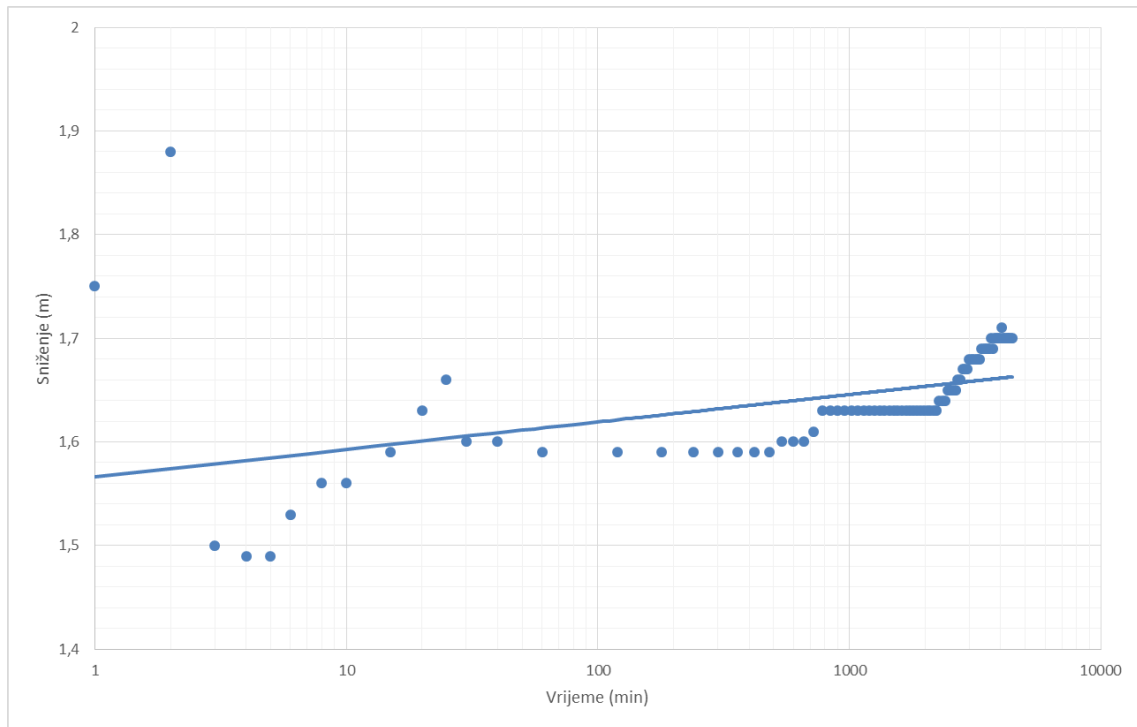
$T$  – transmisivnost ( $m^2/s$ )

Podaci sniženja tijekom crpljenja u piezometru D-1 prikazani su na slici 3.3, a u zdencu ZČ-1 na slici 3.4. Prema Jacob – Cooperovoj metodi sniženje (s) na ordinati je u linearnom mjerilu, a vrijeme (t) proteklo od početka crpljenja na apscisi je u logaritamskom mjerilu. Podaci se potom aproksimiraju pravcem, koji je na slikama 3.3. i 3.4. izvučen automatski kao linija trenda u računalnom programu MS Excel. Za jedan logaritamski ciklus očita se razlika sniženja  $\Delta s$ .



Slika 3.3. Dijagram „vrijeme-sniženje“ u bušotini D-1

Uvrštavanjem očitanih vrijednosti za  $\Delta s=0,009$  m i crpne količine  $Q=0,16$  m<sup>3</sup>/s u jednadžbu (3.1) dobije se vrijednost transmisivnosti  $T=0,368$  m<sup>2</sup>/s. Ako se za debljinu vodonosnika pretpostavi samo zdencem zahvaćeni dio vodonosnika do dubine 30 m, umanjen za krovinu debljine 1 m, hidraulička vodljivost prema jednadžbi (3.3) iznosi  $K=0,0127$  m/s ( $K=1092$  m/dan), što odgovara prethodnim istraživanjima (Urumović i Mihelčić, 2000). Izračun uskladištenja nije bio moguć, tj. dobiveni su nerealni podaci.



Slika 3.4. Dijagram „vrijeme-sniženje“ u zdencu ZČ-1

Uvrštavanjem očitanih vrijednosti za  $\Delta s=0,03$  m i crpne količine  $Q=0,16$  m<sup>3</sup>/s u jednadžbu (3.1) dobije se vrijednost transmisivnosti  $T=0,977$  m<sup>2</sup>/s. Ukoliko podijelimo transmisivnost s debljinom vodonosnika od 29 m, hidraulička vodljivost iznosi  $K=0,0337$  m/s ( $K=2910$  m/dan), što odgovara hidrauličkoj vodljivosti zapadnih dijelova vodonosnika, no rezultate dobivene temeljem analize podataka sniženja u zdencu treba uzimati s oprezom.

### Theisova metoda povratka analize

Nakon prestanka crpljenja razina vode u zdencu i piezometrima ponovo raste. Taj proces se naziva “povratak zdenca“, a sniženje u odnosu na razinu vode prije početka crpljenja „zaostalo sniženje“. Zaostalo sniženje se može izraziti kao razlika između sniženja u piezometru kakvo bi bilo da se crpljenje nastavilo i povrata razine kakav bi bio da se u trenutku prestanka crpljenja u isti taj zdenac počne utiskivati ista količina vode koja se crpila.

Ako se početni potencijal, prije početka crpljenja označi s  $h_0$ , a potencijal za vrijeme povrata razine sa  $h'$ , zaostalo sniženje se može izraziti kao (Bačani, 2006):

$$h_0 - h' = \Delta s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \left( \log \frac{2,25Tt}{r^2 S} - \log \frac{2,25Tt'}{r^2 S} \right) \quad (3.4)$$

$$\Delta s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{t}{t'} \quad (3.5)$$

gdje su:

$\Delta s'$  - „zaostalo“ sniženje ili sniženje nakon prestanka crpljenja (m)

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

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

$t$  – vrijeme proteklo od početka crpljenja (dani)

$t'$  – vrijeme proteklo od prestanka crpljenja (dani)

Postupak se izvodi tako da se na semilog papiru nanese vrijednosti zaostalog sniženja  $\Delta s'$  u odnosu na vrijednosti omjera  $t/t'$ , te se tako dobivene točke aproksimiraju pravcem. Za jedan logaritamski ciklus očita se vrijednost  $\Delta s'$  i uvrsti u izraz za transmisivnost (Bačani, 2006):

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi \Delta s'} \quad (3.6)$$

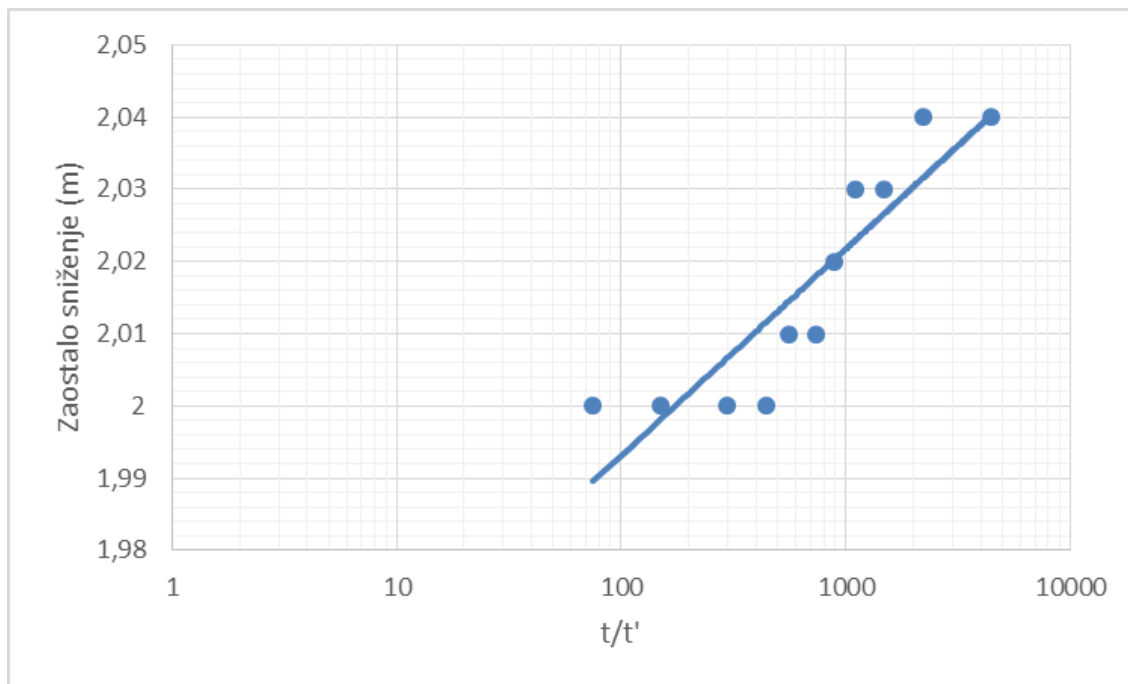
gdje su:

$T$  – transmisivnost ( $m^2/s$ )

$Q$  – crpna količina ( $m^3/s$ )

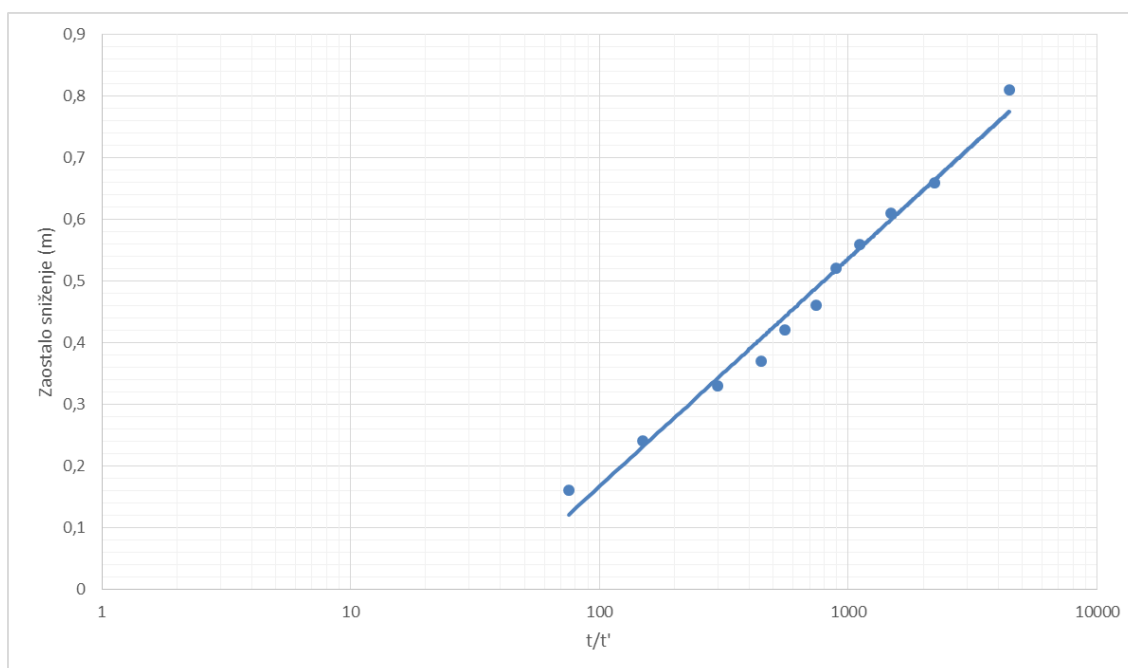
$\Delta s'$  – zaostalo sniženje (m)

Grafički prikaz zaostalog sniženja u piezometru D-1 prikazan je na slici 3.5., a u zdencu ZČ-1 na slici 3.6.



Slika 3.5. Dijagram zaostalog sniženja u piezometru D-1

Uvrštavanje očitanih vrijednosti sa dijagrama zaostalog sniženja u piezometru D-1 (sl. 3.5.) za  $\Delta s'=0,029$  m i crpne količine  $Q=0,16$  m<sup>3</sup>/s u jednadžbu (3.6) dobije se vrijednost transmisivnosti  $T=1$  m<sup>2</sup>/s. Ako se pretpostavi debljina vodonosnika  $m=29$  m, hidraulička vodljivost iznosi  $K=0,034$  m/s ( $K=3010$  m/dan), što odgovara zapadnim predjelima zagrebačkog vodonosnika.



Slika 3.6. Dijagram zaostalog sniženja u zdencu ZČ-1



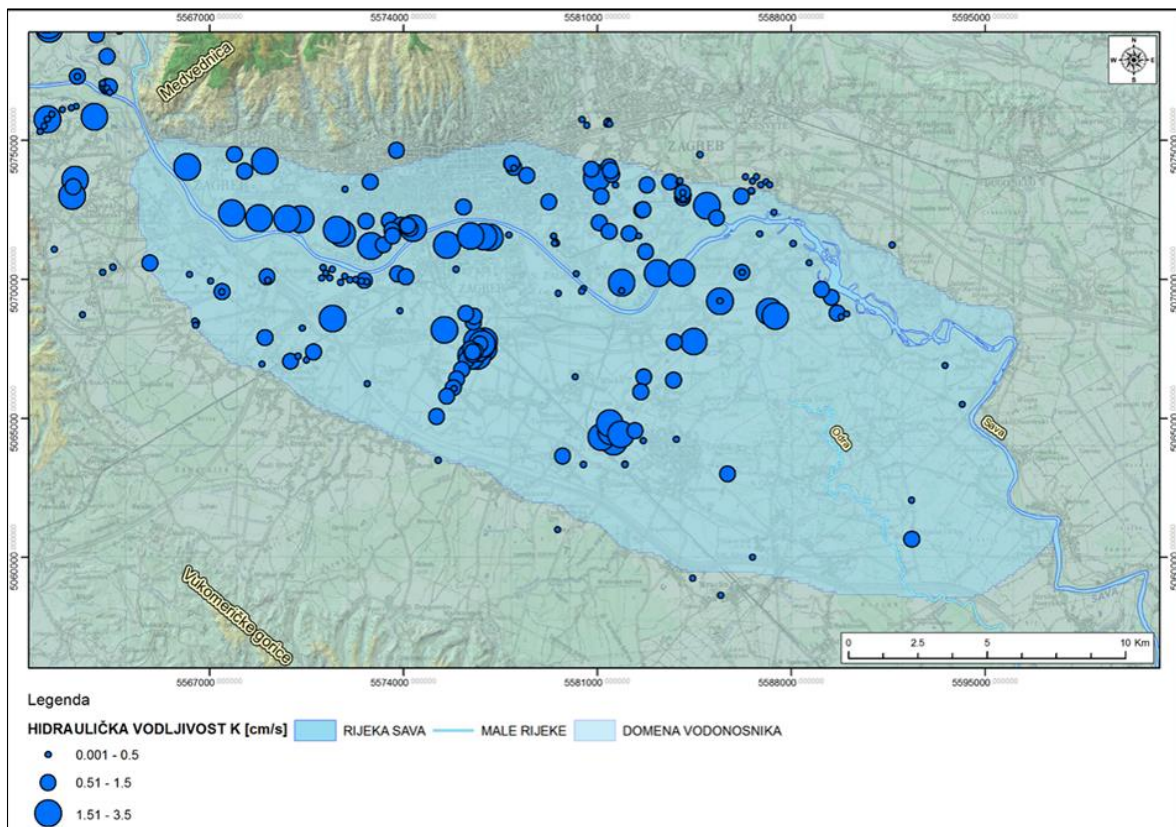
Uvrštavanje očitanih vrijednosti sa dijagrama zaostalog sniženja u zdencu ZČ-1 (sl. 3.6.) za  $\Delta s'=0,378$  m i crpne količine  $Q=0,16$  m<sup>3</sup>/s u jednadžbu (3.6) dobije se vrijednost transmisivnosti  $T=0,0775$  m<sup>2</sup>/s. Ako se pretpostavi debljina vodonosnika  $m=29$  m, hidraulička vodljivost iznosi  $K=0,00267$  m/s ( $K=231$  m/dan).

Prosječne vrijednosti hidrogeoloških parametara izračunatih po dvije metode u piezometru D-1 i zdencu ZČ-1 iznose:

Transmisivnost = 0,605 m<sup>2</sup>/s (52.272 m<sup>2</sup>/dan)

Hidraulička vodljivost = 0,02 m/s (1793 m/dan)

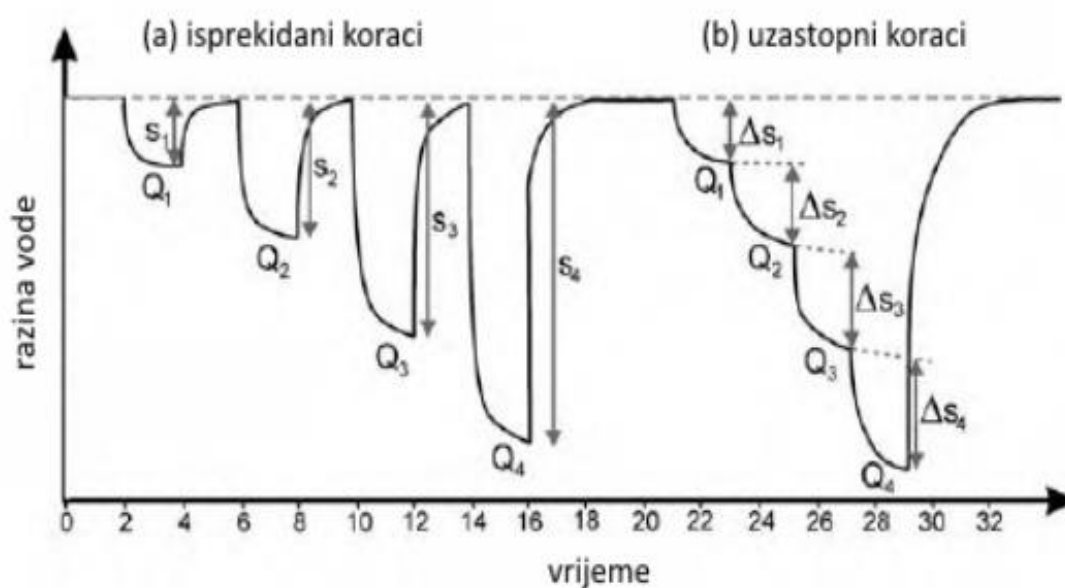
Dobivene prosječne vrijednosti odgovaraju rezultatima prethodnih istraživanja zagrebačkog vodonosnika (sl. 3.7.).



Slika 3.7. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti zagrebačkog vodonosnika (preuzeto iz Posavec i Bačani, 2015)

### 3.2.2 Hidraulički parametri zdenca

Hidraulički parametri zdenca definirani su parametrima linearnih i nelinearnih gubitaka, za koje se primjenjuje crpljenje sa različitim crpnim količinama, kako bi se ostvarili uvjeti za rješavanje kvadratne jednadžbe ukupnog sniženja. Najčešće se crpi u četiri koraka, koji bi idealno trebali biti jednako dugog trajanja, s tim da se na kraju svakog koraka sniženje mora ustaliti. Koraci obično traju između sat i pol do dva, a crpne količine se povećavaju od početka prema kraju crpljenja. Crpljenje u koracima se uglavnom provodi isprekidanim ili uzastopnim koracima (slika 3.8.).

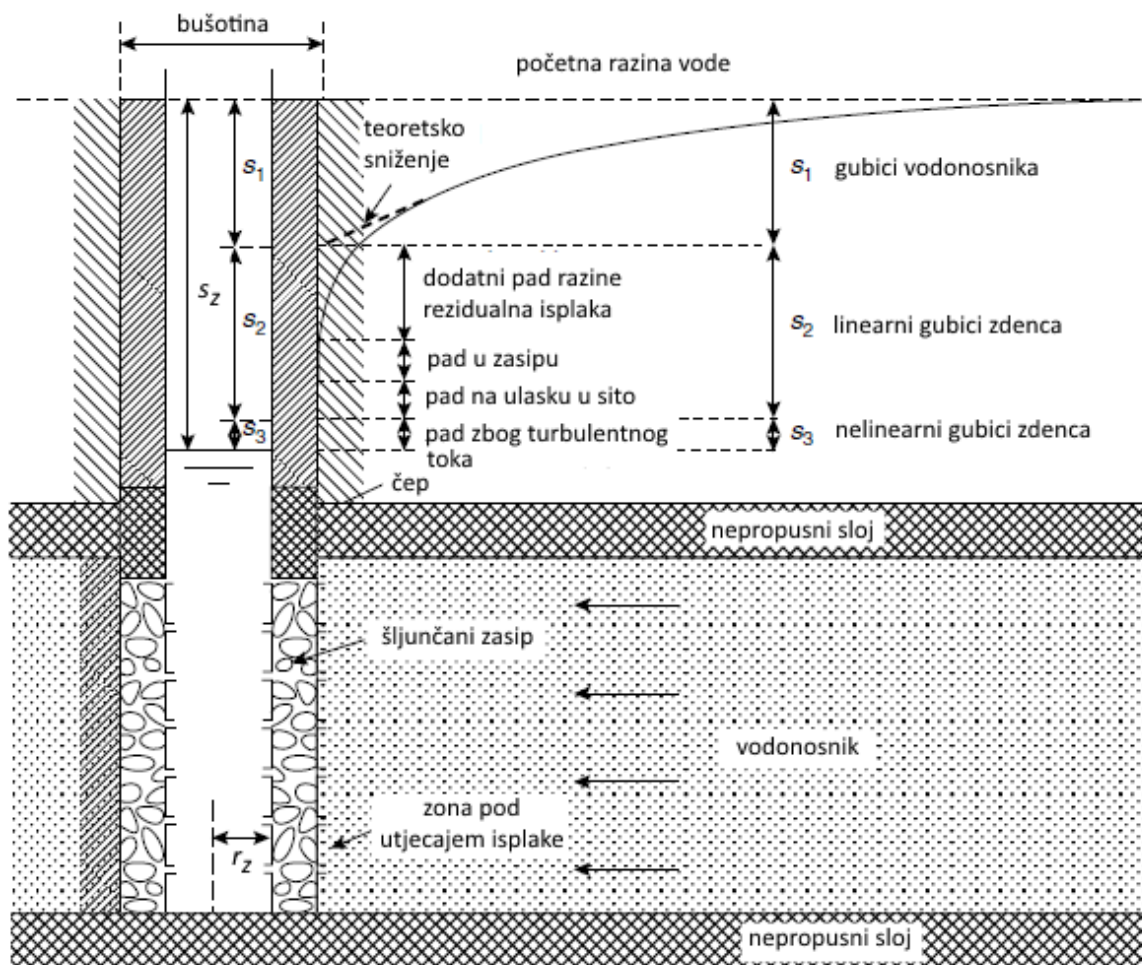


Slika 3.8. Dijagram sniženja u odnosu na vrijeme kod crpljenja u koracima s: (a) isprekidanim koracima, (b) uzastopnim koracima (Misstear i dr., 2006)

U crpljenju s isprekidanim koracima, nakon svakog koraka se čeka dok se sniženje ne vrati na svoju početnu vrijednost dok kod crpljenja s uzastopnim koracima dolazi do povećanja crpne količine odmah nakon završetka prethodnog koraka. Pri testiranju zdenca ZČ-1 provedeno je crpljenje s uzastopnim koracima.

U prirodnim uvjetima voda se u poroznom mediju giba sporo, a uvjeti toka su laminarni te odgovaraju uvjetima u Darcyjevom zakonu. Kako voda dolazi u blizinu zdenca, brzine toka se povećavaju, a tok može postati turbulentan. U samom zdencu dolazi do dodatnog trenja i promjene momenta prilikom prolaska vode kroz filter. To uzrokuje povećanje

sniženja u zdencu i naziva se gubicima zdenca. Različite komponente sniženja su prikazane na slici 3.9.



Slika 3.9. Komponente sniženja razine vode u zdencu (prema Delleur, 1999);  $s_z$  je sniženje u zdencu,  $r_z$  je radijus zdenca, a  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$  su komponente sniženja

Ukupno sniženje u istražno – eksploatacijskom zdencu ZČ – 1 može se prikazat odnosom prema Jacob-u (Cooper i Jacob, 1946):

$$s = BQ + CQ^2 \quad (3.7)$$

gdje su:

$BQ$  - komponenta sniženja uslijed otpora kao posljedica laminarnog strujanja kroz vodonosnu sredinu

$CQ^2$  - komponenta sniženja uslijed turbulentnog strujanja vode u zoni izvan bušotine, kroz filtersku konstrukciju i unutar cijevi

Za interpretaciju gubitaka zdenca korištena je relacija (3.7), koja se može postaviti za slučaj crpljenja u koracima, pri kojoj je za svaki korak „i“ crpljenja:

$$s_i = B + Q_i^2 \quad (3.8)$$

pa se razlika između svaka dva uzastopna koraka u pokusnom crpljenju može prikazati na sljedeći način:

$$\frac{\delta s_i}{\delta Q_i} = B + C \frac{Q_i^2 - Q_{i-1}^2}{\delta Q_i} \quad (3.9)$$

gdje su:

$\delta s_i = s_i - s_{i-1}$  - razlika sniženja između dva susjedna koraka u crpljenju,

$\delta Q_i = Q_i - Q_{i-1}$  - razlika izdašnosti između dva susjedna koraka u crpljenju,

$\delta s_i / \delta Q_i$  - ekvivalentno specifično sniženje,

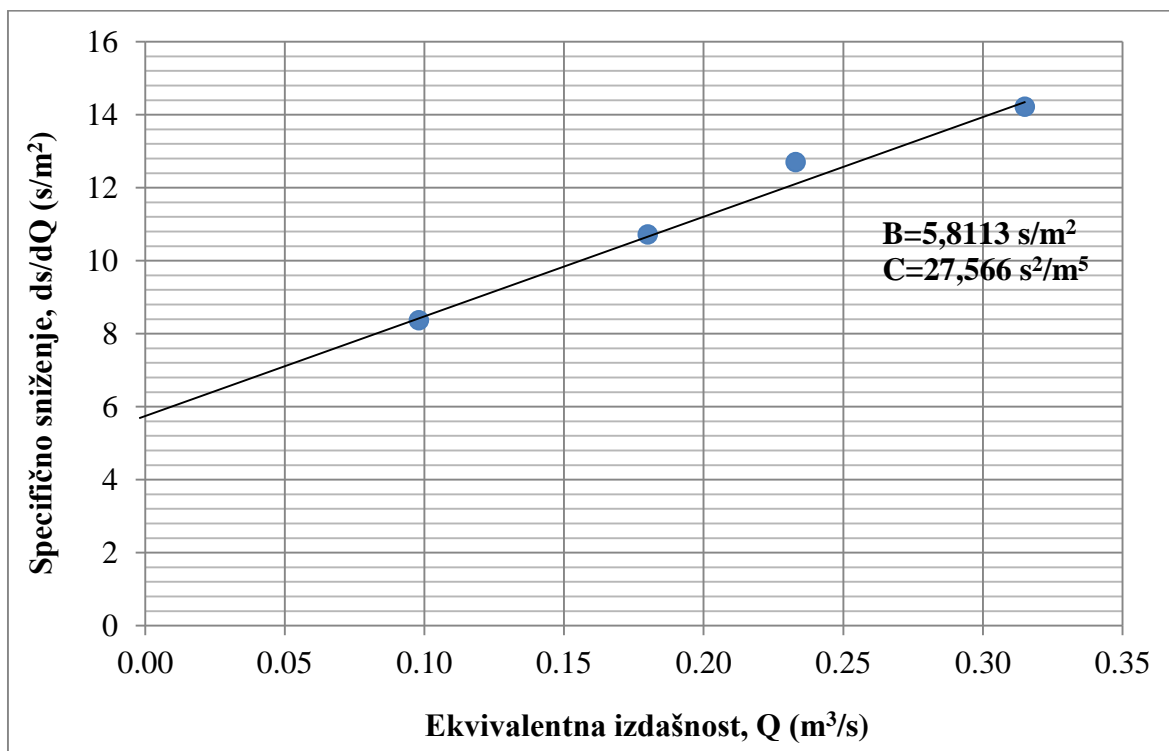
$\frac{Q_i^2 - Q_{i-1}^2}{\delta Q_i} = Q_q$  - ekvivalentna izdašnost između pojedinih koraka u pokusnom crpljenju.

Na temelju prikupljenih podataka prirasta sniženja razine podzemne vode dobivenih pokusnim crpljenjem u koracima u zdencu izveden je proračun ekvivalentne izdašnosti i ekvivalentnog sniženja (tablica 3.1.).

Tablica 3.1. Podaci pokusnog crpljenja u koracima

<b>Korak</b>	<b>Crpna količina</b>	<b>Sniženje</b>	<b>Porast crpne količine</b>	<b>Prirast sniženja</b>	<b>Ekv. izdašnost</b>	<b>Ekv. spec. sniženje</b>
<b>i</b>	<b>Q<sup>(i)</sup> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>s<sup>(i)</sup> (m)</b>	<b>ΔQ<sup>(i)</sup> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Δs<sup>(i)</sup> (m)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>(s/m<sup>2</sup>)</b>
0	0	0				
1	0,098	0,82	0,098	0,82	0,09800	8,36735
2	0,135	1,29	0,037	0,47	0,23300	12,7027
3	0,18	1,93	0,045	0,64	0,31500	14,2222
4	0	0	-0,18	-1,93	0,18000	10,7222

Međusobnim odnosom tih dvaju hidrogeoloških karakteristika grafički su utvrđene hidrogeološke vrijednosti B i C u jednadžbi (3.7) prema kojima su dobivena ukupna sniženja u funkciji crpne količine i pojedini linearni (BQ) i nelinearni ( $CQ^2$ ) gubici (slika 3.10.).



Slika 3.10. Grafička analiza ekvivalentnog specifičnog sniženja i ekvivalentne izdašnosti istražno – eksploatacijskog zdenca ZČ-1 prema podacima iz tablice

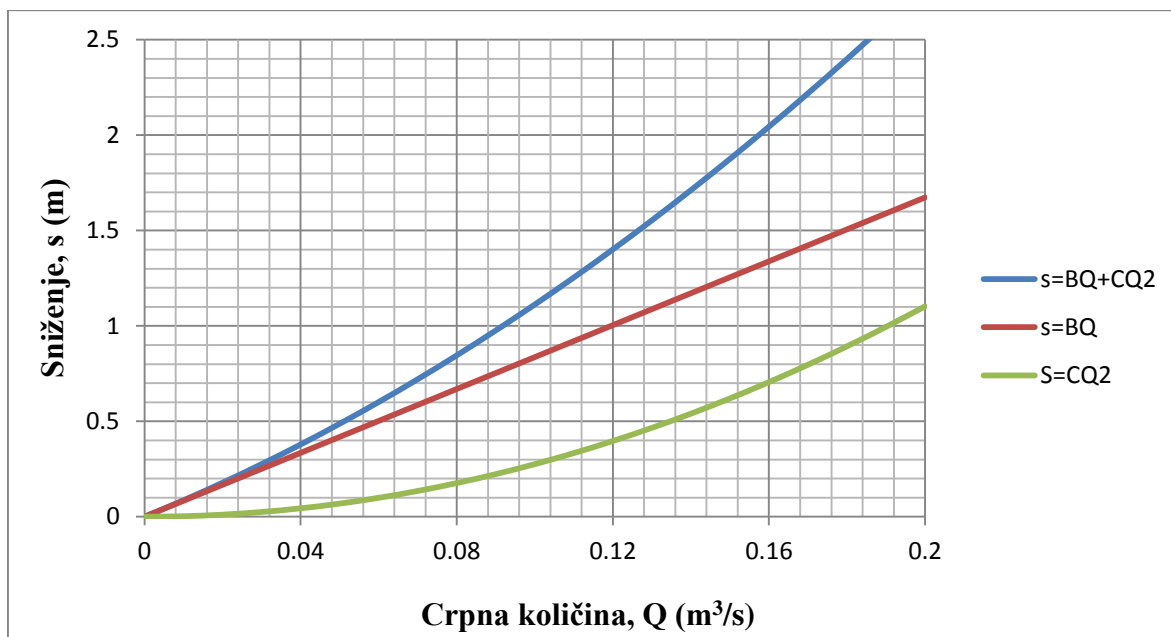
Konstanta sloja B određuje se kao odsječak na ordinati  $s/Q$ , dok se konstanta C računa kao tangens pravca povučenog kroz točke izračunate za odgovarajuće količine crpljenja.

Temeljem izračuna dobivena je jednadžba sniženja:

$$s = 5,8113Q + 27,566Q^2 \text{ (za } Q \text{ u m}^3/\text{s)}$$

### 3.2.3 Crpni kapacitet istražno – eksploatacijskog zdenca

Maksimalna crpna količina s kojom je dokazano zdenac osvojen iznosi cca 180,0 l/s. Uvriježeno je da je optimalna crpna količina 3/4 maksimalne, po tome bi ona iznosila 126 l/s. Prema grafičkom rješenju na Q/s dijagramu, optimalna crpna količina iznosila bi cca 140,0 l/s (slika 3.11.).



Slika 3.11. Dijagram  $s=f(Q)$  i pojedine vrste gubitaka za crpljenje u istražno eksploatacijskom zdencu ZČ-1

U slučaju potrebe za većom crpnom količinom može se zdenac eksploatirati do 160, 0 l/s, ne dugotrajno, već kroz kraći vremenski interval.

Tablica 3.2. Karakteristike istražno – eksploatacijskog zdenca ZČ – 1

Karakteristike/Oznaka zdenca	ZČ-1
- promjer ugrađenog filtra (d)	0,508 m
- maksimalna brzina ulaza vode u filter za laminarne uvjete tečenja ( $f_v$ )	0,028 m/s
- širina trakastog otvora (slot) filtra	2 mm
- ukupni perforirani (slotirani) dio filtera ( $f_c$ )	23%
- duljina filtera (L)	13,50 m
- pretpostavljeno sniženje (s)	1,60 m
- optimalni crpni kapacitet	140, 0 l/s
- transmisivnost (T)	$6,05 \cdot 10^{-1} m^2/s$
- hidraulička vodljivost (K)	$2 \cdot 10^{-2} m/s$
- parametar linearnih gubitaka nakon 240 min crpljenja (B)	$5,8113 s/m^2$
- parametar nelinearnih gubitaka (C)	$27,566 s^2/m^5$

### 3.2.4 Kakvoća podzemne vode

Analiza kakvoće vode na lokalitetu budućeg vodocrpilišta Črnkovec – uža lokacija obavljena je na uzorku iz istražno – eksploatacijskog zdenca ZČ- 1, koji je uzet pri kraju pokusnog crpljenja.

Prema rezultatima fizikalne i kemijske analize svi parametri koji su analizirani su u granicama koje su definirane *Pravilnikom o parametrima sukladnosti i metodama analize vode ljudsku potrošnju* (Narodne novine, broj 125/2013).

Prema mikorbiološkim analizama prisutne su koliformne bakterije koje u vodi za piće ne smiju biti. U podzemnoj vodi svih dijelova zagrebačkog vodonosnika prisutan je velik broj koliformnih bakterija.

Tablica 3.3. Koliformne bakterije u vodonosniku

Naziv parametra	Metoda	Mjerna jedinica	Rezultat	MDK
Koliformne bakterije	HRN EN ISO 930 – 1/2000/Ispr. 1:2008 en	Cfu/100 mL	4	0

#### 4 ZAKLJUČAK

Istražno – eksploatacijski zdenac ZČ-1 izveden je na području budućeg vodocrpilišta Črnkovec – uža lokacija. To je prvi od osam zdenaca koji će biti izvedeni na lokaciji vodocrpilišta.

Bušenje je izvedeno metodom kopanja uz utiskivanje pomoćnog zacijevljenja (laviranjem) promjera 1 m do dubine od 30 metara. Nabušene naslage su većinom šljunkoviti pijesci a nešto manje ima pjeskovitih šljunaka. Čišćenje i osvajanje izvedeno je komprimiranim zrakom metodom air – lifta, metodom sektorskog ispiranja sa preklapanjem intervala te čišćenjem i osvajanjem potopnom pumpom. Na kraju osvajanja voda je bila bistra i bez primjesa sitnozrnatih frakcija.

Pokusno crpljenje je izvedeno s ciljem određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika i hidrauličkih parametara zdenca. Prvo se crpilo u koracima s crpnim količinama 100 l/s, 140 l/s i 180 l/s. Na temelju izmjerenih sniženja u svakom koraku određena je jednadžba sniženja u zdencu koja glasi:

$$s = 5,8113Q + 27,566Q^2 \quad (\text{za } Q \text{ u m}^3/\text{s})$$

Nakon crpljenja u koracima uslijedilo je razdoblje povrata vode te nastavak crpljenja stalnom crpnom količinom. Na temelju podataka o sniženju u piezometru D-1 i zdencu ZČ-1 izračunati su hidrogeološki parametri vodonosnika pomoću Jacob-Cooperove i Theisove metode povratka razine. Prosječna vrijednost transmisivnosti iznosi  $T=6,05 \cdot 10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s, a hidrauličke vodljivosti  $K=2 \cdot 10^{-2}$  m/s što je u skladu s prethodnim istraživanjima.

Kakvoća vode koja je uzeta iz zdenca pri kraju pokusnog crpljenja udovoljava kriterijima Pravilnika o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (Narodne novine, broj 125/2013) po pitanju svih analiziranih parametara, osim koliformnih bakterija koje su prisutne, a u vodi za piće ne smiju biti.



## 5 LITERATURA

Bačani, A. (2006.): Hidrogeologija I. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb.

Bačani, A., Posavec, K., Nakić, Z., Perković, D., Miletić, P., Heinrich-Miletić, M., Parlov, J. i Bazijanec, M. (2005): Elaborat zaštitnih zona vodocrpilišta grada Zagreba, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Fond stručnih dokumenata Grad Zagreb.

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.

Bonacci, O. i Trninić, D. (1986): Analiza uzroka i prognoza promjena vodostaja Save i nivoa podzemnih voda u okolici Zagreba. Vodoprivreda 18, 100–101 (1986/2–3), str. 95–101.

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.

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.

Delleur, J. (1999): The Handbook of Groundwater Engineering. CRC Press LLC LTD, Chichester.

FIL.B.IS. projekt, d.o.o., 2014. *Izveštaj o izradi istražno – eksploatacijskog zdenca na području Črnkovec*, Fond stručnih dokumenata FIL.B.IS. projekt d.o.o. Zagreb.

Misstear, B., Banks D., Clark, L. (2006): Water Wells and Boreholes. John Wiley & Sons, LTD, Chichester.

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

Posavec, K. i Bačani, A. (2015): Elaborat o zonama sanitarne zaštite potencijalnog vodozaštitnog područja Črnkovec – uža lokacija. Fond stručnih dokumenata RGN fakultet, Zagreb.

*Pravilnik o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju* (Narodne novine, broj 125/2013)

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

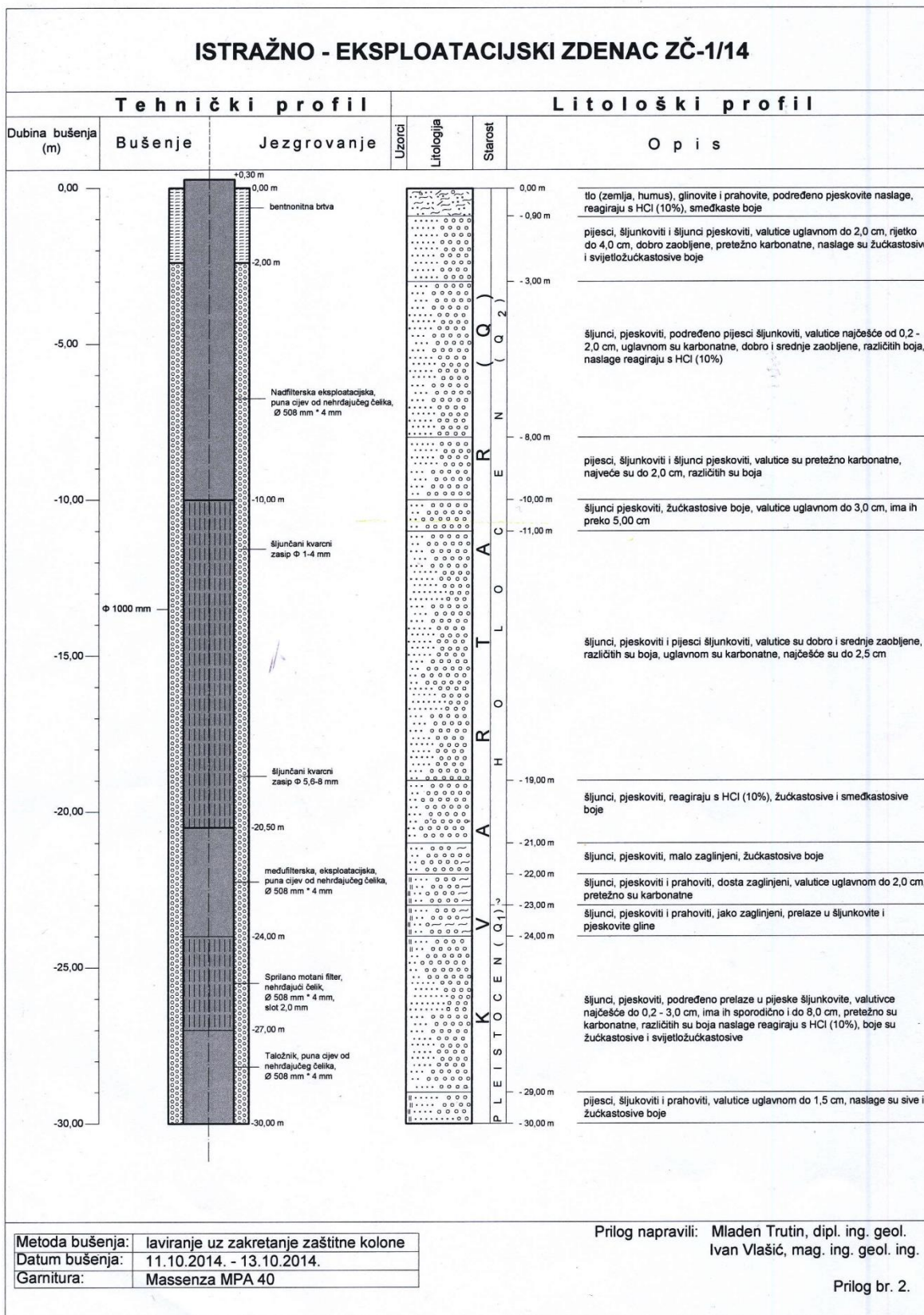
Velić, J. i Saftić, B. (1991): Subsurface Spreading and Facies Characteristics of Middle Pleistocene Deposits between Zaprešić and Samobor. *Geološki vjesnik*, 44, 69-82.

Velić, J. i 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., Saftić B. i Malvić T. (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, 119-130.

Vodoopskrba i odvodnja (2003): 125 godina organizirane vodoopskrbe i 111 godina javne odvodnje grada Zagreba, Vodoopskrba i odvodnja, Zagreb.

PRILOG 1 Tehnički i litološki profil istražno-eksploatacijskog zdenca ZČ-1 (preuzeto iz izvještaja, FIL.B.IS. Projekt d.o.o., 2014)



PRILOG 2 Podaci o pokusnim crpljenju

Crpljenje u koracima							
			ZČ-1/14		D-1	D-4	
Datum	Sat i minuta	Vrijeme proteklo od početka crpljenja	Razina vode u bušotini	Sniženje u odnosu na inicijalno stanje	Razina vode u bušotini	Razina vode u bušotini	Protok
		t (min)	d (m)	s (m)	d (m)	d (m)	Q (l/s)
30.10.2014.	12:00:00	0	2,05	0,00	2,00	2,01	100
		1	3,68	1,63	2,00	2,01	
		2	3,77	1,72	2,00	2,01	
		3	3,77	1,72	2,00	2,01	
		4	2,68	0,63	2,00	2,01	
		5	2,84	0,79	2,00	2,01	
		6	2,84	0,79	2,00	2,01	
		8	2,84	0,79	2,00	2,01	
		10	2,84	0,79	2,00	2,01	
		15	2,84	0,79	2,00	2,01	
		30	2,85	0,80	2,00	2,01	
		60	2,86	0,81	2,00	2,01	
		90	2,87	0,82	2,00	2,01	
		120	2,87	0,82	2,00	2,01	
		180	2,87	0,82	2,00	2,01	
	16:00:00	240	2,87	0,82	2,00	2,01	
		1	3,45	1,40	2,00	2,01	140
		2	3,45	1,40	2,00	2,01	
		3	3,29	1,24	2,00	2,01	
		4	3,30	1,25	2,00	2,01	
		5	3,30	1,25	2,00	2,01	

		6	3,30	1,25	2,00	2,01	
		8	3,30	1,25	2,00	2,01	
		10	3,30	1,25	2,00	2,01	
		15	3,30	1,25	2,00	2,01	
		30	3,30	1,25	2,00	2,01	
		60	3,32	1,27	2,00	2,01	
		90	3,32	1,28	2,00	2,01	
		120	3,32	1,28	2,00	2,01	
		180	3,32	1,29	2,01	2,01	
	20:00:00	240	3,32	1,29	2,01	2,01	
		1	3,86	1,81	2,00	2,01	180
		2	3,86	1,81	2,00	2,01	
		3	3,87	1,82	2,00	2,01	
		4	3,89	1,84	2,00	2,01	
		5	3,90	1,85	2,00	2,01	
		6	3,91	1,86	2,00	2,01	
		8	3,93	1,88	2,00	2,01	
		10	3,95	1,90	2,00	2,01	
		15	3,97	1,92	2,00	2,01	
		30	3,98	1,93	2,00	2,01	
		60	3,98	1,93	2,00	2,01	
		90	3,98	1,93	2,00	2,01	
		120	3,98	1,93	2,00	2,01	
		180	3,99	1,94	2,00	2,01	
	24:00:00	240	3,99	1,94	2,00	2,01	
		1	2,65	0,60	2,00	2,01	Povrat
		2	2,45	0,40	2,00	2,01	
		3	2,34	0,29	2,00	2,01	
		4	2,23	0,18	2,00	2,01	
		6	2,08	0,03	2,00	2,01	
		8	2,08	0,03	2,00	2,01	
		10	2,07	0,02	2,00	2,01	

		20	2,07	0,02	2,00	2,01	
		30	2,07	0,02	2,00	2,01	
		60	2,07	0,02	2,00	2,01	
	2:00:00	120	2,08	0,03	2,00	2,01	

<b>Crpljenje stalnom crpnom količinom</b>							
			<b>ZČ-1/14</b>		<b>D-1</b>	<b>D-4</b>	
Datum	Sat i minuta	Vrijeme proteklo od početka crpljenja	Razina vode u bušotini	Sniženje u odnosu na inicijalno stanje	Razina vode u bušotini	Razina vode u bušotini	Protok
		t (min)	d (m)	s (m)	d (m)	d (m)	Q (l/s)
31.10.2014.	8:00:00	0	2,06	0,01	2,01	2,01	160
		1	3,81	1,76	2,01	2,01	
		2	3,94	1,89	2,01	2,01	
		3	3,56	1,51	2,01	2,01	
		4	3,55	1,50	2,01	2,01	
		5	3,55	1,50	2,01	2,01	
		6	3,59	1,54	2,01	2,01	
		8	3,62	1,57	2,01	2,01	
		10	3,62	1,57	2,01	2,01	
		15	3,65	1,60	2,01	2,01	
		20	3,69	1,64	2,01	2,01	
		25	3,72	1,67	2,01	2,01	
		30	3,66	1,61	2,01	2,01	
		40	3,66	1,61	2,01	2,01	
		60	3,65	1,60	2,01	2,01	
		120	3,65	1,60	2,01	2,01	
		180	3,65	1,60	2,02	2,01	
		240	3,65	1,60	2,01	2,01	
		300	3,65	1,60	2,02	2,01	

		360	3,65	1,60	2,02	2,01	
		420	3,65	1,60	2,02	2,01	
		480	3,65	1,60	2,02	2,01	
		540	3,66	1,61	2,02	2,01	
		600	3,66	1,61	2,02	2,01	
		660	3,66	1,61	2,02	2,01	
		720	3,67	1,62	2,02	2,01	
		780	3,69	1,64	2,02	2,01	
		840	3,69	1,64	2,02	2,01	
		900	3,69	1,64	2,02	2,01	
1.11.2014.	0:00:00	960	3,69	1,64	2,02	2,01	
		1020	3,69	1,64	2,02	2,01	
		1080	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1140	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1200	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1260	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1320	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1380	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1440	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1500	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1560	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1620	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1680	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1740	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1800	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1860	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1920	3,69	1,64	2,01	2,01	
		1980	3,69	1,64	2,01	2,01	
		2040	3,69	1,64	2,01	2,01	
		2100	3,69	1,64	2,01	2,01	
		2160	3,69	1,64	2,01	2,01	
		2200	3,69	1,64	2,01	2,01	

		2280	3,70	1,65	2,01	2,01	
		2340	3,70	1,65	2,02	2,01	
2.11.2014.	0:00:00	2400	3,70	1,65	2,03	2,01	
		2460	3,71	1,66	2,04	2,01	
		2520	3,71	1,66	2,03	2,01	
		2580	3,71	1,66	2,04	2,01	
		2640	3,71	1,66	2,04	2,01	
		2700	3,72	1,67	2,04	2,01	
		2760	3,72	1,67	2,04	2,01	
		2820	3,73	1,68	2,04	2,01	
		2880	3,73	1,68	2,04	2,01	
		2940	3,73	1,68	2,04	2,01	
		3000	3,74	1,69	2,05	2,01	
		3060	3,74	1,69	2,05	2,01	
		3120	3,74	1,69	2,04	2,01	
		3180	3,74	1,69	2,04	2,01	
		3240	3,74	1,69	2,02	2,01	
		3300	3,74	1,69	2,02	2,01	
		3360	3,75	1,70	2,02	2,01	
		3420	3,75	1,70	2,02	2,01	
		3480	3,75	1,70	2,03	2,01	
		3540	3,75	1,70	2,03	2,01	
		3600	3,75	1,70	2,03	2,01	
		3660	3,76	1,71	2,03	2,01	
		3720	3,75	1,70	2,06	2,01	
		3780	3,76	1,71	2,06	2,01	
3.11.2014.	0:00:00	3840	3,76	1,71	2,05	2,01	
		3900	3,76	1,71	2,05	2,01	
		3960	3,76	1,71	2,06	2,01	
		4020	3,77	1,72	2,05	2,01	
		4080	3,76	1,71	2,04	2,01	
		4140	3,76	1,71	2,05	2,01	



		4200	3,76	1,71	2,05	2,01	
		4260	3,76	1,71	2,05	2,01	
		4320	3,76	1,71	2,05	2,01	
		4380	3,76	1,71	2,05	2,01	
		4400	3,76	1,71	2,05	2,01	
	11:00:00	4500	3,76	1,71	2,04	2,01	
		0	2,86	0,81	2,04	2,01	Povrat
		1	2,71	0,66	2,04	2,01	
		2	2,66	0,61	2,04	2,01	
		3	2,61	0,56	2,03	2,01	
		4	2,57	0,52	2,03	2,01	
		5	2,51	0,46	2,02	2,01	
		6	2,47	0,42	2,01	2,01	
		8	2,42	0,37	2,01	2,01	
		10	2,38	0,33	2,00	2,01	
		15	2,29	0,24	2,00	2,01	
		30	2,21	0,16	2,00	2,01	
		60	2,21	0,16	2,00	2,01	