Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom na vodocrpilištu Švarča

Kevrić, Katja

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:169:570365

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI METODOM PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM NA VODOCRPILIŠTU ŠVARČA

Diplomski rad

Katja Kevrić

GI 267

Zagreb, 2017.

Zahvaljujem svom mentoru, redovitom profesoru dr. sc. Kristijanu Posavcu na izuzetno velikoj pomoći, strpljenju i korisnim savjetima koje je dijelio sa mnom te pripomogao pri izradi diplomskog rada.

Također se želim zahvaliti dr. sc. Andrei Bačani i dr. sc. Željku Duiću na sugestijama i savjetima.

Posebna zahvala obitelji i prijateljima na velikoj podršci i strpljenju tijekom studija.

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI METODOM PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM NA VODOCRPILIŠTU ŠVARČA

KATJA KEVRIĆ

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

Sažetak

U teorijskom dijelu nabrojane su i opisane terenske, laboratorijske te metode temeljene na empirijskim formulama za određivanje hidrauličke vodljivosti. Sam predmet istraživanja bio je odrediti hidrauličku vodljivost metodom permeametra sa stalnom razinom. Uzorak za ovaj eksperiment uzet je iz bušotine ZŠ-3/16 na području vodocrpilišta Švarča.

Ključne riječi: hidraulička vodljivost, metode određivanja hidrauličke vodljivosti, permeametar sa stalnom razinom, Švarča

Diplomski rad sadrži: 36 stranica, 6 tablica i 22 slike

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Kristijan Posavec, redoviti profesor, RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Kristijan Posavec, redoviti profesor, RGNF
Dr. sc. Andrea Bačani, redovita profesorica, RGNF
Dr. sc. Željko Duić, docent, RGNF

Datum obrane: 19.12.2017.

University of Zagreb Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

DETERMINATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY USING PERMEAMETER WITH CONSTANT HEAD ON WATER SUPPLY WELL ŠVARČA

KATJA KEVRIĆ

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

Abstract

In this theoretical part of thesis it explains and shows laboratory methods, field tests and method based on empirical formulas for determination of hydraulic conductivity. The subject of this study was measurment of hydraulic conductivity using a permeameter with constant head test method. The sample for this experiment was taken from well ZŠ-3/16 from water supply well Švarča.

Keywords: hydraulic conductivity, methods of determining hydraulic conductivity, constant head permeameter, Švarča

Thesis contains: 36 pages, 6 tables, 22 images,

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD. Kristijan Posavec, Full Professor, RGNF

Reviewers: PhD. Kristijan Posavec, Full Professor, RGNF
PhD. Andrea Bačani, Full Professor, RGNF
PhD. Željko Duić, Assistant Professor, RGNF

Date of defence: 19th December, 2017

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA 2
2.1 Geografski položaj 2
2.2 Geologija 4
2.2.1 Geološka građa istraživanog prostora 6
2.2.2 Strukturni odnosi 7
2.2.3 Litostratigrafske karakteristike nabušenih naslaga 7
2.3 Hidrogeologija 8
2.3.1 Hidrogeološke karakteristike istražno-eksploatacijskog zdenca ZŠ-3/16 9
2.3.2 Proračun hidrogeoloških parametara vodonosnika 11
3. METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI 12
3.1 Terenska metoda 12
3.1.1 Pokusno crpljenje 12
3.2 Metode temeljene na empirijskim formulama 14
3.2.1 Hazen 15
3.2.2 Slichter 16
3.2.3 USBR (Miletić i Henrich – Miletić, 1981) 16
3.3 Laboratorijske metode 16
3.3.1 Permeametar 16
3.3.1.1 Permeametar sa stalnom razinom 18
3.3.1.2 Permeametar sa promjenjivom razinom 20
4. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI 21
4.1 Granulometrijska analiza sijanjem i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama 22
4.1.1 Granulometrijska analiza sijanjem 22
4.1.2 Empirijske formule 24
4.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom 24
5. REZULTATI 32
5.1 Rezultati hidrauličke vodljivosti temeljeni na empirijskim formulama i metodom permeametra sa stalnom razinom 32
6. ZAKLJUČAK 34
7. LITERATURA 35

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Karlovačka kotlina 2

Slika 2-2 Pritoke Kupe (http://www.matica-hrvatska-karlovac.hr/stapek.pdf) 3

Slika 2-3 Područje istraživanja 3

Slika 2-4 Regionalne strukturne jedinice (Kovačević, 2005) 4

Slika 2-5 Razvrstavanje struktura hrvatskog dijela Panonskog bazena (Prelogović et al., 1998; Lučić et al., 2001; Velić et al., 2011) 5

Slika 2-6 Geološka karta karlovačkog područja (Kolaković, 2011) 6

Slika 2-7 Dijagram kolebanja nivoa vode tijekom crpljenja u koracima u istražno-eksploatacijskom zdencu ZŠ-3/16, mjerenje izvedeno 24.11.2016 (FIL.B.IS. projekt d.o.o., 2016) 10

Slika 2-8 Dijagram kolebanja nivoa vode tijekom crpljenja sa stalnom crpnom količinom u istražno-eksploatacijskom zdencu ZŠ-3/16, mjerenje izvedeno 25.11.2016 – 28.11.2016 (FIL.B.IS. projekt d.o.o., 2016) 11

Slika 3-1 Dijagram sniženja u odnosu na vrijeme kod pokusnog crpljenja s: (a) isprekidanim koracima, (b) uzastopnim koracima (Misstear, et al., 2006) 13

Slika 3-2 Permeametar sa stalnom razinom vode (Urumović, 2003) 19

Slika 3-3 Permeametar s promjenjivom razinom vode (Urumović, 2003) 20

Slika 4-1 Uzorak (8-9 m) 21

Slika 4-2 Sušenje uzorka 22

Slika 4-3 Granulometrijski dijagram 23

Slika 4-4 Dijelovi ćelije permeametra 25

Slika 4-5 Postupak četvrtanja 26

Slika 4-6 Sastavljanje ćelije 27

Slika 4-7 Ugradnja uzorka 28

Slika 4-8 Spajanje ćelije na manometar, spremnik za vodu i vakumsku pumpu 29

Slika 4-9 Saturacija uzorka 30

Slika 4-10 Mjerenja 31

Slika 5-1 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta 33

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Litološki sastav nabušenih naslaga istražno-eksploatacijskog zdenca ZŠ-3/16, (FIL.B.IS projekt d.o.o., 2016) 8

Tablica 3-1 Preporuke načina određivanja hidrauličke vodljivosti i propusnosti zrna prema litološkome sastavu i veličini vodljivosti (prema Bowlesu, 1984) 17

Tablica 4-1 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem 23

Tablica 5-1 Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna (d_{10}, d_{20} i d_{60}) 32

Tablica 5-2 Udio glavnih granulometrijskih frakcija uzorka 32

Tablica 5-3 Izračun hidrauličke vodljivosti 32

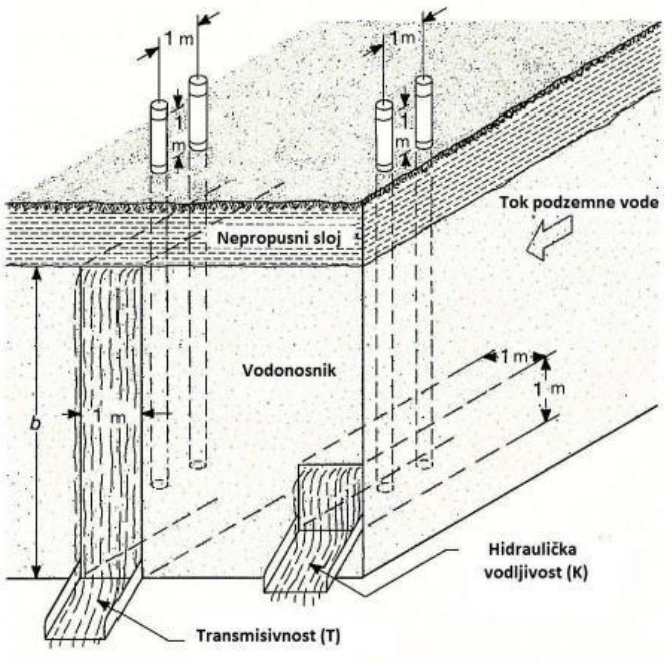
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

K	hidraulička vodljivost	(m/s)
F	površina protjecanja	(m^2)
i	hidraulički gradijent	(-)
L	procjeđivanje	(m^2/s)
K_v	vertikalna hidraulička vodljivost	(m/s)
K_h	horizontalna hidraulička vodljivost	(m/s)
Q	protok	(m^3/s)
C_H	0.0116 (za K izražen u m/s)	(-)
C	0.0036 (ako je K izražen u m/s)	(-)
C	0.00574 (ako je K izražen u m/s)	(-)
d_{10}	efektivni promjer zrna (mm); u sitima 90% zrna većeg promjera i 10% zrna manjeg promjera od d_{10}	(mm)
d_{20}	efektivni promjer zrna (mm); u sitima 80% zrna većeg promjera i 20% zrna manjeg promjera od d_{20}	(mm)
$d_e = d_{10}$	efektivni promjer zrna	(mm)
T	temperatura vode	(°C)
c	bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje značajke stijene (poroznost, zbijenost, oblik zrna o čemu ovisi geometrija pore)	(-)
D	promjer pore kroz koju se fluid filtrira	(m)
g	ubrzanje zbog Zemljine sile teže	(m/s^2)
φ_v	gustoća fluida	(kg/m^3)
η	dinamički viskozitet fluida	(Pa・s)
h	piezometarska razina	(m)
t	vrijeme	(s)
A	površina poprečnog presjeka uzorka	(m^2)
L	duljina	(m)

1. UVOD

Zadatak ovog diplomskog rada bio je određivanje hidrauličke vodljivosti: (1) metodom permeametra sa stalnom razinom, (2) te određivanje hidrauličke vodljivosti metodama temeljenih na empirijskim formulama u koje je uključena i granulometrijska analiza.

Hidraulička vodljivost (eng. hydraulic conductivity), K može se definirati kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne stijene jedinične površine (F = 1 m^2) uz jedinični hidraulički gradijent tj. pad potencijala za 1 m na udaljenosti od 1 m u smjeru tečenja podzemne vode (Slika 1-1). Ima dimenziju L/T, npr. m/s, m/dan, cm/s. Hidraulička vodljivost ovisi o značajkama stijene kroz koju se fluid infiltrira i o značajkama fluida koji se infiltrira (Bačani, 2006).



Slika 1-1 Hidraulička vodljivost (iz Driscoll, 1987)

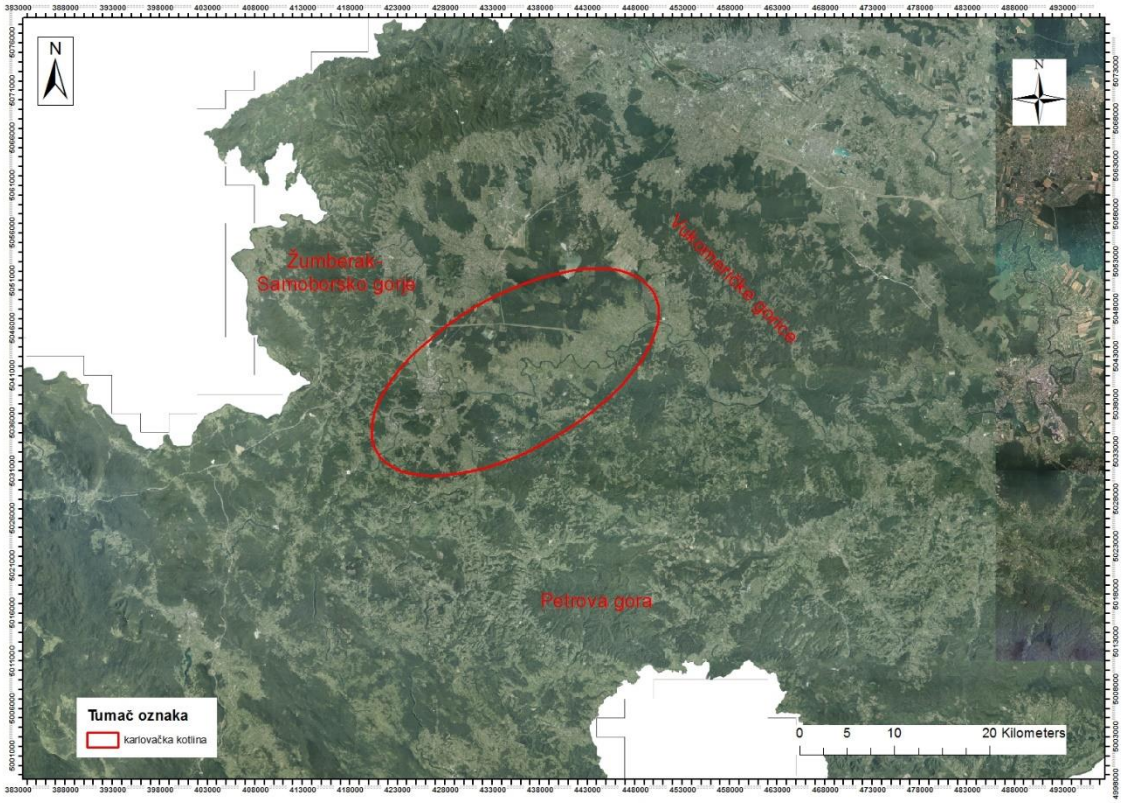
Za određivanje hidrauličke vodljivosti najčešće se koriste terenske i laboratorijske metode, te metoda temeljena na empirijskim formulama. Laboratorijske metode izvode se pomoću permeametra s promjenjivom razinom te sa stalnom razinom. U ovom radu opisana je i provedena metoda permeametra sa stalnom razinom. Također je opisana terenska metoda pokusnog crpljena, gdje se određuje transmisivnost, a dijeljenjem s debljinom sloja određuje hidraulička vodljivost.

Cilj istraživanja je dobivanje hidrauličke vodljivosti holocenskih naslaga na užem području vodocrpilišta Švarča na temelju permeametra sa stalnom razinom i empirijskim formulama.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

2.1 Geografski položaj

Karlovačka kotlina dužine je oko 30 km i širine 25 km. Nadmorska visina joj iznosi od 110 do 130 m n. m. Najniži dijelovi kotline nalaze se sjeveroistočno od Karlovca na prostorima naplavnih i močvarnih ravnica Draganićke šume i Crne Mlake. Sjeveroistočno kotlinu omeđuju Vukomeričke gorice, sa sjeverozapada Žumberačko gorje, s jugoistoka brežuljkasti ogranci Petrove gore, dok se južno od Kupe rubni dijelovi kotline uzdižu u karlovačko nisko pobrđe (Slika 2-1). Najveći dio kotline smješten je sjeverno od Kupe i lepezasto se širi uz njene lijeve pritoke. Od njih je najveća Kupčina sa Žumberka koja se u Kupu ulijeva nizvodno od Karlovca i čini granicu prema Zagrebačkoj Županiji. Riječna mreža je vrlo bogata jer na malom prostoru Kupa prima brojne pritoke među kojima su i veliki desni iz krškog područja – uzvodno od Karlovca to je Dobra, a u samom gradu Korana s Mrežnicom (Slika 2-2). S desne, južne strane Kupe prostiru se brežuljci s terasastim zemljištem koji prema jugu i zapadu prelaze u krške predjele.

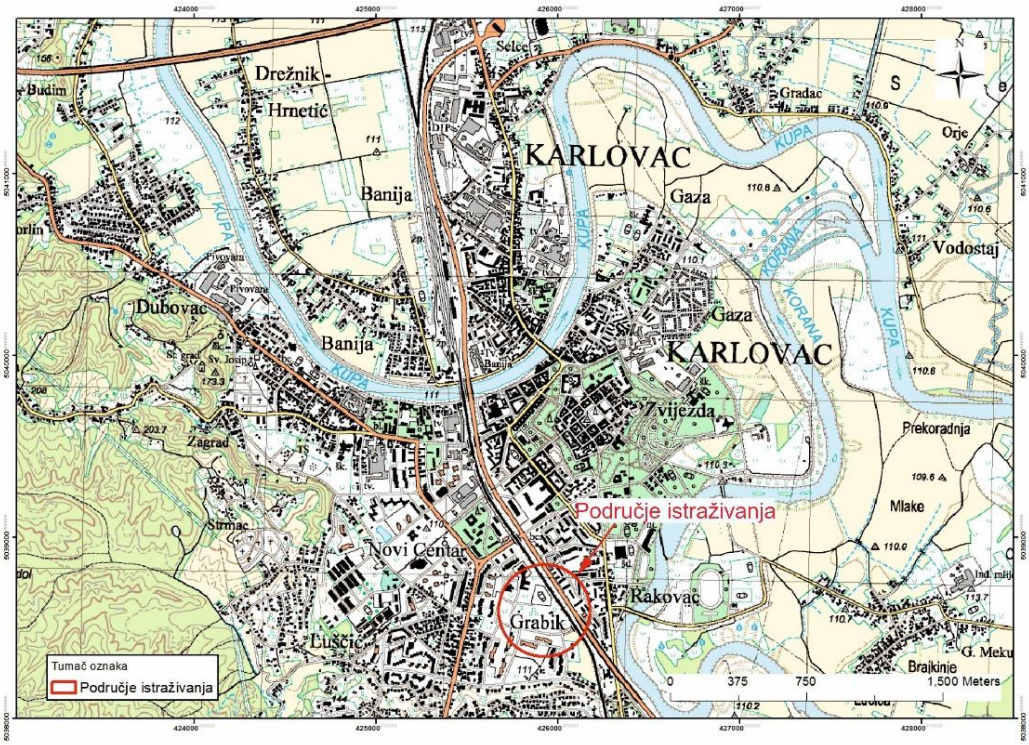


Slika 2-1 Karlovačka kotlina



Slika 2-2 Pritoke Kupe (http://www.matica-hrvatska-karlovac.hr/stapek.pdf)

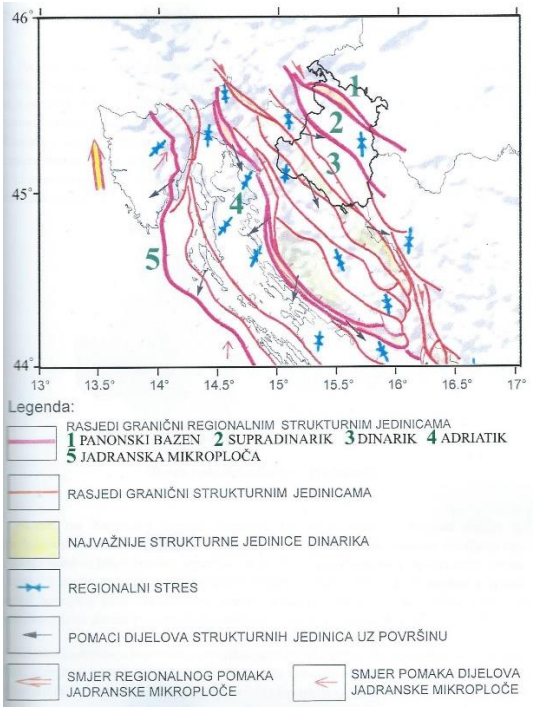
Mikrolokacija istražno-eksploatacijskog zdenca ZŠ-3/16 nalazi se u središnjem dijelu grada Karlovca na prostoru izvorišta Švarča (Grabrik) izvan ograđene I zone sanitarne zaštite. Udaljen je ≈ 630 m od lijeve obale rijeke Korane i ≈ 1180 m od desne obale rijeke Kupe.



Slika 2-3 Područje istraživanja

2.2 Geologija

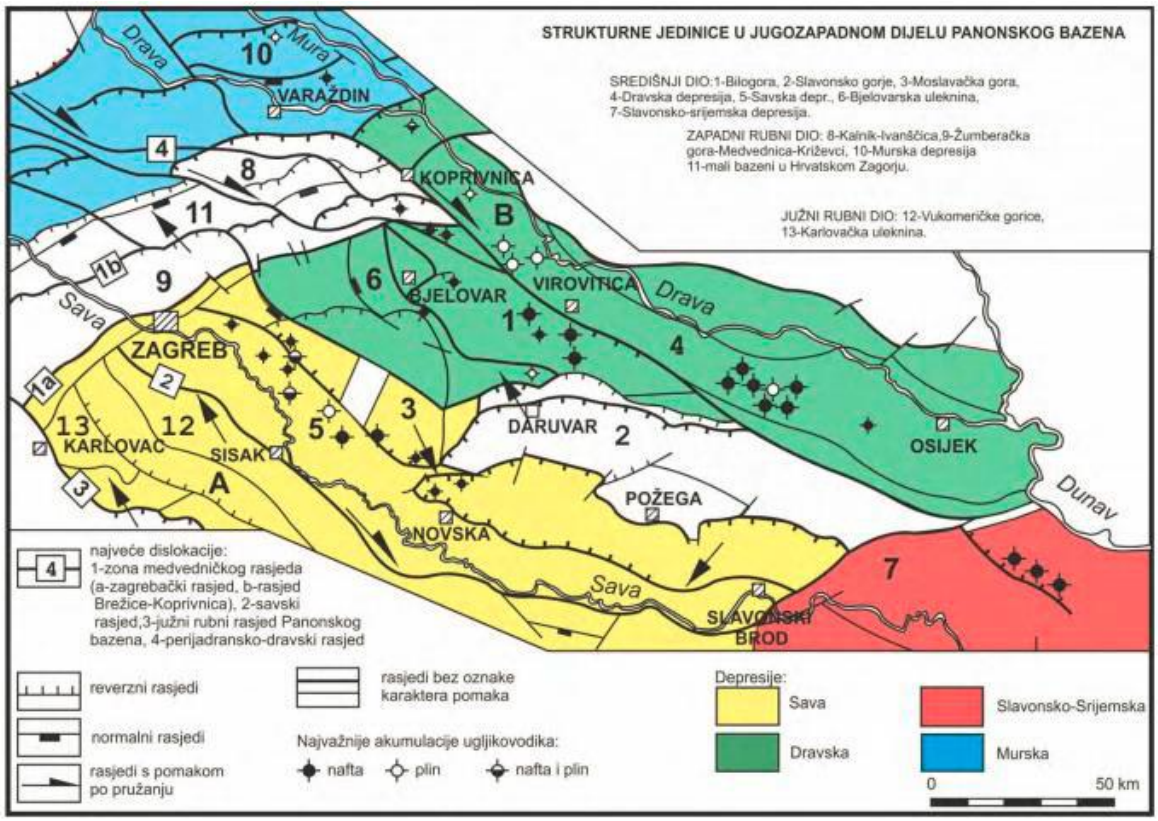
Na području Hrvatske razlikuju se tri osnovne regionalne strukturne jedinice: Jadranska mikroploča, Dinaridi (Adriatik, Dinarik i Supradinarik) i Panonski bazen, od kojih su na području Karlovca zastupljene: Panonski bazen i Supradinarik. Granica Panonskog bazena i Supradinarika na području Karlovačke kotline je rasjed Črnomelj-Karlovac-Glina (Slika 2-4).



Slika 2-4 Regionalne strukturne jedinice (Kovačević, 2005)

U širem smislu prema geotektonskoj koncepciji Dinarida (Herak, 1986 i 1991) istražni prostor pripada u strukturni kompleks Unutrašnji Dinaridi (Supradinarik), njegov jugozapadni dio graniči sa strukturnim kompleksom Dinarske karbonatne platforme (Dinarik).

U užem smislu istražno područje nalazi se u Karlovačkom bazenu, a smješteno je u rubnom jugozapadnom dijelu depresije u porječju rijeka Kupe i Korane.

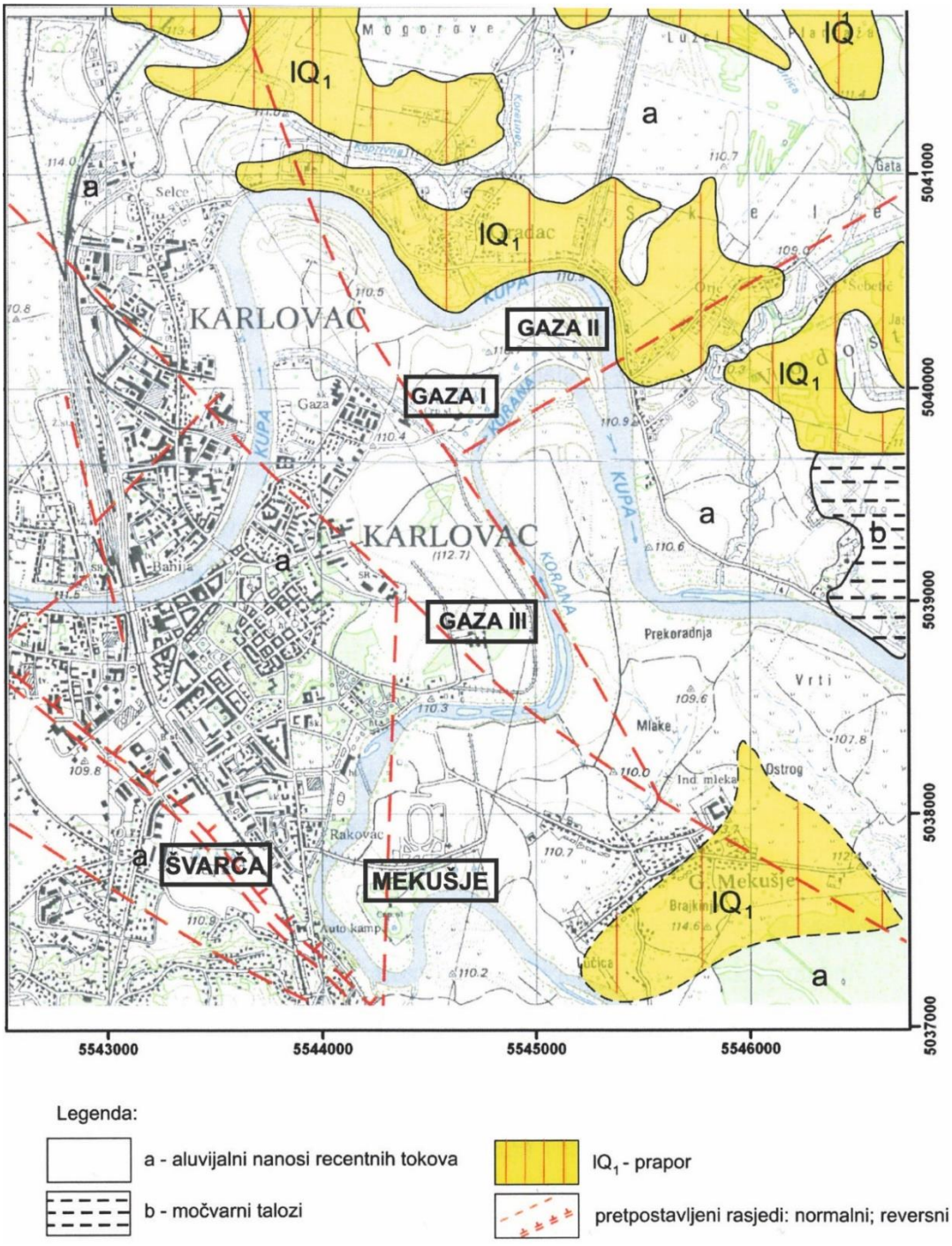


Slika 2-5 Razvrstavanje struktura hrvatskog dijela Panonskog bazena (Prelogović et al., 1998; Lučić et al., 2001; Velić et al., 2011)

Karlovački bazen predstavlja perifernu pojavu Panonskog bazena (Slika 2-5), tj. mali, djelomično izolirani neogenski bazen smješten u sjeverozapadnom kutu puno većeg Savskog bazena. Oblikovanje Karlovačkog bazena je neogenske starosti. Za vrijeme ekstenzijskih pokreta u neogenu uništene su dotadašnje strukture stijena predneogenske starosti. Podloga je razlomljena i kasnije prekrivena mladim taložinama, uključujući i kvartarne. Najdublje dijelove središnjeg dijela bazena čine paleozojski klastit, trijaski klastit i dolomiti, jurske karbonatne naslage i kredni vapnenci i klastiti. Neogenske taložine koje zapunjavaju bazen rezultat su četiri sedimentacijska ciklusa u miocenu koji čine transgresivno-regresivne sekvencije (egenburg-otnang, karpat, baden-sarmat i panon-pont), a posljedica su izmjenjujućih faza ekstenzija i kompresija. To su lapori, gline, pješčenjaci i litotamnijski vapnenci. Na njih su taloženi pliocenski pijesci, šljunci, gline, zaglinjeni pijesci i konglomerati (u zadnjem pliocensko-kvartarnom ciklusu odlažu se uglavnom riječno-barski sedimenti u izmjenama krupnih i finoklastičnih materijala). U pleistocenu prevladavaju gline i siltovi kopnenog i barskog lesa. Debele taložine kvartara prekrivaju centralni dio bazena (Kovačević, 2005).

2.2.1 Geološka građa istraživanog prostora

Na širem području vodocrpilišta Švarča površinski pokrivač je uglavnom od najmlađih kvartarnih naslaga. Osnovna obilježja rekonstruirana su na temelju podataka iz Osnovne geološke karte, list Karlovac 1:100 000, Hrvatski geološki institut (nepublicirano) i Geološke karte Republike Hrvatske 1:300 000. Od litostratigrafskih jedinica izdvojeni su: prapor (IQ_1), močvarni talozi (b) i aluvijalni nanosi recentnih tokova (a) (Slika 2-6).



Slika 2-6 Geološka karta karlovačkog područja (Kolaković, 2011)

Prapor (IQ_1)

Naslage prapora nalazimo u obliku nepravilnih izoliranih površina u sjeveroistočnom i krajnjem jugoistočnom dijelu područja obuhvaćenog geološkom kartom (Slika 2-6). Ove taložine su vjetrom donošene u zamočvarena područja te su miješani s organogeno-barskim sedimentima. U sastavu prevladava prah, dok je udio gline i prašinastog pijeska manji.

Močvarni talozi (b)

Ove taloge nalazimo na krajnjem istočnom dijelu terena. Vezani su za ograničena područja močvara. U reduktivnim uvjetima taložene su organogene gline s manjim udjelom praha. Predstavljaju bočni ekvivalent praporima. Debljine su 2-3 m.

Aluvijalni nanosi recentnih tokova (a)

Predstavljaju glavninu područja obuhvaćenog geološkom kartom (Slika 2-6). Nalazimo ih u dolinama glavnih vodotokova gdje su tim naslagama izgrađena najvažnija vodocrpilišta s međuzrnskom poroznošću. U ovim naslagama prevladavaju šljunci, pijesci, prah i gline. Na površini terena prevladavaju prahovite i sitnozrne gline koje naliježu preko šljunčano pjeskovitog sloja, debljine najčešće od 3-5 m, rijetko do desetak metara. Često je miješanje litotipova u svim omjerima kako lateralno tako i vertikalno. Prevladavaju zrna i valutice vapnenca, dolomita, pješčenjaka i škriljavca.

2.2.2 Strukturni odnosi

Cijelo područje obuhvaćeno geološkom kartom Slika (2-6) odlikuje se jednostavnom geološkom građom na površini i vjerojatno vrlo zamršenim strukturnim odnosima u dubini. Kvartarni sedimenti koji predstavljaju krovinu vodonosnika i vodonosnik istaloženi su iz voda tekućica i njihovi slojevi generalno imaju vodoravan položaj. Svi rasjedi prikazani na geološkoj karti pretpostavljeni su na temelju odnosa struktura koje se prepoznaju lateralno od obuhvaćenog terena.

2.2.3 Litostratigrafske karakteristike nabušenih naslaga

Istražno-eksploatacijski zdenac ZŠ-3/16 (Švarča) izbušen je do dubine od -16,00 m. Litološki sastav probušenih naslaga prikazan je u tablici 2-1.

Tablica 2-1 Litološki sastav nabušenih naslaga istražno-eksploatacijskog zdenca ZŠ-3/16, (FIL.B.IS projekt d.o.o., 2016)

Interval (m)	Litološki opis
0,00 — - 2,00	Gline, prahovite i malo pjeskovite, smeđe i sivkastosmeđe boje, naslage su dosta limonitizirane.
- 2,00 — - 4,00	Prahovi, pjeskoviti i glinoviti, pred kraj intervala malo šljunkoviti, valutice i ulomci su srednje i slabo zaobljeni, uglavnom su 0,2 – 2,0 cm, neke do 4,5 cm, naslage su limonitizirane, boje sivkastosmeđe i žućkastosmeđe.
- 4,00 — - 7,00	Šljunci, pjeskoviti, ponegdje malo prahoviti, na početku i kraju intervala neznatno zaglinjeni, limonitizirani su, boje sivkastosmeđe i žućkastosmeđe, valutice su srednje zaobljene, uglavnom su 0,2 – 3,0 cm, rijetko do 6,0 cm, boja im je bjelkasta, vrlosvijetlosiva, svijetlosiva, siva, tamnosiva, žućkastosiva, žućkastosmeđa i crvenkastosmeđa, izgrađene su od karbonatnih stijena (vapnenci, dolomitični vapnenci, kalcitični dolomiti, dolomiti), kvarca, klastita (pješčenjaci, konglomerati, slejtovi), rjeđe eruptiva.
- 7,00 —- 8,00	Pijesci, šljunkoviti, prahoviti i zaglinjeni, limonitizirani su, žućkastosmeđe i sivkastosmeđe boje, valutice su srednje zaobljene, boje su žućkastosmeđe, žućkstosive, sive, tamnosive, svijetlosive i bjelkaste, veličine najčešće 0,2 – 1,5 cm, rjeđe do 5,00 cm.
- 8,00 —- 9,00	Šljunci, malo pjeskoviti i prahoviti, limonitizirani, boje sivkastosmeđe, valutice su srednje zaobljene, promjera uglavnom 1,0 – 3,0 cm, neke do 7,5 cm, boje sužućkastosmeđe, sive, tamnosive, svjetlosive i bjelkaste.
- 9,00 — - 11,00	Prahovi, pjeskoviti i zaglinjeni, na početku intervala malo šljunkoviti, limonitizirani, boje žućkastosmeđe, valutice su uglavnom 0,2 – 1,0 cm, rijeđe do 2,0 cm, različitih boja, porijeklom su od karbonatnih stijena, klastita i kvarca, a rijeđe od eruptiva.
- 11,00 — - 12,00	Pijesci, prahoviti i zaglinjeni, ponegdje su malo šljunkoviti, naslage su limonitizirane, boje žućkastosmeđe, valutice su uglavnom 0,2 – 1,0 cm, rijetke su preko 1,0 cm.
- 12,00 —- 14,00	Prahovi, zaglinjeni, pjeskoviti, naslage su jače limonitizirane, žućkstosmeđe boje.
- 14,00 — - 16,00	Pijesci, prahoviti i zaglinjeni, šljunkoviti prema kraju intervala, limonitizirani, sivkastosmeđe i žućkastosmeđe boje, valutice i ulomci srednje i slabo zaobljeni, uglavnom su 0,2 – 0,5 cm, rijetko preko 1,0 cm, različitih su boja.

2.3 Hidrogeologija

Prema hidrogeološkim značajkama sedimenti Karlovačke depresije mogu se generalizirano podijeliti na (Barilić, 1998):

1. vodonepropusne sedimente: klastiti mezozoika i paleozoika, lapor tercijarne starosti prašinaste gline kvartara,
2. slabo vodopropusne sedimente: karbonatne stijene mezozoika i neogena te pijesci tercijara i kvartara,
3. dobro vodopropusne sedimente: šljunci i pjeskoviti šljunci, tercijarne i kvartarne starosti.

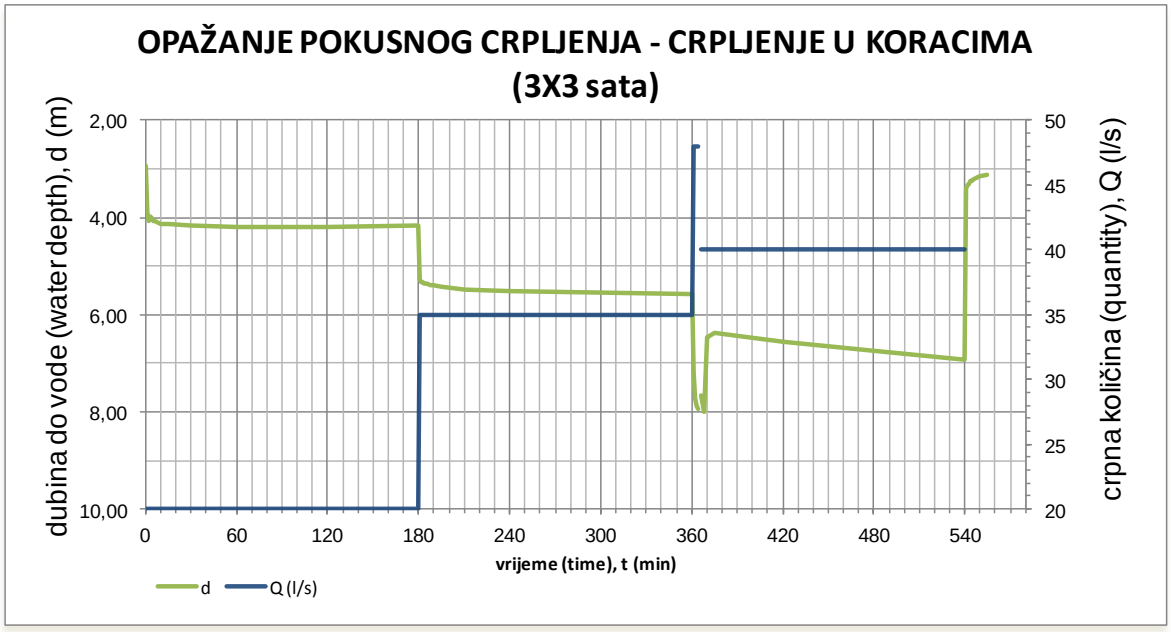
Među njima razlikuju se dvije grupe vodonosnika:

- klastične stijene primarne međuzrnske poroznosti koje ispunjuju Karlovačku depresiju i
- karbonatne stijene sekundarne poroznosti koje izgrađuju rubna gorja (Žumberačko – Samoborsko gorje i Petrova gora) i periferne dijelove Karlovačke depresije.

2.3.1 Hidrogeološke karakteristike istražno-eksploatacijskog zdenca ZŠ-3/16

Pokusno crpljenje istražno-eksploatacijskog zdenca ZŠ-3/16 izvedeno je u periodu od 24.11.2016 – 28.11.2016. Crpljena voda odvedena je privremenim odvodnim cjevovodom dužine ≈ 200 m kako bi se izbjegla hidraulička veza crpljene vode s onom u vodonosnom sloju.

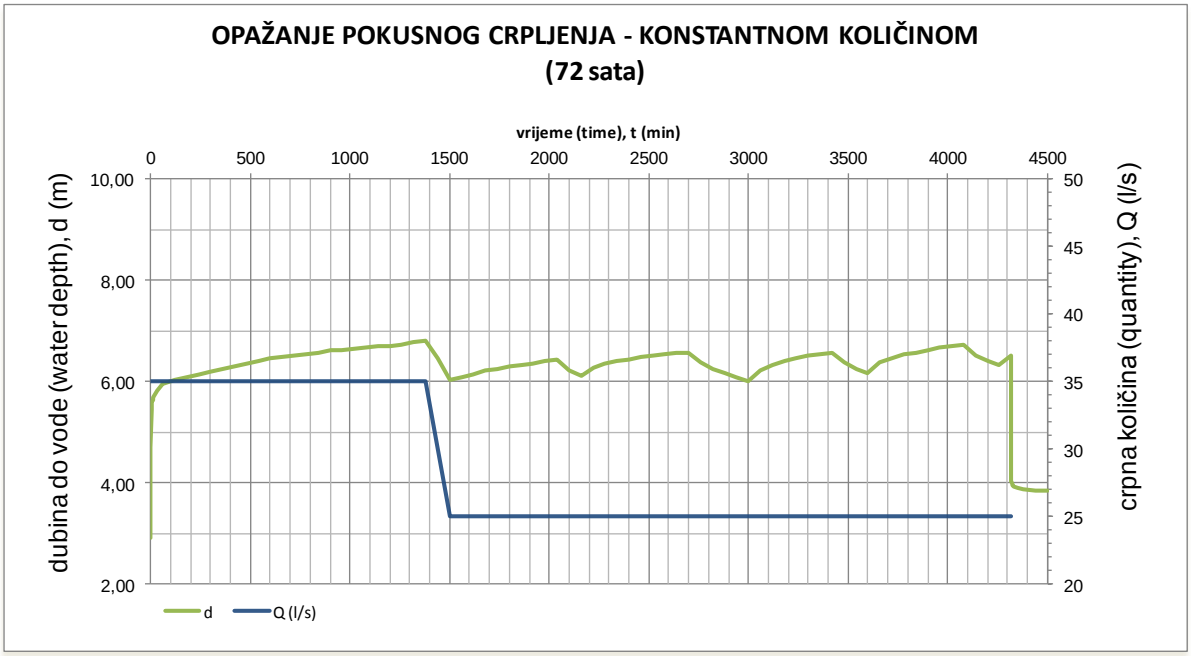
Testiranje je izvedeno u koracima („step – test“) s tri crpne količine (Q_1 = 20 l/s ; Q_2 = 35 l/s i Q_3 = 40 l/s), a vremenski interval za svaki korak iznosio je 180 minuta (FIL.B.IS. projekt d.o.o., 2016).



Slika 2-7 Dijagram kolebanja nivoa vode tijekom crpljenja u koracima u istražno-eksploatacijskom zdencu ZŠ-3/16, mjerenje izvedeno 24.11.2016 (FIL.B.IS. projekt d.o.o., 2016)

Da bi se utvrdile hidrogeološke karakteristike istražno-eksploatacijskog zdenca ZŠ-3/16 izvedeno je crpljenje sa stalnom crpnom količinom („konstant – test“) Q = 35 l/s. Prilikom crpljenja stalnom crpnom količinom razina podzemne vode postigla je ustaljenje (Slika 2-8).

Prilikom pokusnog crpljenja zdenca ZŠ-3/16 uključivali su se stariji zdenci na vodocrpilištu Švarča za potrebe vodoopskrbe grada Karlovca. Zbog toga su prema dogovoru s projektantom (predstavnik Hrvatskih voda) smanjene crpne količine trećeg koraka „step – testa“ te crpna količina „konstant – testa“ (FIL.B.IS. projekt d.o.o., 2016).



Slika 2-8 Dijagram kolebanja nivoa vode tijekom crpljenja sa stalnom crpnom količinom u istražno-eksploatacijskom zdencu ZŠ-3/16, mjerenje izvedeno 25.11.2016 – 28.11.2016 (FIL.B.IS. projekt d.o.o., 2016)

2.3.2 Proračun hidrogeoloških parametara vodonosnika

Hidrogeološki parametri proračunati su korištenjem podataka dobivenih mjerenjem promjena razine podzemne vode u istražno-eksploatacijskom zdencu ZŠ-3/16 (FIL.B.IS. projekt d.o.o.,2016).

Prema Theis povrat metodi vrijednost koeficijenta transmisivnosti iznosi:

- eksploatacijski zdenac ZŠ-3/16 $T = 5929,2\ m^2/dan$

Prema Theis povrat metodi vrijednost hidrauličke vodljivosti iznosi:

- eksploatacijski zdenac ZŠ-3/16 $K = 1,3725*10^{-3}\ m/s$

3. METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

Postoji nekoliko metoda određivanja hidrauličke vodljivosti:

1. terenska metoda pokusnog crpljenja, gdje se određuje transmisivnost T, a dijeljenjem s debljinom sloja određuje hidraulička vodljivost K,
2. laboratorijska metoda – pomoću permeametra,
3. metoda koja se temelji na empirijskim formulama uz korištenje podataka o granulometrijskom sastavu porozne sredine.

Odabir metoda koju ćemo koristiti ovisi o cilju istraživanja i raspoloživim sredstvima. Najtočnija i najskuplja metoda je metoda pokusnog crpljenja. Hidraulička vodljivost određena na uzorku u permeametru predstavlja točkasti podatak, koji ne može biti reprezentativan za najčešće heterogeni prirodni vodonosni sustav. Često korištena metoda je metoda pomoću empirijskih formula (Bačani, 2006).

3.1 Terenska metoda

3.1.1 Pokusno crpljenje

Pokusno crpljenje je najtočnija metoda za određivanje parametara hidrauličke vodljivosti. Provodi se iz nekoliko razloga, kao što su određivanje parametara vodonosnika, provjera kvalitete vode, provjera izdašnosti. Ukratko, pokusno crpljenje može imati dva cilja: određivanje hidrogeoloških parametara vodonosne sredine i parametara zdenca.

Podaci koji se prikupljaju su:

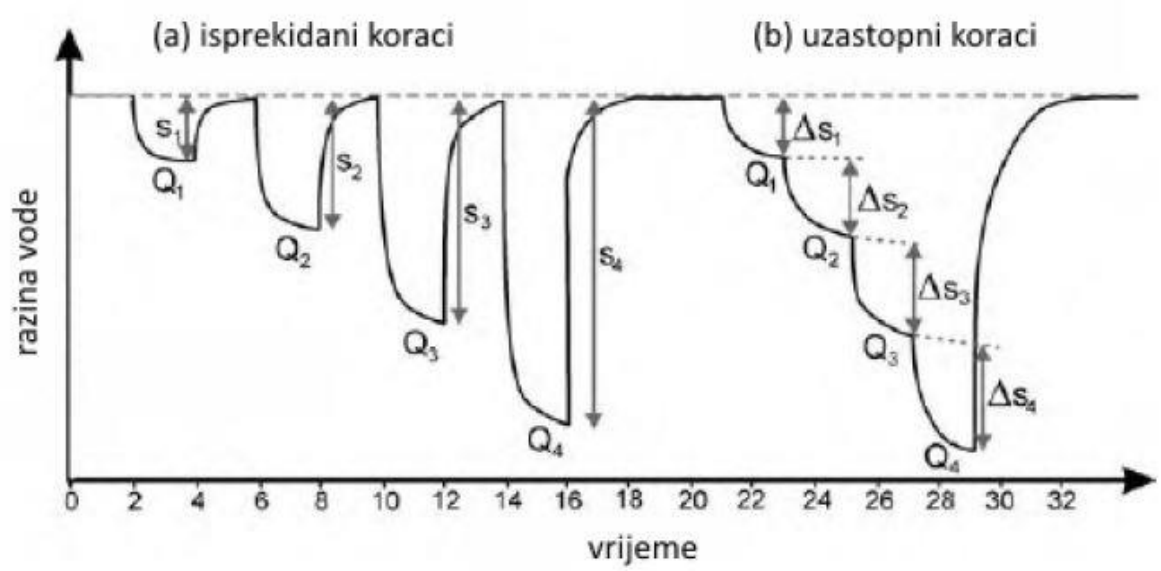
- razina vode u zdencu ili piezometru (h),
- crpna količina (Q),
- vrijeme opažanja (t),
- udaljenost od zdenca (r).

Postupak pokusnog crpljenja počinje crpljenjem vode iz zdenca koji ima filtarski dio u vodonosnom sloju koji želimo testirati. Za vrijeme pokusnog crpljenja mjeri se sniženje razine podzemne vode u vremenu i crpna količina. Učinak crpljenja na piezometarsku visinu opaža se mjerenjem sniženja podzemne vode u crpnom zdencu i opažačkim bušotinama. Najčešći tipovi pokusnog crpljenja su: crpljenje u koracima, crpljenje sa stalnom količinom

te povrat razine vode u crpljenom zdencu nakon prestanka crpljenja. Neke od pretpostavki kod pokusnog crpljenja su: vodonosnik je homogen, izotropan, jednake debljine na području pod utjecajem crpljenja, vodonosnik je neograničenog prostiranja, prije početka crpljenja potenciometrijska ploha je približno horizontalna, radijus zdenca je zanemarivo mali, tok vode je radijalan u horizontalnoj ravnini i količina crpljenja je stalna.

Crpljenje u koracima:

Mjeri se sniženje podzemne vode u zdencu pri različitim crpnim količinama. 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 traju oko dva sata. Crpne količine se povećavaju od početka prema kraju crpljenja. Crpljenje u koracima se provodi uzastopnim ili s isprekidanim koracima (Slika 3-1).



Slika 3-1 Dijagram sniženja u odnosu na vrijeme kod pokusnog crpljenja s: (a) isprekidanim koracima, (b) uzastopnim koracima (Misstear, et al., 2006)

Crpljenje sa stalnom količinom:

Nakon crpljenja u koracima potrebno je određeno vrijeme da bi se stanje u vodonosniku vratilo na svoje početno stanje prije početka crpljenja. Nakon toga slijedi crpljenje sa stalnom količinom. Glavni cilj crpljenja sa stalnom količinom je određivanje parametara vodonosnika: hidrauličke vodljivosti, transmisivnosti i koeficijenta uskladištenja. Vrijeme trajanja ovakvog testiranja je između jednog i deset dana, a ponekad, kada su granični uvjeti vodonosnika kompliciran može trajati i nekoliko tjedana.

Povrat razine vode:

Nakon što crpljenje završi, razina vode u zdencu ili piezometru počinje se vračati na početnu razinu. U početku je povrat razine nagli, a kasnije se usporava.

Hidrogeološki parametri vodonosnog sloja izračunavaju se pomoću određenih formula (analitičkih rješenja jednadžbi toka) u koje uvrštavamo poznate i izmjerene veličine: sniženja u piezometrima, udaljenost piezometara od zdenca i crpnu količinu. Kod zatvorenoga vodonosnog sloja najčešće se koriste Theisova i Jacob – Cooper-ova metoda. Za poluzatvoreni vodonosni sloj koristi se Hantush – Jacobova metoda, a za otvoreni vodonosni sloj sa zakašnjelim otpuštanjem Neumanova metoda.

Prije početka pokusnog crpljenja moraju se utvrditi sve postojeće promjene razine podzemne vode (dugotrajne i kratkotrajne promjene). Nekoliko dana prije početka pokusnog crpljenja treba se barem dva puta dnevno mjeriti razina vode u svim piezometrima. Za svaki piezometar izrađuje se nivogram iz kojeg se može očitati trend i veličina promjene piezometarske visine. Crpljenje počinje kada se ne očekuju veće promjene potencijala za vrijeme trajanja crpljenja. Pokusno crpljenje traje dok se konus depresije ne stabilizira (nekoliko sati do nekoliko dana) tj. dok se ne uspostave stacionarni uvjeti (Bačani, 2006).

3.2 Metode temeljene na empirijskim formulama

Metode određivanja hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama temelje se na korelacijama hidrauličke vodljivosti i granulometrijskog sastava uzoraka materijala vodonosnika.

Najvažnije i najčešće primjenjivane laboratorijske metode određivanja zrna u sedimentima jesu mjerenje, sijanje i sedimentacijska analiza, a sve zajedno obuhvaćene su jednim nazivom granulometrijska analiza (Tišljar, 2004).

Za izračun hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama potrebno je načiniti granulometrijske analize na uzorcima materijala od kojeg je izrađen vodonosni sloj kojeg ispitujemo. Ukoliko se granulometrijski sastav vodonosnog sloja po dubini mijenja, potrebno je uzeti uzorak iz svakog pojedinog intervala unutar koje se sastav ne mijenja, s time da se na uzorku mora označiti za koji interval je uzorak reprezentativan (Bačani, 2006).

Sijanje je najvažnija metoda određivanja veličine čestica sitnozrnatih, šljunčanih, šljunčano-pješčanih i prahovito-pješčanih sedimenata. Uzorak se sije kroz određen broj sita gdje se otvori smanjuju na svakom sljedećem situ odozgo prema dole. Uzorak se podjeli u nekoliko frakcija. Frakcija je onaj dio uzorka koji se zadrži na situ nakon sijanja. Može se provest mokrim i suhim postupkom.

- Suhi postupak: Uzme se određena količina materijala te se usipa na najgrublje sito koje je postavljeno na vrhu. Sita sa uzorkom se tresu oko 10 minuta. Zatim se izvaže ostatak na svakom situ te materijal koji je prošao kroz najfinije sito (na dnu). Uzorak se važe na vagi čija je točnost najmanje 0.1 % od ukupne težine uzorka. Isti se postupak ponavlja za sljedeće sito i za uzorak koje je prosijan kroz zadnje sito.
- Mokri postupak: Taj postupak se koristi kada su na krupna zrna zalijepljene sitne frakcije. Postupak je isti kao pri suhom postupku samo što se na svakom situ materijal ispire, nakon toga suši te važe.

Pri sijanju dobivamo rezultate ostataka na sitima i rezultat prolaza količine materijala kroz sito najmanjih otvora, što se zove prosjev. Analiza se smatra točnom ako se zbroj težina svih ostataka na sitima i prosjeva ne razlikuje od prije sijanja odvagane težine više od 1 %.

3.2.1 Hazen

Hidraulička vodljivost se izračunava na temelju efektivnog promjera zrna:

$$K = C_H \, d^2_{10} \, (0{,}7+0{,}03T) \qquad (3\text{-}1)$$

gdje je:

K – hidraulička vodljivost (m/s),

d_{10} – efektivni promjer zrna (mm), što znači da u toj stijeni ima 90 % zrna većeg promjera i 10 % zrna manjeg od promjera d_{10},

$C_H = 0{,}0116$ (za K izražen u m/s)

T – temperatura vode (°C)

Ovaj izraz može biti korišten ukoliko su ispunjeni sljedeći uvjeti:

$$d_{10} = 0{,}1\text{-}3 \text{ mm} \qquad (3\text{-}2)$$

i ako je koeficijent jednolikosti

$$d_{60} / d_{10} < 5 \qquad (3\text{-}3)$$

Ako Hazenovu formulu usporedimo s izrazom hidrauličke vodljivosti $K = cd^2q_vg / \mu$ onda je očito da Hazenov koeficijent C_H ne odgovara bezdimenzijskome koeficijentu c. Naime, Hazenov koeficijent C_H objedinjuje u sebi i značajke stijene i značajke fluida i ima dimenzije $L^{-1}\ T^{-1}$.

3.2.2 Slichter

$$K = C\ d^2_e \qquad (3\text{-}4)$$

gdje je:

K – hidraulička vodljivost (m/s)

C = 0,00574 (za K u m/s)

$d_e = d_{10}$ – efektivni promjer zrna (mm)

3.2.3 USBR (Miletić i Henrich – Miletić, 1981)

$$K = C\ d_{20}^{2,3} \qquad (3\text{-}5)$$

gdje je:

K – hidraulička vodljivost (m/s)

C = 0,0036 (ako je K u m/s)

d_{20} – efektivni promjer zrna (mm) ili onaj promjer u uzorku od kojeg ima 80% zrna veći promjer i 20 % zrna manji promjer

3.3 Laboratorijske metode

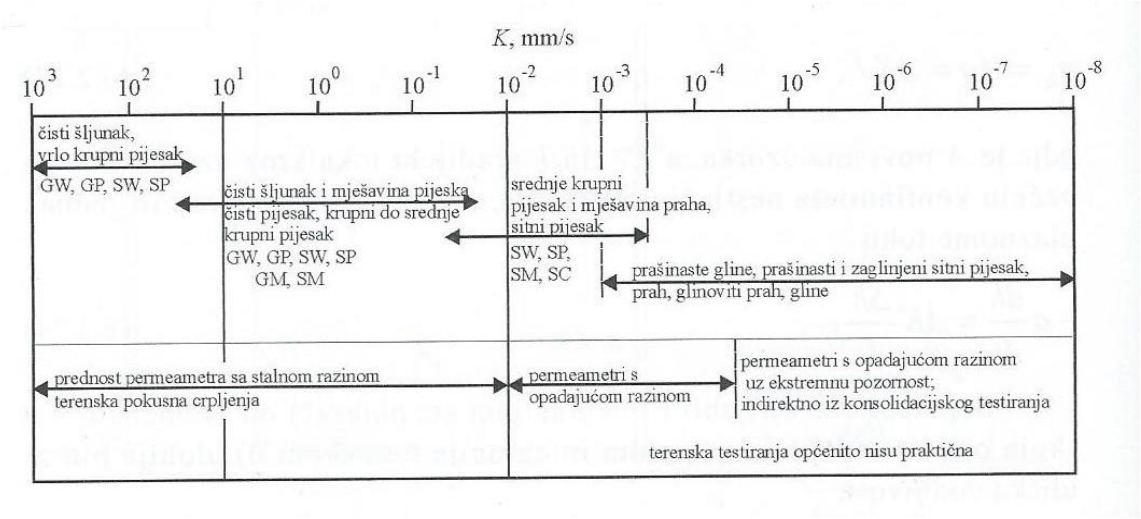
3.3.1 Permeametar

Hidraulička vodljivost se u laboratoriju određuje metodom permeametra sa stalnom razinom ili metodom permeametra sa promjenjivom razinom vode na uzorcima uzetima na različitim točkama vodonosnika. Uzorci su poremećeni jer je njihovo uzimanje praktično neizvedivo bez utjecaja na sredinu (uzimanje uzoraka, transport te postavljanje u posudu za testiranje). Bez obzira na vrstu ili količinu ispitivanog materijala u laboratoriju se ne mogu simulirati potpuno isti uvjeti kakvi su u vodonosniku. Tako se u laboratoriju dobiju manje precizni podaci o vodonosniku kao što bi se dobili pri ispitivanjima in situ. Potrebno je poduzeti sve što je izvedivo kako bi poremećaj bio što manji, a pri korištenju dobivenih podataka treba biti krajnje pažljiv s interpretacijom.

Uzorci se podvrgavaju toku koji se može odvijati pri stalnoj razini (permeametar sa stalnom razinom) ili toku s promjenjivom razinom (permeametar s opadajućom razinom). Za dobro propusne ($K > 10^{-5}$ m/s) materijale koristi se permeametar sa stalnom razinom dok se za slabo propusne ($K < 10^{-5}$ m/s) materijale koristi permeametar s promjenjivom razinom (Tablica 3-1). U oba slučaja voda se može dodavati na vrh ili na dno uzorka.

Hidraulička vodljivost matematički je opisana kao omjer specifičnog protoka (brzine protjecanja) i hidrauličkog gradijenta. Hidraulička vodljivost ovisi o tipu fluida koji protječe odnosno njegovim svojstvima, dinamičkoj viskoznosti fluida i njegovoj gustoći te svojstvu same porozne sredine da omogući protjecanje koja se izražava kao unutarnja propusnost (k [L^2]). Zbog toga se za uzorke gline i praha dobiju različite vrijednosti hidrauličke vodljivosti u ovisnosti o tipu fluida. Unutarnja propusnost samo je svojstvo porozne sredine kojim se opisuje sposobnost protjecanja i nije ovisno o tipu fluida koji protječe poroznom sredinom. Ipak unutarnje propusnosti određene pomoću zraka i vode se razlikuju. Propusnosti određene pomoću zraka općenito imaju veće vrijednosti nego one određene pomoću destilirane vode (de Wiest, 1965). Razlike između vrijednosti propusnosti objašnjavaju se činjenicom da hidratacija gline i drugih minerala gline uzrokuje bubrenje zrna, a time i zatvaranje pora. Na osnovu toga efektivni volumen gline znatno poraste, a rezultat toga je opadanje šupljeg prostora, pa time i propusnosti.

Tablica 3-1 Preporuke načina određivanja hidrauličke vodljivosti i propusnosti zrna prema litološkome sastavu i veličini vodljivosti (prema Bowlesu, 1984)



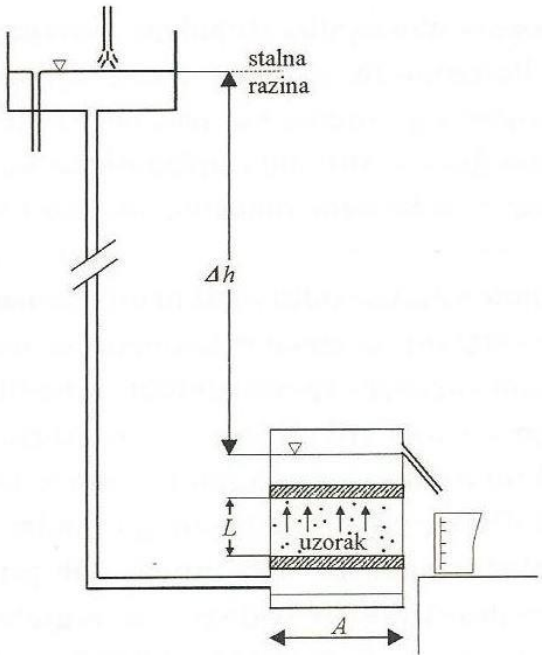
Pri laboratorijskome određivanju hidrauličke vodljivosti permeametrom pojavljuju se brojne poteškoće u dobivanju pouzdanih rezultata. Pri istraživanju te pri interpretaciji rezultata istraživanja treba voditi računa o sljedećim ograničenjima:

- Tla su u prirodi obično uslojena, pa je u laboratoriju teško simulirati stvarne terenske uvjete.
- U pijesku su k_v i k_h zbog deformacijskih uvjeta dosta različiti ($K_h = 10K_v$ do $K_h = 1000K_v$), a takvi prirodni uvjeti se pri uzimanju uzoraka nepovratno gube.
- Male dimenzije terenskih uzoraka dovode do djelovanja rubnih uvjeta, poput tečenja uz glatke strane posude i stvaranja mjehurića zraka u vodi ili obliku zamki zraka u uzorku, što može imati zamjetan učinak na rezultate.
- Metode permeametrom odvijaju se samo u saturiranim uvjetima.
- Kada je K malen (10^{-7} do 10^{-11}), vrijeme potrebno za testiranje lako može uzrokovati evaporaciju i procurivanje opreme, što dovodi do pogreške u veličini hidrauličke vodljivosti K za nekoliko redova veličine.
- Zbog duljine trajanja testa, obično se primjenjuje hidraulički gradijent od 5 ili veći, dok je u prirodi reda veličine od 0.001 do 2.
- U pijesku nerealno visok hidraulički gradijent može stvarati turbulencije, dakle okolnosti toka različite od terenskih pod kojima se odvija laminaran tok.
- Nerealno visok hidraulički gradijent može dovesti do konsolidacije i poroznosti koja je različita od prirodne poroznosti uzorka (Urumović, 2003).

3.3.1.1 Permeametar sa stalnom razinom

U permeametru sa stalnom razinom (Slika 3-2) strujanje je ustaljeno i jednodimenzijsko. Uzorak je izložen stalnoj razlici piezometarske razine Δh, koja osigurava stalnu količinu toka Q, mjerljivu na donjem preljevu. Pri takvim uvjetima i dužini uzorka L, te površini presjeka uzorka A, hidraulička vodljivost i unutarnja propusnost mogu se izravno odrediti iz Darcyjevog zakona (Urumović, 2003).

$$K = \frac{QL}{A\Delta h} = k\frac{qg}{\mu} \qquad (3\text{-}6)$$



Slika 3-2 Permeametar sa stalnom razinom vode (Urumović, 2003)

Permeametar sa stalnom razinom koristi se za određivanje hidrauličke vodljivosti dobro propusnih materijala. Voda se dodaje na dno ili na vrh uzorka. Uzorak obično ima oblik pravilnog kružnog cilindra, a smješten je između dviju poroznih ploča zanemarivog otpora. Prije testiranja mora biti potpuno saturiran destiliranom vodom i ne smije sadržavati mjehuriće plina, kako bi se minimalizirali učinci zarobljenog zraka i strane tvari u šupljinama. Pri normalnim okolnostima, u vodi ipak postoji određeni sadržaj otopljenog zraka (oko 20 litara po m^3 vode pri sobnoj temperaturi i atmosferskome tlaku (Urumović, 2004).

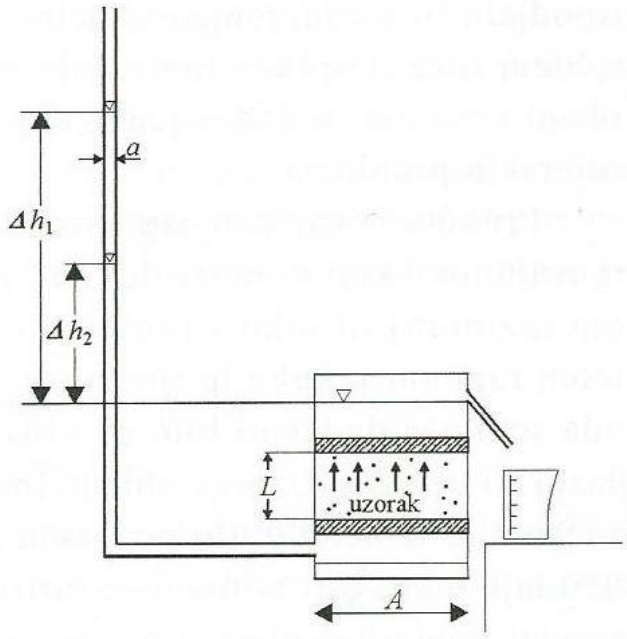
Da bi određivanje hidrauličke vodljivosti bilo sigurnije potrebno je načiniti nekoliko testova s različitim veličinama stalne razlike Δh piezometarske razine odnosno različitim hidrauličkim gradijentima između gornjeg vodospremnika i donjeg preljeva. Graf odnosa Darcyjeve brzine i hidrauličkog gradijenta pokazuje da li se sustav nalazi u linearnom toku (kada su točke na pravcu) ili turbulentnom toku (kada točke počnu odstupati od pravca). Eksperiment traje toliko dugo dok se odnos između hidrauličkog gradijenta i specifičnog protoka ne postaje nelinearan jer ukazuje da se je izašlo iz područja valjanosti Darcyjevog zakona tj. laminarnog toka. Valjanost tog zakona se može provjeriti Reynoldsovim brojem. U praksi se često uzima da linearni tok prelazi u turbulentni tok kod Reynoldsovog broja između 1 i 10 (Bear & Verriujt, 1987). Ovaj podatak nije toliko pouzdan koliko grafički

prikaz odnosa Darcyeve brzine i hidrauličkog gradijenta jer nekad i za Re > 10 graf *q-i* pokazuje linearnost.

3.3.1.2 Permeametar sa promjenjivom razinom

Permeametar sa promjenjivom razinom vode obično se primjenjuje kada je nužno dobiti relativno visoke razine vode, a posebno je prikladan za određivanje hidrauličke vodljivosti sitnozrnastih materija (Lee et Fetter, 1994). Za njih je potrebno dobiti relativno velike hidrauličke gradijente. Količina protjecanja vode kroz uzorak određuje se opažanjem iznosa pada visine vode u uspravnoj cijevi (Slika 3-3). Tijekom vremena t_1 visina vode opadne s njezine inicijalne visine Δh_1 na Δh_2 .

Kao i kod permeametra sa stalnom razinom, voda se može dodati na dno ili na vrh uzorka. Uzorak obično ima oblik pravilnog kružnog cilindra, a smješten je između dviju poroznih ploča zanemarivog otpora (Urumović, 2003).



Slika 3-3 Permeametar s promjenjivom razinom vode (Urumović, 2003)

4. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

Uzorak (Slika 4-1) za određivanje hidrauličke vodljivosti uzet je iz bušotine ZŠ-3/16 u središnjem dijelu grada Karlovca, na maloj livadi pored Dječjeg vrtića Grabnik (koordinate lokacije 15°32'58" (istok) i 45°29'75" (sjever)). Dubina istražno-eksploatacijskog zdenca ZŠ-3/16 je 16 m.



Slika 4-1 Uzorak (8-9 m)

Tijek izvedbe eksperimenta:

1. uzimanja uzorka za testiranje iz jezgrovanog materijala pri izradi bušotine (Slika 4-1),
2. priprema uzorka za testiranje, sušenjem u laboratoriju (Slika 4-2) ,
3. granulometrijska analiza sijanjem,
4. korelacija hidrauličke vodljivosti i granulometrijskog sastava na osnovu empirijskih formula,
5. eksperimentalno laboratorijsko određivanje hidrauličke vodljivosti, permeametrom sa stalnom razinom.



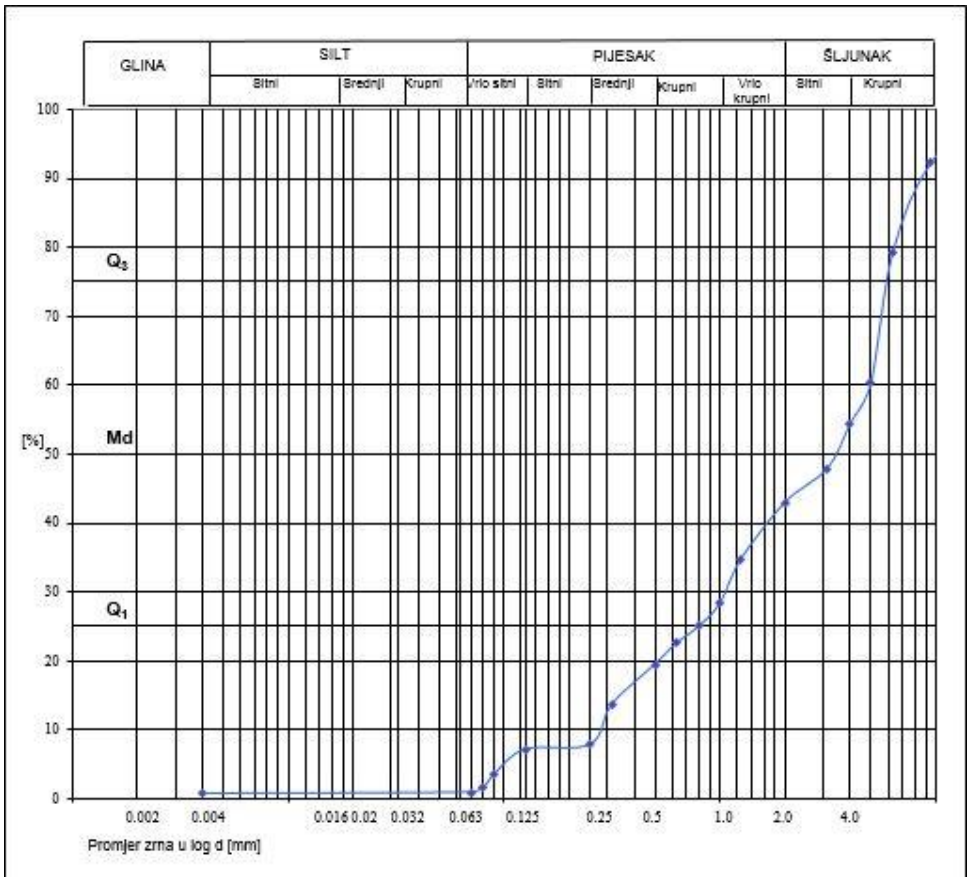
Slika 4-2 Sušenje uzorka

4.1 Granulometrijska analiza sijanjem i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama

4.1.1 Granulometrijska analiza sijanjem

Najprije su izvagana sva pojedina sita te uzorak. Za suho sijanje korištena su krupna sita (veličine otvora 19 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 5 mm, 4 mm i 3,15 mm) i mikrosita (2 mm, 1,25 mm, 1 mm, 0,8 mm, 0,63 mm, 0,5 mm, 0,315 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,09 mm, 0,08 mm, 0,071 mm i 0,004 mm). Sita su postavljena jedna ispod drugog tako da se otvori smanjuje prema dolje. Uzorak se usipao na najgornje sito te su se sva sita tresla oko 10 minuta. Nakon toga su izvagana pojedina sita sa uzorkom koji je ostao na njima.

Nakon toga je napravljena granulometrijska krivulja. Iz nje se mogu očitati udjeli bilo kojih frakcija, a prikazuje cjelokupan sastav i raspored zrna, pa se iz nje mogu izračunati i očitati važni granulometrijski koeficijenti (Tišljar, 2004).



Slika 4-3 Granulometrijski dijagram

Tablica 4-1 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem

d sita [mm]	Masa sita (g)	Masa sita i uzorak (g)	Masa (g)	[%]	Kumulativno [%]
19.000	589.9	1681.7	1091.80	7.68	100.00
9.500	537.2	2400.40	1863.20	13.11	92.32
6.300	494.8	3178.20	2683.40	18.88	79.21
5.000	433.1	1279.50	846.40	5.95	60.33
4.000	464.3	1382.40	918.10	6.46	54.38
3.150	434.2	1135.30	701.10	4.93	47.92
2.000	404.4	1572.70	1168.30	8.22	42.98
1.250	524.3	1435.90	911.60	6.41	34.76
1.000	379.6	850.90	471.30	3.32	28.35
0.800	373.9	726.20	352.30	2.48	25.03
0.630	358.2	790.90	432.70	3.04	22.55
0.500	294.8	1126.30	831.50	5.85	19.51
0.315	380.9	1210.70	829.80	5.84	13.66
0.250	336.2	435.90	99.70	0.70	7.82
0.125	339.5	852.60	513.10	3.61	7.12
0.090	358.8	642.60	283.80	2.00	3.51
0.080	352.0	438.10	86.10	0.61	1.51
0.071	330.5	358.7	28.2	0.20	0.91
0.004	360.1	461	100.9	0.71	0.71
			14213.30	100.00	

4.1.2 Empirijske formule

Hazen:

$$K = C_H \, d^2_{10} \, (0{,}7+0{,}03T) = 0{,}0116 \cdot 0{,}28^2 \, (0{,}7 + 0{,}03 \cdot 22) = 1{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \qquad (4\text{-}1)$$

USBR:

$$K = C \, d_{20}^{2,3} = 0{,}0036 \cdot 0{,}5^{2,3} = 7{,}3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \qquad (4\text{-}2)$$

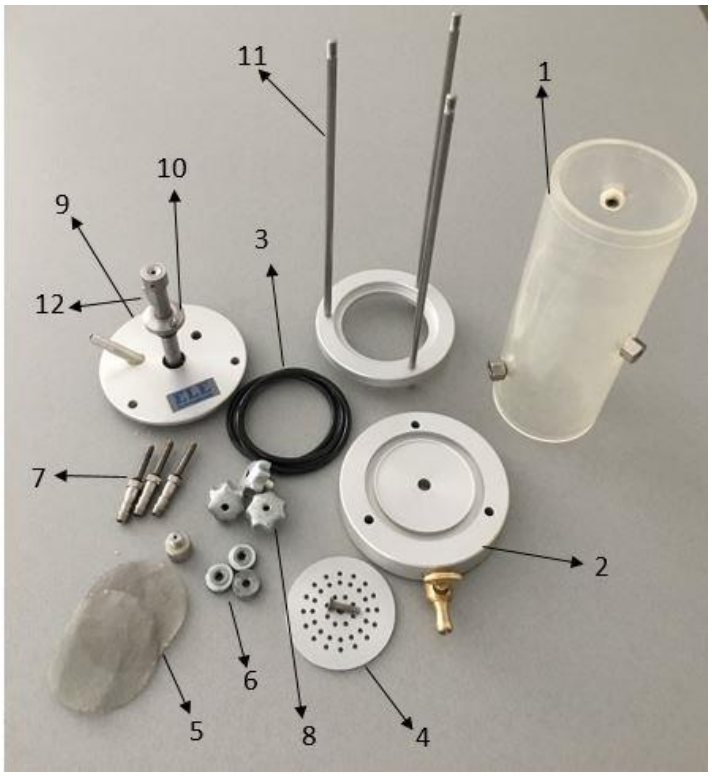
Slichter:

$$K = C \, d^2_e = 0{,}00574 \cdot 0{,}28^2 = 4{,}5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \qquad (4\text{-}3)$$

4.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom

Eksperiment je napravljen prema ispitnoj normi ASTM D2434 – 68. Norma nalaže da se iz uzorka moraju ukloniti zrna veća od 19 mm i da u uzorku ne mije biti više od 10% čestica manjih od 75 μm. Korišteni parametar je standardnih dimenzija tj. udaljenost između manometra je uvijek ista, a širina poprečnog presjeka ćelije je stalna. Mjeri se razlika piezometarske visine za svaku promjenu hidrauličkog gradijenta i vrijeme potrebno da kroz uzorak prođe voda određenog volumena.

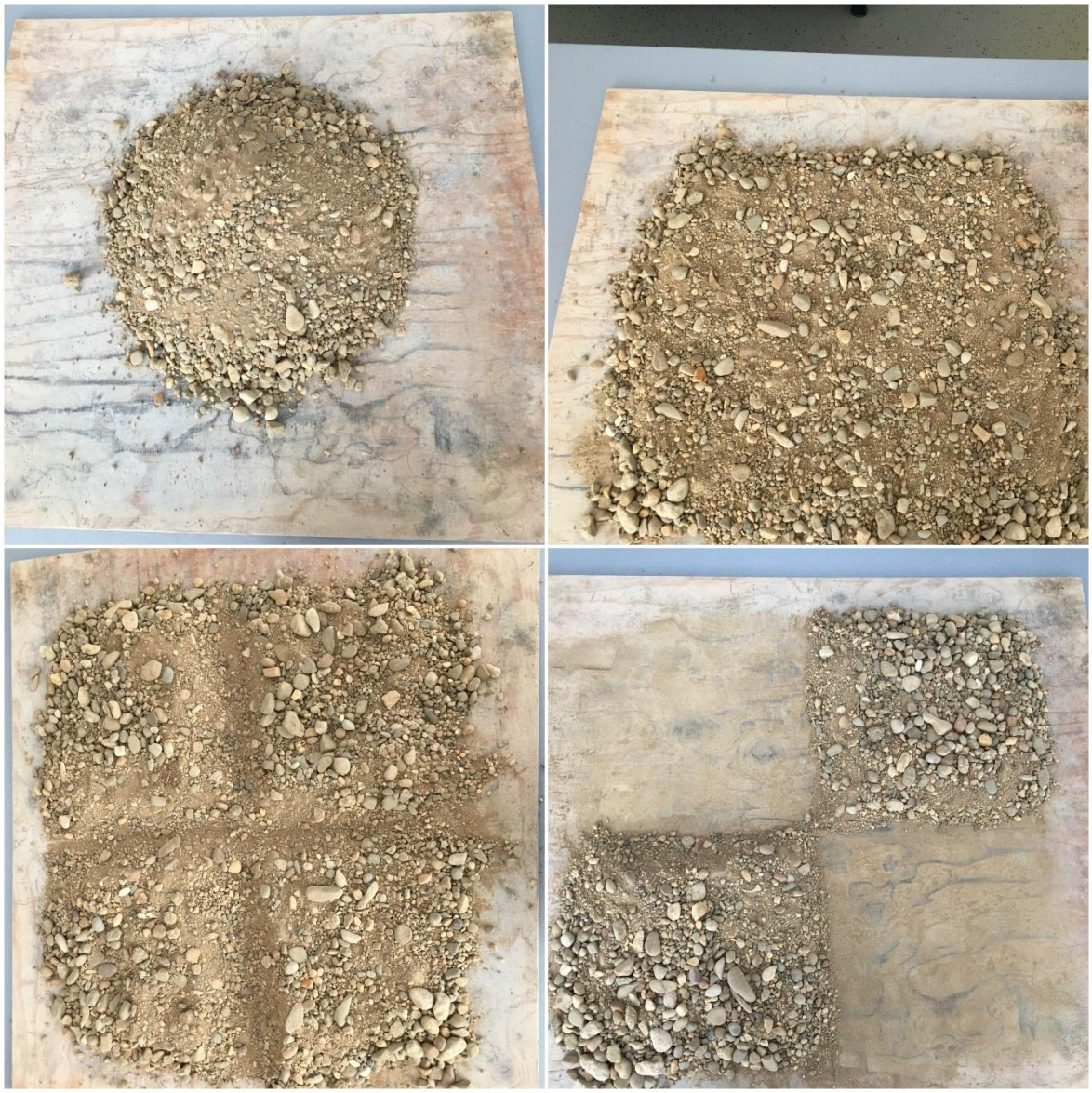
Izmjere se dimenzije ćelije: udaljenost između manometra L (m), srednju vrijednost unutarnjeg promjera ćelije D (m) i poprečni presjek A (cm^2). Dijelovi ćelije su prikazani na slici (4-4).



(1) ćelija permeametra,
(2) donja bazna ploča sa ventilom,
(3) gumice,
(4) porozni disk,
(5) filterske mrežice,
(6) donji navoji,
(7) manometarske spojnice,
(8) gornji navoji,
(9) gornja ploča sa otvorom,
(10) potisni klip,
(11) tronožac za učvršćivanje,
(12) odzračni ventil.

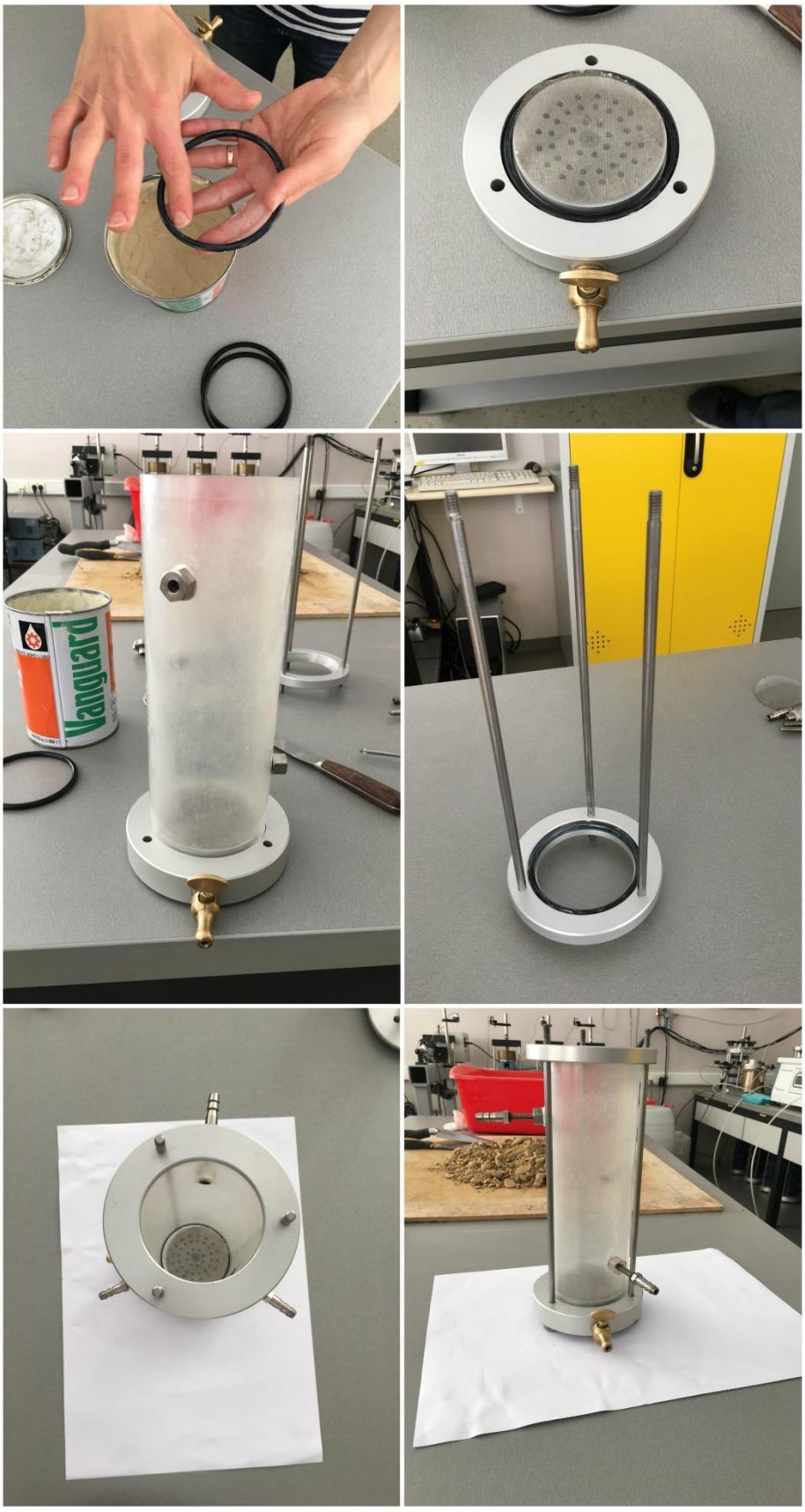
Slika 4-4 Dijelovi ćelije permeametra

Postupak počinje četvrtanjem uzorka da bi se dobio reprezentativni uzorak. Provodi se tako da se izdvoji određena količina materijala te rasporedi na ravnoj i čistoj površini. Razdjeli se na četiri jednaka dijela, te se od svakog dijela uzimaju uzorci sa suprotnih strana. Uzimamo taj uzorak te ga ponovno rasporedimo na ravnoj ploči, razdijelimo na četiri jednaka dijela te uzimamo uzorke sa suprotnih strana. Postupak se ponavlja dok se ne dobije uzorak čiji je volumen dva puta veći od volumena ćelije.

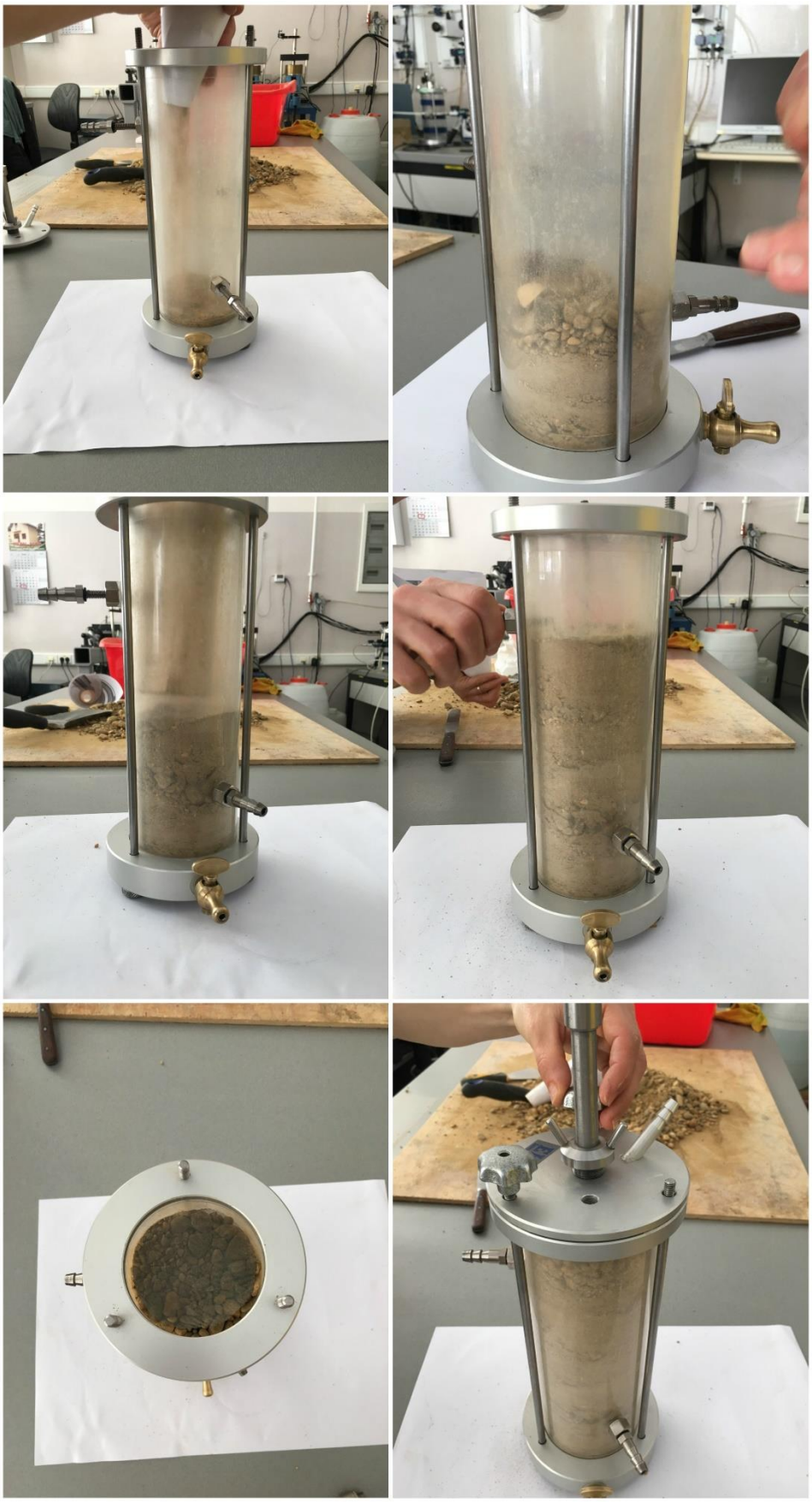


Slika 4-5 Postupak četvrtanja

Ćelija se dobro očisti te se svi spojevi namažu vazelinom. U ćeliju se na dno stavi filter mrežica (Slika 4-6). Nakon toga se uzorak ugrađuje u ćeliju pomoću standardiziranog lijevka (kružnim pokretima). Uzorak se puni po 2 cm debljine te se nakon toga sabija batom. Kad se uzorkom dođe do manometarskog izlaza, stavlja se manometarska spojnica koja je prethodno namazana vazelinom. Postupak se ponavlja dok se ćelija ne napuni. Uzorak se ne smije napuniti do vrha ćelije (2 cm do vrha), jer bi tako napunjen uzorak spriječio dovod vode iz rezervoara. Na vrh uzorka se stavi druga filter mrežica te se stavi poklopac (Slika 4-7). Na poklopcu se nalazi ispušni ventil, zatvoren je, no ukoliko se dogodi da u uzorku ima zraka ventil se otvori.



Slika 4-6 Sastavljanje ćelije



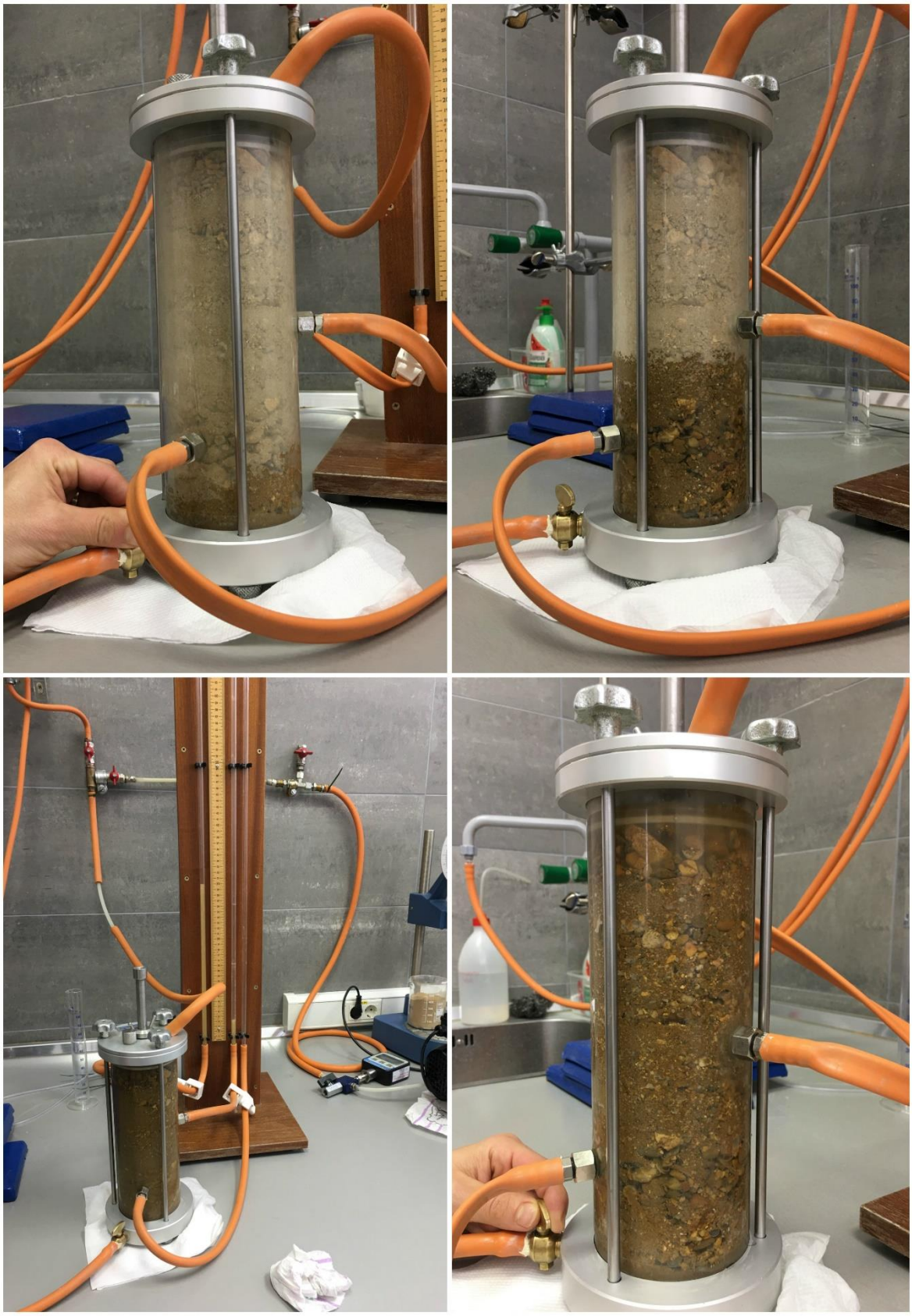
Slika 4-7 Ugradnja uzorka

Ovako je pripremljena ćelija spremna za postupak permeametra sa stalnom razinom. Spaja se na manometar, spremnik za vodu te vakumsku pumpu. Ventil za rezervoar napunjen sa vodom je za prvi dio postupka zatvoren. Cijevi koje su spojene na manometar su također zatvorene (štipaljkama) (Slika 4-8). Prije početka rada vakumske pumpe potrebno je provjeriti je li zatvoren svaki dovod zraka u uzorak. Nakon toga se uključi pumpa koja odvodi zrak iz ćelije oko 10 do 15 minuta da bi se stvorio vakuum.



Slika 4-8 Spajanje ćelije na manometar, spremnik za vodu i vakumsku pumpu

Otvara se ventil na ćeliji dolje i počinje saturacija uzorka. Saturacija mora biti spora da se ne bi konsolidirani uzorak poremetio. Kada voda dođe do uzorka, prije nego što dođe do poklopca, zatvara se ventil na ćeliji dolje i pusti da još pumpa malo radi (Slika 4-9) Nakon kraćeg vremena se ventil na ćeliji dolje opet otvori tako da voda dolazi do poklopca. Kada vidimo da je vakumska pumpa izvukla sav zrak, zatvara se ventil na cijevi koja vodi prema vakumskoj pumpi, a otvori se ventil kod rezervoara (Slika 4-9). Otvaranjem ventila na rezervoaru sustav je okrenut, otvore se cjevčice na manometru a cijev na izlazu (dolje) digne kako bi ulazi i izlaz bili na istoj razini. Tek kada se razine u sve tri cjevčice u manometru podignu na istu razinu u uzorku nema zraka.



Slika 4-9 Saturacija uzorka

Mjerenje počinje s gradijentom pri kojem je razlika visina u manometarskim cjevčicama jednaka 2 cm, a nakon toga se povećava za 0,5 cm. Mjeri se vrijeme potrebno da se napuni menzura od 100 mL (Slika 4-10). Povećanje gradijenta, tj. povećanje razlike u manometarskim visinama u cjevčicama ponavlja se tako dugo dok se ne dođe do odstupanja od linearnog odnosa specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta.



Slika 4-10 Mjerenja

5. REZULTATI

5.1 Rezultati hidrauličke vodljivosti temeljeni na empirijskim formulama i metodom permeametra sa stalnom razinom

Kako bi se pristupilo izračunu hidrauličke vodljivosti metodom temeljenoj na empirijskim formulama, prethodno je na kumulativnoj granulometrijskoj krivulji potrebno očitati vrijednosti efektivnih promjera zrna (Tablica 5-1). Također, rezultati granulometrijske analize su prikazani u tablici 5-2. U Tablici 5-3 prikazane su vrijednosti hidrauličke vodljivosti prema Hazenu, Slichteru, USBR-u i pomoću permeametra sa stalnom razinom. Iz tablice 5-1 vidljivo je da nije zadovoljen prvi kriterij za uzorak te nije bilo moguće izračunati hidrauličku vodljivost prema Hazenu. Prosječna hidraulička vodljivost je 4,84 x 10^{-4} m/s.

Tablica 5-1 Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna (d_{10}, d_{20} i d_{60})

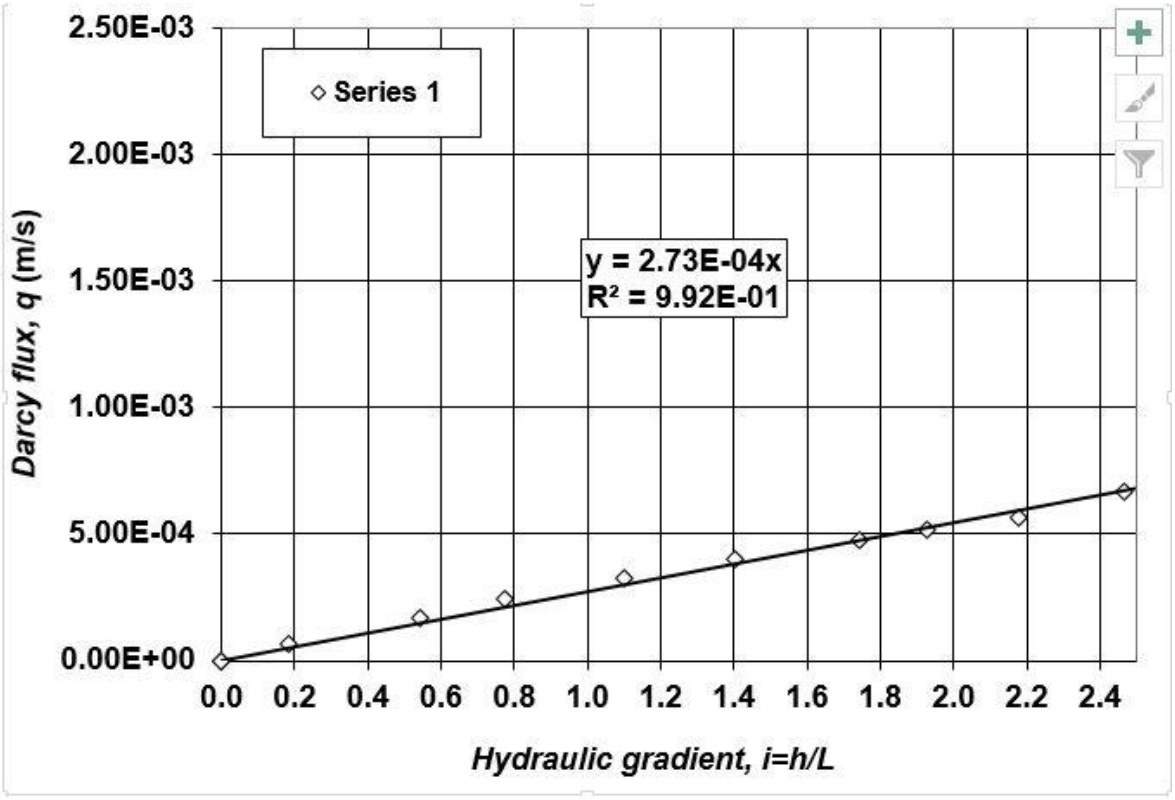
Uzorak	d_{10} (mm)	d_{20} (mm)	d_{60} (mm)	1.uvjet $d_{60}/d_{10}<5$	2.uvjet d_{10} = 0,1-3 (mm)
8-9 m	0.28	0.5	5	17.86	0.28

Tablica 5-2 Udio glavnih granulometrijskih frakcija uzorka

Uzorak	Šljunak (udio frakcije u %)	Pijesak (udio frakcije u %)	Prah (udio frakcije u %)	Glina (udio frakcije u %)
8-9 m	56.5	42.5	1	/

Tablica 5-3 Izračun hidrauličke vodljivosti

Uzorak	Hazen (K m/s)	Slichter (K m/s)	USBR (K m/s)	Permeametar (K m/s)	K_{sr}
8-9 m	/	4.5 x 10^{-4}	7.3 x 10^{-4}	2.73 x 10^{-4}	4,84 x 10^{-4}



Slika 5-1 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta

Hidraulička vodljivost dobivena metodom permeametra sa stalnom razinom bitno se ne razlikuje od hidrauličkih vrijednosti dobivenih empirijskim formulama. Hidrauličke vodljivost dobivene eksperimentom i empirijskim formulama po USBR-u te Slichteru su jednakih veličina. No, potrebno je napomenuti da bi za dobivanje realnijih vrijednosti trebalo napraviti detaljniju analizu granulometrijskih krivulja te primijeniti nešto drugačije obrasce pisanja formula, što je razrađeno u disertaciji Urumović, 2013. Stoga korištene empirijske formule, a koje se najčešće navode u literaturi, predstavljaju pojednostavljene formule za izračun hidrauličke vodljivosti.

6. ZAKLJUČAK

Na uzorku s dubine od –8 m napravljena je granulometrijska analiza te je na temelju empirijskih formula određena hidraulička vodljivost, a ujedno je na istom uzorku laboratorijskim mjerenjem izmjerena hidraulička vodljivost permeametrom sa stalnom razinom. Granulometrijskom analizom utvrđeno je da uzorak pjeskoviti šljunak.

Na temelju granulometrijske analize izrađena je kumulativna granulometrijska krivulja iz koje su iščitane vrijednosti efektivnih veličina zrna koji služe za ulazni parametar za određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama. Srednja hidraulička vodljivost iznosi $K_{sr} = 4{,}84 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Pokus permeametrom sa stalnom razinom dao je očekivanu vrijednost hidrauličke vodljivosti. Uspoređujući rezultat dobiven permeametrom i empirijskim formulama, dolazi do sličnosti u rezultatima. Hidraulička vodljivost mjerena u laboratoriju, $K = 2{,}73 \cdot 10^{-4}$ m/s manja je nego što je dobivena na terenu pokusnim crpljenjem, $K = 1{,}3725 \cdot 10^{-3}$ m/s. To se objašnjava činjenicom da je uzorak na kojem je napravljen pokus manji pa je mogućnost pogreške veća.

Samo izvođenje eksperimenta je jednostavno što je i prednost laboratorijskih metoda. Terenska metoda pokusnog crpljenja daje preciznije rezultate, ali iziskuje puno više vremena, ljudi i financija. Jedne i druge metode imaju svoje prednosti i mane. Odabir metode ovisi prvenstveno o iskustvu s prijašnjim mjerenjima, vremenu izvršavanja pa i o financijskim sredstvima.

7. LITERATURA

ASTM D 2434 – 68 (2000): American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).

BAČANI, A. (2006): Hidrogeologija 1, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb.

BARILIĆ. D. (1998): Problemi kolmotacije kod zdenaca lociranih u blizini površinskog toka na primjeru crpilišta Gaze. Magistarski rad, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, str. 92, Zagreb.

BEAR J. & VERRUIJT, A. (1987): Modeling Groundwater Flow and Pollution. D. Reidel Publ. Comp., 1-413, Dordrecht.

BOWLES, J. E. (1984): Physical and Geotehnical Properties of Soil. McGraw-Hill, New York.

DE WIEST, R. J. M. (1965): Geohydrology. John Wiley, New York.

DRISCOLL, F.G. (1987): Groundwater and wells. Johnson Division, 1-1089

FIL.B.IS. projekt d.o.o., (2016): Izrada dva istražno-eksploatacijska zdenca na izvorištima Švarča (ZŠ-3/16) i Mekušje (ZM-1A/16) u Karlovcu, Fond dokumentacija vodovoda Karlovca.

HERAK, M. (1986): A new concept of geotectonic of the Dinarides. (Nova koncepcija geotektonike Dinarida). Acta geol., 16/1 (prir. Istraž. 53), Jugosl. akad. znan. umjetn., 35 – 117,

HERAK, M. (1991): Dinaridi. Mobilistički osvrt na genezu i strukturu. (Dinarides. Mobilistic view of the genesis and structure.). Acta. Geol., 21/2 (Prir. istraž. 63), Hrv. akad. znan. umjetn., 1- 42, Zagreb.

KOLAKOVIĆ, K. (2011): Geološka i hidrogeološka istraživanja na crpilištu Gaza I u Karlovcu, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb

KOVAČEVIĆ, A. (2005): Hidrogeološke značajke Karlovačke županije, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb

LEE, F., FETTER, C. V. (1994): Hydrogeology laboratory manual. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey

LUČIĆ, D., SAFTIĆ, B., KRIZMANIĆ, K., PRELOGOVIĆ, E., BRITVIĆ, V., MESIĆ, I. &TADEJ, J. (2001): The neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatica – Marine and Petroleum Geology, 18, 133 - 147

MILETIĆ, P. & HEINRICH-MILETIĆ, M. (1981): Uvod u kvantitativnu hidrogeologiju. 1-220, Sveučilište u Zagrebu i NIŠRO Varaždin

MISSTEAR, B., BANKS D., CLARK, L. (2006): Water Wells and Boreholes, John Wiley & Sons, LTD, Chichester

PRELOGOVIĆ, E., SAFTIĆ, B., KUK, V., VELIĆ, J., DRAGAŠ, M. & LUČIĆ, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Panonnian Basin. Tectonophysics, 297, 283 - 293

TIŠLJAR, J. (2004): Sedimentologija klastičnih i silicijskih taložina, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb

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

URUMOVIĆ, K. (2013): Parametarska kvantifikacija hidrogeoloških svojstava klastičnih naslaga na primjerima pokusnih polja u sjevernoj Hrvatskoj. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

VELIĆ, J., MALVIĆ, T., CVETKOVIĆ, M., (2011): Palinspastic reconstruction of synsedimentary tectonics of Neogene and Quaternary sediment in the Kloštar Field (Sava Depression, Pannonian Basin, Croatia). Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 162, 2, 193-203

http://www.matica-hrvatska-karlovac.hr/stapek.pdf - izvor za sliku (16.11.2017., 11:18)