Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom na lijevom zaobalju istočnog dijela zagrebačkog vodonosnika

Čambala, Marija

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:169:508363

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 LIJEVOM ZAOBALJU ISTOČNOG DIJELA ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

Diplomski rad

Marija Čambala
GI-275

Zagreb, 2017.

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru dr. sc. Kristijanu Posavcu na iskazanom povjerenju, izuzetnoj suradnji i koji je svojim stručnim i praktičnim savjetima pomogao pri izradi ovog rada.

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

Na kraju bih se zahvalila svojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom cijelog mog studiranja.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI METODOM PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM NA LIJEVOM ZAOBALJU ISTOČNOG DIJELA ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

MARIJA ČAMBALA

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

Sažetak

U teorijskom dijelu rada nabrojane su i opisane metode određivanja hidrauličke vodljivosti na terenu i u laboratoriju. Sam predmet istraživanja bio je odrediti hidrauličku vodljivost metodom permeametra sa stalnom razinom. Uzorak za ovaj eksperiment uzet je na području Veletržnice i hladnjače Zagrebačkog holdinga, istočni dio grada Zagreba.

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

Diplomski rad sadrži: 33 stranice, 21 sliku i 3 tablice

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, redoviti profesor, RGNF
Dr.sc. Željko DUIĆ, docent, RGNF

Datum obrane: 15. 09. 2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

DETERMINATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY USING PERMEAMETER WITH CONSTANT HEAD ON THE LEFT HINTERLAND OF THE EASTERN PART OF ZAGREB AQUIFER

MARIJA ČAMBALA

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

Abstract

In this theoretical part of thesis field and laboratority methods are listed and discribed for measuring hydraulic conductivitiy. 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 at territory Veletržnice i hladnjače Zagrebačkog holdinga, eastern part of Zagreb.

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

Thesis contains: 33 pages, 21 images and 3 tables

Original in: Croatian

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

Supervisior: Dr. Kristijan POSAVEC, Full Professor, RGNF

Reviewers: Dr.sc. Kristijan POSAVEC, Full Professor, RGNF
Dr.sc. Andrea BAČANI, Full Professor, RGNF
Dr.sc. Željko DUIĆ, Assistant Professor, RGNF

Date of defense: September 15, 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD ---------- 1

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA ---------- 2

2.1 Geografski položaj ---------- 2

2.2 Geološke značajke ---------- 3

2.3 Hidrogeološke značajke ---------- 5

3. METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI ---------- 9

3.1 Terenska metoda pokusnog crpljenja ---------- 9

3.2 Laboratorijska metoda – pomoću permeametra ---------- 10

3.2.1 Permeametar sa stalnom razinom ---------- 11

3.2.2 Permeametar s promjenjivom razinom ---------- 12

3.3 Metode temeljene na empirijskim formulama ---------- 12

4. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI ---------- 15

4.1 Granulometrijska analiza sijanjem i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama ---------- 16

4.1.1 Granulometrijska analiza i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama za uzorak na dubini od 1–4 m ---------- 17

4.1.1.1 Granulometrijska analiza ---------- 17

4.1.1.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama ---------- 18

4.1.2. Granulometrijska analiza i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama za uzorak na dubini od 4–24 m ---------- 19

4.1.2.1 Granulometrijska analiza ---------- 19

4.1.2.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama ---------- 20

4.1.3. Granulometrijska analiza i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama za uzorak na dubini od 24–25 m ---------- 21

4.1.3.1 Granulometrijska analiza ---------- 21

4.1.3.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama ---------- 22

4.2 Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom ---------- 23

4.2.1 Sastavljanje ćelije i ugradnja uzorka u ćeliju ---------- 23

4.2.2 Saturacija uzorka ---------- 25

4.2.3 Postupak ispitivanja ---------- 26
4.2.4 Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom za uzorak na dubini od 1-4 m ---------- 27
4.2.5 Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom za uzorak na dubini od 4-24 m ------- 28
4.2.6 Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom za uzorak na dubini od 24-25 m ----- 29
5. REZULTATI ---------- **30**
5.1 Rezultati hidrauličkih vodljivosti temeljeni na empirijskim formulama i metodom permeametra sa stalnom razinom ---------- **30**
6. ZAKLJUČAK ---------- **31**
7. LITERATURA ---------- **32**

POPIS SLIKA

Slika 1-1 Hidraulička vodljivost (Driscoll, 1987 – Bačani, 2006)---------- 1
Slika 2-1 Prostorni položaj zagrebačkog vodonosnika---------- 2
Slika 2-2 Geografski položaj lokacije uzorkovanja---------- 3
Slika 2-3 Geološka karta zagrebačkog područja (Bačani i Šparica, 2001) ---------- 4
Slika 2-4 Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006) ---------- 5
Slika 2-5 3D hidrogeološki model zagrebačkog vodonosnika (Posavec, 2006)---------- 6
Slika 2-6 Rubne granice modela i granice otjecanja/dotjecanja (Bačani, 2009)---------- 7
Slika 4-1 Sušenje uzorka ---------- 15
Slika 4-2 Korištena sita i postupak sijanja ---------- 16
Slika 4-3 Reprezentativni uzorak od 1–4 metra ---------- 17
Slika 4-4 Granulometrijski dijagram za uzorak dubine od 1–4 metra ---------- 18
Slika 4-5 Reprezentativni uzorak od 4–24 metra ---------- 19
Slika 4-6 Granulometrijski dijagram za uzorak dubine od 4–24 metra ---------- 20
Slika 4-7 Reprezentativni uzorak od 24–25 metra ---------- 21
Slika 4-8 Granulometrijski dijagram za uzorak dubine od 24–25 metra ---------- 22
Slika 4-9 Dijelovi ćelije permeametra ---------- 23
Slika 4-10 Sastavljanje ćelije ---------- 24
Slika 4-11 Ugradnja uzorka u ćeliju ---------- 25
Slika 4-12 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za uzorak s dubine od 1-4 m ---------- 27
Slika 4-13 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za uzorak s dubine od 4-24 m---------- 28
Slika 4-14 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za uzorak s dubine od 24-25 m ---------- 29

POPIS TABLICA

Tablica 4-1 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem za uzorak dubine od 1–4 m ----------17

Tablica 4-2 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem za uzorak dubine od 4–24 m ----------19

Tablica 4-3 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem za uzorak dubine od 24–25 m----------21

Tablica 5-1 Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna (d_{10}, d_{20}, d_{60}) ----------30

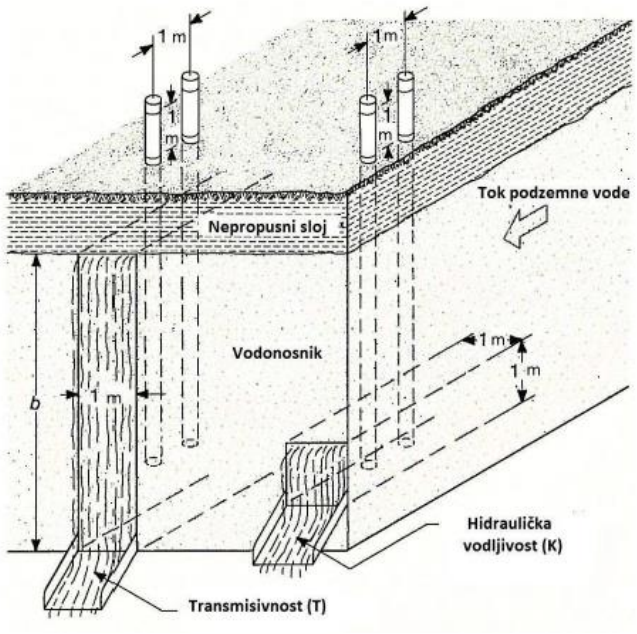
Tablica 5-2 Izračun hidrauličke vodljivosti----------30

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)
C_H	0,0116 (za 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)
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)
C	0.0036 (ako je K izražen u m/s)	(-)
d_{20}	efektivni promjer zrna u mm ili onaj promjer gdje je 80% zrna većeg, a 20% manjeg promjera	(mm)
C	0.00574 (ako je K izražen u m/s)	(-)
$d_e=d_{10}$	efektivni promjer zrna	(mm)
K_h	horizontalna hidraulička vodljivost	(m/s)
h	piezometarska razina	(m)
Q	protok	(m^3/s)
t	vrijeme	(s)
A	površina poprečnog presjeka uzorka	(m^2)
L	duljina	(m)

1. UVOD

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 je L/T, primjerice m/s, m/dan, cm/s. Postoji nekoliko metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti od kojih su najčešće korištene: 1) terenska metoda pokusnog crpljenja, gdje se određuje transmisivnost, 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. Hidraulička vodljivost ovisi o značajkama stijene kroz koju fluid teče i o značajkama samog fluida (Bačani, 2006).



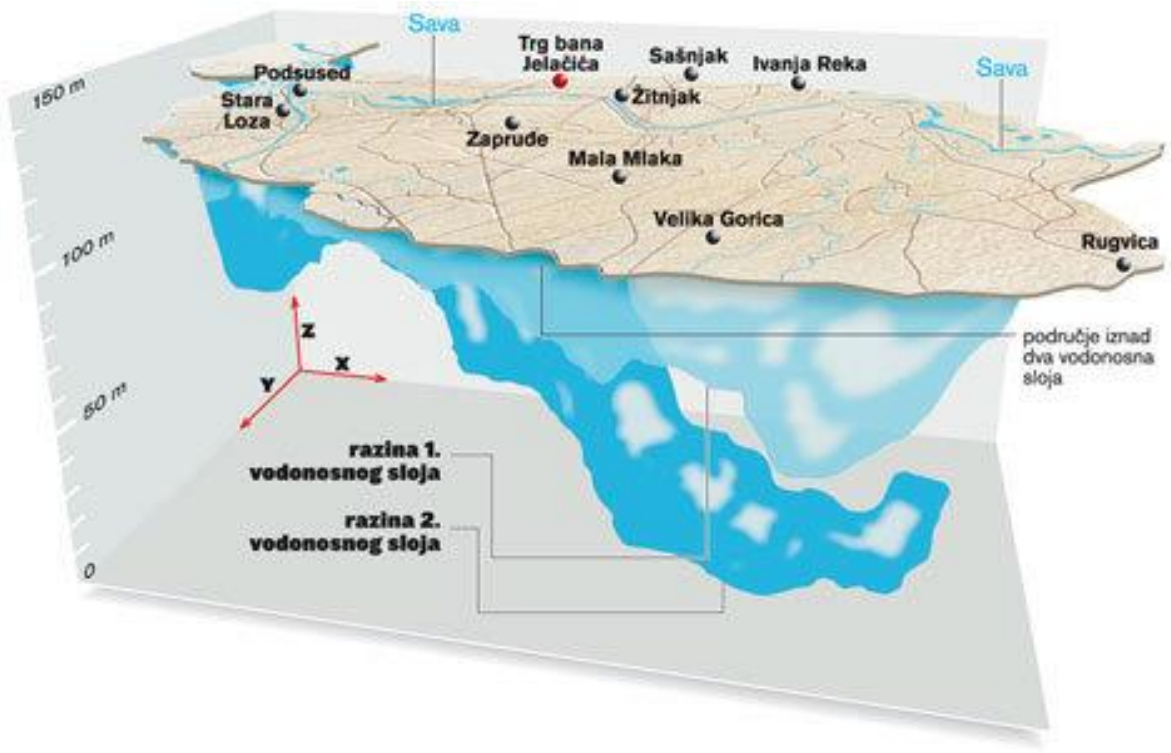
Slika 1-1 Hidraulička vodljivost (Driscoll, 1987 – Bačani, 2006)

Predmet istraživanja ovog diplomskog rada je određivanje hidrauličke vodljivosti. Prvi cilj rada je dati teoretski uvod u kojem će se opisati područje istraživanja i metode određivanja hidrauličke vodljivosti. Drugi cilj rada je određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama i permeametrom sa stalnom razinom. Svrha rada je laboratorijsko određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom za potrebe korištenja određenih vrijednosti u daljnjim hidrogeološkim istraživanjima. Uzorak za ovaj eksperiment uzet je na području Veletržnice i hladnjače Zagrebačkog holdinga, istočni dio grada Zagreba.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

2.1 Geografski položaj

Zagrebački vodonosnik smjestio se u zapadnom dijelu Panonske nizine. Prostire se na području između Medvednice na sjeveru, Vukomeričkih gorica na jugu, podsusedskog praga na zapadu te Rugvice na istoku **(Slika 2-1)**. Većim dijelom obuhvaća područje grada Zagreba. Prostire se duž rijeke Save, pravcem sjeverozapad-jugoistok u dužini od oko 30 km, s prosječnom širinom od 10 do 15 km (Posavec, 2006). Ukupna površina rasprostiranja mu iznosi oko 350 km^2, a rijeka Sava ga dijeli na desno i lijevo zaobalje. Područje vodonosnika je pretežno ravničarskog karaktera, a na svojim rubovima omeđeno je brežuljcima s vodotocima i uskim dolinama.



Slika 2-1 Prostorni položaj zagrebačkog vodonosnika (preuzeto s Internet stranice)

Uzorak za određivanje hidrauličke vodljivosti pomoću permeametra sa stalnom razinom uzet je na području grada Zagreba, točnije na području Veletržnice i hladnjače Zagrebačkog holdinga **(Slika 2-2)**. Uzorak je uzet s lokacije neposredno nakon završetka bušenja za budući vodoopskrbni zdenac. Zdenac se nalazi na lijevom zaobalju istočnog dijela zagrebačkog vodonosnika.

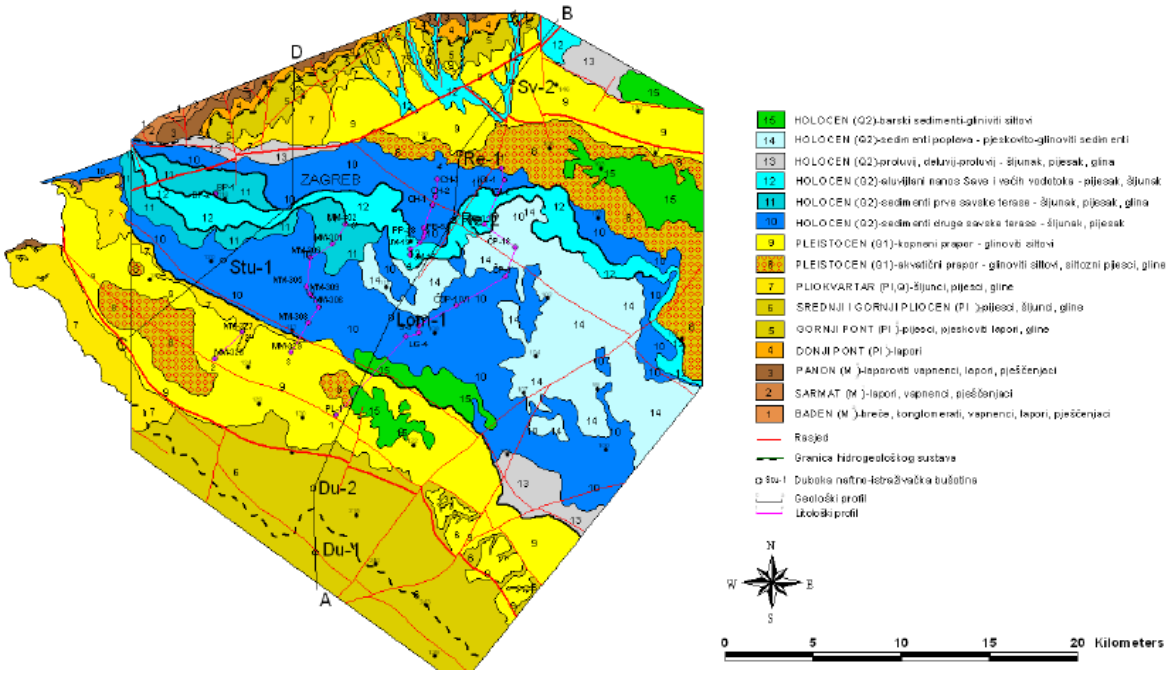


Slika 2-2 Geografski položaj lokacije uzorkovanja (preuzeto s Google Earth)

2.2 Geološke značajke

Zagrebački vodonosni sustav je kvartarni sustav koji čine srednje i gornje pleistocenske te holocenske taložine **(Slika 2-3)**. 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. Rezultatima analize mahom litoloških podataka bušotina izdvojena su tri osnovna genetska tipa klastičnih sedimenata odnosno tri litofacijesa (Blašković i Dragičević, 1989): (1) slijed klastičnih sedimenata karakteriziran čestom

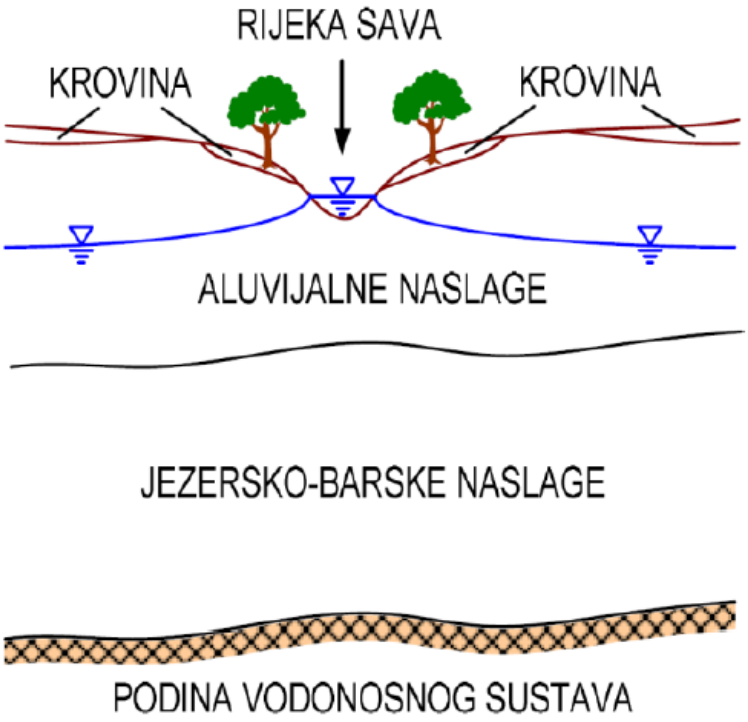
izmjenom litoloških članova (šljunka i glina) determiniran je kao *proluvijalni litofacijes*; (2) široko rasprostranjeni slijed klastičnih sedimenata formiran meandriranjem toka rijeke Save, između kojih je dominantan šljunak, a sadržani su i pijesci različitih granulacija sve do veličine praha, određen je kao *aluvijalni litofacijes*; i (3) široko rasprostranjeni slijed klastita karakteriziran na širem području učestalom pojavom siltozno-glinovitih sedimenata, praha, treseta te u predjelima dubljeg dosega bušotina znatnim debljinama leća šljunka, šljunka-pijeska, šljunka-pijeska-praha, s većim ili manjim primjesama gline, a koji je uvjetno imenovan kao *jezersko-barski litofacijes*.



Slika 2-3 Geološka karta zagrebačkog područja (Bačani i Šparica, 2001)

Vodonosni sustav prostire se oko 30 km u smjeru sjeverozapad-jugoistok, s prosječnom širinom od 10 do 15 km i debljinom koja iznosi 5 do 10 metara u zapadnim dijelovima pa sve do stotinjak metara u istočnim dijelovima sustava. Slabo propusna krovina ili nije prisutna ili pak dostiže 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. Shematski profil vodonosnog sustava **(Slika 2-4)** prikazuje troslojni sustav: krovinske naslage, prvi vodonosni sloj s dominantno aluvijalnim naslagama rijeke Save i drugi vodonosni sloj s dominantno jezersko-barskim naslagama. Slabo propusne naslage čine podinu vodonosnog sustava. Proluvijalni krupnoklastični sedimenti nisu prikazani na

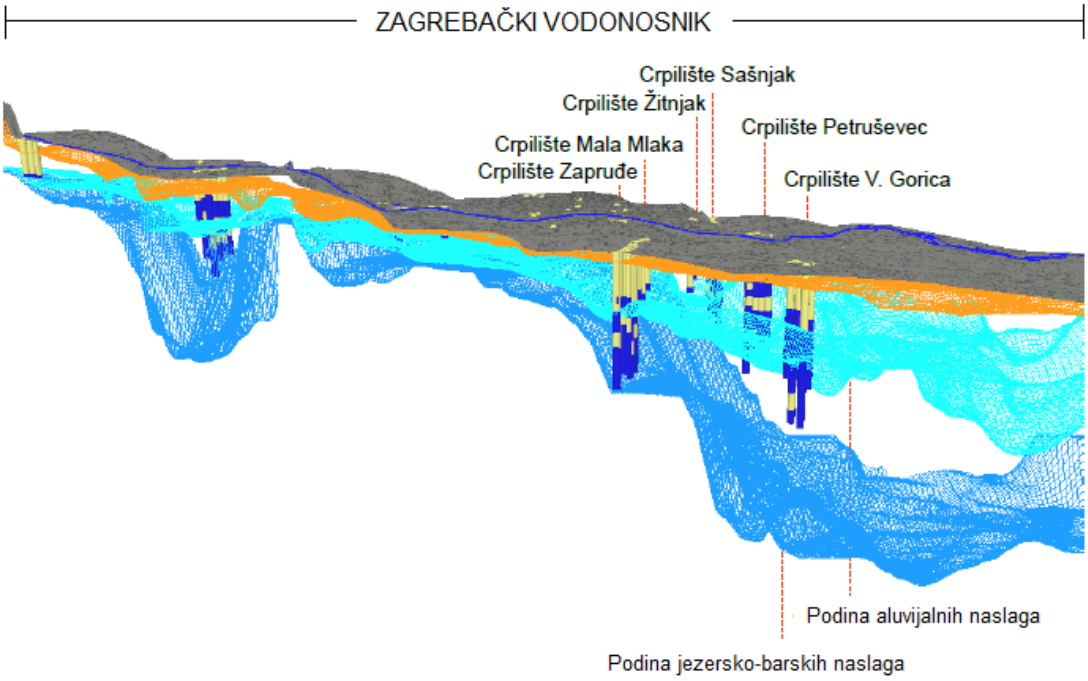
slici 2-4 jer se pojavljuju diskontinuirano u uskom pojasu uz najjužnije obronke Medvednice (Posavec, 2006).



Slika 2-4 Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006)

2.3 Hidrogeološke značajke

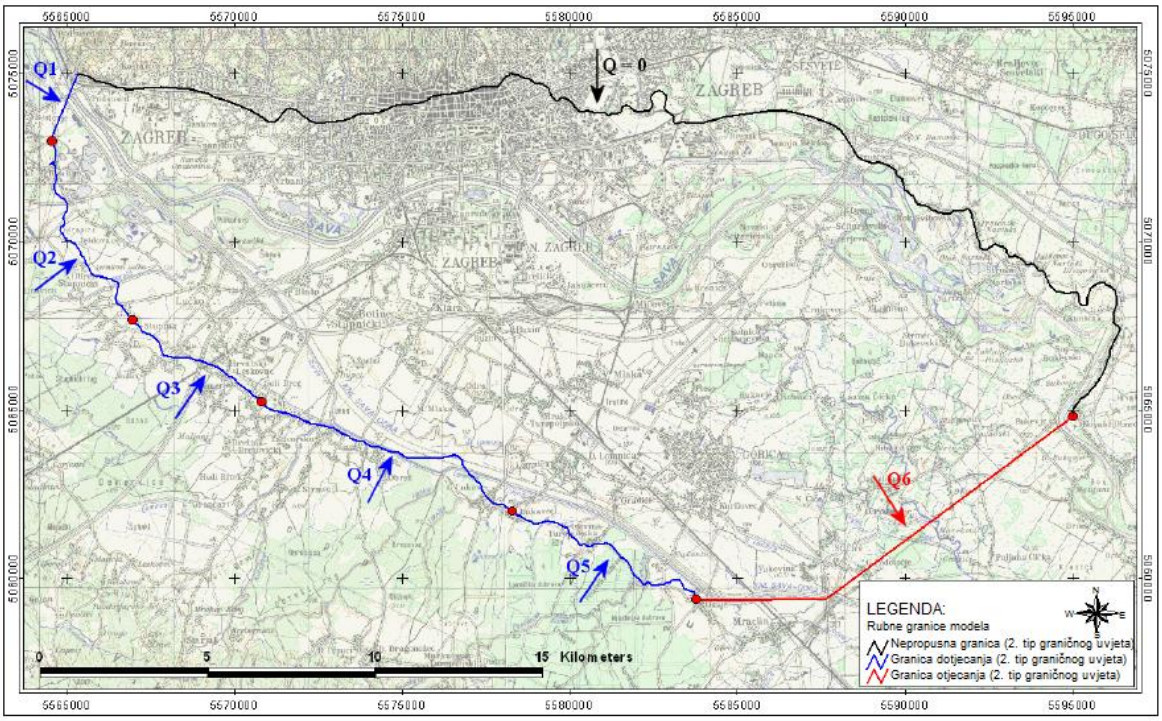
Zagrebački vodonosnik je otvoreni vodonosnik što znači da mu gornju granicu saturacije čini vodna ploha pod atmosferskim tlakom. Podinu vodonosnika čine slabo propusne naslage. U profilu se razlikuju dva vodonosna sloja: prvi vodonosni sloj s dominantno aluvijalnim naslagama rijeke Save i drugi vodonosni sloj s dominantno jezersko-barskim naslagama **(Slika 2-5)**. Debljina prvog vodonosnog sloja kreće se od 5 do 10 m u zapadnom dijelu pa sve do 40 metara u istočnom dijelu vodonosnika. Debljina drugog vodonosnog sloja se u zapadnom dijelu sustava kreće oko 20 metara. U istočnom dijelu sustava debljine su znatno veće i iznose 60 metara (Peršić, 2014).



Slika 2-5 3D hidrogeološki model zagrebačkog vodonosnika (Posavec, 2006)

Rubne granice vodonosnika čine u hidrauličkom smislu nepropusna granica na sjeveru, granica dotjecanja na zapadu, granica dotjecanja na jugu te granica otjecanja na istoku **(Slika 2-6)**. Generalni smjer toka podzemne vode je od zapada prema istoku/jugoistoku. Iako se prije smatralo da je južna granica vodonosnika nepropusna Posavec je (2006) analizirao dotjecanja/otjecanja u, odnosno iz zagrebačkog vodonosnika na osnovu karata ekvipotencijala za godišnje visoke, srednje i niske razine podzemne vode u razdoblju od 1994. do 2003. godine i zaključio da po južnoj rubnoj granici vodonosnika postoji određeno dotjecanje različitog intenziteta duž granice, a potencijalne zone pojačanog intenziteta dotjecanja čine područja oko potoka Starača i Lomnica. Napajanje vodonosnika se u najvećoj mjeri ostvaruje (1) infiltracijom iz rijeke Save; (2) infiltracijom oborina; (3) infiltracijom iz propusne vodoopskrbne i kanalizacijske mreže; (4) dotjecanjem po zapadnoj granici iz susjednog samoborskog vodonosnika; te (5) dotjecanjem po južnoj granici vodonosnika s područja Vukomeričkih Gorica. Analizom karata ekvipotencijala utvrđeno je da Sava za vrijeme visokih voda napaja vodonosnik duž cijelog toka, dok za vrijeme srednjih i niskih voda na pojedinim dijelovima toka dolazi do dreniranja vodonosnika što nepovoljno utječe na razine podzemne vode, a s time i na raspoložive količine za vrijeme dužih sušnih razdoblja. 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^2/dan) zbog visokih iznosa kako hidrauličke vodljivosti tako i debljine vodonosnog sloja (Brkić i Biondić, 2000). Uspoređujući nivograme Save s nivogramima razina podzemne vode mjerenih na piezometrima u neposrednoj blizini Save duž cijelog toka na istraživanom području zapaža se izuzetno dobra povezanost vodostaja Save i razina podzemne vode. Miletić i Bačani (1999) temeljem vodne bilance za 1998. godinu zaključuju da doprinos Save u obnavljanju količina podzemne vode iznosi oko 73%. 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÷2 m svakih 10 godina na području cijelog vodonosnika.



Slika 2-6 Rubne granice modela i granice otjecanja/dotjecanja (Bačani, 2009)

Početkom devedesetih 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 (Bačani i Posavec, 2009).

3. METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

Postoji nekoliko metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti, a najčešće korištene su: 1) terenska metoda pokusnog crpljenja, gdje se određuje transmisivnost, 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 metode 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 pokusnog crpljenja

Postupak pokusnog crpljenja odnosi se isključivo na propusne, vodonosne naslage, koje su važne za pridobivanje vode s ciljem vodoopskrbe. Velika prednost ove metode je što se tlo ili stijena ispituju u neporemećenoj okolini. Zato, ako tlo ima sekundarnu propusnost zbog pukotina ili sadrži korijenje, test će uključivati njihov utjecaj na izmjerenu hidrauličku vodljivost.

Kod ove metode poznate su vrijednosti piezometarskih razina, odnosno sniženja, a nepoznanice su hidrogeološki parametri. Pokusno crpljenje može imati dva cilja. Prvi se odnosi na testiranje vodonosnog sloja, tj. na određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnog sloja, a drugi se odnosi na testiranje zdenca, tj. određivanje specifičnog kapaciteta zdenca, dozvoljenog sniženja, izbor odgovarajuće crpke, itd. 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 potenciometrijsku plohu (piezometarsku visinu) opaža se mjerenjem sniženja u crpljenom zdencu i opažačkim bušotinama, tj. piezometrima.

Hidrogeološki parametri vodonosnog sloja izračunavaju se pomoću određenih formula (analitičkih rješenja jednadžbi toka) u koje uvrštavamo poznate i izmjerene veličine: sniženja u piezometrima, udaljenosti piezometara od zdenca i crpnu količinu. Za vrijeme pokusnog crpljenja mjeri se sniženje u vremenu i crpljena količina. Prije početka pokusnog crpljenja potrebno je utvrditi sve postojeće promjene razine podzemne vode, uključujući dugotrajne regionalne trendove i kratkotrajne promjene. Za svaki piezometar izrađuje se nivogram.

Crpljenje počinje kada se ne očekuju veće promjene potencijala za vrijeme trajanja crpljenja. Poželjno je da pokusno crpljenje traje dok se konus depresije ne stabilizira, tj. dok se ne uspostave stacionarni uvjeti (Bačani, 2006).

3.2 Laboratorijska metoda – pomoću permeametra

Pri laboratorijskom ispitivanju hidrauličke vodljivosti uzorci se podvrgavaju toku koji se može odvijati pri stalnoj razini (permeametar sa stalnom razinom) ili toku s promjenjivom razinom (permeametar s promjenjivom razinom).

Za dobro propusne materijale ($K > 10^{-5}$ m/s) koristi se permeametar sa stalnom razinom dok se za slabo propusne ($K < 10^{-5}$ m/s) materijale koristi permeametar s promjenjivom razinom.

U oba slučaja voda se može dodavati bilo na vrh, bilo na dno uzorka, pa tok može biti silazni ili uzlazni. Uzorak obično ima oblik pravilnoga kružnog cilindra, a smješten je između dviju poroznih ploča zanemarivog otpora. On prije testiranja mora biti potpuno saturiran destiliranom vodom i ne smije sadržavati mjehuriće plina, kako bi se minimizirali 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 atmosferskom tlaku).

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

- Tla su u prirodi obično uslojena pa je u laboratoriju teško simulirati stvarne terenske uvjete.
- U pijesku su K_v i K_h dosta različiti, često reda veličine od $K_h = 10K_v$ do $K_h = 1000K_v$, a takvi se prirodni uvjeti pri uzimanju uzoraka nepovratno izgube.
- Male dimenzije terenskih uzoraka dovode do djelovanja rubnih uvjeta, poput tečenja uz glatke strane posude i stvaranja mjehurića zraka u vodi ili u obliku zamki zraka u uzorku, što može imati zamjetan učinak na rezultate.
- Metode permeametrom odvijaju se samo u saturiranim uvjetima
- Kada je K malen, reda veličine 10^{-7} do 10^{-11} m/s, 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 trajanja testa, obično se primjenjuje puno veći hidraulički gradijent nego što je u prirodi.
- U pijesku nerealno visok hidraulički gradijent može stvarati turbulencije, dakle okolnosti toka različite od terenskih pod kojima se odvija laminarni tok.
- Nerealno visok hidraulički gradijent može dovesti do konsolidacije i poroznosti koja je različita od prirodne poroznosti uzorka (Urumović, 2003).

3.2.1 Permeametar sa stalnom razinom

U permeametru sa stalnim tlakom strujanje je ustaljeno i jednodimenzijsko. Uzorak je izložen stalnoj razlici piezometarske razine Δh, koja osigurava stalnu količinu toka Q, mjerljivu na donjemu preljevu. Pri takvim uvjetima i uz dužinu uzorka L te površinu presjeka uzorka A, hidraulička vodljivost i unutarnja propusnost mogu se izravno odrediti iz Darcyjeva zakona:

$$K = \frac{QL}{A\Delta h} = k\,\frac{\rho g}{\mu} \qquad \textbf{(3-1)}$$

Za sigurnije određenje hidrauličke vodljivosti preporučuje se načiniti nekoliko testova s različitim veličinama stalne razlike Δh piezometarske razine između gornjega vodospremnika i donjega preljeva (Urumović, 2003).

Da bi se odredila hidraulička vodljivost potrebno je načiniti okvirno desetak testova s različitim piezometarskim visinama, odnosno s različitim hidrauličkim gradijentima, no generalno se testovi rade tako dugo dok se ne izađe iz područja laminarnog toka odnosno granice valjanosti Darcyevog zakona. Graf odnosa Darcyeve brzine i hidrauličkog gradijenta pokazuje da li se sustav nalazi u laminarnom toku, odnosno kada točke u grafu počnu odstupati od linearnosti, ulazi se u turbulentni tok. Tu se zapravo i postavlja granica valjanosti Darcyjevog zakona, odnosno za područje toka u kojem se odvija laminarni tok vrijedi Darcyjev zakon, dok pri turbulentnom tečenju on više ne vrijedi. Eksperiment traje tako dugo dok odnos između hidrauličkog gradijenta i specifičnog protoka vode ne postane nelinearan jer to ukazuje da se izašlo iz područja valjanosti Darcyjeva zakona. Još je jedan način za provjeru valjanosti Darcyjevog zakona, a to je Reynoldsov broj. Kao indeks za procjenu prelaska režima toka iz laminarnoga u turbulentni koristi se Reynoldsov broj (Urumović, 2003). Taj podatak nije toliko pouzdan koliko grafički prikaz odnosa Darcyeve brzine i hidrauličkog gradijenta jer nekad i za Re > 10 graf q-i pokazuje linearnu ovisnost.

3.2.2 Permeametar s promjenjivom razinom

Permeametar s promjenjivom razinom obično se primjenjuje kada je nužno dobiti relativno visoke tlakove, a posebno je prikladan za određivanje hidrauličke vodljivosti sitnozrnatih materijala. Tu se količina protjecanja vode kroz uzorak određuje opažanjem iznosa pada visine vode u uspravnoj cijevi. Tijekom nekog vremena t_1, visina vode opadne s njezine inicijalne visine Δh_1 *na* Δh_2 (Urumović, 2003).

3.3 Metode temeljene na empirijskim formulama

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

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

Sijanje je najvažnija metoda određivanja veličine čestica sitnozrnatih, šljunčanih, šljunčano-pješčanih i prahovito-pješčanih sedimenata. Uzorak se sije kroz određen broj sita, obično od 5 do 7, tako da se razdijeli u više frakcija. Frakcija je onaj dio uzorka koji se zadrži na situ nakon sijanja. Koristi se niz sita standardnih dimenzija, čiji se otvori smanjuju na svakom sljedećem situ (odozgo prema dolje). Provodi se suhim i mokrim postupkom.

Kod suhog postupka uzme se određena količina materijala, uzorak. Uzorak se usipa na najgrublje sito u nizu sita, koja su postavljena jedno iznad drugog, u tresilicu. Sita s uzorkom se tresu 10 do 15 minuta. Nakon toga se važe ostatak na svakom situ, te materijal koji je prošao kroz najfinije sito (odnosno materijal koji je uhvaćen u zdjelu na dnu). Uzorak se važe na tehničkoj vagi čija je točnost najmanje 0.1 % od ukupne težine uzorka.

Mokri postupak se primjenjuje ako su na krupna zrna nalijepljene sitne frakcije. Postupak je isti kao i kod suhog sijanja samo se na svakom situ materijal ispire, zatim suši i važe.

Prema tome, 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 za više od 1 %. Rezultati granulometrijske analize koriste se kao ulaz za empirijske formule.

Jedna od najpoznatijih empirijskih formula je formula ***Hazena*** (1893) koji izračunava hidrauličku vodljivost na temelju efektivnog promjera zrna:

$$K = C_H \, d_{10}^2 \, (0{,}7 + 0{,}03T) \qquad \textbf{(3-2)}$$

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 promjera od d_{10},

$C_H = 0{,}0116$ (za K izražen u m/s)

T – temperatura vode (˚C).

Ovaj izraz može se koristiti ukoliko su ispunjeni slijedeći uvjeti:

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

i ako je koeficijent jednolikosti $d_{60} / d_{10} < 5$.

Ukoliko Hazenovu formulu usporedimo s izrazom za hidrauličku vodljivost $K = cd^2\rho_v g/\eta$ onda je očito da Hazenov koeficijent C_H ne odgovara bezdimenzijskom koeficijentu c. Naime, Hazenov koeficijent C_H objedinjuje u sebi i značajke stijene i značajke fluida i ima dimenzije $L^{-1}T^{-1}$.

Drugi izraz za određivanje hidrauličke vodljivosti iz granulometrijskog sastava je formula ***USBR*** koja glasi (Miletić i Heinrich-Miletić, 1981):

$$K = C \cdot d_{20}^{2,3} \qquad \textbf{(3-4)}$$

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.

Treći izraz je formula ***Slichtera*** (1899):

$$K = C\, d^2_e \qquad \textbf{(3-5)}$$

gdje je:

K – hidraulička vodljivost (m/s)

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

d_e – efektivni promjer zrna (mm).

4. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

Uzorak za ovaj eksperiment uzet je na području Veletržnice i hladnjače Zagrebačkog holdinga, istočni dio grada Zagreba (koordinate lokacije: N: 45° 47' 53" , E: 16° 01' 28").

Tijek izvedbe eksperimenta:

1. Granulometrijska analiza sijanjem i empirijske formule
2. Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom

Za ovaj eksperiment uzeta su tri uzoraka na dubinama: 1–4 m; 4–24 m; 24–25 m.

Nakon uzimanja uzorka na terenu, uzorak je donesen u laboratorij gdje je na veću površinu rasut kako bi se osušio **(Slika 4-1)**. Sušenje je trajalo nekoliko dana, nakon čega je napravljena granulometrijska analiza.



Slika 4-1 Sušenje uzorka

4.1 Granulometrijska analiza sijanjem i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama

Najprije se izvaže uzorak te se zatim izvaže pojedino sito bez uzorka. Nakon vaganja uzorka i sita rađeno je suho sijanje te su korištena sita u razmaku od 0,071 do 19 mm (19 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 5 mm, 4 mm i 3,15 mm, 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 i 0,071 mm). Sita su postavljena jedno ispod drugog, na način da se otvori sita smanjuju prema dolje **(Slika 4-2)**. Sijanje započinje da se uzorak usipa u najgornje sito te se zatim sva sita tresu 10 do 15 minuta. Nakon toga opet se izvažu pojedina sita s ostatkom uzorka u njima. Dobiveni rezultati pohranjeni su u tablice te su napravljene granulometrijske krivulje za sva 3 uzorka.



Slika 4-2 Korištena sita i postupak sijanja

Kumulativna granulometrijska krivulja glavni je i najčešći način prikazivanja rezultata granulometrijske analize, jer se iz nje izravno mogu očitati udjeli bilo kojih frakcija, a prikazuje cjelokupan sastav i raspored zrna, pa se iz nje mogu očitati i izračunati i važni granulometrijski koeficijenti (Tišljar, 2004.).

4.1.1 Granulometrijska analiza i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama za uzorak na dubini od 1–4 m

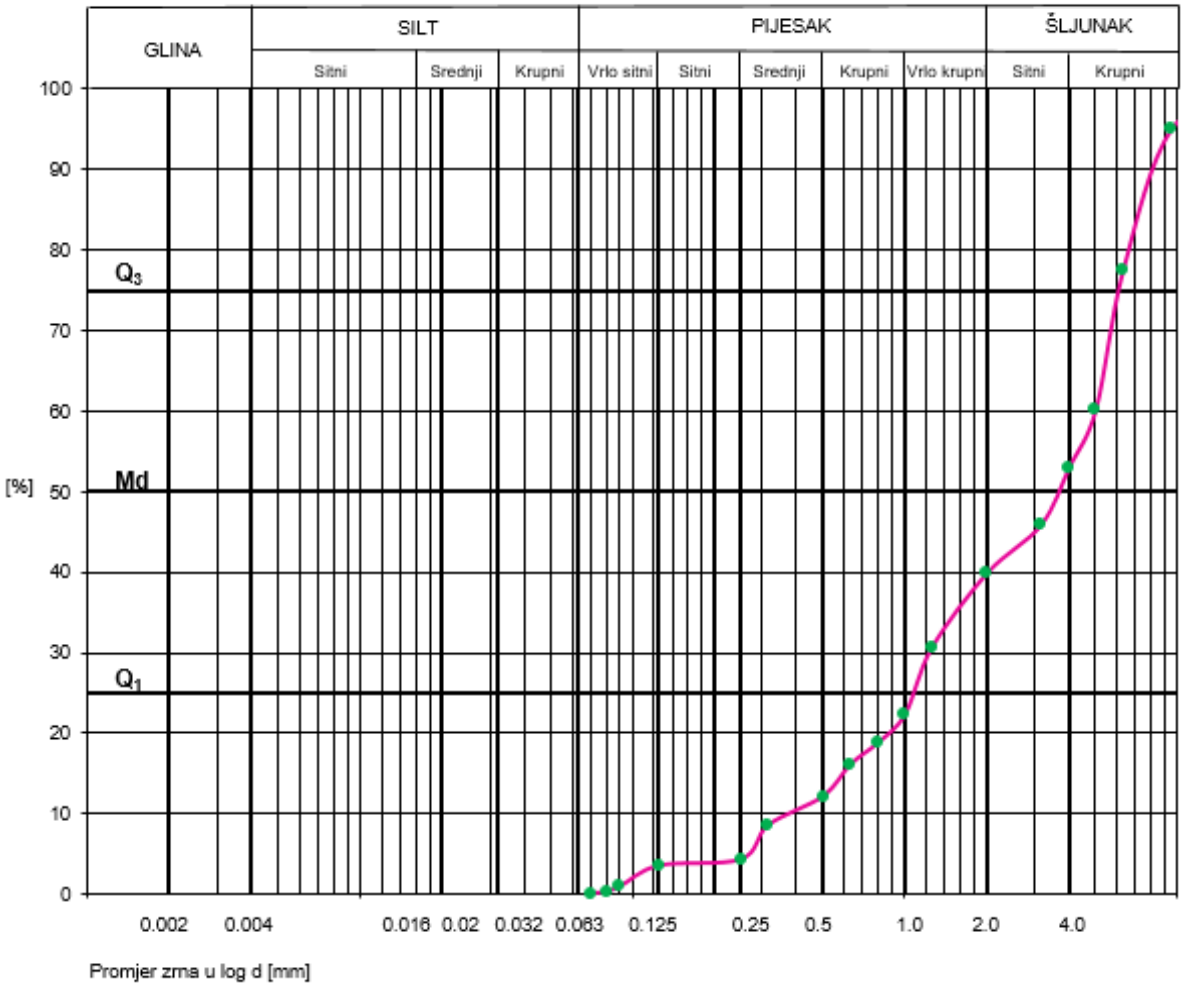


Slika 4-3 Reprezentativni uzorak od 1–4 metra

4.1.1.1 Granulometrijska analiza

Tablica 4-1 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem za uzorak dubine od 1–4 m

d sita [mm]	*Masa sita (g)*	*Masa sito i uzorak (g)*	*Masa (g)*	*[%]*	*Kumulativno [%]*
19,0	589,9	935,8	345,9	4,94	100,00
9,5	537,2	1764,6	1227,4	17,54	95,06
6,3	494,8	1709,6	1214,8	17,36	77,52
5,0	433,1	933,3	500,2	7,15	60,15
4,0	464,3	966,7	502,4	7,18	53,01
3,15	434,2	850,8	416,6	5,95	45,83
2,0	404,4	1056,8	652,4	9,32	39,87
1,25	524,3	1098,9	574,6	8,21	30,55
1,0	379,6	624,8	245,2	3,50	22,34
0,8	373,9	565,8	191,9	2,74	18,83
0,63	358,2	635,8	277,6	3,97	16,09
0,5	294,8	545,1	250,3	3,58	12,12
0,315	380,9	679,4	298,5	4,27	8,54
0,25	336,2	390,9	54,7	0,78	4,28
0,125	339,5	521,1	181,6	2,60	3,50
0,09	358,8	404,8	46,0	0,66	0,90
0,08	352,0	364,7	12,7	0,18	0,24
0,071	330,5	334,9	4,4	0,06	0,06
			6997,2		



Slika 4-4 Granulometrijski dijagram za uzorak dubine od 1–4 metra

4.1.1.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama

Hazen:

$$K = C_H \, d_{10}^2 \, (0{,}7 + 0{,}03T) = 0{,}0116 \cdot 0{,}4^2 \cdot (0{,}7 + 0{,}03 \cdot 22) = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

USBR:

$$K = C \cdot d_{20}^{2{,}3} = 0{,}0036 \cdot 0{,}9^{2{,}3} = 2{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Slichter:

$$K = C \, d_e^2 = 0{,}00574 \cdot 0{,}4^2 = 9{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

4.1.2. Granulometrijska analiza i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama za uzorak na dubini od 4–24 m

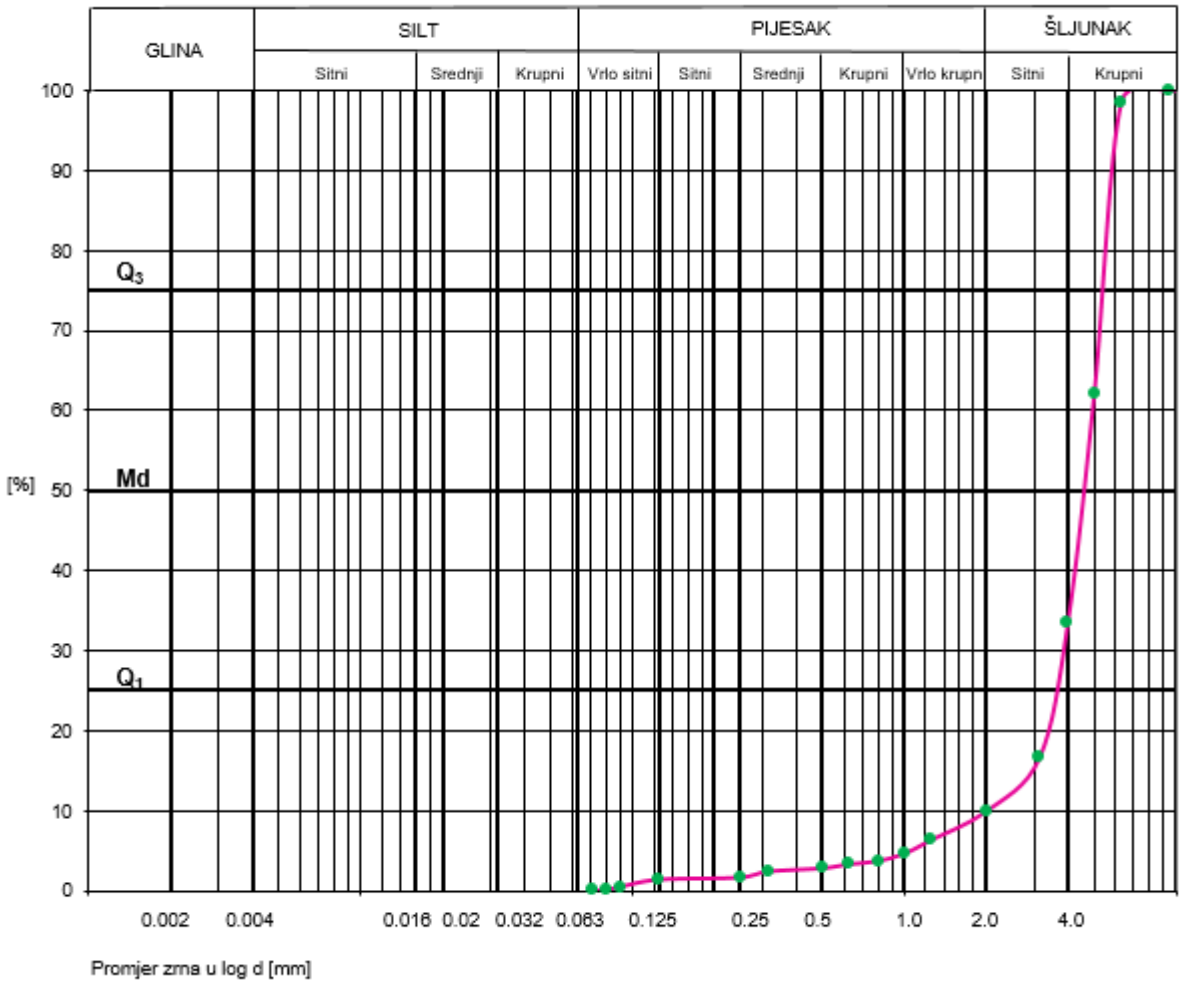


Slika 4-5 Reprezentativni uzorak od 4–24 metra

4.1.2.1 Granulometrijska analiza

Tablica 4-2 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem za uzorak dubine od 4–24 m

d sita [mm]	*Masa sita (g)*	*Masa sito i uzorak (g)*	*Masa (g)*	*[%]*	*Kumulativno [%]*
19,0	589,9	597,6	7,7	0,11	100,00
9,5	537,2	628,0	90,8	1,33	99,89
6,3	494,8	2979,2	2484,4	36,50	98,55
5,0	433,1	2382,9	1949,8	28,64	62,05
4,0	464,3	1606,5	1142,2	16,78	33,41
3,15	434,2	891,8	457,6	6,72	16,63
2,0	404,4	649,9	245,5	3,61	9,91
1,25	524,3	638,0	113,7	1,67	6,30
1,0	379,6	442,4	62,8	0,92	4,63
0,8	373,9	399,0	25,1	0,37	3,71
0,63	358,2	393,5	35,3	0,52	3,34
0,5	294,8	322,3	27,5	0,40	2,82
0,315	380,9	431,4	50,5	0,74	2,42
0,25	336,2	354,7	18,5	0,27	1,67
0,125	339,5	403,0	63,5	0,93	1,40
0,09	358,8	381,3	22,5	0,33	0,47
0,08	352,0	358,9	6,9	0,10	0,14
0,071	330,5	333,0	2,5	0,04	0,04
			6806,8		



Slika 4-6 Granulometrijski dijagram za uzorak dubine od 4–24 metra

4.1.2.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama

Hazen:

$$K = C_H \, d_{10}^2 \, (0{,}7 + 0{,}03T) = 0{,}0116 \cdot 2^2 \cdot (0{,}7 + 0{,}03 \cdot 22) = 0{,}06 \text{ m/s}$$

USBR:

$$K = C \cdot d_{20}^{2{,}3} = 0{,}0036 \cdot 3{,}3^{2{,}3} = 0{,}06 \text{ m/s}$$

Slichter:

$$K = C \, d_e^2 = 0{,}00574 \cdot 2^2 = 0{,}02 \text{ m/s}$$

4.1.3. Granulometrijska analiza i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama za uzorak na dubini od 24–25 m

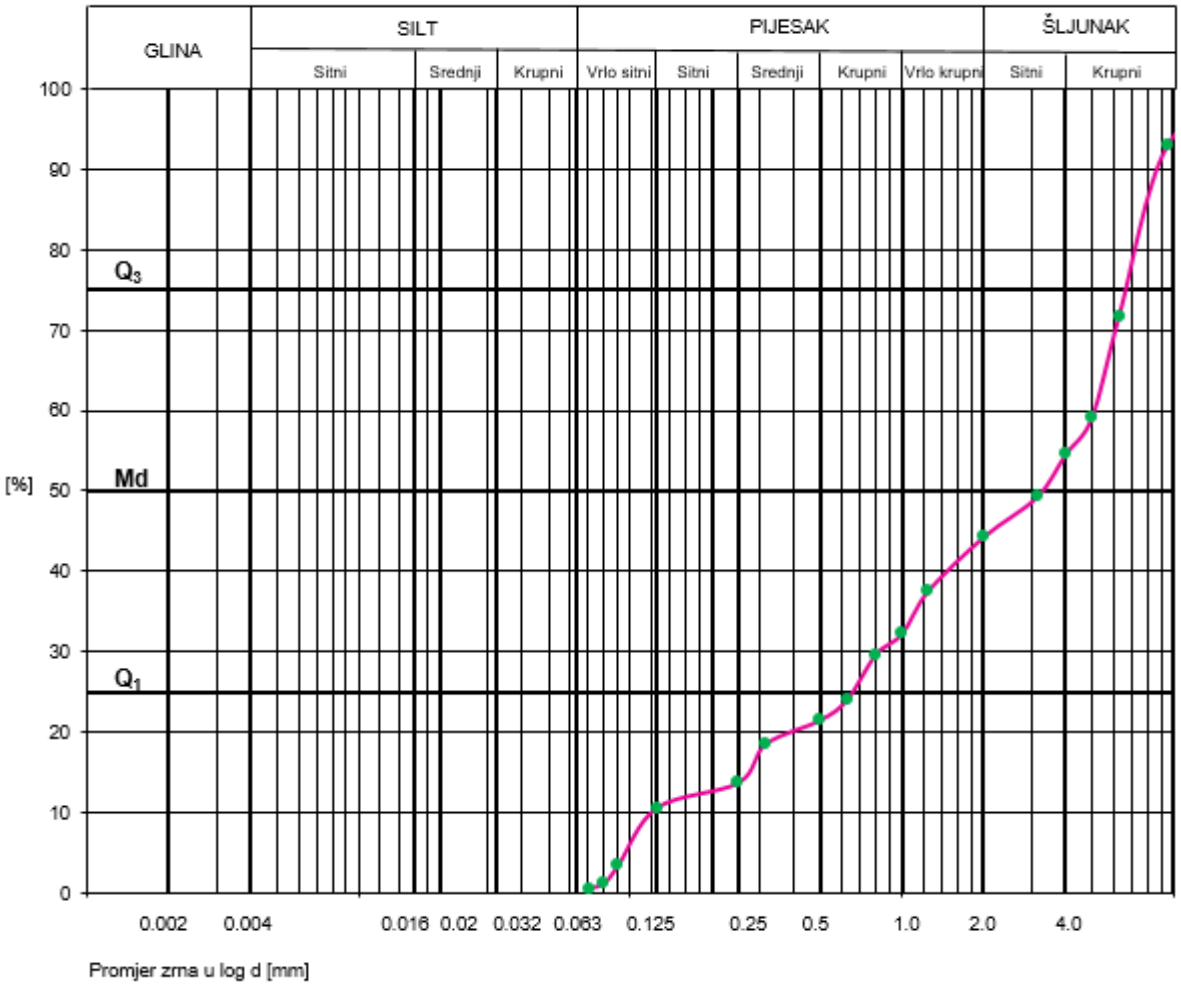


Slika 4-7 Reprezentativni uzorak od 24–25 metra

4.1.3.1 Granulometrijska analiza

Tablica 4-3 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem za uzorak dubine od 24–25 m

d sita [mm]	*Masa sita (g)*	*Masa sito i uzorak (g)*	*Masa (g)*	*[%]*	*Kumulativno [%]*
19,0	589,9	940,8	350,9	6,96	100,00
9,5	537,2	1611,3	1074,1	21,30	93,04
6,3	494,8	1134,1	639,3	12,68	71,74
5,0	433,1	663,1	230,0	4,56	59,07
4,0	464,3	729,1	264,8	5,25	54,51
3,15	434,2	686,1	251,9	5,00	49,25
2,0	404,4	743,8	339,4	6,73	44,26
1,25	524,3	792,6	268,3	5,32	37,53
1,0	379,6	511,0	131,4	2,61	32,21
0,8	373,9	653,1	279,2	5,54	29,60
0,63	358,2	490,1	131,9	2,62	24,07
0,5	294,8	443,9	149,1	2,96	21,45
0,315	380,9	624,2	243,3	4,82	18,49
0,25	336,2	493,6	157,4	3,12	13,67
0,125	339,5	700,7	361,2	7,16	10,55
0,09	358,8	472,5	113,7	2,25	3,39
0,08	352,0	382,4	30,4	0,60	1,13
0,071	330,5	357,2	26,7	0,53	0,53
			5043,0		



Slika 4-8 Granulometrijski dijagram za uzorak dubine od 24–25 metra

4.1.3.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama

Hazen:

$$K = C_H\, d_{10}^2\, (0{,}7 + 0{,}03T) = 0{,}0116 \cdot 0{,}12^2 \cdot (0{,}7 + 0{,}03 \cdot 22) = 2{,}3 \cdot 10^{-4}\ \text{m/s}$$

USBR:

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

Slichter:

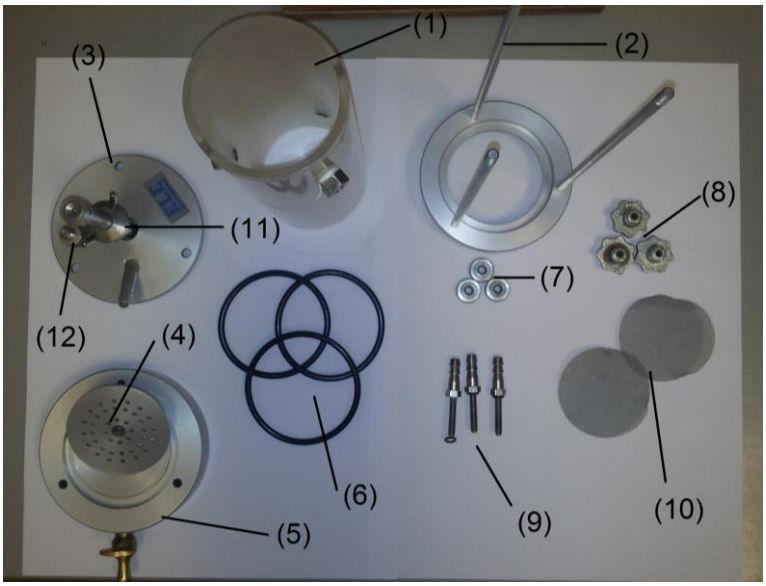
$$K = C\, d_e^2 = 0{,}00574 \cdot 0{,}12^2 = 8{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{m/s}$$

4.2 Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom

Nakon napravljene granulometrijske analize pokazalo se da su uzorci uglavnom šljunkoviti te je kao laboratorijska metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti odabrana metoda permeametra sa stalnom razinom. Eksperiment je rađen prema ispitnoj normi ASTM D2434 – 68. Korišteni permeametar je standardnih dimenzija, tj. udaljenost između manometara 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. Količina toka mjerljiva je na donjem preljevu. Metoda je detaljno objašnjena po koracima.

4.2.1 Sastavljanje ćelije i ugradnja uzorka u ćeliju

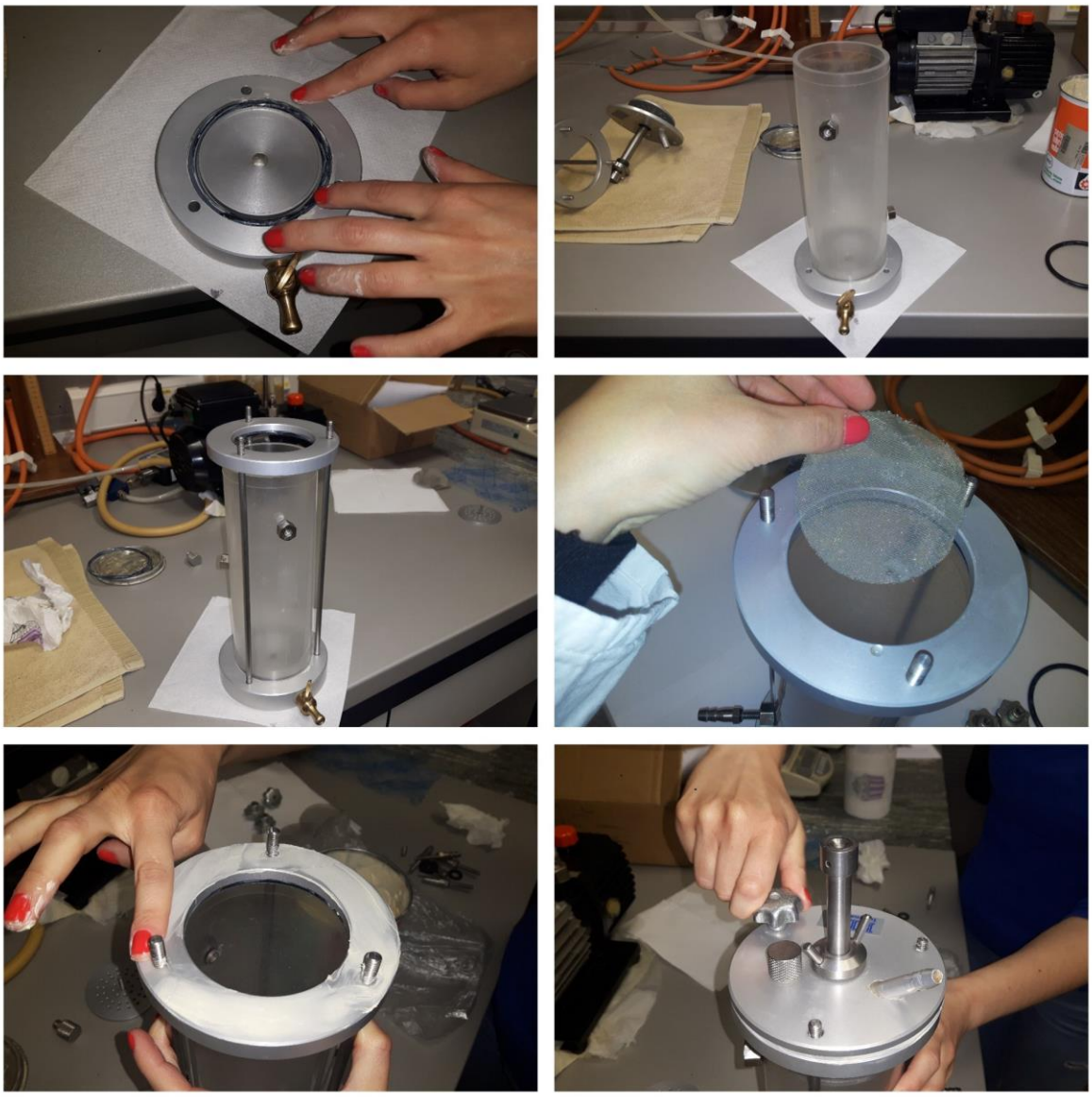
Korištena norma ASTM D 2434 - 68 nalaže da se iz uzorka moraju ukloniti zrna veća od 19 mm i da u uzorku ne smije biti više od 10 % čestica manjih od 75 μm. Nakon što smo uzorke prosijali i uklonili zrna veća od 19 mm, prije same ugradnje uzorka moraju se još izmjeriti dimenzije ćelije. Potrebno je izmjeriti udaljenost između manometara L (m), poprečni presjek A (cm^2), srednju vrijednost unutarnjeg promjera ćelije D (m). Dijelovi ćelije prikazani su na **Slici 4-9**.



Slika 4-9 Dijelovi ćelije permeametra

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

Kada je uzorak spreman za ugradnju, počinje se sa sastavljanjem ćelije permeametra **(Slika 4-10)**. Ćeliju je najprije potrebno dobro očistiti kako u dijelovima gdje se ćelija spaja ne bi ostalo čestica prethodnog uzorka. Zatim se svi spojevi i brtve dobro namažu vazelinom. Prije nego što se uzorak ugrađuje u ćeliju se stavlja filter mrežica. Druga filter mrežica stavlja se u ćeliju kada je uzorak već ugrađen.



Slika 4-10 Sastavljanje ćelije

Uzorak se stavlja pomoću lijevka, kružnim pokretima lijevka. Uzorak se puni po 2 cm debljine, nakon čega se sabija batom. Kada uzorkom dođemo do manometarskog izlaza, stavljamo manometarsku spojnicu koja je, također, prethodno namazana vazelinom. Postupak se ponavlja dok se ćelija ne popuni i dok se ne stavi posljednja manometarska spojnica. Uzorak se ne smije napuniti do vrha ćelije (2 cm do vrha), jer bi tako napunjen

uzorak spriječio dovod vode iz rezervoara. Kad je ćelija napunjena, na uzorak se stavlja filter mrežica, te nakon toga poklopac. Na poklopcu se nalazi ispušni ventil, zatvoren je, no ukoliko se dogodi da u uzorku ima zraka ventil se otvori. Ovako pripremljena ćelija spremna je za postupak permeametra sa stalnom razinom **(Slika 4–11)**.



Slika 4-11 Ugradnja uzorka u ćeliju

4.2.2 Saturacija uzorka

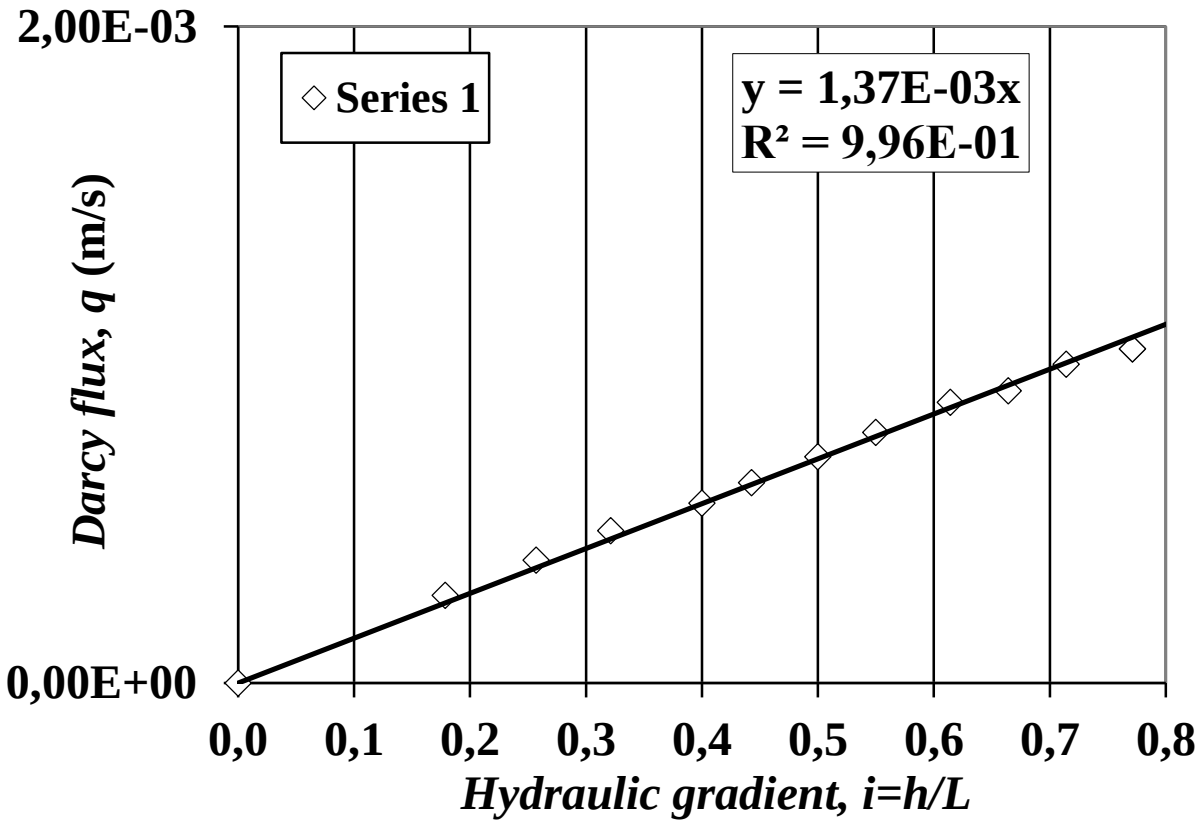
Nakon završene ugradnje uzorka i potpunog sastavljanja ćelije uzorak je potrebno saturirati. Otvori se ventil na ćeliji dolje te se saturacija provodi punjenjem uzorka od dolje prema gore. Važno je da saturacija bude dovoljno spora kako ne bi došlo do remećenja

zbijenosti uzorka. Nakon što je saturacija završena, okreće se sustav i pušta se voda iz spremnika da se gravitacijski procjeđuje kroz uzorak. Prije početka mjerenja potrebno je ukloniti zrak iz uzorka (vakuum pumpa izvlači zrak oko 10 do 15 minuta). Kad se uzorak ispuni vodom sustav se okreće. Najprije se otvara dovodni ventil koji propušta vodu u uzorak i zatvara se ventil prema vakuumskoj pumpi. Otvaranjem dovodnog ventila na donjoj baznoj ploči započinje postupak ispitivanja. Tek kad se razina vode u sve 3 cjevčice u manometru podigne na istu visinu možemo biti sigurni da u uzorku nema zraka.

4.2.3 Postupak ispitivanja

Postupak ispitivanja započinje otvaranjem dovodnog ventila, te osiguravanjem slobodnog protoka vode kroz uzorak. Nakon postizanja stabilne manometarske razine započinje mjerenje. Počinje se s razlikom visina dizanja vode u manometarskim cjevčicama od 2 cm, nakon toga se ta razlika povećava za 0,5 cm kako bi se povećao protok koji je linearno proporcionalan hidrauličkom gradijentu i koji je u granicama Darcyjevog zakona. Povećanje gradijenta odnosno povećanje razlike u manometarskim visinama u cjevčicama ponavlja se tako dugo dok ne dođe do odstupanja od linearnog odnosa specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta što upućuje na pojavu turbulentnog toka. Mjeri se vrijeme potrebno da se napuni menzura od 100 ml.

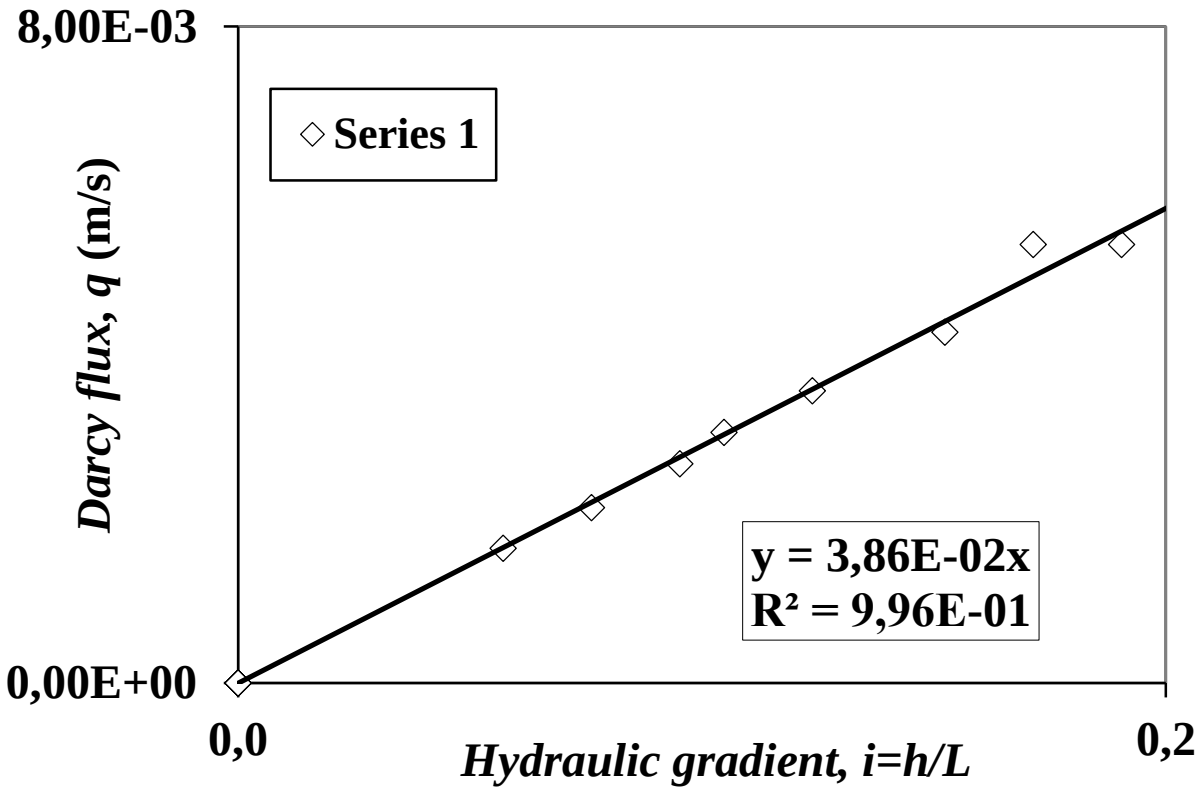
4.2.4 Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom za uzorak na dubini od 1-4 m



Slika 4-12 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za uzorak s dubine od 1-4 m

Napravljeno je 11 mjerenja na temelju kojih je dobivena hidraulička vodljivost koja iznosi $K = 1{,}37 \times 10^{-3}$ m/s.

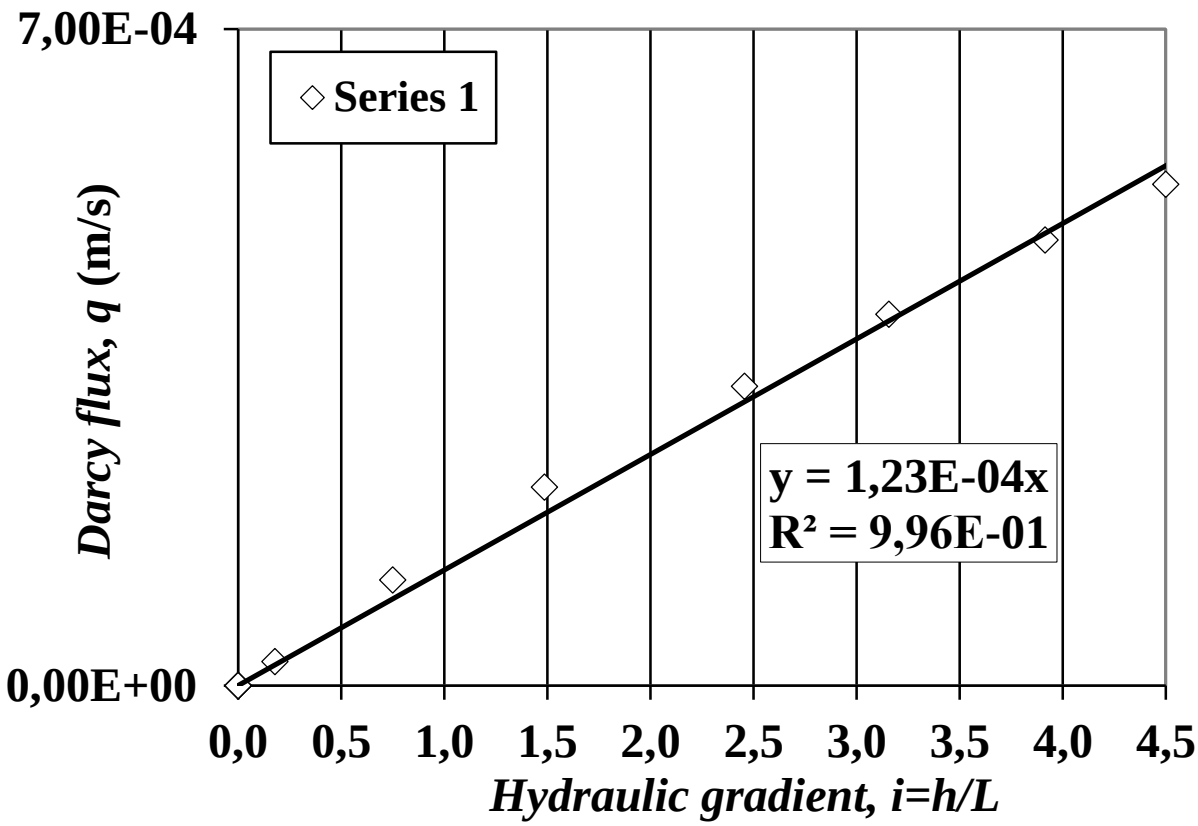
4.2.5 Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom za uzorak na dubini od 4-24 m



Slika 4-13 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za uzorak s dubine od 4-24 m

Napravljeno je 8 mjerenja na temelju kojih je dobivena hidraulička vodljivost koja iznosi $K = 3{,}86 \times 10^{-2}$ *m/s*.

4.2.6 Eksperiment permeametrom sa stalnom razinom za uzorak na dubini od 24-25 m



Slika 4-14 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za uzorak s dubine od 24-25 m

Napravljeno je 7 mjerenja na temelju kojih je dobivena hidraulička vodljivost koja iznosi $K = 1,23 \times 10^{-4}$ *m/s*.

5. REZULTATI

5.1 Rezultati hidrauličkih 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 kumulativnim granulometrijskim krivuljama potrebno očitati vrijednosti efektivnih promjera zrna (Tablica 5-1). U Tablici 5-2 prikazane su vrijednosti hidrauličke vodljivosti prema Hazenu, USBR-u, Slichteru i pomoću permeametra sa stalnom razinom. Iz tablice 5-1 vidljivo je da nije zadovoljen prvi kriterij za uzorke na dubini od 1 – 4 m i 24 – 25 m (d_{60} /d_{10}b < 5), te za ta dva uzorka nije bilo moguće izračunati hidrauličku vodljivost prema Hazenu.

Tablica 5-1 Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna (d_{10}, d_{20}, 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)***
1 – 4 m	0,4	0,9	4,5	11,25	0,4
4 – 24 m	2	3,3	4,5	2,25	2
24 – 25 m	0,12	0,4	4,5	37,5	0,12

Tablica 5-2 Izračun hidrauličke vodljivosti

Uzorak	***Hazen (m/s)***	***USBR (m/s)***	***Slichter (m/s)***	***Permeametar (m/s)***
1 – 4 m	-	$2{,}8\cdot10^{-3}$	$9{,}2\cdot10^{-4}$	$1{,}37\cdot10^{-3}$
4 – 24 m	0,06	0,06	0,02	$3{,}86\cdot10^{-2}$
24 – 25 m	-	$4{,}4\cdot10^{-4}$	$8{,}3\cdot10^{-5}$	$1{,}23\cdot10^{-4}$

Hidrauličke vodljivosti dobivene metodom permeametra sa stalnom razinom bitno se ne razlikuju od hidrauličkih vodljivosti dobivenih izračunima empirijskim formulama, no hidrauličke vodljivosti dobivene eksperimentom su većih vrijednosti. Najveće vrijednosti hidrauličke vodljivosti dao je uzorak od 4 – 24 m koji je prema granulometrijskoj analizi najjednoličniji i sadrži najmanje sitnozrnatih komponenti, dok je najmanje vrijednosti hidrauličke vodljivosti dao uzorak od 24 – 25 m zbog najvećeg udjela sitnozrnatog materijala.

6. ZAKLJUČAK

Na tri uzoraka s različitih dubinskih intervala (1-4 m, 4-24 m, 24-25 m) napravljena je granulometrijska analiza te je određena hidraulička vodljivost na temelju empirijskih formula i metodom permeametra sa stalnom razinom.

S ciljem određivanja hidrauličke vodljivosti metodom temeljenoj na empirijskim formulama prethodno je napravljena granulometrijska analiza. Granulometrijskom analizom je utvrđeno da svi uzorci pripadaju skupini pjeskovitih šljunaka jer u svima dominira šljunkovita komponenta.

Na temelju granulometrijske analize napravljene su kumulativne granulometrijske krivulje iz kojih su iščitane vrijednosti efektivnih veličina zrna koji služe kao ulazni parametri za određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama.

Test permeametrom sa stalnom razinom uspio je na sva tri uzorka te se, uspoređujući rezultate dobivene permeametrom i empirijskim formulama, dolazi do sličnosti u rezultatima, s napomenom da rezultati dobiveni metodom permeametra sa stalnom razinom daju nešto niže vrijednosti od rezultata dobivenih empirijskim formulama.

Samo izvođenje eksperimenta je jednostavno što je ujedno i prednost laboratorijskih metoda. Metode na terenu daju preciznije rezultate, ali iziskuju puno više vremena, ljudi, pa tako i financijskih sredstva. I terenske i laboratorijske metode određivanja hidrauličke vodljivosti imaju svoje prednosti i mane pa na kraju odabir ovisi prvenstveno o iskustvu s prijašnjim mjerenjima, koliko brzo su nam podaci potrebni i, naravno, o samim financijskim mogućnostima.

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

BAČANI, A. i POSAVEC, K. (2009): Elaborat zaštitnih zona vodocrpilišta Velika Gorica, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb

BAČANI, A. i ŠPARICA, M. (2001): Geology of Zagreb aquifer system. 9th International Congress of the geological society od Greece. (26. – 28. September, 2001). Proceedings, vol XXXIV, No 5, 1973 – 1979, Athens

BLAŠKOVIĆ, I. i DRAGIČEVIĆ, I. (1989): Studija prostornog rasporeda i geometrije sedimentnih tijela i njihov utjecaj na hidrogeološke odnose na području lijeve i desne obale Save od Bregane do Rugvice. RGN fakultet, Zagreb

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 vodonosnih i njegove hidrogeološke značajke. Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima, zbornik radova, okrugli stol, Slavonski Brod

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

HAZEN, A. (1893): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. 24th Annual Report of the Massachusetts State Board of Health, 1-541, Boston

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

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

PERŠIĆ, S. (2014): Određivanje hidrauličke vodljivosti naslaga srednjeg i mlađeg pleistocena zagrebačkog vodonosnika na području budućeg vodocrpilišta Črnkovec (uža

lokacija), Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb

POSAVEC, K. (2006): Identifikacija i prognoza minimalnih razina podzemne vode zagrebačkog aluvijalnog vodonosnika modelima recesijskih krivulja, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb

SLICHTER, C.S. (1899): Theoretical investigations of the motion of ground waters. 19th Annual Report, Part II. USGS, Washington, D.C.

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. 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 od Middle Pleistocene Deposits between Zaprešić and Samobor, Geološki vijesnik, vol. 44, 69 – 82

VELIĆ, J. i DURN, G. (1993): Alternating Lacustrine – Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases during Quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia. Geologija Croatica, vol. 46, No.1, p. 71 – 90

VELIĆ, J., B. SAFTIĆ & T. MALVIĆ: (1999): Lithologic Composition and Stratigraphy of Quaternary Sediments in the Area of the "Jakuševec" Waste Depository (Zagreb, Northern Croatia). Geologia Croatica, vol. 52, no. 2, p. 119–13

Web adrese:

http://www.zarez.hr/clanci/infrastruktura-domena-biopolitike - izvor za sliku (12.7.2017., 12:18 h)