

Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom na području Velike Gorice

Kukolja, Adriana

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:169:053568>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



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 PODRUČJU VELIKE GORICE**

Diplomski rad

Adriana Kukolja

GI 290

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem svom mentoru, redovitom profesoru dr. sc. Kristijanu Posavcu na strpljenju, povjerenju i iskazanoj pomoći koji je svojim stručnim i praktičnim savjetima pomogao pri izradi ovog rada.

Srdačno se zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Jeleni Parlov i izv. prof. dr. sc. Željku Duiću na susretljivosti i korisnim sugestijama za potrebe rada.

Najveće hvala cijeloj mojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom cijelog studiranja.

ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI METODOM PERMEAMETRA SA
STALNOM RAZINOM NA PODRUČJU VELIKE GORICE

ADRIANA KUKOLJA

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

Sažetak

U radu je određivana hidraulička vodljivost na nekonsolidiranom uzorku šljunka i pijeska iz pedološkog okna na području vodocrpilišta Velika Gorica. Uzorak je testiran u laboratoriju primjenom permeametra sa stalnom razinom i dana je usporedba rezultata u odnosu na metodu određivanja hidrauličke vodljivosti uz pomoć empirijskih formula Hazena, Slichtera i USBR. Teorijski dio rada definira Darcyjev zakon i hidrauličku vodljivost te opisuje korištene laboratorijske metode i metode temeljene na empirijskim formulama za određivanje hidrauličke vodljivosti. Dobivena vrijednost hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom je unutar raspona očekivanih vrijednosti za zagrebački vodonosnik, a iznosi $8,2 \times 10^{-5}$ m/s.

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

Diplomski rad sadrži: 39 stranica, 5 tablica, 20 slika i 23 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Prof. dr. sc. Kristijan Posavec, RGNF

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Kristijan Posavec, RGNF
Izv. prof. dr. sc. Željko Duić, RGNF
Izv. prof. dr. sc. Jelena Parlov, RGNF

Datum obrane: 28. rujan 2018.

DETERMINATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY USING CONSTAT HEAD
PERMEABILITY TEST METHOD IN THE AREA OF THE WELL FIELD
VELIKA GORICA

ADRIANA KUKOLJA

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

Abstract

The main goal of this Master's thesis was to determine hydraulic conductivity of unconsolidated gravel and sand sample from the pedological area in the well field Velika Gorica. Sample was tested in laboratory using a constant head permeability test and were compared with the results from method based on empirical formulas (Hazen, USBR, Slichter). The theoretical part of the work defines Darcy's law and hydraulic conductivity and describes used laboratory methods and method based on empirical formulas for determining hydraulic conductivity. Obtained value of hydraulic conductivity using a constant head permeability test is within the range of expected values for the Zagreb aquifer and it is 8.2×10^{-5} m/s.

Keywords: hydraulic conductivity, constant head permeameter, well field Velika Gorica, methods of determining hydraulic conductivity

Thesis contains: 39 pages, 5 tables, 20 figures and 23 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited 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 Željko Duić, Associate Professor, RGNF
PhD Jelena Parlov, Associate Professor, RGNF

Date of defense: September 28, 2018.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PRIRODNE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA.....	3
2.1. Lokacija područja istraživanja.....	3
2.2. Geološke značajke	4
2.3. Hidrogeološke značajke.....	7
3. TEORIJSKE OSNOVE.....	9
3.1. Darcyjev zakon	9
3.2. Hidraulička vodljivost	11
4. METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI	14
4.1. Metode temeljene na empirijskim formulama.....	14
4.2. Laboratorijske metode	19
5. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI	22
5.1. Granulometrijska analiza sisanjem i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama	23
5.2. Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom	25
6. REZULTATI.....	32
7. ZAKLJUČAK	35
8. LITERATURA.....	37

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Hidraulička vodljivost (Bačani, 2006).....	1
Slika 2.1 Lokacija istraživanog područja	3
Slika 2.2 Prostorni položaj zagrebačkog vodonosnika (Kukolja i Plazonić, 2018).....	4
Slika 2.3 Isječak osnovne geološke karte SFRJ 1:100.000, list Zagreb i list Ivanić Grad (Kukolja i Plazonić, 2018).....	5
Slika 2.4 Shematski profil zagrebačkoga vodonosnog sustava (Posavec, 2006).....	6
Slika 2.5 3D prikaz hidrogeološkog modela zagrebačkog vodonosnika (Bačani i Posavec, 2014).....	7
Slika 3.1 Shematski prikaz Darcyjeve aparature (Bačani, 2006).....	9
Slika 4.1 Permeametar sa stalnom razinom vode (Urumović, 2003).....	20
Slika 4.2 Permeametar s promjenjivom razinom vode (Urumović, 2003)	21
Slika 5.1 Pedološko okno – mjesto uzimanja uzorka.....	22
Slika 5.2 Sušenje uzorka	22
Slika 5.3 Metoda sijanja: a) sita standardnih dimenzija, b) postupak suhog sijanja.....	23
Slika 5.4 Granulometrijska krivulja za ispitivani uzorak.....	24
Slika 5.5 Dijelovi ćelije permeametra	25
Slika 5.6 Postupak četvrtanja uzorka: a) količina materijala za četvrtanje, b) cjelokupan uzorak, c) dijeljenje uzorka na četvrtine, d) uklanjanje uzorka sa suprotnih četvrtina	26
Slika 5.7 Sastavljanje ćelije permeametra: a) mazanje gumica vazelinom, b) sastavljanje donje bazne ploče, c) tronožac za učvršćivanje, d) učvršćivanje ćelije i stavljanje gornje bazne ploče	27
Slika 5.8 Ugradnja uzorka u ćeliju permeametra	29

Slika 5.9 Saturacija uzorka.....	30
Slika 5.10 Postupak ispitivanja i mjerenje	31
Slika 6.1 Grafički prikaz odnosa Darcyjeve brzine q i hidrauličkog gradijenta i	34

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Karakteristične vrijednosti hidrauličke vodljivosti K za različite vrste materijala (Bačani, 2006)	13
Tablica 5.1 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem	24
Tablica 6.1 Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna (d_{10} , d_{20} i d_{60}).....	32
Tablica 6.2 Udio glavnih granulometrijskih frakcija uzorka.....	32
Tablica 6.3 Rezultat hidrauličke vodljivosti	33

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

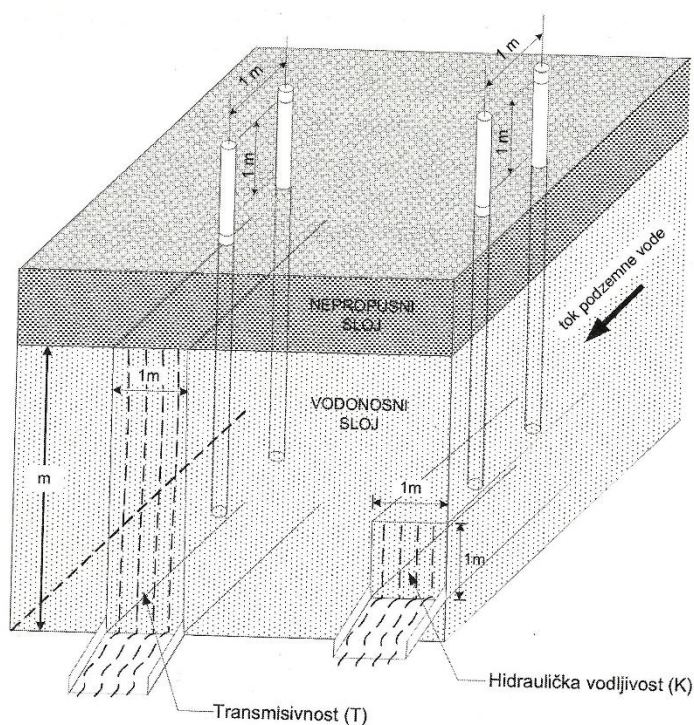
Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica
K	hidraulička vodljivost	(m/s)
F	površina protjecanja	(m ²)
i	hidraulički gradijent	(-)
Q	protok	(m ³ /s)
h_1, h_2	piezometarska visina	(m)
l	duljina	(m)
\vec{q}	specifični protok	(m/s)
c	bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje značajke stijene (poroznost, zbijenost i oblik zrna)	(-)
d	promjer pore	(m)
g	akceleracija sile teže	(m/s ²)
ρ_v	gustoća fluida	(kg/m ³)
d_{30}	reprezentativni promjer	(mm)
η	dinamički viskozitet fluida	(Pa·s = kg/ms)
k	unutrašnja propusnost	(m ²)
$d_e=d_{10}$	efektivni promjer zrna, tj. promjer u uzorku od kojeg 10 % zrna ima manji promjer	(mm)
d_{20}	efektivni promjer zrna, tj. promjer u uzorku od kojeg 20 % zrna ima manji promjer	(mm)
d_{60}	efektivni promjer zrna, tj. promjer u uzorku od kojeg 60 % zrna ima manji promjer	(mm)
C_H	konstanta - 0,0116 (za K izražen u m/s)	(-)

T	temperatura vode	(°C)
C	konstanta - 0,0036 (za K izražen u m/s)	(-)
n	poroznost	(-)
ν	kinematička viskoznost	(m ² /s)
C	konstanta - 0,00574 (za K u m/s)	(-)
L	visina uzorka u ćeliji	(m)
a	površina poprečnog presjeka cjevčice	(cm ²)
t	vrijeme	(s)
A	površina poprečnog presjeka uzorka	(m ²)

1. UVOD

U ovom radu obrađuje se problem određivanja hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom te određivanje hidrauličke vodljivosti metodama temeljenim na empirijskim formulama u koje je uključena i granulometrijska analiza na uzorku iz pedološkog okna s područja vodocrpilišta Velika Gorica koje je dio zagrebačkog vodonosnika.

Hidraulička vodljivost (eng. *hydraulic conductivity*), K može se definirati kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne stijene jedinične površine ($F = 1 \text{ m}^2$) 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 , primjerice m/s , m/dan , cm/s (Bačani, 2006).



Slika 1.1 Hidraulička vodljivost (Bačani, 2006)

Hidraulička vodljivost kao sposobnost protoka vode kroz poroznu sredinu koju je prvi matematički opisao Darcy 1856. godine, jedan je od najvažnijih i najčešće korištenih parametara porozne sredine. Hidraulička vodljivost je tenzor, što znači da se svojstva mijenjaju sa smjerom, tj. razlikuju se u prostoru i obično imaju manje vrijednosti u

okomitom nego u vodoravnom smjeru (Posavec et al., 2018). Svojstvo hidrauličke vodljivosti imaju tla, sedimenti i stijene, a ona ovisi o značajkama stijene kroz koju fluid teče i o značajkama samog fluida. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti kreću se u širokom rasponu od 10^{-13} do 10^{-1} m/s ovisno o tipu porozne sredine. Najviše vrijednosti pokazuju šljunci, pijesci te vrlo okršene i raspucale stijene, dok najniže vrijednosti hidrauličke vodljivosti imaju neraspucale magmatske i metamorfne stijene kao što su granit, gnajs i bazalt (Bačani, 2006).

Postoji nekoliko metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti od kojih su najčešće korištene:

- terenska metoda pokusnog crpljenja, gdje se određuje transmisivnost, a dijeljenjem s debljinom sloja dobiva se hidraulička vodljivost K ,
- laboratorijska metoda – pomoću permeametra sa stalnom ili promjenjivom razinom,
- metoda koja se temelji na empirijskim formulama uz korištenje podataka o granulometrijskom sastavu porozne sredine.

Ispitivanja hidrauličke vodljivosti nekonsolidiranih naslaga zagrebačkog vodonosnika koristeći permeametar sa stalnom razinom primijenjena su i u prethodnim studijama i radovima Ban (2011), Ivačić (2014), Gelo (2014), Peršić (2014) i Čambala (2017). Ban (2011) ispituje uzorke nekonsolidiranog materijala uzete u neposrednoj blizini rijeke Save i dobiva hidrauličke vodljivosti u rasponu od 10^{-4} m/s. Ivačić (2014) je utvrdio da su hidrauličke vodljivosti iz uzoraka preuzetih s bušotine u području budućeg vodocrpilišta Črnkovec u rasponu od 10^{-3} do 10^{-5} m/s. Čambala (2017) je odredila vrijednosti hidrauličke vodljivosti u rasponu od 10^{-3} do 10^{-4} m/s u središnjem dijelu zagrebačkog vodonosnika, dok su Gelo (2014) i Peršić (2014) proučavali uzorke iz 100 m bušotine na istočnom dijelu zagrebačkog vodonosnika i dobili hidrauličke vodljivosti u rasponu od 10^{-3} do 10^{-5} m/s.

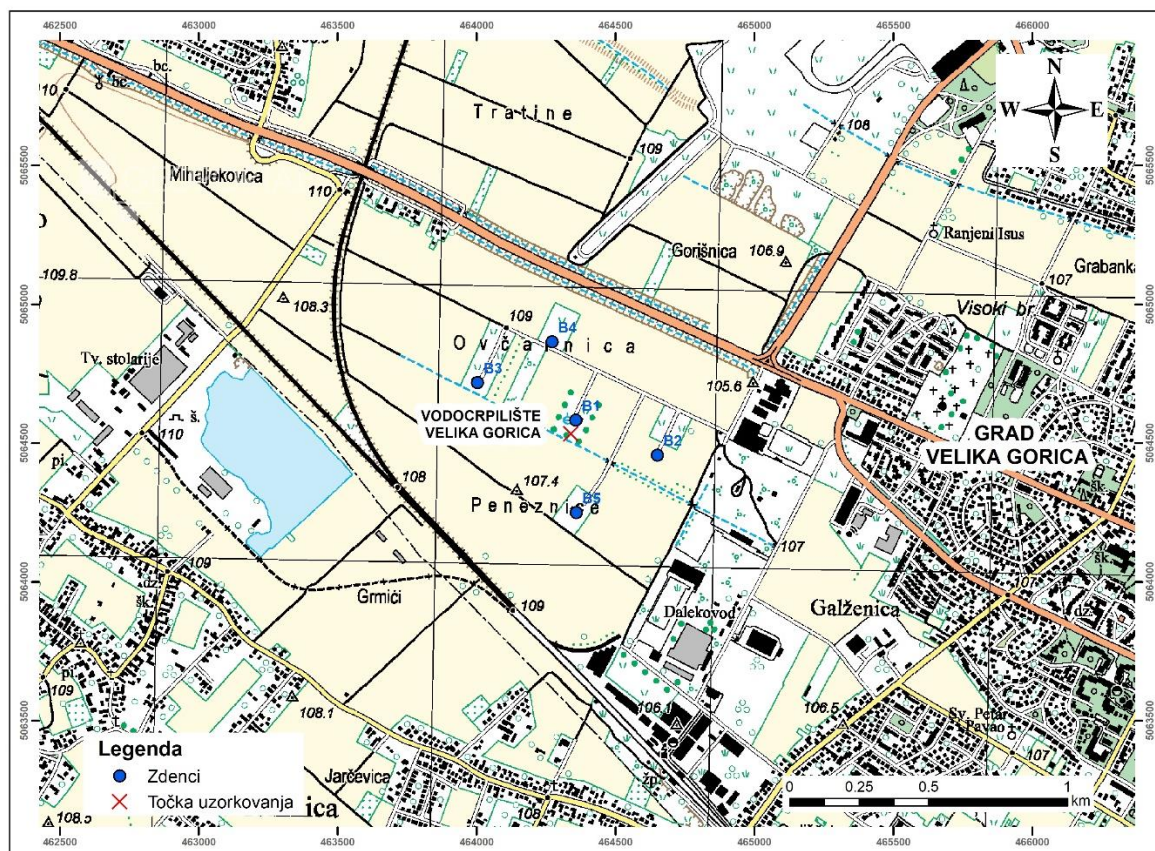
Hidraulička vodljivost ispitana na uzorku s dubine od 2 m iz zone središnjeg dijela zagrebačkog vodonosnika u blizini vodocrpilišta Velika Gorica koji sadrži oko 60% šljunka i oko 40% zrna veličine pijeska pokazuje hidrauličke vodljivosti u rasponu od 10^{-5} m/s što je u skladu s testovima prethodnih autora.

2. PRIRODNE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

2.1. Lokacija područja istraživanja

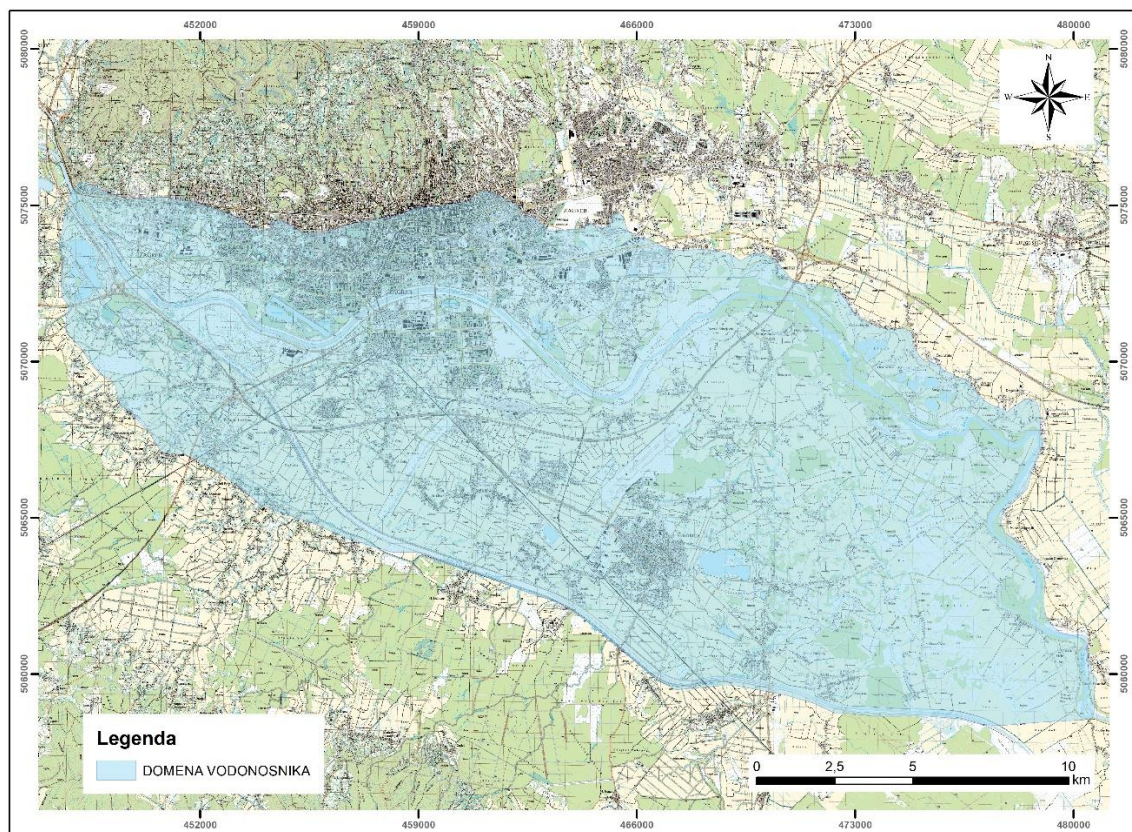
Područje istraživanja smješteno je zapadno od grada Velike Gorice koji se nalazi na području Zagrebačke županije. Istraživani uzorak iz pedološkog okna nalazi se u sklopu vodocrpilišta Velika Gorica uz zdenac B-1, južno od rijeke Save i samim time zahvaća vodu iz zagrebačkog vodonosnika (slika 2.2). Na lokaciji vodocrpilišta postoji 5 izbušenih zdenaca dubine od 35,8 do 46 m koji opskrbljuju vodom dio grada Zagreba i grad Veliku Goricu.

Zdenci zahvaćaju aluvijalni šljunkovito-pjeskoviti vodonosni sloj, koji je bušenjem ustanovljen na dubinskom intervalu od približno 4 do 44 metra. Vodonosni horizont je izgrađen od sitnozrnog do krupnozrnog šljunka s većim udjelom krupnozrnog pijeska. U krovini je prašinsta, polupropusna glina, dok je podina razvijena nejednoliko sa udjelima prašinstog pijeska i gline (Bačani i Posavec, 2009).



Slika 2.1 Lokacija istraživanog područja

Lokacija pripada području zagrebačkog vodonosnika koji se smjestio u zapadnom dijelu Panonske nizine. Rubne granice vodonosnika čine gora Medvednica na sjeveru, Vukomeričke gorice na jugu, Podsusedski prag na zapadu te Rugvica na istoku. Zagrebački vodonosnik svojim većim dijelom obuhvaća područje grada Zagreba (slika 2.2) s pravcem pružanja sjeverozapad – jugoistok, duž rijeke Save u dužini od oko 30 km i s prosječnom širinom od 10 do 15 km (Posavec, 2006). Vodonosnik zauzima površinu rasprostiranja od oko 350 km² i zajedno sa samoborsko-zaprešićkim vodonosnikom predstavlja strateške zalihe Republike Hrvatske i temelj vodoopskrbe grada Zagreba i Zagrebačke županije.



Slika 2.2 Prostorni položaj zagrebačkog vodonosnika (Kukulja i Plazonić, 2018)

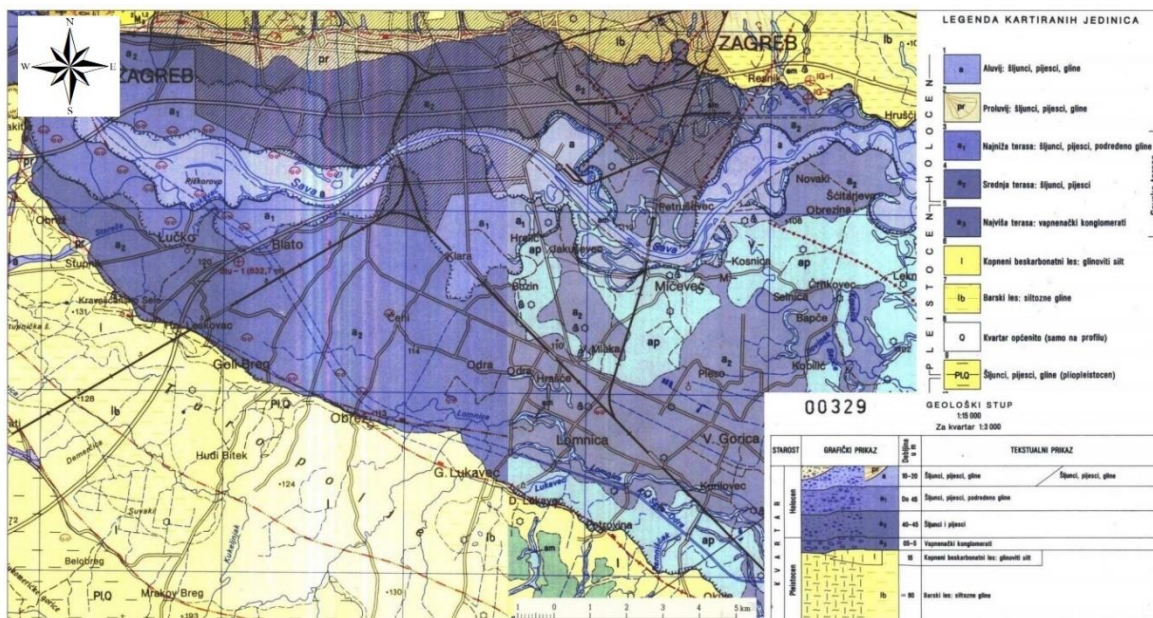
2.2. Geološke značajke

Zagrebački vodonosnik čine sedimenti koji su se taložili za vrijeme srednjeg i gornjeg pleistocena te holocena (slika 2.3).

Dublji vodonosni sloj taložen je tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena, a na području zagrebačkog vodonosnika nalazila su se jezera i močvare. Područja okolnih gorja Medvednice, Žumberačkog gorja i Marijagoričkih brda bila su kopna podložna intenzivnoj

eroziji i denudaciji. Najstarije kvartarne naslage donjeg pleistocena su predstavljene većinom prahovitim glinama i glinovitim prahovima, ponegdje i sitnozrnati pijesci. Srednji pleistocen predstavljen je uglavnom pijescima osobito u starijem i srednjem dijelu, dok se u mlađem srednjem pleistocenu pojavljuju prahovi i gline (Velić i Saftić, 1991; Velić i Durn, 1993). Mlađi pleistocen karakteriziran je lateralnim promjenama šljunka, pijeska, praha i gline. Krajem pleistocena tektonska aktivnost uvjetovala je spuštanje terena uz rubove Medvednice, Samoborskog gorja i Vukomeričkih gorica te formiranje Savske potoline (Velić i Saftić, 1991).

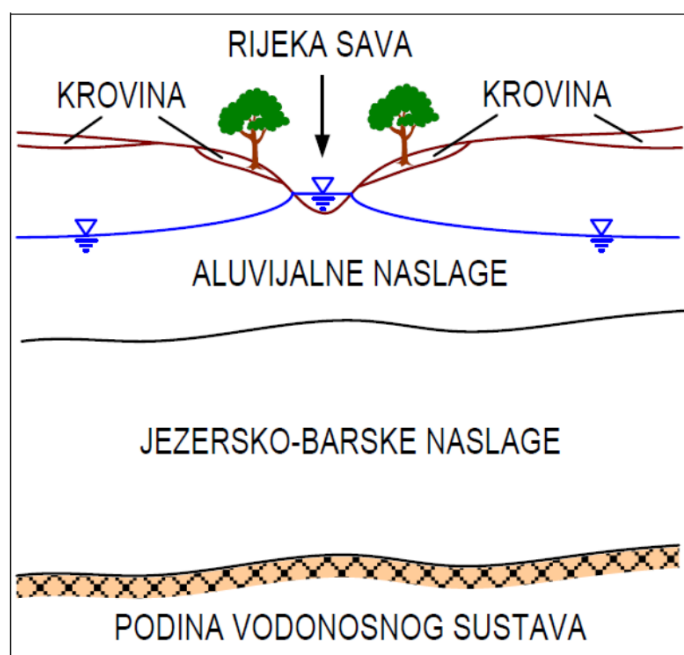
Plići vodonosni sloj taložen je tijekom holocena. Različiti klimatski i tektonski procesi početkom holocena omogućili su prodor i formiranje rijeke Save, nakon čega započinje transport materijala s područja Alpa na ove prostore (Velić i Durn, 1993). Okoliš taloženja i petrografski sastav valutica predstavljaju glavnu razliku naslaga pleistocena i holocena. Izvorišni materijal su tako postale Alpe, a sastav valutica je pretežito karbonatni, dok su u pleistocenu prevladavale siliciklastične valutice lokalnih izvorišta sa Samoborskog gorja, Medvednice, itd. Zbog čestih klimatskih promjena i tektonske aktivnosti količina transportiranog materijala bila je promjenjivog intenziteta. Posljedica je takvih klimatskih procesa i tektonskih pokreta heterogenost i anizotropija zagrebačkoga vodonosnika te neujednačena debljina naslaga (Kukulja i Plazonić, 2018).



Slika 2.3 Isječak osnovne geološke karte SFRJ 1:100.000, list Zagreb i list Ivanić Grad (Kukulja i Plazonić, 2018)

Uže područje same lokacije istraživanja izgrađeno je također od kvartarnih naslaga koje čine beskarbonatni prapori, holocenski aluvij druge savske terase, sedimenti poplava, te aluvij mrtvaja. Aluviji mrtvaja (am) predstavljaju nekadašnje tokove rijeke Save ili manjih tokova, sedimenti poplava (ap) nalaze se u cijelom području velikih rijeka i nastaju kao posljedica velikih poplava, a sastoje se od sitnozrnatog materijala (praha i gline). Produkt akumulacijskog i erozijskog djelovanja toka Save predstavljaju naslage druge savske terase (a₂) koje čine pijesci, šljunci te pjeskovite i prahovite gline. Naslage beskarbonatnih prapora (l) nastale su kao produkt transporta materijala vjetrom na kopnenu površinu, a predstavljene su naslagama veličine praha (Basch, 1983).

Shematski profil vodonosnog sustava prikazuje troslojni sustav: krovinske naslage – proluvijalni litofacijes, plići sloj u kojemu su zastupljene aluvijalne naslage rijeke Save, dok u dubljem vodonosnom sloju dominantno prevladavaju jezersko–barske naslage kao što je prikazano na slici 2.4.

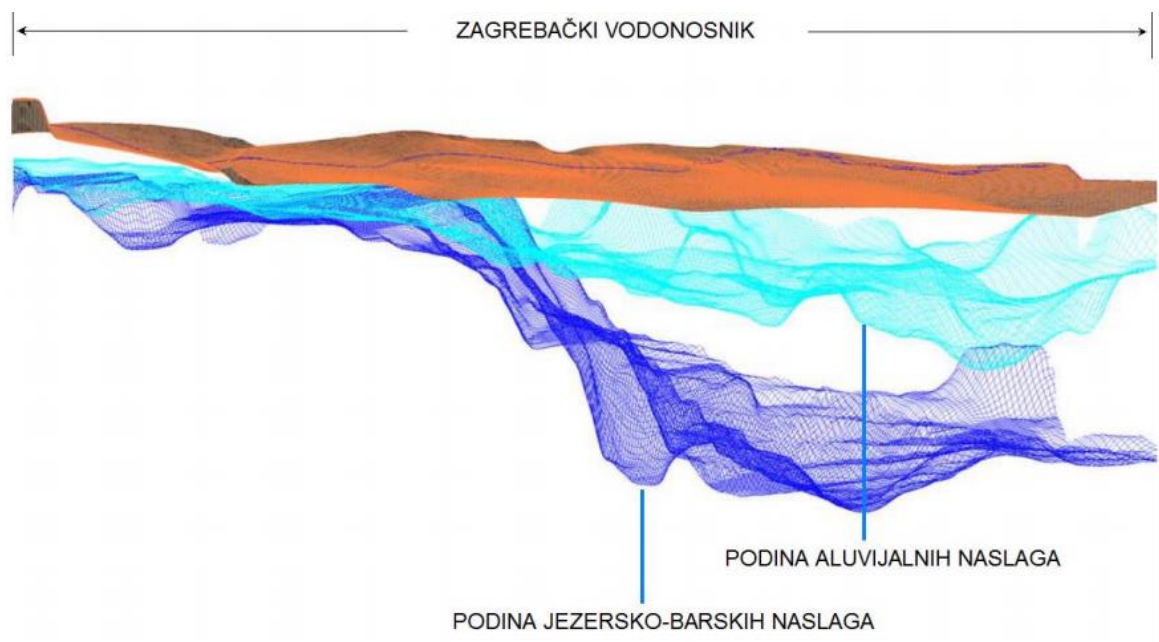


Slika 2.4 Shematski profil zagrebačkoga vodonosnog sustava (Posavec, 2006)

2.3. Hidrogeološke značajke

Zagrebački vodonosnik otvoreni je aluvijalni vodonosnik s vodnom plohom u stalnom kontaktu s rijekom Savom. Rubne granice vodonosnika čine, u hidrauličkom smislu, nepropusna granica na sjeveru, granica dotjecanja na jugozapadu te granica otjecanja na jugoistoku. Horizontalno prostiranje vodonosnika određeno je kvartarnim naslagama, koje definiraju domenu vodonosnika (Bačani i Posavec, 2014).

U profilu vodonosnika razlikuju se dva dobro propusna vodonosna sloja povezana u jednu hidrauličku cjelinu: prvi vodonosni sloj s dominantno aluvijalnim naslagama rijeke Save i drugi vodonosni sloj s dominantno jezersko–barskim naslagama. Debljine vodonosnika su raznolike, a kreću se od nekoliko metara pa sve do otprilike 100 m. Debljina prvog vodonosnog sloja kreće se od 5 do 10 metara u zapadnom dijelu do 40 metara u istočnom dijelu. Debljina drugog vodonosnog sloja doseže oko 20 metara na zapadu, dok je u istočnom dijelu sustava debljina znatno veća i kreće se do 60 metara u području Črnkovca. Krovinu vodonosnika čine slabo propusne naslage koje su vrlo tanke, svega nekoliko metara ili su potpuno odsutne. Debljina slabo propusne krovine povećava se i do 15 metara na rubnim područjima ili u jugoistočnom dijelu vodonosnika. Podinu vodonosnog sustava izgrađuju slabo propusne naslage (Posavec, 2006). Na slici 2.5 prikazan je 3D hidrogeološki model zagrebačkog vodonosnika.



Slika 2.5 3D prikaz hidrogeološkog modela zagrebačkog vodonosnika
(Bačani i Posavec, 2014)

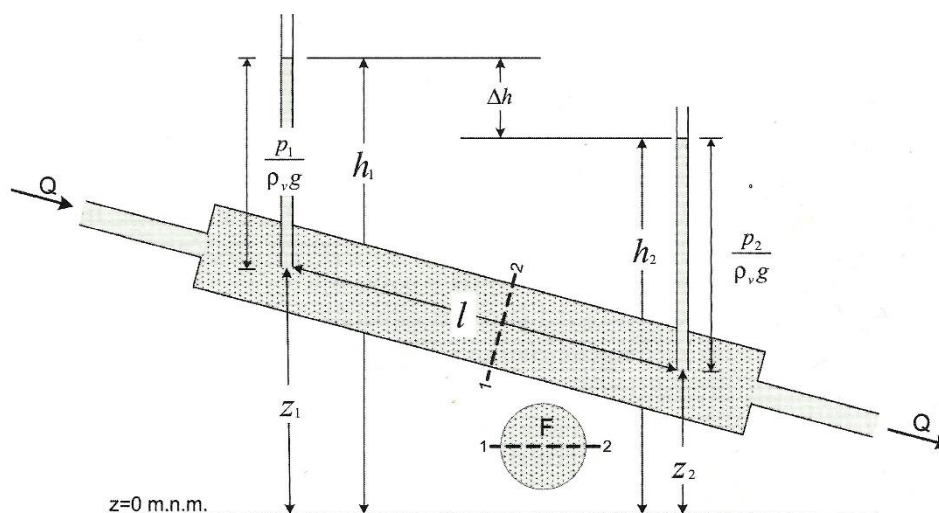
Regionalni smjer toka podzemne vode kreće se od zapada prema istoku/jugoistoku tj. paralelno s rijekom Savom, dok lokalni smjerovi toka podzemne vode u znatnoj mjeri ovise o vodostajima rijeke Save koja ima dominantan utjecaj na promjene razina podzemne vode. Za vrijeme visokih voda rijeka Sava napaja podzemne vode duž cijele duljine toka, dok za vrijeme srednjih i niskih voda dolazi do dreniranja vodonosnika, odnosno dolazi do smanjenja razine podzemne vode i time se smanjuju količine raspoložive vode za vrijeme dužih sušnih razdoblja (Posavec, 2006). Napajanje zagrebačkoga vodonosnika primarno se ostvaruje infiltracijom iz rijeke Save, infiltracijom oborina, infiltracijom iz propusne vodoopskrbne i kanalizacijske mreže, utjecanjem iz susjednog samoborskog vodonosnika po zapadnoj granici i dotjecanjem po južnoj granici vodonosnika s područja Vukomeričkih Gorica (Posavec, 2006). Korito rijeke Save naslanja se na aluvijalne holocenske naslage šljunkovitog sastava velike hidrauličke vodljivosti koje čine glavni vodonosni sloj, zbog toga je hidraulička veza između rijeke Save i vodonosnika vrlo jaka. Vrijednost hidrauličke vodljivosti na zapadnoj strani vodonosnika vrlo je visoka i prelazi 3000 m/dan, dok dalje prema istoku opada (kod Črakovca iznosi oko 2000 m/dan), a još istočnije i manje od 1000 m/dan. Transmisivnost vodonosnika doseže najveće vrijednosti na području Črakovca (50 000 m²/dan) zbog visokih iznosa hidrauličke vodljivosti i debljine vodonosnog sloja (Posavec, 2006).

3. TEORIJSKE OSNOVE

3.1. Darcyjev zakon

Podzemne vode obično su u stanju tečenja, što je posljedica dotjecanja i otjecanja vode. Zbog pojave u razlici potencijala, voda teče s mjesta višeg na mjesto nižeg potencijala. Henry Darcy (1856) bio je prvi koji je matematičkim postavkama dao tumačenje tečenja podzemne vode. Utemeljitelj je zakona koji opisuje laminarni gravitacijski tok vode (ili druge tekućine) u poroznoj sredini (tlo/stijena).

Darcy je tijekom eksperimenta mjerio razine vode h_1 i h_2 pomoću dva manometra na ulazu i izlazu pješčanog filtra te količinu vode (Q) kao što je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1 Shematski prikaz Darcyjeve aparature (Bačani, 2006)

Voda se filtrira kroz pješčani filter. Dužina pješčanog filtra (l) i površina poprečnog presjeka filtra (F) su poznate. Ustanovio je da je količina vode (Q) proporcionalna poprečnom presjeku pješčanog filtra (F) i razlici između visine vode na ulazu i izlazu iz filtra, a obrnuto proporcionalna duljini filtra (l) tj.:

$$Q = K \cdot F \cdot \frac{h_1 - h_2}{l} = K \cdot F \cdot i$$

(3-1)

ili u diferencijalnom obliku:

$$Q = -K \cdot F \cdot \frac{dh}{dl}$$

(3-2)

gdje je:

Q – količina vode koja protječe kroz filter od pijeska (m^3/s),

F – površina poprečnog presjeka pješčanog filtra okomita na smjer toka (m^2),

K – faktor proporcionalnosti za kojeg Darcy navodi da ovisi o propusnosti sloja (m/s),

h_1, h_2 – visine vode (potencijali) iznad referentne ravnine mjerene pomoću manometara na ulazu i izlazu pješčanog filtra (m),

$\frac{h_1 - h_2}{l} = i = \frac{dh}{dl}$ – hidraulički gradijent (bezdimenzionalna veličina). To je gubitak mehaničke energije fluida duž toka ili pad potencijala na promatranom putu.

Prema Darcyjevom zakonu specifični protok ili Darcyjeva brzina je:

$$\vec{q} = -K \cdot \text{grad } h$$

(3-3)

gdje je:

\vec{q} – specifični protok, tj. količina vode koja protječe kroz jediničnu površinu poprečnog presjeka (m/s),

K – hidraulička vodljivost (m/s),

$\text{grad } h$ – hidraulički gradijent (-).

Brzina toka vode je linearno proporcionalna hidrauličkom gradijentu, stoga se ovaj zakon i zove *linearni zakon filtracije*. U Darcyjevom zakonu $Q = K \cdot F \cdot i$, K predstavlja hidrauličku vodljivost (m/s , m/dan , cm/s) koju je on nazvao koeficijentom proporcionalnosti. Dimenzija mu je jednaka dimenziji brzine (L/T). Parametar koji izražava lakoću kojom se voda giba kroz vodonosnik, tj. mjera propusnosti tla/stijene. Odnos između specifičnog protoka q i hidrauličkog gradijenta i će prestati biti linearan s porastom

specifičnog protoka, stoga Darcyjev zakon ima svoju gornju i donju granicu valjanosti. Valjanost Darcyjevog zakona je opisana Reynoldsovim brojem $Re = \frac{\rho \cdot q \cdot d_{30}}{\eta}$ [-], izračunatog kao omjer gustoće vode ρ , specifičnog protoka q , reprezentativnog zrna promjera d_{30} i dinamičke viskoznosti vode η . Za Reynoldsov broj manji od jedan, tok se smatra laminaran i vrijedi Darcyjev zakon. Za Reynoldsov broj u rasponu od 1 do 10, eksperimentalni test pokazuje da Darcyjev zakon još uvijek može biti valjan, kao što je to slučaj kod protoka podzemnih voda. Gornja granica Reynoldsovog broja nije uvijek stroga. U slučajevima u kojima je vrijednost Reynoldsova broja malo iznad 10, a specifični protok q se prema hidrauličkom gradijentu i i dalje nalazi na pravcu ukazuje na to da je tok laminaran i Darcyjev zakon vrijedi. Stoga se valjanost Darcyjevog zakona prilikom provođenja eksperimenta u laboratoriju najbolje provjerava pomoću specifičnog protoka q u odnosu na hidraulički gradijent i i pravac. Ali općenito, predložene granice Reynoldsova broja primjenjuju se u praksi (Posavec et al., 2018).

3.2. Hidraulička vodljivost

Hidraulička vodljivost se definira kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne stijene jedinične površine uz jedinični hidraulički gradijent, što podrazumijeva pad potencijala za 1 m na udaljenosti od 1 m u smjeru tečenja podzemne vode. Parametar koji izražava lakoću kojom se voda giba kroz vodonosnik, tj. mjera propusnosti tla/stijene. Hidraulička vodljivost ovisi o značajkama stijene kroz koju se fluid giba i o značajkama fluida (Bačani, 2006):

$$K = cd^2 \frac{\rho_v \cdot g}{\eta} = k \cdot \frac{\rho_v \cdot g}{\eta} \quad (3-4)$$

gdje je:

K – hidraulička vodljivost (m/s),

c – bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje poroznost, zbijenost i oblik zrna,

d – promjer pore kroz koju se fluid filtrira (m),

g – akceleracija sile teže (m/s²),

ρ_v – gustoća fluida (kg/m^3)

η – dinamički viskozitet fluida ($\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg/ms}$),

k – unutrašnja propusnost (m^2). Izraz $k = cd^2$ (m^2) odnosi se na značajke stijene, a $\frac{\rho_v \cdot g}{\mu}$ ($\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$) se odnosi na značajke fluida (Bačani, 2006).

Hidraulička vodljivost K (L/T) i u manjoj mjeri koeficijent propusnosti k (L/T) kao pojmovi se koriste u grani hidrogeologije koja se bavi podzemnom vodom dok se pojam propusnost k (L^2) koristi u industriji nafte koja se bavi i vodom i naftom i plinom (Posavec et al., 2018).

Hidraulička vodljivost može biti zavisna o izotropiji i anizotropiji. Materijali u kojima je hidraulička vrijednost jednaka u svim smjerovima su *izotropni* ($K_x=K_y=K_z$). Materijal kojem je hidraulička vrijednost u različitim smjerovima različita je *anizotropan* ($K_x \neq K_y \neq K_z$) (Bačani, 2006). Prilikom određivanja hidrauličke vodljivosti nekog vodonosnog sloja, važno je odrediti da li je taj vodonosni sloj homogen ili heterogen. Homogeni vodonosnici su jako rijetki u prirodi i njima se granulometrijski sastav u prostoru i po dubini ne mijenja, dok se kod heterogenih mijenja, pa se i da taj način mijenja hidraulička vodljivost. Dakle, za heterogene vodonosne slojeve potrebno je odabrati reprezentativne uzorke.

Vrijednosti hidrauličke vodljivosti kreću se u širokom rasponu od 10^{-13} do 10^{-1} m/s ovisno o tipu porozne sredine (tablica 3.1). Najviše vrijednosti pokazuju šljunci, pijesci te vrlo okršene i raspucale stijene, dok najniže vrijednosti hidrauličke vodljivosti imaju neraspucale magmatske i metamorfne stijene kao što su granit, gnajs i bazalt, no ako su te stijene raspucale njihova hidraulička vodljivost može biti i za dva ili tri reda veličine veća. Najmanje razlike unutar jedne grupe stijena su kod sedimenata, a najveće kod kristalinskih stijena. U rješavanju praktičnih problema, uzima se da su stijene s $K \leq 10^{-9}$ m/s nepropusne (Bačani, 2006).

Tablica 3.1 Karakteristične vrijednosti hidrauličke vodljivosti K za različite vrste materijala
(Bačani, 2006)

Vrsta stijene	Hidraulička vodljivost K (m/s)
SEDIMENTI:	
Šljunak	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-2}$
Krupnozrnati pijesak	$9 \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-3}$
Srednjezrnati pijesak	$9 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-4}$
Sitnozrnati pijesak	$2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-4}$
Prah, les	$1 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-5}$
Glina	$1 \cdot 10^{-11} - 4,7 \cdot 10^{-9}$
SEDIMENTNE STIJENE:	
Okršeni i grebenski vapnenac	$1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-2}$
Vapnenac, dolomit	$1 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-6}$
Pješčenjak	$3 \cdot 10^{-10} - 6 \cdot 10^{-6}$
Silit	$1 \cdot 10^{-11} - 1,4 \cdot 10^{-8}$
Sol	$1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-10}$
Anhidrit	$4 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-8}$
Šejl	$1 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-9}$
KRISTALINSKE STIJENE:	
Raspucane magmatske i metamorfne stijene	$8 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-4}$
Neraspucane magmatske i metamorfne stijene	$3 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-10}$
Rastrošeni granit	$3,3 \cdot 10^{-6} - 5,2 \cdot 10^{-5}$
Rastrošeni gabra	$5,5 \cdot 10^{-7} - 3,8 \cdot 10^{-6}$
Bazalt	$2 \cdot 10^{-11} - 4,2 \cdot 10^{-7}$
Propusni bazalt	$4 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-2}$

4. METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

Postoji nekoliko metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti, a to su: terenske – metode utiskivanja i pokusno crpljenje, laboratorijske metode – permeametar sa stalnom i padajućom razinom te indirektne metode određivanja koje se temelje na empirijskim formulama uz korištenje podataka o granulometrijskom sastavu porozne sredine (Oštrić, 2018a). Odabir metode određivanja hidrauličke vodljivosti ovisi o cilju istraživanja i raspoloživim sredstvima. Određivanje hidrauličke vodljivosti terenskim metodama je ograničeno zbog nedostatka informacija o samom vodonosniku te poznavanju geometrije vodonosnika i hidrauličkih granica. Troškovi terenskih ispitivanja također mogu biti ograničavajući faktor upotrebe terenskih metoda. Terenska metoda pokusnog crpljenja smatra se najtočnijom, ali i najskupljom metodom određivanja hidrauličke vodljivosti. U laboratorijskim uvjetima u homogenom, izotropnom materijalu hidrauličku vodljivost je lako odrediti. No, hidraulička vodljivost određena na uzorku u permeametriju predstavlja točkasti podatak, koji ne može biti reprezentativan za najčešće heterogeni prirodni vodonosni sustav, stoga je često korištena metoda pomoću empirijskih formula temeljena na distribuciji veličine zrna (Bačani, 2006). One su neusporedivo jeftinije i ne ovise o geometriji i hidrauličkim granicama vodonosnika. U narednim poglavljima bit će opisane korištene metode u ovom radu.

4.1. Metode temeljene na empirijskim formulama

Određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama temelji se na korelaciji hidrauličke vodljivosti i granulometrijskog sastava uzorka materijala vodonosnika.

Granulometrijska analiza podrazumijeva najvažnije i najčešće primjenjivane laboratorijske metode određivanja veličine zrna u sedimentima, a to su mjerenje, sijanje i sedimentacijska analiza. Svaka od tih metoda primjenjuje se u odgovarajućem području veličine zrna, te za određivanje pojedine vrste sedimenata, kao i stupnja i načina njihove litifikacije (Tišljar, 2004). Sijanje je najvažnija i najčešće primjenjivana metoda određivanja veličine zrna šljunčanih, šljunčano-pješčanih, pješčanih i prahovito-pješčanih sedimenata. Ovisno o broju korištenih sita, sijanjem se dobiva određeni broj frakcija koje predstavljaju količinu materijala zaostalu na pojedinom situ tj. one veličine koja je ograničena promjerom otvora na gornjem i donjem situ. Sijanje se može obavljati rupičastim, pletenim ili laboratorijskim sitima i mikro-sitima, ovisno o rasponu veličine zrna uzorka (Tišljar, 2004).

Sijanje se provodi suhim i mokrim postupkom. Za sijanje suhim postupkom uzima se određena količina materijala (uzorak). Uzorak se usipa na najgrublje sito u nizu sita, koja su postavljena jedno iznad drugog, u tresilicu te 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 koristi kada su na krupna zrna nalijepljene sitne frakcije. Postupak je isti kao i kod suhog sijanja samo što se na svakom situ materijal ispire, zatim suši i važe.

Sijanjem 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 granulometrijskih analiza mogu se prikazati histogramom, krivuljom učestalosti raspodjele i kumulativnom granulometrijskom krivuljom. Navedenim dijagramima za prikaz rezultata analize na apscisu nanosimo veličinu zrna, a na ordinatu postotak pojedinih frakcija. Kumulativna granulometrijska krivulja je najčešći način prikazivanja rezultata granulometrijske analize jer se iz nje izravno mogu očitati udjeli bilo kojih frakcija, a prikazuje cjelokupan sastav i raspored zrna. Konstruira se unošenjem odgovarajuće veličine zrna, odnosno granične vrijednosti frakcija na apscisu s logaritamskom ljestvicom i kumulativnog zbroja udjela pojedinih frakcija izraženih u postocima na ordinatu (Tišljar, 2004).

Mnogi su znanstvenici proučavali odnos *hidrauličke vodljivosti* i *parametara porozne sredine* te ga nastojali odrediti, tj. izraziti, što je rezultiralo nastankom niza različitih formula. Rezultati granulometrijske analize predstavljaju osnovni ulazni parametar koji služi za dobivanje hidrauličke vodljivosti pomoću empirijskih formula opisanim u narednim poglavljima.

4.1.1. Hazen

Jedna od najpoznatijih empirijskih formula je formula *Hazena* (1893) koji izračunava hidrauličku vodljivost na temelju efektivnog promjera zrna (Bačani, 2006):

$$K = C_H d_{10}^2 (0,7 + 0,03T) \quad (4-1)$$

gdje je: K – hidraulička vodljivost (m/s), d_{10} – efektivni promjer zrna (mm), što znači da u stijeni ima 90 % zrna većeg promjera i 10 % zrna manjeg promjera od d_{10} , $C_H = 0,0116$ (za K izražen u m/s) i T – temperatura vode ($^{\circ}\text{C}$).

Hazenov izraz je prvotno razvijen za određivanje hidrauličke vodljivosti jednoliko graduiranih pijesaka, ali se koristi i za određivanje hidrauličke vodljivosti u rasponu od sitnog pijeska do šljunka ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

1. uvjet: koeficijent jednolikosti $\frac{d_{60}}{d_{10}} < 5$
2. uvjet: $d_{10} = 0,1 - 3 \text{ mm}$

Usporedimo li Hazenovu formulu s izrazom hidrauličke vodljivosti $K = cd^2 \frac{\rho_v \cdot g}{\eta} = k \cdot \frac{\rho_v \cdot g}{\eta}$, očito je da Hazenov koeficijent C_H ne odgovara bezdimenzijskom koeficijentu c . Hazenov koeficijent C_H objedinjuje u sebi i značajke stijene i značajke fluida i ima dimenzije $\text{L}^{-1}\text{T}^{-1}$ (Bačani, 2006). Hazenova jednadžba uključuje i koeficijent temperaturne korekcije koji odgovara temperaturi od 10°C , pri kojoj je temperaturni koeficijent $c_T = 1$. Promjena temperature izaziva promjenu viskoznosti vode i njoj primjerenu promjenu veličine hidrauličke vodljivosti.

4.1.2. USBR

Prema Miletić i Heinrich – Miletić iz 1981. formula glasi (Bačani, 2006):

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

gdje je: d_{20} – efektivni promjer zrna (mm), što znači da u stijeni ima 80 % zrna većeg promjera i 20 % zrna manjeg promjera od d_{20} , $C = 0,0036$ (za K izražen u m/s).

USBR formula izračunava hidrauličku vodljivost efektivnog promjera zrna d_{20} i ne ovisi o poroznosti. Formula se najviše koristi za pijeske srednje veličine zrna s koeficijentom jednolikosti manjim od 5 (Majzec, 2014).

4.1.3. Slichter

C. S. Slichter je nakon teorijske rasprave o tečenju podzemne vode (1899) proveo eksperimente procjeđivanja vode kroz pijesak i šljunak koristeći velike aparature i široki spektar gradijenata s težnjom da se približi prirodnim uvjetima. Slichter uvodi pojmove triju funkcija koje dominantno utječu na veličinu ovoga parametra: veličine zrna, poroznosti i temperature (Urumović, 2013).

Jedan od pristupa primjene Slichterove jednadžbe podrazumijeva korištenje efektivnog promjera zrna d_{10} čija je primjena zadnjih godina naročito raširena navodeći Slichterovu formulu (1989) u sljedećem obliku (Majzec, 2014):

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot n^{3,287} \cdot d_{10}^2 \quad (4-3)$$

gdje je:

g – gravitacijska konstanta $\sim 9,81$ (m/s²),

ν – kinematička viskoznost (m²/s),

n – poroznost (-),

d_{10} – efektivni promjer zrna (mm) tj. promjer u uzorku od kojeg 10 % zrna ima manji promjer

Slichterova jednadžba najviše se koristi za zrna promjera između 0,01 i 5 mm.

Prihvatanje efektivnog promjera zrna d_{10} nastalo je iz više razloga. Prvi razlog je prikladnost takve veličine zrna u analizama kapilarnosti pa se prihvaćao univerzalnim, a drugi je jednostavnost izračunavanja, što je dugo bio važan inženjerski čimbenik (Majzec, 2014).

Pojednostavljena Slichterova formula koja je ujedno i korištena u ovom radu glasi:

$$K = C d_e^2$$

(4-4)

gdje je:

K – hidraulička vodljivost (m/s),

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

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

4.2. Laboratorijske metode

Hidraulička vodljivost se u laboratoriju određuje pomoću permeametra pri čemu se koriste mali uzorci izdvojeni 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). Uvjeti u laboratoriju ne mogu simulirati potpuno iste uvjete kakvi su u vodonosniku, zato ispitivanjem u laboratoriju dobivamo manje precizne podatke o vodonosniku nego što bi se dobili pri ispitivanjima *in situ* (Urumović, 2003).

Postoje dva načina ispitivanja hidrauličke vodljivosti u laboratoriju, a to su metoda permeametra sa stalnom razinom i metoda permeametra s promjenjivom razinom. Za dobro propusne materijale ($K > 10^{-4}$ m/s) koristi se permeametar sa stalnom razinom dok se za slabo propusne ($K < 10^{-4}$ m/s) materijale koristi permeametar s promjenjivom razinom (Reddy, 2002).

Uzorak se ugrađuje u ćeliju cilindričnog oblika standardnih dimenzija između dviju poroznih ploča, gdje je prilikom pripreme potrebno paziti na zbijenost i saturiranost uzorka te na pojavu mjehurića zraka koji negativno utječu na ispitivanje. U oba slučaja ispitivanja s permeametrom, voda se može dodavati na vrh ili dno uzorka pa tok može biti silazni ili uzlazni. Uzorak prije testiranja mora biti potpuno saturiran destiliranom vodom uz paralelnu primjenu vakuumske pumpe kojom se odvodi zrak iz uzorka jer uzorak ne smije sadržavati mjehuriće plina. Pri normalnim okolnostima, u vodi ipak postoji određeni sadržaj otopljenog zraka (oko 20 litara po m^3 vode pri sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku).

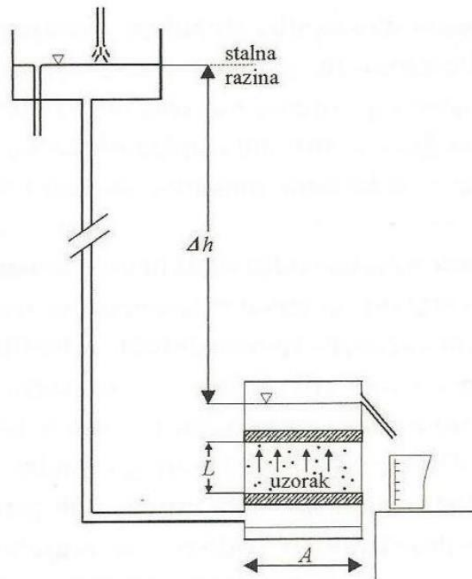
4.2.1. Permeametar sa stalnom razinom

Permeametar sa stalnom razinom (slika 4.1) je uređaj za mjerenje hidrauličke vodljivosti dobro propusnih materijala u laboratoriju. U permeametru sa stalnim tlakom strujanje je ustaljeno i jednodimenzionalno. Prilikom vršenja ispitivanja mjeri se vrijeme t potrebno da kroz uzorak prođe voda određenog volumena, protok Q , razlika manometarskih visina Δh očitana s manometarskih cjevčica i temperatura vode T . Preko tih podataka, uz standardni poprečni presjek A i duljinu uzorka L , izravno iz Darcyjevog zakona može se odrediti hidraulička vodljivost (Urumović, 2003):

$$K = \frac{QL}{A\Delta h} = k \frac{\rho_v g}{\mu}$$

(4-5)

Ova metoda koristi se za određivanje hidrauličke vodljivosti propusnijih tala, odnosno uzoraka koji sadrže manje od 10% čestica manjih od 75 μm (br. 200).

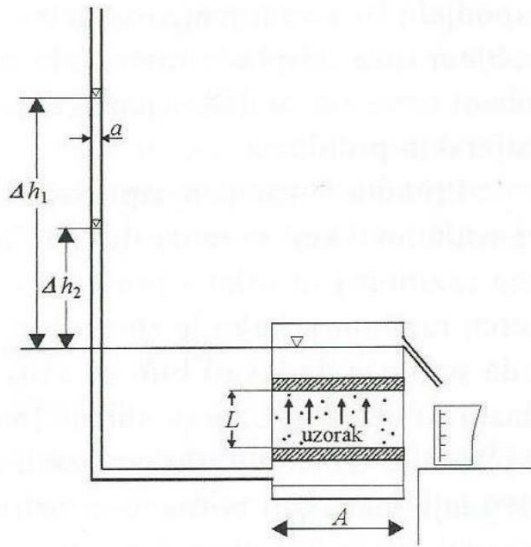


Slika 4.1 Permeametar sa stalnom razinom vode (Urumović, 2003)

Kako bismo sigurnije odredili hidrauličku vodljivost preporučuje se načiniti nekoliko testova s različitim veličinama stalne razlike Δh – piezometarske razine (Urumović, 2003). Eksperiment traje tako dugo dok odnos između hidrauličkog gradijenta i specifičnog protoka vode ne izađe iz područja linearnog laminarnog toka, tj. granice valjanosti Darcyjevog zakona. Valjanost zakona može se provjeriti i Reynoldsovim brojem. U praksi se često uzima da linearni laminarni tok prelazi u nelinearni laminarni kod $Re > 10$, a u turbulentni kod $Re > 100$ dok je pouzdaniji podatak grafički prikaz odnosa Darcyjeve brzine i hidrauličkog gradijenta jer nekad i za $Re > 10$ graf q -i pokazuje linearnu ovisnost (Posavec et al., 2018).

4.2.2. Permeametar s promjenjivom razinom

Hidraulička vodljivost sitnozrnatih materijala za koje je potrebno dobiti relativno velike hidrauličke gradijente mjeri se permeametrom s promjenjivom razinom (slika 4.2).



Slika 4.2 Permeametar s promjenjivom razinom vode (Urumović, 2003)

Kod permeametra s promjenjivom razinom saturacija uzorka traje puno duže (24 h i više) nego kod permeametra sa stalnom razinom. Unutar vremena saturacije potrebno je kontrolirati temperaturu i tlak jer njihovim porastom dolazi do oslobađanja zraka. Nakon saturiranja, određuje se gradijent, ovisno o uzorku, pri kojem će se vršiti ispitivanje. Ovom se metodom određuje količina protjecanja vode u vremenu kroz uzorak opažanjem iznosa pada visine vode u uspravnoj cijevi. U nekom vremenu t_1 , visina vode padne s njezine inicijalne visine h_1 na visinu h_2 u uspravnoj cijevi. Poznavajući podatke o visini uzorka L u ćeliji i površini poprečnog presjeka cjevčice a , hidraulička vrijednost dobije se iz izraza (Urumović, 2003):

$$K = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

(4-6)

5. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

Uzorak za ovo ispitivanje uzet je na području vodocrpilišta Velika Gorica u blizini zdenca B-1 s dubine od 2 metra (slika 5.1).



Slika 5.1 Pedološko okno – mjesto uzimanja uzorka

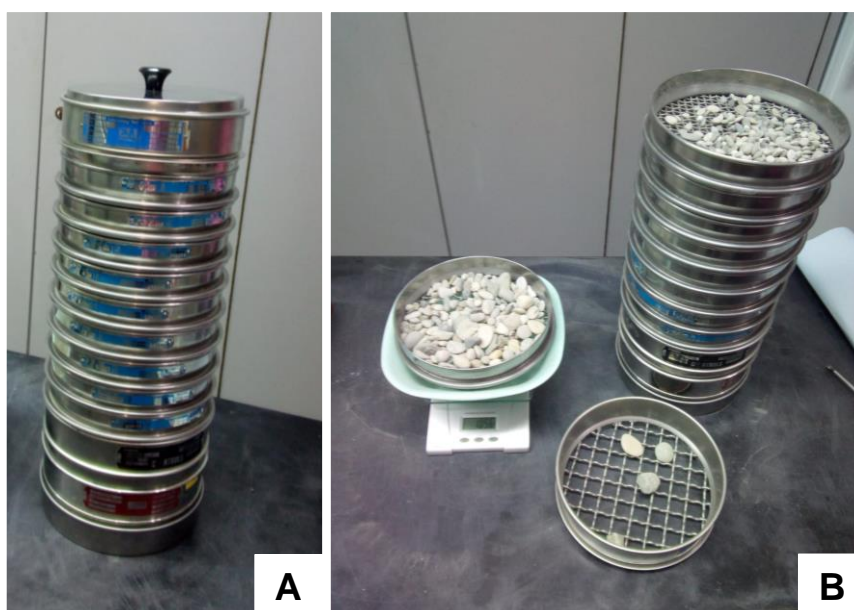
Nakon uzimanja uzorka na terenu, uzorak je donesen u laboratorij gdje je stavljen na sušenje 48 sati (slika 5.2), nakon čega je provedena granulometrijska analiza.



Slika 5.2 Sušenje uzorka

5.1. Granulometrijska analiza sijanjem

Prvo se izvaže uzorak, a zatim pojedino sito bez uzorka. Nakon vaganja uzorka i sita, korištena je metoda sijanja suhim postupkom na sitima u rasponu od 0,004 do 19 mm. Sita su postavljena jedna ispod drugog u nizu od krupnih sita (veličine otvora 19 mm, 8 mm, 6,3 mm, 5 mm, 4 mm i 3,15 mm) do mikrosita (2 mm, 1 mm, 0,63 mm, 0,2 mm, 0,063 mm, 0,032 mm i 0,004 mm) tako da se otvori smanjuju prema dolje (slika 5.3a). Uzorak se usipa na najgrublje sito u nizu sita te se sva sita tresu 10 do 15 minuta (slika 5.3b). 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).

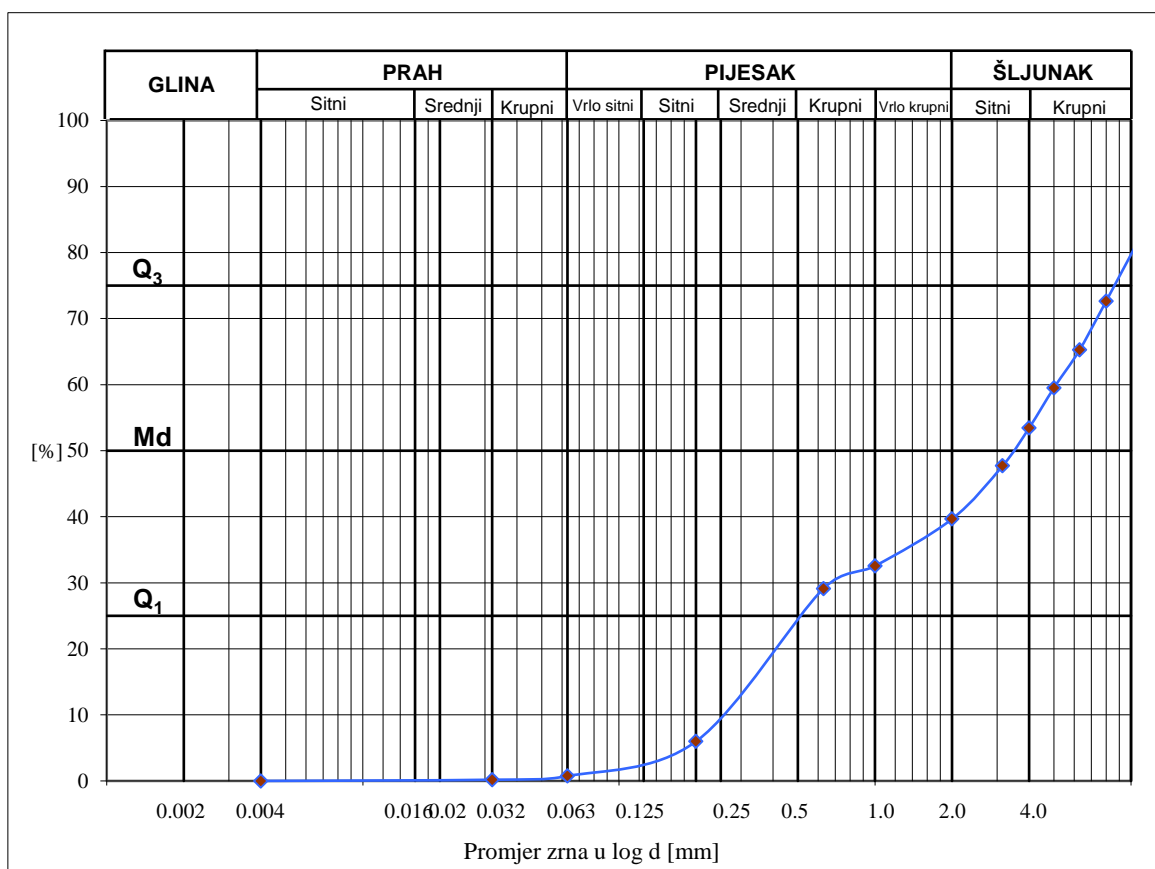


Slika 5.3 Metoda sijanja: a) sita standardnih dimenzija, b) postupak suhog sijanja

Dobivene rezultate prikazuje tablica 5.1 prema kojoj je napravljena granulometrijska krivulja (slika 5.4). Granulometrijska krivulja prikazuje cjelokupan sastav i raspored zrna pa se iz nje mogu izračunati i očitati važni granulometrijski koeficijenti potrebni za određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama (Tišljarić, 2004).

Tablica 5.1 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem

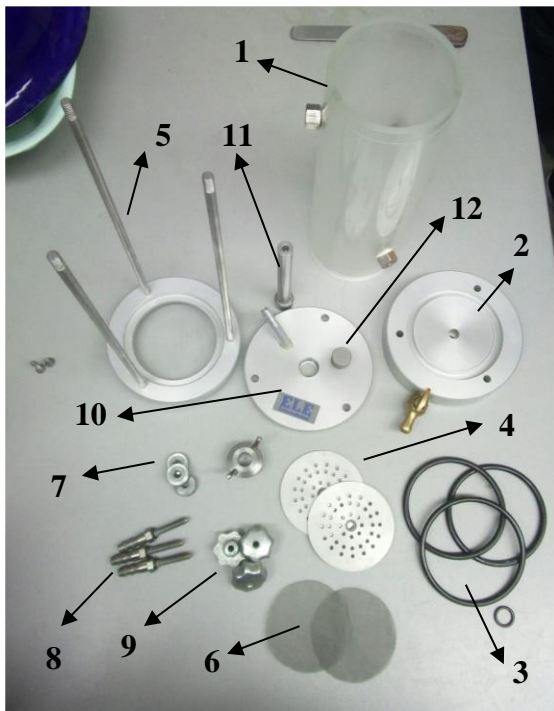
d sita [mm]	Masa sita (g)	Masa sita i uzoka (g)	Masa (g)	[%]	Kumulativno [%]
19,00	589,9	648,0	58,1	2,67	100,00
8,00	461,0	1056,0	595,0	27,34	72,66
6,30	496,0	657,0	161,0	7,40	65,26
5,00	436,0	561,0	125,0	5,74	59,51
4,00	466,0	598,0	132,0	6,07	53,45
3,15	436,0	561,0	125,0	5,74	47,70
2,00	405,0	580,0	175,0	8,04	39,66
1,00	381,0	536,0	155,0	7,12	32,54
0,63	358,0	432,0	74,0	3,40	29,14
0,20	296,0	800,0	504,0	23,16	5,97
0,063	274,0	388,0	114,0	5,24	0,74
0,032	384,0	396,0	12,0	0,55	0,18
0,004	360,0	364,0	4,0	0,18	0,00
			Σ	2176,00	



Slika 5.4 Granulometrijska krivulja za ispitivani uzorak

5.2. Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom

Ispitivanje je rađeno prema ispitnoj normi ASTM D2434 – 68 koja 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 . Korišteni permeametar je standardnih dimenzija, tj. udaljenost između manometara je uvijek ista, a širina poprečnog presjeka ćelije je stalna. 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 5.5.

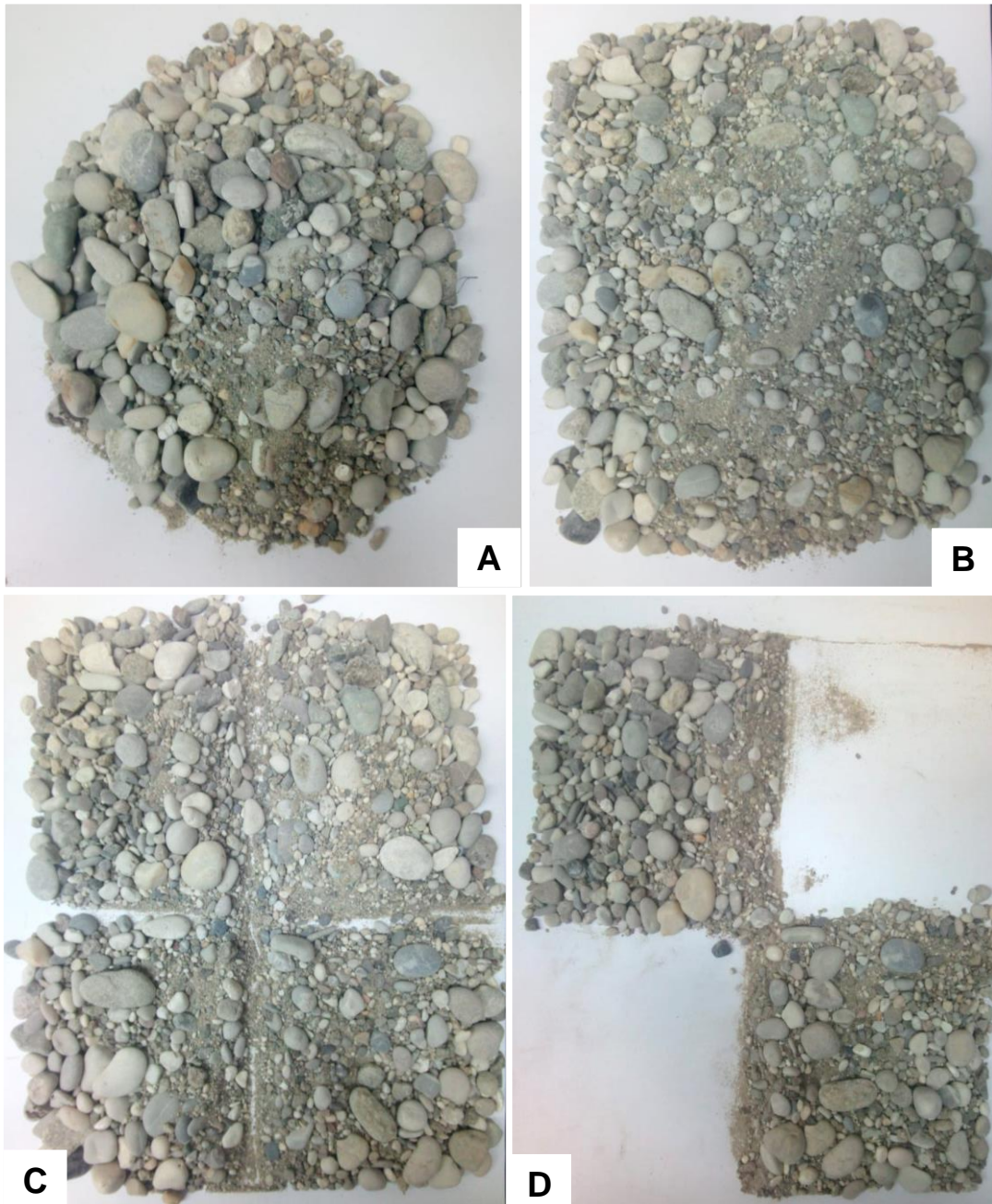


- 1) ćelija permeametra,
- 2) donja bazna ploča s ventilom,
- 3) gumice,
- 4) porozne pločice,
- 5) tronožac za učvršćivanje,
- 6) filtarske mrežice,
- 7) donji navoji,
- 8) manometarske spojnice,
- 9) gornji navoji,
- 10) gornja ploča s otvorom,
- 11) potisni klip
- 12) odzračni ventil

Slika 5.5 Dijelovi ćelije permeametra

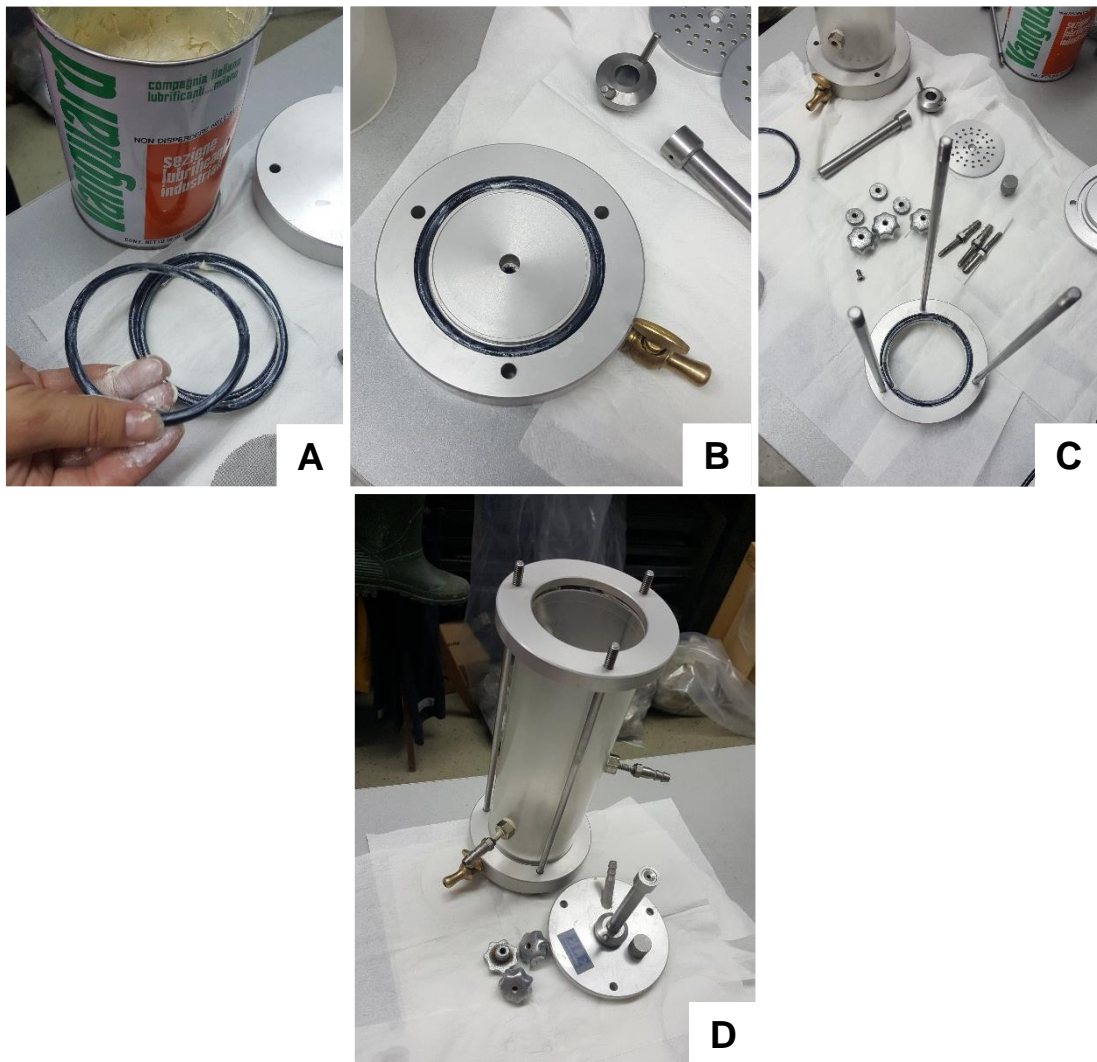
Pokusom se mjeri razlika piezometarske visine za svaku promjenu hidrauličkog gradijenta i vrijeme potrebno da kroz uzorak prođe voda određenog volumena. Količina toka mjerljiva je na donjem preljevu.

Postupak počinje četvrtanjem uzorka (slika 5.6) da bi se dobio reprezentativni uzorak. Izdvoji se određena količina materijala te se rasporedi na ravnoj i čistoj površini. Uzorak se razdjeli na četiri jednaka dijela i uzimaju se 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 5.6 Postupak četvrtanja uzorka: a) količina materijala za četvrtanje, b) cjelokupan uzorak, c) dijeljenje uzorka na četvrtine, d) uklanjanje uzorka sa suprotnih četvrtina

Nakon postupka četvrtanja, uzorak je spreman za ugradnju i počinje sastavljanje ćelije permeametra (slika 5.7). Ćeliju je najprije potrebno dobro očistiti kako u dijelovima gdje se ćelija spaja ne bi ostalo čestica prethodnog uzorka. Najprije se jedna od dviju poroznih ploča ugradi na donju baznu ploču s ventilom. Nakon toga se ćelija permeametra stavlja na donju baznu ploču s ventilom te se između njih postavlja gumica koja se prethodno namaže s vazelinom koja poboljšava brtvljenje. Naposljetku donjim navojima učvrstimo tronožac za donju baznu ploču. U ćeliju se na dno stavlja filtarska mrežica prije ugradnje samog uzorka. Druga filter mrežica stavlja se u ćeliju kada je uzorak već ugrađen.



Slika 5.7 Sastavljanje ćelije permeametra: a) mazanje gumica vazelinom, b) sastavljanje donje bazne ploče, c) tronožac za učvršćivanje, d) učvršćivanje ćelije i stavljanje gornje bazne ploče

Uzorak se ugrađuje u ćeliju pomoću lijevka (kružnim pokretima) u tankim slojevima po 2 cm nakon čega se sabija batom da bi se dobio što zbijeniji uzorak kao približna simulacija uvjeta u prirodi (slika 5.8). Kada uzorak dođe do manometarskog izlaza, stavlja se manometarska spojnica koja je prethodno namazana vazelinom. Postupak se ponavlja dok se ćelija ne napuni i dok se ne stavi posljednja manometarska spojnica. Uzorak nikada ne smije biti do vrha ćelije (2 cm do vrha) jer bi tako napunjen uzorak spriječio dovod vode iz rezervoara. Nakon ugradnje uzorka, stavljamo filter mrežicu i poroznu pločicu zajedno s gornjom pločom. Na gornjoj ploči se nalazi ispušni ventil (zatvoren), no ukoliko u uzorku ima zraka ventil se otvori. Ćelija se osigurava gornjim navojima i spremna je za ispitivanje permeametriom sa stalnom razinom.





Slika 5.8 Ugradnja uzorka u ćeliju permeametra

Nakon ugradnje uzorka u ćeliju, potrebno je ćeliju spojiti na sustav cijevi. Manometarske spojnice spajaju se na manometarske cjevčice, otvor gornje ploče se spaja na spremnik za vodu, a ventil na donjoj baznoj ploči se spaja na gumenu cijev koja je uronjena u vodu. Ventil za rezervoar napunjen sa vodom je za prvi dio postupka zatvoren. Cijevi koje su spojene na manometar su također zatvorene štipaljka. Kako bi se stvorila što realnija simulacija prirodnih uvjeta iz uzorka je potrebno isisati zrak vakumskom pumpom 10 do 15 minuta. Prije pokretanja vakumske pumpe potrebno je provjeriti je li zatvoren sav dovod zraka i vode. Nakon toga polako okrećemo ventil na donjoj baznoj ploči i započinje saturacija uzorka od dolje prema gore (slika 5.9). Saturacija mora biti spora kako ne bi došlo do remećenja zbijenosti uzorka. Kada je uzorak saturiran, sustav se okreće i pušta se voda iz spremnika da se gravitacijski procjeđuje kroz uzorak. Najprije se otvara ventil na rezervoaru koji propušta vodu u uzorak i zatvara se ventil na cijevi koji vodi prema vakuumskoj pumpi.





Slika 5.9 Saturacija uzorka

Otvaranjem ventila na donjoj baznoj ploči započinje postupak ispitivanja, otvore se cjevčice na manometru, a cijev na izlazu podigne kako bi ulaz i izlaz bili na istoj razini (slika 5.10). Tek kada se razina vode u sve tri manometarske cjevčice podigne na istu visinu možemo biti sigurni da u uzorku nema zraka. Pri laboratorijskom ispitivanju hidrauličke vodljivosti permeametrov sa stalnom razinom mjeri se razlika u manometarskim cjevčicama Δh (m), vrijeme t (s) potrebno da se napuni menzura volumena 100 ml i temperatura vode T ($^{\circ}\text{C}$). Mjerenje počinje s gradijentom pri kojem je razlika visine u manometarskim cjevčicama jednaka 2 cm te se postupno povećava za 0,5 cm. Povećanje gradijenta, tj. razlike u visinama manometarskih cjevčica se ponavlja tako dugo dok ne dođe do odstupanja od linearnog odnosa specifičnog protoka q i hidrauličkog gradijenta i što upućuje na pojavu nelinearnog laminarnog ili turbulentnog toka.



Slika 5.10 Postupak ispitivanja i mjerenje

6. REZULTATI

Ispitivanje provedeno na uzorku iz plitkog dijela zagrebačkog vodonosnika pokazalo je sljedeće vrijednosti hidrauličke vodljivosti (tablica 6.3). Prije samog izračuna hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama potrebno je na kumulativnoj granulometrijskoj krivulji očitati vrijednosti efektivnih promjera zrna (tablica 6.1), dok su rezultati granulometrijske analize prikazani u tablici 6.2.

Tablica 6.1 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)
2 m	0,25	0,45	5,0	20,0	0,25

Tablica 6.2 Udio glavnih granulometrijskih frakcija uzorka

UZORAK	Šljunak (%)	Pijesak (%)	Prah (%)	Glina (%)
2 m	60,3	38,9	0,8	/

Određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama:

Hazen:

$K = C_H d_{10}^2 (0,7 + 0,03T)$, uz uvjete da je koeficijent jednolikosti $\frac{d_{60}}{d_{10}} < 5$ i $d_{10} = 0,1-3$ mm. Koeficijent jednolikosti iznosi $\frac{5,0}{0,25} = 20$, što je veće od 5, stoga prvi uvjet nije zadovoljen i ne može se primijeniti Hazenova formula.

USBR:

$$K = C \cdot d_{20}^{2,3} = 0,0036 \cdot 0,45^{2,3} = 5,74 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \quad (6-1)$$

Slichter:

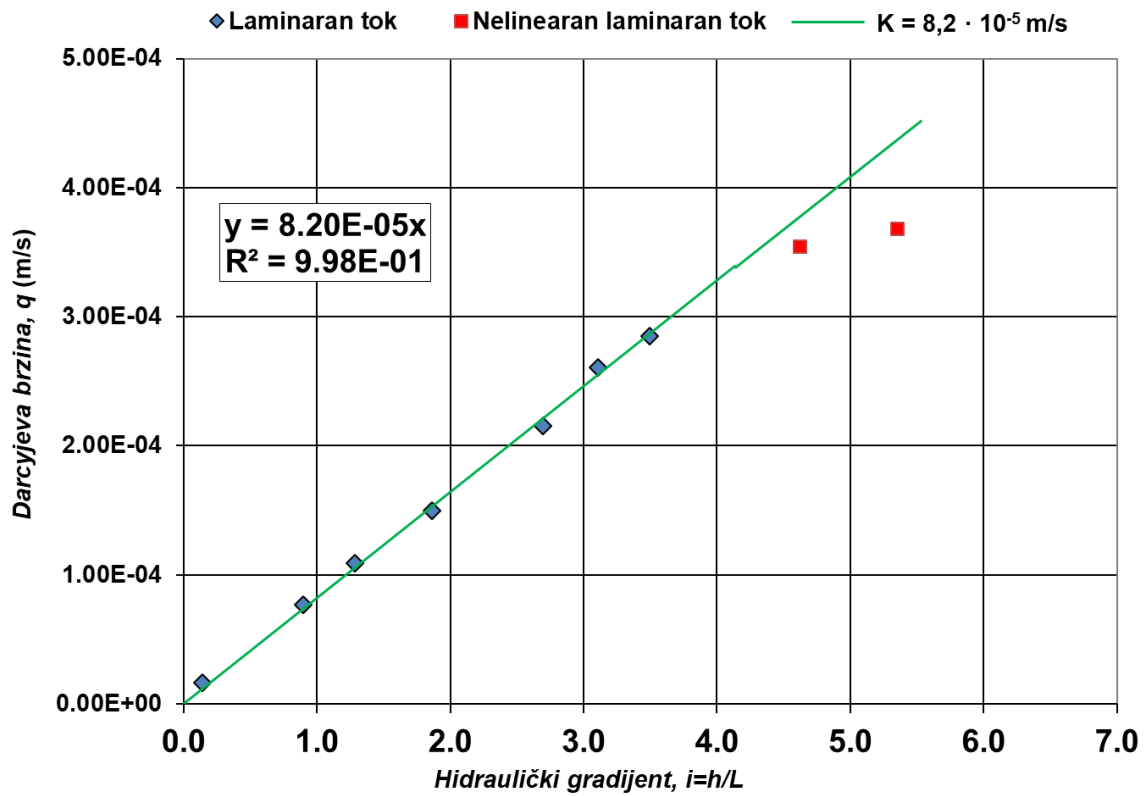
$$K = C \cdot d_e^2 = 0,00574 \cdot 0,25^2 = 3,59 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \quad (6-2)$$

Tablica 6.3 Rezultat hidrauličke vodljivosti

HIDRAULIČKA VODLJIVOST (K)					
UZORAK	Hazen (m/s)	USBR (m/s)	Slichter (m/s)	Permeametar sa stalnom razinom (m/s)	K_{sr} (m/s)
2 m	/	$5,74 \cdot 10^{-4}$	$3,59 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$3,38 \cdot 10^{-4}$

Uzorak je klasificiran kao pjeskoviti šljunak. Iz tablice 6.1 vidljivo je da nije zadovoljen prvi uvjet za uzorak te nije moguće izračunati hidrauličku vodljivost prema Hazenu. Prosječna hidraulička vodljivost je $3,38 \times 10^{-4}$ m/s. Graf odnosa Darcyjeve brzine i hidrauličkog gradijenta pokazuje nalazi li se sustav u laminarnom toku, odnosno kada točke u grafu počnu odstupati od linearnosti, ulazi se u nelinearni laminarni ili 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 nelinearnom laminarnom ili turbulentnom gibanju on više ne vrijedi. Još je jedan način za provjeru valjanosti Darcyjevog zakona, a to je Reynoldsov broj. Kao indeks za procjenu prelaska režima toka iz linearnog laminarnog u nelinearni laminarni i turbulentni koristi se Reynoldsov broj. Taj podatak nije toliko pouzdan koliko grafički prikaz odnosa Darcyjeve brzine i hidrauličkog gradijenta (Ivačić, 2014).

Na slici 6.1 prikazan je odnos Darcyjeve brzine i hidrauličkog gradijenta za ispitani uzorak. Provedeno je devet mjerenja. Može se vidjeti da je protok za primijenjene hidrauličke gradijente u završnoj fazi, tj. za konačna dva mjerenja postao turbulentan, stoga je u izračunu razmatrano samo prvih sedam mjerenja za koje vrijedi da je tok još uvijek laminaran. Dobivena vrijednost hidrauličke vodljivosti je unutar raspona očekivanih vrijednosti za zagrebački vodonosnik. Hidraulička vodljivost dobivena eksperimentom permeametra sa stalnom razinom bitno se ne razlikuje od hidrauličkih vodljivosti dobivenih empirijskim formulama po USBR-u i Slichteru, no hidraulička vodljivost dobivena eksperimentom je manjih vrijednosti. Dobiveni rezultati pokazuju da bismo za realnije vrijednosti hidrauličke vodljivosti trebali napraviti detaljniju analizu granulometrijskih krivulja te primijeniti drugačije obrasce pisanja formula kao što je razrađeno u Urumović (2013). Korištene empirijske formule u ovom radu, a koje su i najčešće u literaturi, predstavljaju pojednostavljene formule za izračun hidrauličke vodljivosti.



Slika 6.1 Grafički prikaz odnosa Darcyjeve brzine q i hidrauličkog gradijenta i

7. ZAKLJUČAK

Postoji nekoliko metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti, a odabir metode ovisi o cilju istraživanja i raspoloživim sredstvima. U ovom radu, hidraulička vodljivost određivana je laboratorijskom metodom permeametra sa stalnom razinom te su rezultati uspoređivani s onima dobivenim na temelju empirijskih formula uz korištenje podataka o granulometrijskom sastavu porozne sredine.

Područje istraživanja pripada podzemlju zagrebačkog vodonosnika koje je generalno građeno od šljunkovitih i šljunkovito-pjeskovitih naslaga dobre hidrauličke vodljivosti. Na uzorku s dubine od 2 metra napravljena je granulometrijska analiza kojom je utvrđeno da je uzorak pjeskoviti šljunak što je i prikazano kumulativnom granulometrijskom krivuljom. Kumulativna granulometrijska krivulja je najčešći način prikazivanja rezultata granulometrijske analize jer se iz nje izravno mogu očitati udjeli frakcija, a prikazuje cjelokupan sastav i raspored zrna. Vrijednosti koje se iz dijagrama mogu očitati ili izračunati služe kao osnovni ulazni parametri za izračunavanje hidrauličke vodljivosti pomoću empirijskih formula (Hazen, USBR i Slichter).

Laboratorijski test permeametrom sa stalnom razinom dao je očekivanu vrijednost hidrauličke vodljivosti koja se bitno ne razlikuje od hidrauličkih vodljivosti dobivenih empirijskim formulama po USBR-u i Slichteru. Na uzorku je provedeno devet mjerenja, a protok je u završnoj fazi, tj. za konačna dva mjerenja postao nelinearan laminaran. Hidraulička vodljivost mjerena u laboratoriju iznosi $K = 8,20 \times 10^{-5}$ m/s što je unutar raspona očekivanih vrijednosti za zagrebački vodonosnik, određenim u istraživanjima prethodnih autora. Hidraulička vodljivost K dobivena empirijskim formula iznosi $K = 5,74 \times 10^{-5}$ m/s po USBR-u i $3,59 \times 10^{-4}$ m/s po Slichteru. 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.

Laboratorijska metoda određivanja hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom je jednostavna što je i prednost korištenja laboratorijskih metoda u odnosu na terenske metode, primjerice pokusno crpljenje koje daje preciznije rezultate, ali iziskuje puno više vremena, ljudi i financijskih sredstava. Što se tiče upotrebe empirijskih formula, rezultati pokazuju da bismo za realnije vrijednosti hidrauličke vodljivosti trebali napraviti

detaljniju analizu granulometrijskih krivulja te primijeniti drugačije obrasce pisanja formula jer korištene empirijske formule u ovom radu, a koje su i najčešće u literaturi, predstavljaju pojednostavljene formule za izračun hidrauličke vodljivosti.

8. 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. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 198.

BAČANI, A. i POSAVEC, K., 2009. Elaborat zaštitnih zona vodocrpilišta Velika Gorica, Zagreb: Rudarsko – geološko – naftni fakultet Sveučilišta u zagrebu, str. 77.

BAČANI, A., POSAVEC, K., 2014. Elaborat o zonama zaštite izvorišta Grada Zagreba. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 209.

BAN, A., 2011. Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 36.

BASCH, O., 1981. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Ivanić Grad, L 33-81. Institut za geološka istraživanja Zagreb. Savezni geološki zavod, Beograd.

BASCH, O., 1983. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za list Ivanić Grad, L 33-81. Institut za geološka istraživanja Zagreb. Savezni geološki zavod, Beograd.

ČAMBALA, M., 2017. Određivanje hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom na lijevom zaobalju istočnog dijela zagrebačkog vodonosnika. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 33.

GELO, N., 2014. Određivanje hidrauličke vodljivosti holocenskih naslaga zagrebačkog vodonosnika na području budućeg vodocrpilišta Črnkovec (uža lokacija). Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 39.

IVAČIĆ, V., 2014. Određivanje hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom na budućem vodocrpilištu Črnkovec. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 37.

KUKOLJA, A., PLAZONIĆ, D., 2018. Klorirana otapala - trikloreten i tetrakloreten u podzemnoj vodi i vodi za piće vodocrpilišta Sašnak – sustav javne vodoopskrbe grada Zagreba. Rad za rektorovu nagradu. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 74.

MAJZEC, A., 2014. Određivanje hidrauličke vodljivosti pomoću parametara porozne sredine na primjeru crpilišta Osekovo. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 40.

PERŠIĆ, S., 2014. Određivanje hidrauličke vodljivosti naslaga srednjeg i mlađeg pleistocena zagrebačkog vodonosnika na području budućeg vodocrpilišta Črnkovec (uža lokacija). Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 34.

POSAVEC, K., 2006. Identifikacija i prognoza minimalnih razina podzemne vode zagrebačkoga aluvijalnog vodonosnika modelima recesijskih krivulja. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 89.

POSAVEC, K., KUKOLJA, A. I KOCIJAN, V., 2018. Constant head permeameter tests for hydraulic conductivity of unconsolidated sediments and associated terminology. U: 2nd Croatian congress on geomathematics and geological terminology, Zagreb, 2018.

REDDY, R.K., 2002. Engineering properties of soils based on laboratory testing. Chicago: University of Illinois at Chicago.

ŠIKIĆ, K., BASCH, D. I ŠIMUNIĆ, A., 1978. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Zagreb, L 38-80, Savezni geološki zavod, Beograd.

TIŠLJAR, J., 2004. Sedimentologija klastičnih i silicijskih taložina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 426.

URUMOVIĆ, K. 2003. Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 318.

URUMOVIĆ, K., 2013. Parametarska kvantifikacija hidrogeoloških svojstava klastičnih naslaga na primjerima pokusnih polja u sjevernoj Hrvatskoj. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 165.

VELIĆ, J., DURN, G., 1993. Alternating Lacustrine-Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases during Quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia. *Geologia Croatica*, vol. 46, no. 1, str. 71–90.

VELIĆ, J., SAFTIĆ, B., 1991. Subsurface Spreading and Facies Characteristics of Middle Pleistocene Deposits between Zaprešić and Samobor. *Geološki vjesnik*, 44, str. 69–82.

Web izvori:

OŠTRIĆ, M., 23.03.2018. Darcyjev zakon. URL: www.gfos.unios.hr/download/p04-hidrogeologija-darcy-23-03-3.pdf. (pristupljeno 16.08.2018.)