

Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom na području vodocrpilišta Bikana u Virovitici

Kocijan, Valentina

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:169:521267>

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
VODOCRPILIŠTA BIKANA U VIROVITICI**

Diplomski rad

Valentina Kocijan

GI 301

Zagreb, 2018.

Zahvale

Najljepše se zahvaljujem mentoru, dr. sc. Kristijanu Posavcu na komentarima, savjetima i pomoći pri izradi diplomskog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Jeleni Parlov te dr. sc. Željku Duiću na sugestijama i savjetima.

Također, zahvaljujem dr. sc. Željku Duiću što mi je donio uzorak na kojem su obavljena ispitivanja.

Dipl. ing. Evelini Oršulić te tehničaru Saši Šipeku zahvaljujem se na pomoći pri izvođenju eksperimenata.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci tijekom studiranja.

ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI METODOM PERMEAMETRA SA
STALNOM RAZINOM NA PODRUČJU VODOCRPILIŠTA BIKANA U VIROVITICI

VALENTINA KOCIJAN

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Cilj rada bio je odrediti hidrauličku vodljivost empirijskim formulama te metodom permeametra sa stalnom razinom za odabrani uzorak, s područja crpilišta Bikana u sjevernom dijelu grada Virovitice. U teorijskom dijelu rada opisane su metode terenskog i laboratorijskog određivanja hidrauličke vodljivosti. U samom zaključku, dobiveni rezultati su međusobno uspoređeni.

Ključne riječi: hidraulička vodljivost, permeametar, empirijske formule, Virovitičko – podravska županija

Diplomski rad sadrži: 32 stranice, 4 tablice, 16 slika i 34 reference

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Kristijan Posavec, redoviti profesor

Ocjenjivači: Dr. sc. Kristijan Posavec, redoviti profesor

Dr. sc. Jelena Parlov, izvanredni profesor

Dr. sc. Željko Duić, izvanredni profesor

Datum obrane: 20. rujan 2018., Rudarsko–geološko–naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's thesis

DETERMINATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY USING PERMEAMETER
WITH CONSTANT HEAD AT THE WATER WELLS BIKANA IN VIROVITICA

VALENTINA KOCIJAN

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

Abstract

The main aim of the thesis was to determine the hydraulic conductivity of a given sample using both permeameter with constant head and empiric formulas. The sample was taken at the water wells Bikana on the northern part of Virovitica. In the theoretical part of the thesis, field and laboratory methods for hydraulic conductivity determination are described. At the very end of this work, results obtained from both empirical formulas and permeameter with the constant head are compared.

Keywords: hydraulic conductivity, permeameter, empiric formulas, County of Virovitica - Podravina

Thesis contains: 32 pages, 4 tables, 16 figures and 34 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Full Professor Kristijan Posavec, PhD

Reviewers: Full Professor Kristijan Posavec, PhD

Associate Professor Jelena Parlov, PhD

Associate Professor Željko Duić, PhD

Date of defense: 20 September 2018., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA – CRPILIŠTE BIKANA	2
2.1 GEOGRAFSKI POLOŽAJ	3
2.2 GEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA	5
2.3 HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA	6
3. HIDRAULIČKA VODLJIVOST I METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOST	7
3.1 TERENSKÉ METODE	8
3.1.1. Slug metoda	8
3.1.2. Packer metoda	8
3.1.3. Pressure test metoda	9
3.1.4. Metoda trasiranjem	9
3.1.5. Pokusno crpljenje	10
3.2 LABORATORIJSKE METODE	11
3.2.1 Permeametar	11
3.2.2 Permeametar sa stalnom razinom	12
3.2.3 Permeametar s promjenjivom razinom	13
3.3 METODE TEMELJENE NA EMPIRIJSKIM FORMULAMA	14
3.3.1 Hazenova formula	16
3.3.2 Slichterova formula	17
3.3.3 USBR	17
4. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI	18
4.1 GRANULOMETRIJSKA ANALIZA SIJANJEM I ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI EMPIRIJSKIM FORMULAMA	19
4.2 ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI KORIŠTENJEM EMPIRIJSKIH FORMULA	22
4.3 ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI KORISTEĆI EKSPERIMENT PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM	22
5. REZULTATI HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI TEMELJENI NA EMPIRIJSKIM FORMULAMA I METODOM PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM	27

5. ZAKLJUČAK	29
6. LITERATURA	30

POPIS SLIKA

Slika 2.1 – Položaj Virovitičko - podravske županije u Republici Hrvatskoj (<i>preuzeto iz Mihelčić et al., 2007</i>).....	2
Slika 2.2 Položaj vodocrpilišta na području Virovitičko – podravske županije (<i>preuzeto iz Alilović, 2014</i>)	3
Slika 2.3 Položaj zdenca B 1-1 (<i>Preuzeto iz Duić & Hlevnjak, 2018</i>).....	4
Slika 3.1 Hidraulička vodljivost (<i>preuzeto iz Bačani, 2006</i>).....	7
Slika 3.1 Permeametar sa stalnom razinom vode (Urumović, 2003)	13
Slika 3.2 Permeametar s promjenjivom razinom vode (Urumović, 2003).....	14
Slika 4.1 Sušenje uzorka.....	18
Slika 4.2 Četvrtanje uzorka	19
Slika 4.3 Postupak sijanja i vaganja	20
Slika 4.4 Granulometrijska krivulja.....	21
Slika 4.5 Dijelovi permeametra: (1) Čelija permeametra, (2) donja bazna ploča s ventilom, (3) tronožac za učvršćivanje, (4) porozni disk, (5) filtarske mrežice, (6) gumice, (7) manometarske spojnice, (8) gornji navoji, (9) gornja ploča s otvorom, (10) potisni klip, (11) odzračni ventil, (12) donji navoji.	23
Slika 4.6 Sastavljanje ćelije	24
Slika 4.7 Ugradnja uzorka	24
Slika 4.8 Saturacija uzorka	25
Slika 4.9 Postupak mjerenja	26
Slika 5.1 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta	28

POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Prikaz rezultata granulometrijske analize sijanjem	20
Tablica 5.1 Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna (d10, d20 i d60)	27
Tablica 5.2 Rezultati granulometrijske analize	27
Tablica 5-3 Izračun hidrauličke vodljivosti.....	27

1. Uvod

Cilj rada bio je odrediti hidrauličku vodljivost empirijskim formulama te metodom permeametra sa stalnom razinom za odabrani uzorak, s područja crpilišta Bikana. Crpilište Bikana smješteno je u Virovitičko-podravskoj županiji, u sjevernom dijelu grada Virovitice.

Količina vode koja protječe kroz uzorak tla prvi puta je opisana od strane Darcya 1856. godine. Proučavanjem toka vode kroz stupac pijeska, Darcy je razvio relaciju između brzine filtracije, hidrauličkog gradijenta i koeficijenta K , tj. hidrauličke vodljivosti (Nielsen, 2006). Hidraulička vodljivost, kao jedan od najvažnijih sedimentacijskih procesa, kontrolira protok i transportne procese čestica u vodonosniku te karakterizira kapacitet medija za transport vode. Hidraulička vodljivost predstavlja parametar proporcionalnosti u Darcyjevom zakonu te izražava lakoću gibanja tekućine kroz zasićeni porozni medij (Urumović, 2003).

Laboratorijsko određivanje hidrauličke vodljivosti najčešće obuhvaća granulometrijsku analizu (Hazen, 1892; Terzaghi, 1925; Carman, 1937; Kozeny, 1953; Vuković & Soro, 1992; Roscoe Moss Company, 2008) te određivanje hidrauličke vodljivosti koristeći permeametar (Freeze & Cherry, 1979; Todd & Mays, 2005; Malama & Revil, 2014). Iako je granulometrijska analiza najupotrebljavanija metoda određivanja hidrauličke vodljivosti, metoda permeametra se također često upotrebljava. Metoda permeametra sa stalnom razinom upotrebljava se kod određivanja hidrauličke vodljivosti kod pjeskovitih i šljunčanih uzoraka dok se metoda permeametra sa promjenjivom razinom upotrebljava kod sitnijih, silitnih pijesaka, siltova te glina (Davies, 1969). Dosadašnja određivanja hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom obavili su Ban (2011), Ivačić (2014), Gelo (2014), Peršić (2014) i Čambala (2017) na nekonsolidiranim naslagama Zagrebačkog vodonosnika.

Metode određivanja hidrauličke vodljivosti možemo podijeliti na:

- terenske: slug test metoda, packer test metoda, pressure test metoda, trasiranje i pokusno crpljenje;
- laboratorijske: permeametar s promjenjivom razinom i permeametar sa stalnom razinom te
- određivanje hidrauličke vodljivosti pomoću empirijskih formula.

2. Područje istraživanja – Crpilište Bikana

Površina Virovitičko – podravske županije iznosi 2022 km² (Slika 2.1), a prema popisu stanovništva 2011. godine na području županije živi 84.836 stanovnika (DZS). Udaljenost krajnjih točaka zapad – istok iznosi 74 km, a krajnjih točaka sjever – jug 58 km (Mihelčić et al., 2007).

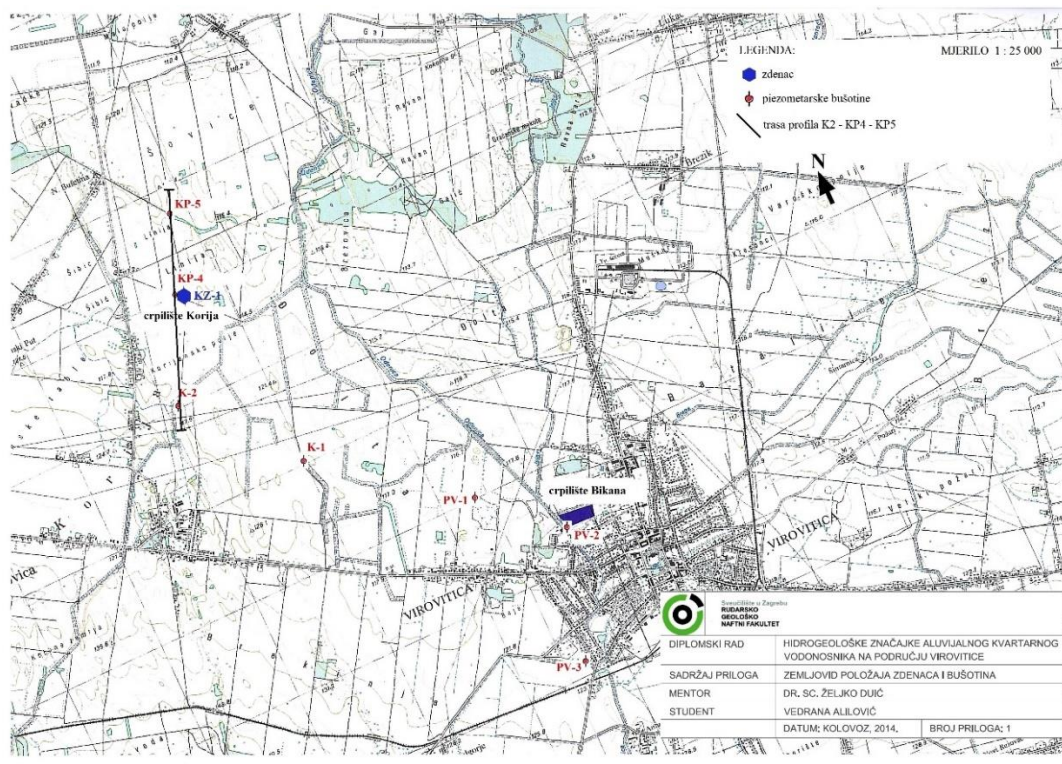


Slika 2.1 – Položaj Virovitičko - podravske županije u Republici Hrvatskoj (preuzeto iz Mihelčić et al., 2007)

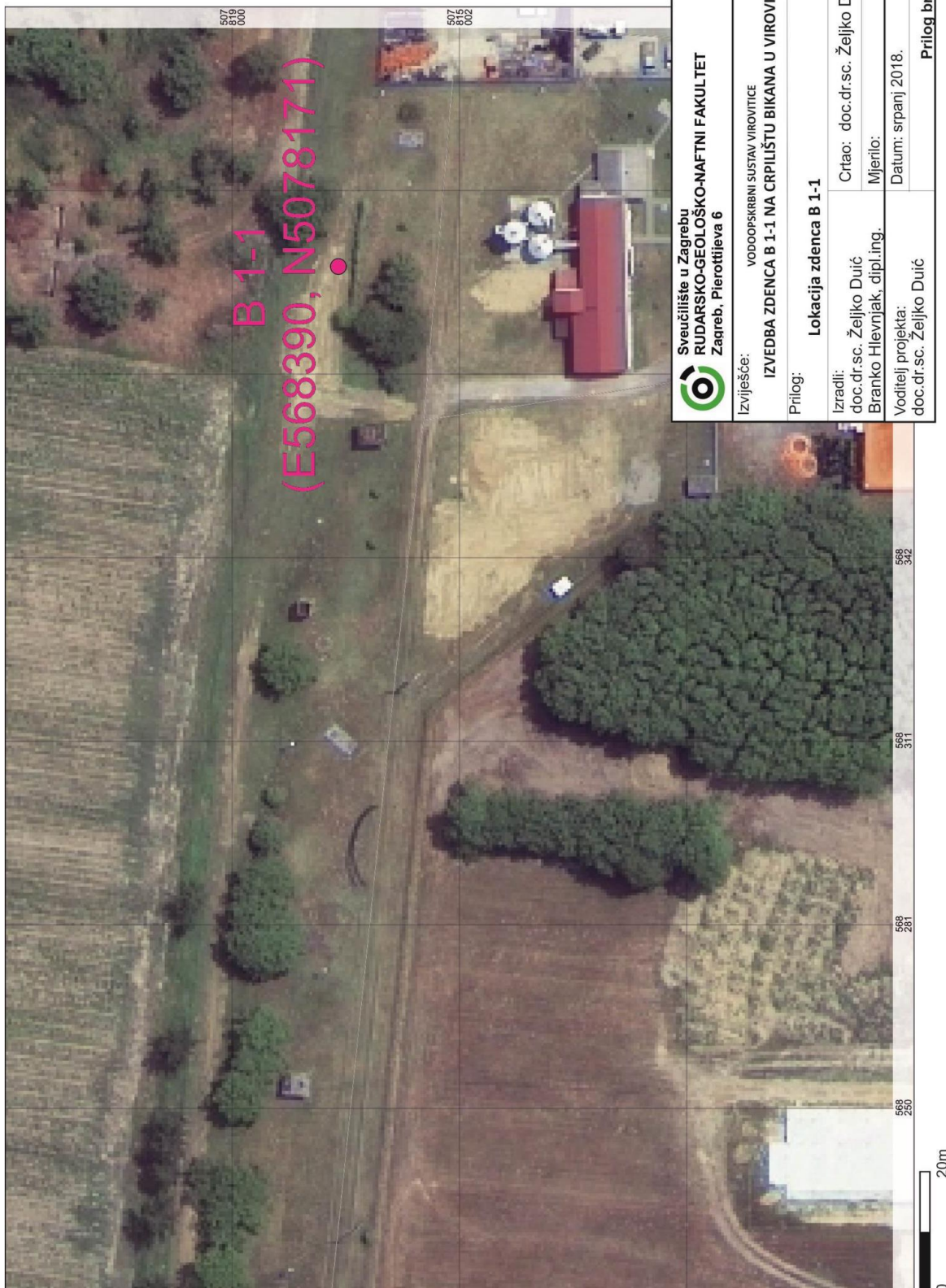
2.1 Geografski položaj


Virovitičko-podravaska županija nalazi se u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske, na dodiru središnje i istočne Hrvatske. Prema prirodno-geografskim obilježjima zapadni dio županije nalazi se na prostoru Bilogorske Podravine, a istočni dio na prostoru Slavonske Podravine. Ovaj prostor je karakteriziran izduženim oblikom u pravcu sjeverozapad-jugoistok, te jasnom reljefnom podjelom na sjeverni prostor podravske nizine te južni brdsko-planinski prostor, koji obuhvaća sjeverne padine Bilogore, Papuka i Krndije. S obzirom na to da županija leži na velikom vodonosnom području, uvjeti za opskrbu vodom su dobri, pa je za stanovništvo županije od presudne važnosti zaštita i korištenje vodonosnika koji utječe direktno na razvoj vodoopskrbnog sustava županije (Alilović, 2014).

Ispitivani uzorak uzet je iz zdenca B 1-1, na području glavnog izvorišta virovitičkoga vodoopskrbnog sustava, vodocrpilišta Bikana (Slika 2.3). Crpilište Bikana predstavlja zdenački zahvat podzemnih voda (Slika 2.2), a nalazi se u sjevernom dijelu grada Virovitice, u rubnom dijelu između urbaniziranih dijelova na jugu i poljodjelskih površina na sjeveru (Duić & Hlevnjak, 2018).



Slika 2.2 Položaj vodocrpilišta na području Virovitičko – podravske županije (preuzeto iz Alilović, 2014)



 Sveučilište u Zagrebu RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET Zagreb, Pierottijeva 6	
IZVEDBA ZDENCA B 1-1 NA CRPILISTU BIKANA U VIROVITICI	
Lokacija zdenca B 1-1	
Izvješće: VODOOPSKRBNI SUSTAV VIROVITICE	
Prilog: Izradili: doc.dr.sc. Željko Duić Branko Hlevnjak, dipl.ing.	Prilog br.: 1 Crtao: doc.dr.sc. Željko Duić Mjerilo: Datum: srpanj 2018.
Voditelj projekta: doc.dr.sc. Željko Duić	

Slika 2.3 Položaj zdenca B 1-1 (Preuzeto iz Duić & Hlevnjak, 2018)

2.2 Geološke značajke područja

U geološkoj građi širega područja virovitičke Podravine izdvajaju se dvije geotektonske jedinice (URUMOVIĆ i dr., 2008) s različitom geološkom građom i morfološkim obilježjima, što je rezultiralo i s izrazito različitim hidrogeološkim značajkama. To su:

- Dravska depresija u kojoj je formiran debeli kvartarni vodonosni kompleks i
- Bilogorsko i Papučko gorje koje izgrađuju slabo propusne tvorevine, pa se ovdje rijetko pojavljuju vodonosnici koji su u pravilu lokalnoga značaja. Najznačajniji vodonosnici pojavljuju se u karbonatnim naslagama miocenske i trijaskeske starosti.

Površinski promatrano, geološka građa pridravske ravnice je vrlo jednolična kako kronostratigrafski, jer su to sve najmlađe naslage koje pripadaju holocenu i najmlađem pleistocenu, tako i litološki jer na površini nalazimo uglavnom gline, prah i pijesak koji se pojavljuju u miješanim i izmjeničnim odnosima (Alilović, 2014).

Kvartarne naslage na površini ovog područja su dobro proučene, a time i raščlanjene na Osnovnoj geološkoj karti. Na obroncima Krndije, Papuka i Bilogore izdvojeni su fluvio-jezerski šljunci, pijesci i podređeno gline u izmjeni u razdoblju pliocen-kvartar. Od naslaga koje se pojavljuju na površini u pleistocen su uvršteni pretežito pijesci zavodnjene sredine i genetski tipovi eolskog niza, a u holocen sedimenti fluvijalnog, eolskog, barskog i padinskog facijesa (Prelogović & Velić, 1992).

U strukturno-tektonskom pogledu, ovo područje sadrži nekoliko minimuma i maksimuma. Antiklinala "Pitomača" u smjeru jugoistoka tone u veliku sinklinalu kod Virovitice, a na sjeveru je prati sinklinala koja također tone u Virovitičku. Krajem miocena, odnosno krajem taloženja gornjopontskih naslaga dolazi do izdizanja Bilogore i erozije naslaga. Istovremeno se ispunjava Dravski bazen koji se spušta i talože se fluvijalni i jezerski sedimenti, šljunci i pijesci. Vlaškom orogenetskom fazom izdiže se Bilogorski horst i oblikuje se struktura Virovitice. Dravski bazen i dalje tone te se ispunjava, a cijelo područje postupno poprima današnji izgled. Početkom kvartara nastupa regresija, pri čemu ostaju manja jezera i na kraju zaostaje kopno na kojem se postupno počinje razvijati današnja riječna mreža. Konačno se formira tok rijeke Drave i talože se krupnozrnati sedimenti pijesak i šljunak, te detritični materijal s Alpa i okolnog područja te je posljedica toga ritmična izmjena šljunka, pijeska i praha. U gornjem pleistocenu cijelo područje prekriva prapor, a neotektonski pokreti daju današnji izgled (Alilović, 2014).

2.3 Hidrogeološke značajke područja

Ravničarski predjeli Podravine morfološki ocrtavaju protezanje Dravske depresije gdje su istaložene vrlo debele tercijarne i kvartarne naslage, a u njihovom vršnom dijelu pojavljuje se kvartarni vodonosni kompleks u kojem su nakupljene velike količine podzemnih voda, te ujedno predstavljaju glavna izvorišta vodoopskrbe. U ujednačenom ravničarskom području naziru se tragovi razvedenosti terena, a prema morfološkom i hidrogeološkom značenju mogu se izdvojiti dvije jedinice (URUMOVIĆ i dr., 2008.):

- Nizinski predjeli pretežitog dijela dravske ravnice u kojima su uskladištene velike količine podzemnih voda (vodonosnici velike ukupne debljine). Za kakvoću podzemnih voda ovih predjela karakteristični su reduktivni uvjeti za koje je jedna od uobičajenih posljedica povišeni sadržaj željeza, mangana i prirodnog sadržaja amonijaka.
- Drugo područje su rubne terase koje nemaju kontinuirano pružanje, a vjerojatno su im različite i geneze. Zajednička im je manja debljina naslaga i manja reduktivnost uvjeta, dok im je mjestimično izražena oksidiranost naslaga. Posljedica toga je povoljnija prirodna kakvoća podzemne vode. Ovakvi predjeli pojavljuju se kao terase rubnih zapadnih predjela u obliku Đurđevačko-Pitomačke terase, koja je vjerojatno prvenstveno uvjetovana neotektonskim zbivanjima.

Za potrebe vodoopskrbe zanimljiv je samo najgornji dio ovog vodonosnog kompleksa, aluvijalni vodonosnik heterogene litološke građe (URUMOVIĆ i dr., 1976). U litološkom sastavu aluvijalnog vodonosnika pojavljuju se pijesak i šljunak koji izgrađuju propusne slojeve, te prah i glina koji izgrađuju polupropusne slojeve. Prema regionalnoj hidrogeološkoj situaciji može se zaključiti da gotovo cijelo područje virovitičke Podravine leži na vodonosnim naslagama debljina mjestimično i preko 200 m. Moguće su i znatno veće debljine. To su u pravilu šljunčane naslage vrlo velike propusnosti, ali i raznolike kvalitete podzemne vode (URUMOVIĆ i dr., 2008).

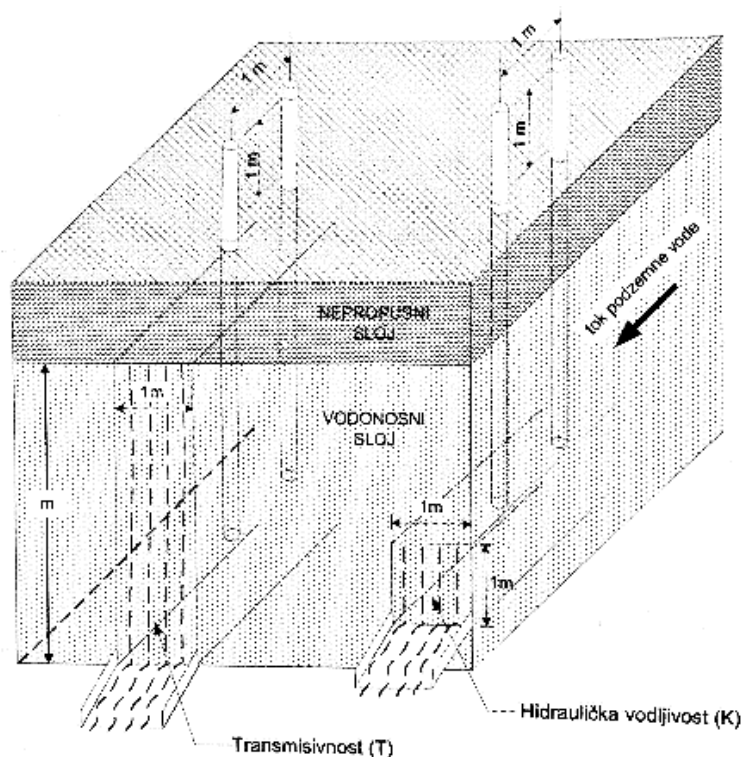
3. Hidraulička vodljivost i metode određivanja hidrauličke vodljivost

Hidraulička vodljivost može se definirati kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne stijene jedinične površine ($F = 1 \text{ m}^2$) uz jedinični hidraulični gradijent tj. pad potencijala za 1 m na udaljenosti od 1 m u smjeru tečenja podzemne vode (Slika 3.1; Bačani, 2006).

Ovisi o značajkama stijene kroz koju fluid prolazi i o značajkama fluida:

$$K = cd^2 \frac{\rho_v g}{\mu} = k \frac{\rho_v g}{\mu} \quad (3.1)$$

u kojem je K hidraulička vodljivost (m/s), c bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje značajke stijene (poroznost, zbijenost, oblik zrna o čemu ovisi geometrija pore), d promjer pore kroz koju prolazi fluid (m), g gravitacija (m/s^2), ρ gustoća fluida (kg/m^3) i ν dinamički viskozitet fluida ($P_{as} = \text{kg/ms}$). Parametar k uzima se kao stalna veličina, a zove se *unutarnja propusnost* ili, kraće, *propusnost* (Urumović, 2003): $k = cd^2$ (m^2), te se odnosi na značajke stijene. Izraz ($\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$) odnosi se na značajke fluida (Bačani, 2006).



Slika 3.1 Hidraulička vodljivost (preuzeto iz Bačani, 2006)

3.1 Terenske metode

Za određivanje hidrauličke vodljivosti od terenskih metoda primjenjuju se: slug metoda, packer metoda, pressure test metoda, metoda trasiranjem i pokusno crpljenje.

3.1.1. Slug metoda

Slug metoda je jedna od najčešće korištenih terenskih metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti u zdencima i piezometrima te je pogodna i za tla i za stijene. Izvodi se utiskivanjem ili crpljenjem vode iz piezometra ili zdenca te praćenjem promjena razine vode H , prilikom težnje povratka u ravnotežno stanje u vremenu t . Metoda se najviše koristi kod vodonosnih slojeva velike hidrauličke vodljivosti, jer bi kod materijala s malom hidrauličkom vodljivošću eksperiment trajao danima ili tjednima, a u takvim slučajevima preporučuje se pressure test metoda. U slučaju vertikalno orijentiranih zdenaca ili piezometara, slug metodom se mjeri horizontalna hidraulička vodljivost (Bouwer & Rice, 1976).

3.1.2. Packer metoda

Ovu metodu primjenjujemo u mjerenjima vršenim u konsolidiranim stijenama ili u otvorenim bušotinama. Ovisno o situaciji, možemo koristiti metodu s jednim ili dva pakera koji se postavljaju na odabranu dubinu u bušotini. Metoda s jednim pakerom služi za testiranje dijela bušotine od dna do postavljenog pakera unutar bušotine. Mjerenja se izvode tijekom bušenja te se paker postavlja na željenoj dubini. Nadalje, paker se ispuni vodom ili plinom sve dok ne dođe do njegovog pomicanja. Nakon mjerenja bušenje se nastavlja, a testiranja se provode u toku napredovanja bušenja. Ovisno o hidrauličkoj vodljivosti, vrijeme trajanja pokusa može varirati između 15 minuta i 2 sata te se u isto vrijeme također mjere i razine podzemne vode. Što je hidraulička vodljivost veća, vrijeme trajanja pokusa je kraće. Kod metode s dva pakera bušotina se izbuši do kraja te se tek nakon toga postave pakeri. Pokus se izvodi tako da se sa testiranjem započne na dnu bušotine i napreduje se prema površini jer u suprotnom može doći do narušavanja stabilnosti bušotine. Prednost ove metode je kraće vrijeme u odnosu na pokusno crpljenje i slug metodu te što se izbjegava

efekt bušotinskog uskladištenja. Obično se koristi u slabo propusnim stijenama (Walthall, 1990).

3.1.3. Pressure test metoda

Pressure test metoda koristi se kod materijala sa malom hidrauličkom vodljivosti, manjom od 1×10^{-7} cm/s (Nielsen, 2006). Tijekom testiranja u bušotinu se postavi sustav pakera te se promatra pad tlaka koji se bilježi kao funkcija vremena. U prostoru između pakera povisi se tlak te se praćenjem njegovih promjena dobivaju podaci o koeficijentu uskladištenja S i hidrauličkoj vodljivosti K . Pokus se izvodi u bušotini u stijenskoj masi za koju se želi saznati hidraulička vodljivost K pomoću električnih logera. Što su stijene propusnije, vrijeme trajanja pokusa je kraće. Također, brži je od pokusnog crpljenja ili slug metode (Orient et al., 1987).

3.1.4. Metoda trasiranjem

Trasiranjem se dobivaju podaci o različitim veličinama, a jedna od njih je i hidraulička vodljivost. Istraživanje se izvodi utiskivanjem traseru, koji je najčešće obojen, u jedan ili više zdenaca, a zatim se taj traser detektira na istražnim bušotinama. Zbog radijalnog širenja traseru, bušotine se postavljaju radijalno u smjeru toka od utisne bušotine. Iz njih se vade uzorci prema kojima se dobivaju podaci o količini prolaznog traseru te se mjeri se vrijeme koje je potrebno da traser stigne do istražne bušotine. Preporučljivo je utiskivanje traseru na više različitih dubina zbog dobivanja detaljnijih i preciznijih podataka. Traser ne smije biti toksičan ni radioaktivan i mora biti uočljiv kod vrlo malih koncentracija.

Najčešće se koristi za krške vodonosnike, gdje teren ne zahtjeva izvođenje bušotina. Trasiranje bojanjem sa ciljem dokazivanja podzemne veze između dvije točke poznato je kao kvalitativno trasiranje gdje se pojava boje na točki istjecanja (izvor ili ponor) utvrđuje vizualnim opažanjem ili pomoću tzv. pasivnih detektora. Ovom metodom se još mogu procijeniti prividna brzina tečenja i vrijeme putovanja, a detaljnije informacije dobivaju se kvantitativnim trasiranjem. Metoda se rijetko koristi, jer je sama izvedba relativno skupa i dugotrajna (Parlov, 2012).

3.1.5. Pokusno crpljenje

Postupak pokusnog crpljenja primjenjuje se isključivo kod propusnih vodonosnih naslaga koje su važne za crpljenje vode s ciljem vodoopskrbe. Prednost ove metode je što se tlo ili stijena ispituju u neporemećenoj okolini. Prema tome, ako tlo ima sekundarnu propusnost zbog pukotina ili sadrži korijenje, test uključuje njihov utjecaj na izmjerenu hidrauličku vodljivost. Ovom metodom dobivaju se hidrogeološki parametri. Pokus se izvodi tako da se voda, u vodonosnom sloju koji želimo testirati, crpi iz zdenaca određenim kapacitetom kroz određeno vrijeme te se opažaju podaci piezometarskih visina u okolnim piezometrima. Na temelju tih podataka izračunavaju se hidrogeološki parametri (Bačani, 2006).

Pokusno crpljenje može imati dva cilja:

- određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnog sloja i
- određivanje specifičnog kapaciteta zdenca, dozvoljenog sniženja, izbor odgovarajuće crpke itd.

Preporuka je da se postavi minimalno 3 opažачka piezometra na različite udaljenosti od crpnog zdenca. Udaljenost postavljenih piezometara od zdenaca ovisi o hidrauličkoj vodljivosti vodonosnog sloja iz kojeg se crpi voda. Ukoliko je hidraulička vodljivost velika, opažачki se piezometri postavljaju bliže crpnom zdencu (10 – 100 m), jer je pritom konus depresije strmiji i kraći. Kod vodonosnih slojeva manjih hidrauličkih vodljivosti zdenci se postavljaju na veće udaljenosti (100 – 250 m) od crpnog zdenca, jer je konus depresije manjeg nagiba i veće dužine. Detaljnosti istraživanja, svrha te raspoloživi budžet određuju broj postavljenih piezometara. Prije početka pokusnog crpljenja određuju se sve postojeće promjene razine podzemne vode, uključujući dugotrajne regionalne trendove i kratkotrajne promjene. Za svaki piezometar nakon toga crta se nivogram. Crpljenje počinje tek kada se ne očekuju veće promjene potencijala za vrijeme trajanja crpljenja, a poželjno je da traje dok se konus depresije ne stabilizira.

U zdencu B 1-1 izbušenom na području crpilišta Bikana, iz kojeg je uzet uzorak, dobivena je vrijednost hidrauličke vodljivosti od 113 m/dan.

3.2 Laboratorijske metode

3.2.1 Permeametar

Laboratorijskim metodama hidraulička vodljivost se određuje pomoću tzv. permeametra, a koriste se mali uzorci izdvojeni na različitim točkama vodonosnika ili neke druge stijene. Uzorci se dobivaju iz raskopa ili iz bušotina. (Urumović, 2003).

Hidraulička vodljivost se određuje na uzorcima koji se ugrađuju u ćeliju cilindričnog oblika prema definiranoj normi. Tijekom pripreme potrebno je paziti na zbijenost i saturiranost uzorka te na pojavu mjehurića zraka koji onemogućavaju točno ispitivanje. Kod normalnih okolnosti, u vodi postoji određeni sadržaj otopljenog zraka (oko 20 litara po m^3 vode pri sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku) (Urumović, 2003). Ispitivanje se može provesti metodama permeametra sa stalnom razinom i metodom permeametra s promjenjivom razinom, a izbor metode ovisi o veličini zrna u uzorku. Kod dobro propusnih materijala ($K > 10^{-5}$ m/s) koristi se permeametar sa stalnom razinom dok se kod slabo propusnih materijala ($K < 10^{-5}$ m/s) koristi permeametar s promjenjivom razinom.

Pri istraživanju te pri interpretaciji rezultata istraživanja treba voditi računa o sljedećim ograničenjima:

- Tla su u prirodi obično uslojena, pa je u laboratoriju teško simulirati stvarne terenske uvjete.
- U pijesku su K_v i K_h zbog deformacijskih uvjeta dosta različiti ($K_h = 10K_v$ do $K_h = 1000K_v$), a takvi prirodni uvjeti se pri uzimanju uzoraka nepovratno gube.
- Male dimenzije terenskih uzoraka dovode do djelovanja rubnih uvjeta, poput tečenja uz glatke strane posude i stvaranja mjehurića zraka u vodi ili obliku zamki zraka u uzorku, što može imati zamjetan učinak na rezultate.
- Metode permeametrom odvijaju se samo u saturiranim uvjetima.
- Kada je K malen (10^{-7} do 10^{-11}), vrijeme potrebno za testiranje lako može uzrokovati evaporaciju i procurivanje opreme, što dovodi do pogreške u veličini hidrauličke vodljivosti K za nekoliko redova veličine.

- Zbog duljine trajanja testa, obično se primjenjuje hidraulički gradijent od 5 ili veći, dok je u prirodi reda veličine od 0,001 do 2.
- U pijesku nerealno visok hidraulički gradijent može stvarati turbulencije, dakle okolnosti toka različite od terenskih pod kojima se odvija laminaran tok.
- Nerealno visok hidraulički gradijent može dovesti do konsolidacije i poroznosti koja je različita od prirodne poroznosti uzorka (Urumović, 2003).

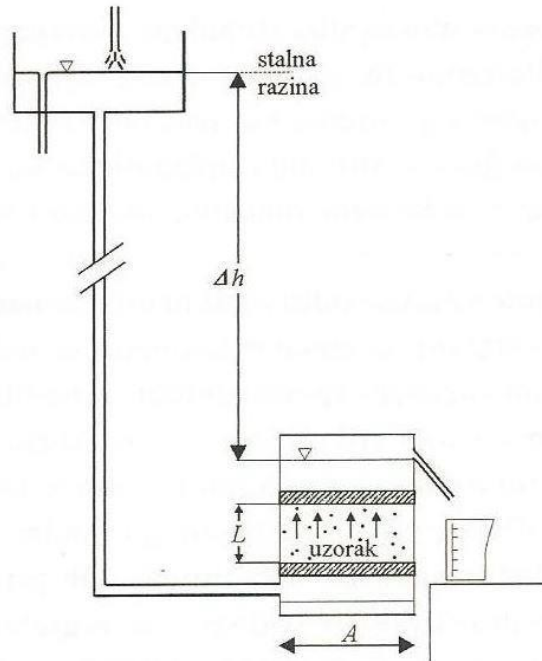
3.2.2 Permeametar sa stalnom razinom

U permeametu sa stalnom razinom strujanje je ustaljeno i jednodimenzionalno (Slika 3.1). Prilikom ispitivanja mjeri se vrijeme t potrebno da kroz uzorak prođe voda određenog volumena, protok Q , razlika visina h očitana s manometarskih cjevčica te temperatura vode T . Koristeći te podatke, uz poprečni presjek A i duljinu uzorka L , hidraulička vodljivost i unutarnja propusnost određuju se izravno iz Darcyjevog zakona (Urumović, 2003):

$$K = \frac{QL}{Ah} = k \frac{\rho_v g}{\mu} \quad (3.2)$$

Za točno određivanje hidrauličke vodljivosti preporučuje se napraviti nekoliko mjerenja s različitim vrijednostima Δh piezometarske razine između gornjega vodospremnika i donjega preljeva (Urumović, 2003). Preporučljivo je napraviti oko desetak mjerenja s različitim piezometarskim visinama, odnosno s različitim hidrauličkim gradijentima, no u praksi se testovi rade tako dugo dok se ne izađe iz područja laminarnog toka, odnosno granice valjanosti Darcyevog zakona. Graf odnosa Darcyve brzine i hidrauličkog gradijenta pokazuje nalazi li se sustav u laminarnom toku. Granica valjanosti Darcyjevog zakona odvaja područje laminarnog toka gdje vrijedi Darcyjev zakon te turbulentno tečenje gdje on više ne vrijedi, a kao pomoć može se koristiti i Reynoldsov broj (Urumović, 2003). Naime, Reynoldsov broj nije toliko pouzdan kao grafički prikaz jer ponekad graf pokazuje linearnost kod $Re > 10$.

Ova metoda koristi se za određivanje hidrauličke vodljivosti propusnijih tla, odnosno uzoraka koji sadrže manje od 10% čestica manjih od 75 mm.



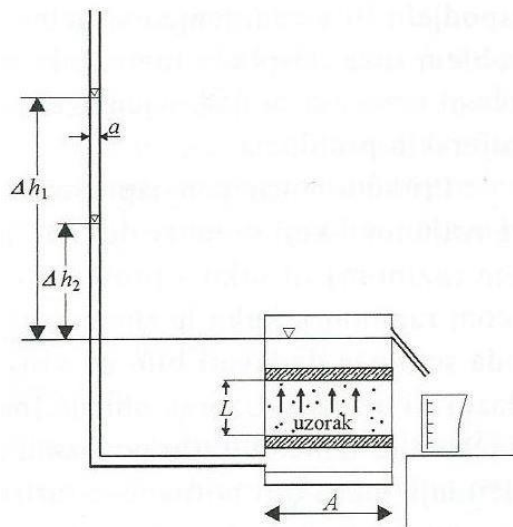
Slika 3.1 Permeametar sa stalnom razinom vode (Urumović, 2003)

3.2.3 Permeametar s promjenjivom razinom

Permeametar s promjenjivom razinom (Slika 3.2) obično se primjenjuje kada je potrebno dobiti relativno visoke gradijente, a posebno je prikladan za određivanje hidrauličke vodljivosti sitnozrnatih materijala (Lee et Fetter, 1994).

Saturacija uzorka traje puno duže nego kod permeametra sa stalnom razinom te unutar tog vremena treba kontrolirati temperaturu i tlak. Ukoliko dođe do njihove promjene tijekom saturacije, izaziva se oslobađanje zraka. Ovom metodom određuje se količina protjecanja vode u vremenu kroz uzorak mjerenjem iznosa pada visine u uspravnoj cijevi (Balaško, 2011). Tijekom nekog vremena t_1 , visina vode opadne s njezine inicijalne visine Δh_1 na Δh_2 (Urumović, 2003). Sa podacima o visini uzorka u ćeliji L te površini poprečnog presjeka cjevčice a , hidraulička vodljivost određuje se iz izraza:

$$K = \frac{aL}{A\Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.3)$$



Slika 3.2 Permeametar s promjenjivom razinom vode (Urumović, 2003)

3.3 Metode temeljene na empirijskim formulama

Kod metode određivanja hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama korelira se hidraulička vodljivost te granulometrijski sastav uzoraka materijala vodonosnika.

Najvažnije i najčešće primjenjivane laboratorijske metode obuhvaćene su granulometrijskom analizom, a određivanje zrna u sedimentima provodi se metodama mjerenja, sisanja i sedimentacijske analize (Tišljarić, 2004).

Za početak, potrebno je napraviti granulometrijske analize na uzorcima materijala od kojeg je izrađen vodonosnik kojeg ispitujuemo. Ukoliko se granulometrijski sastav vodonosnog sloja mijenja po dubini, potrebno je uzeti uzorak iz svakog pojedinog intervala unutar kojeg je sastav nepromijenjen, s time da se na uzorku mora označiti pojedini interval za koji je uzorak reprezentativan (Bačani, 2006).

Sisanje je najvažnija metoda određivanja veličine čestica sedimenata. Uzorak se sije kroz određen broj sita gdje se otvori smanjuju na svakom sljedećem situ odozgo prema dolje. Na taj način uzorak se odjeljuje u nekoliko frakcija, tj. dijelove uzorka koji se zadržavaju na pojedinom situ nakon sisanja. Provodi se mokrim i suhim postupkom.

- Suhi postupak: Određena količina materijala se usipava na najgrublje sito koje se nalazi na vrhu. Sita sa uzorkom se tresu kružnim pokretima 10 do 15 minuta. Nakon toga, važe se ostatak na svakom situ te materijal koji je prošao kroz najfinije sito (na dnu). Frakcija se važe na vagi s najmanje 0,1% točnosti od ukupne težine uzorka. Isti se postupak ponavlja za sljedeće sito i za frakciju koja je prosijana kroz najfinije sito.
- Mokri postupak: Ovaj postupak se koristi kada su prašinate čestice sljepljene na krupna zrna. Postupak je identičan suhom, a jedina razlika je što se materijal ispire na svakom situ te se nakon toga suši i važe.

Rezultati ostataka na sitima te rezultat prolaza količine materijala kroz sito najmanjih otvora, naziva se prosjev. Analiza se smatra točnom ukoliko se zbroj težina svih ostataka na sitima i prosjeva ne razlikuje od početne odvagane težine više od 1 %.

3.3.1 Hazenova formula

Jedna od najpoznatijih empirijskih formula je formula Hazena (1892) koji izračunava hidrauličku vodljivost na temelju efektivnog promjera zrna (Bačani, 2006):

$$K = C_H d_{10}^2 (0,7 + 0,03T) \quad (3.4)$$

gdje je:

K – hidraulička vodljivost (m/s),

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

$C_H = 0,0116$ (za K izražen u m/s)

T – temperatura vode (°C)

Ovaj izraz može biti korišten ukoliko su ispunjeni sljedeći uvjeti:

$$d_{10} = 0,1-3 \text{ mm}$$

i ako je koeficijent jednolikosti

$$d_{60} / d_{10} < 5$$

Ako Hazenovu formulu usporedimo s izrazom hidrauličke vodljivosti $K = cd^2q_{vg} / \mu$ onda je očito da Hazenov koeficijent C_H ne odgovara bezdimenzijskome koeficijentu c (Bačani, 2006). Naime, Hazenov koeficijent C_H objedinjuje u sebi i značajke stijene i značajke fluida i ima dimenzije $L^{-1} T^{-1}$.

3.3.2 Slichterova formula

Drugi izraz koji se koristi određivanje hidrauličke vodljivosti pomoću empirijskih formula jest Slichterova (1899) formula i ona glasi:

$$K = Cd_e^2 \quad (3.5)$$

gdje je:

K – hidraulička vodljivost (m/s)

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

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

U primjeni Slichterove metode, uvedene su dvije novosti u promatranju učinka granulometrijskog sastava na hidrauličku vodljivost. Jedna je otklanjanje strogo uvjeta jednoličnosti zrna i širenje valjanosti metode za izračun hidrauličke vodljivosti na temelju granulometrijskog sastava zbog osrednje veličine zrna u uzorku (Urumović, 2013). Druga je novost uvođenje funkcije poroznosti.

3.3.3 USBR

Treći izraz za određivanje hidrauličke vodljivosti iz granulometrijskog sastava je formula **USBR** (Miletić i Henrich – Miletić, 1981) koja glasi:

$$K = Cd_{20}^{2,3} \quad (3.6)$$

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

4. Određivanje hidrauličke vodljivosti

Tijek izvedbe eksperimenta:

1. priprema uzorka za testiranje, sušenjem u laboratoriju (Slika 4.1) ,
2. granulometrijska analiza suhim sijanjem,
3. korelacija hidrauličke vodljivosti i granulometrijskog sastava na osnovu empirijskih formula,
4. eksperimentalno laboratorijsko određivanje hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom.

Nakon uzimanja uzorka na terenu, uzorak je donesen u laboratorij gdje je rasut na ravnu površinu kako bi se osušio. Sušenje je trajalo dva dana, nakon čega je napravljena granulometrijska analiza.



Slika 4.1 Sušenje uzorka

4.1 Granulometrijska analiza sijanjem i određivanje hidrauličke vodljivosti empirijskim formulama

Količinu uzorka je najprije trebalo smanjiti metodom četvrtanja (Slika 4.2). Uzorak se rasprostire u maloj debljini na ravnu površinu u kvadratnom obliku nakon čega se podjeli na četiri jednaka dijela. Uzimaju se dva dijagonalna kvadranta kako bi dobili reprezentativan utorak za ispitivanje. Postupak se ponavlja sve dok se ne dobije željena količina uzorka. Nakon dobivanja željenog uzorka, kreće se na granulometrijsku analizu.



Slika 4.2 Četvrtanje uzorka

Najprije se izvaže svako sito zasebno bez uzorka, a nakon toga izvažemo uzorak. Nakon vaganja, rađeno je suho sijanje. Za sijanje korišteno je 13 sita u rasponu od 0,032 mm do 19 mm, odnosno sita veličine: 0,032 mm, 0,063 mm, 0,20 mm, 0,63 mm, 1,00 mm, 2,00 mm, 3,15 mm, 4,00 mm, 5,00 mm, 6,30 mm, 8,00 mm te 19,0 mm. Sita su postavljena jedno ispod drugog, na način da se veličina otvora na situ smanjuje prema dnu. Uzorak se usipa u najgornje sito, te se zatim sva sita tresu kružnim pokretima 10 do 15 minuta nakon čega se važe svako pojedino sito sa frakcijom zadržanom na istom (Slika 4.3).

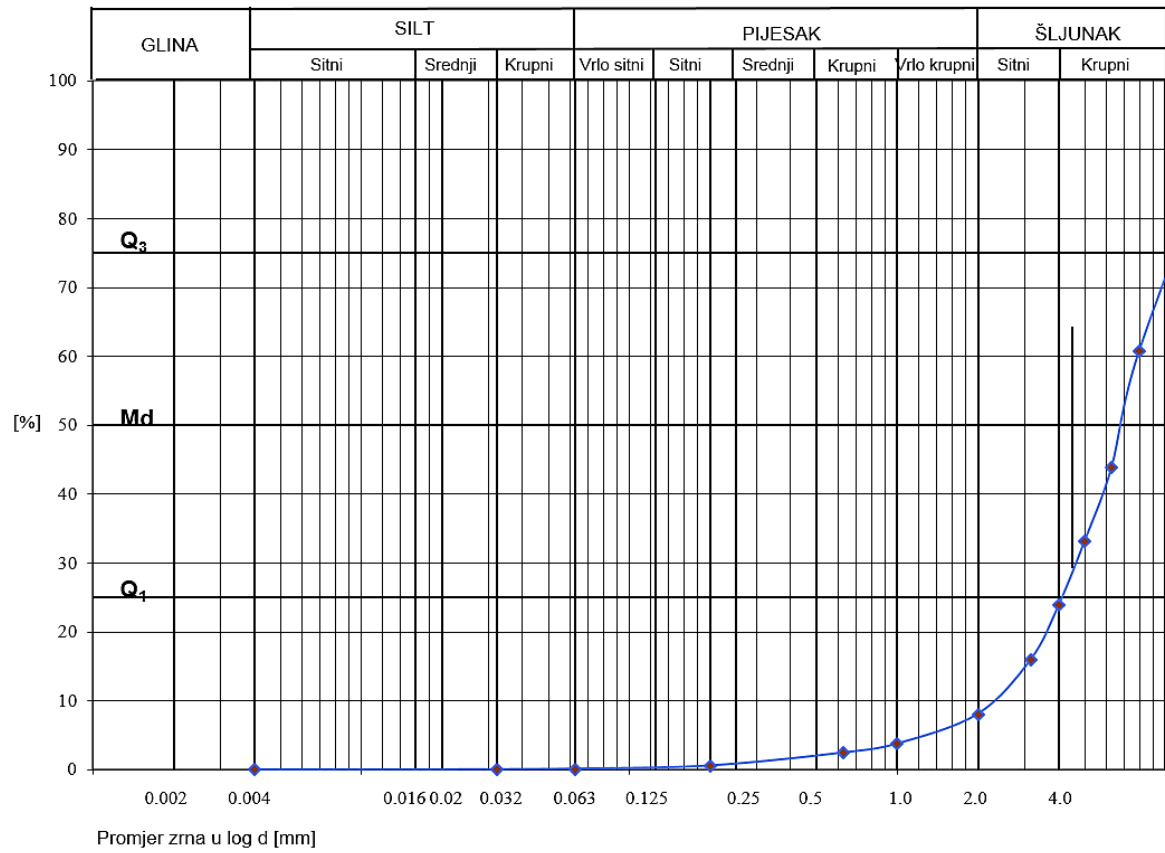


Slika 4.3 Postupak sisanja i vaganja

Rezultati se pohranjuju u tablicu iz koje se nakon toga crta granulometrijska krivulja koja prikazuje cjelokupan sastav i raspored zrna (Tablica 4.1; Slika 4.4). Iz nje se očitavaju udjeli dobivenih frakcija iz kojih se izračunavaju granulometrijski koeficijenti (Tišljarić, 2004).

Tablica 4.1 Prikaz rezultata granulometrijske analize sisanjem

d sita [mm]	Masa sita [g]	Masa sito i uzorak [g]	Masa ostatka na situ [g]	[%]	Kumulativno [%]
19,00	589,9	668,0	78,1	3,51	100,00
8,00	461,0	1334,0	873,0	39,20	60,80
6,30	496,0	874,0	378,0	16,97	43,83
5,00	436,0	674,0	238,0	10,69	33,14
4,00	466,0	673,0	207,0	9,30	23,84
3,15	436,0	611,0	175,0	7,86	15,99
2,00	405,0	581,0	176,0	7,90	8,08
1,00	381,0	477,0	96,0	4,31	3,77
0,63	358,0	387,0	29,0	1,30	2,47
0,20	296,0	338,0	42,0	1,89	0,58
0,063	274,0	284,0	10,0	0,45	0,13
0,032	384,0	386,0	2,0	0,09	0,04
0,004	360,0	361,0	1,0	0,04	0,00
			2227,00		
Ukupna masa prije sisanja:			2300,00 g		



Slika 4.4 Granulometrijska krivulja

4.2 Određivanje hidrauličke vodljivosti korištenjem empirijskih formula

Hidrauličke vodljivosti određene su pomoću empirijskih formula objašnjenih u poglavlju 3.3.

Hazen:

$$K = C_H d_{10}^2 (0,7 + 0,03T) = 0,0116 \cdot 2,2^2 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot 22) = 7,6 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

USBR:

$$K = C \cdot d_{20}^{2,3} = 0,0036 \cdot 3,6^{2,3} = 6,9 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Slichter:

$$K = C d^2 e = 0,00574 \cdot 2,2^2 = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

4.3 Određivanje hidrauličke vodljivosti koristeći eksperiment permeametra sa stalnom razinom

Granulometrijska analiza je pokazala da je uzorak šljunkovit, te je prema tome permeametar sa stalnom razinom odabran kao laboratorijska metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti. Permeametar koji smo koristili je standardnih dimenzija, tj. udaljenost između manometara i širina poprečnog presjeka ćelije je stalna (4.5). Mjeri se razlika piezometarskih visina za svaku promjenu hidrauličkog gradijenta te vrijeme potrebno da kroz uzorak prođe voda određenog volumena. Količina toka mjeri se na donjem preljevu. Eksperiment je rađen prema ispitnoj normi ASTM D2434 – 68 koja nam 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 uklanjanja zrna većih od 19 mm, mjerimo dimenzije ćelije. Mjeri se udaljenost između manometara L (m), poprečni presjek A (cm^2) te srednju vrijednost unutarnjeg promjera ćelije D (m).



Slika 4.5 Dijelovi permeametra: (1) Čelija permeametra, (2) donja bazna ploča s ventilom, (3) tronožac za učvršćivanje, (4) porozni disk, (5) filtarske mrežice, (6) gumice, (7) manometarske spojnice, (8) gornji navoji, (9) gornja ploča s otvorom, (10) potisni klip, (11) odzračni ventil, (12) donji navoji.

Prije nego što se ćelija sastavi, mora se dobro očistiti te se svi spojevi mažu vazelinom kako u ćeliju ne bi ulazio zrak. Na donju baznu ploču stavi se porozni disk i filtarska mrežica te se pričvrsti ćelija permeametra. Manometarske spojnice se zaviju do unutarnje stijenke ćelije te se zavijaju do kraja tek kada ugradimo uzorak do njihove razine (Slika 4.6). Nakon toga ugrađuje se uzorak u intervalima po 2 cm kružnim pokretima. Ugradnja se vrši pomoću standardiziranog lijevka te se zbija batom. Čelija se puni do razine 2 cm udaljene od vrha, jer da se ćelija puni do vrha, uzorak bi sprječavao dovod vode iz rezervoara. Na vrh uzorka postavlja se druga filtarska mrežica te se ćelija zatvara gornjom pločom koja sadrži ispušni ventil. Svi navoji se zatežu kako tijekom eksperimenta zrak ne bi ulazio u uzorak (Slika 4.7). Ovako pripremljena ćelija spremna je za postupak permeametra sa stalnom razinom.



Slika 4.6 Sastavljanje ćelije



Slika 4.7 Ugradnja uzorka

Nakon sastavljanja ćelije te ugradnje uzorka, potrebno ga je saturirati. Ćelija se cijevima spaja na manometar, spremnik za vodu te vakumsku pumpu. Ventil za rezervoar napunjen sa vodom u prvom dijelu postupka je zatvoren ventilom, a cijevi spojene na manometar zatvorene su štipaljka. Nakon toga se uključi vakuum pumpa koja odvodi zrak. Pumpa radi 10 do 15 minuta kako bismo bili sigurni da nema preostalog zraka u uzorku. Potom polako otvaramo ventil kako bi pumpa polako vukla vodu iz donjeg rezervoara te tako saturirala uzorak (Slika 4.8). Važno je da saturacija bude dovoljno spora kako ne bi došlo do

remećenja zbijenosti uzorka. Po završetku saturacije, isključuje se pumpa, okreće se sustav i pušta se voda iz spremnika da se gravitacijski procjeđuje kroz uzorak. Miču se štipaljke sa manometarskih cjevčica te kad je razina vode u sve 3 cjevčice u manometru ista, sigurni smo da u uzorku nema zraka te smo tek tada spremni za početak ispitivanja.



Slika 4.8 Saturacija uzorka

Postupak mjerenja započinje otvaranjem dovodnog ventila što omogućuje slobodni protok vode kroz uzorak. Razlika visina vode u manometarskim cjevčicama A i C mora biti 2 cm, a nakon toga se ta razlika za svako mjerenje povećava za 0,5 cm. Na taj način povećavamo protok koji je linearno proporcionalan hidrauličkom gradijentu te pazimo da je u granicama Darcyjevog zakona. Povećanje gradijenta, tj. povećanje razlike u manometarskim visinama u cjevčicama, ponavlja se dok ne dođe do odstupanja od linearnog odnosa specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta što upućuje na pojavu turbulentnog toka za koji više ne vrijedi Darcyev zakon. Mjeri se vrijeme potrebno da se napuni menzura od 100 ml (Slika 4.9).



Slika 4.9 Postupak mjerenja

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

Za izračun hidrauličke vodljivosti metodom temeljenoj na empirijskim formulama, potrebno je na kumulativnoj granulometrijskoj krivulji očitati vrijednosti efektivnih promjera zrna (Tablica 5.1). Rezultati granulometrijske analize su prikazani u tablici 5.2. U Tablici 5.3 prikazane su vrijednosti hidrauličke vodljivosti prema Hazenu, Slichteru, USBR-u i pomoću permeametra sa stalnom razinom. Na slici 5.1 prikazan je graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta.

Tablica 5.1 Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna (d₁₀, d₂₀ i d₆₀)

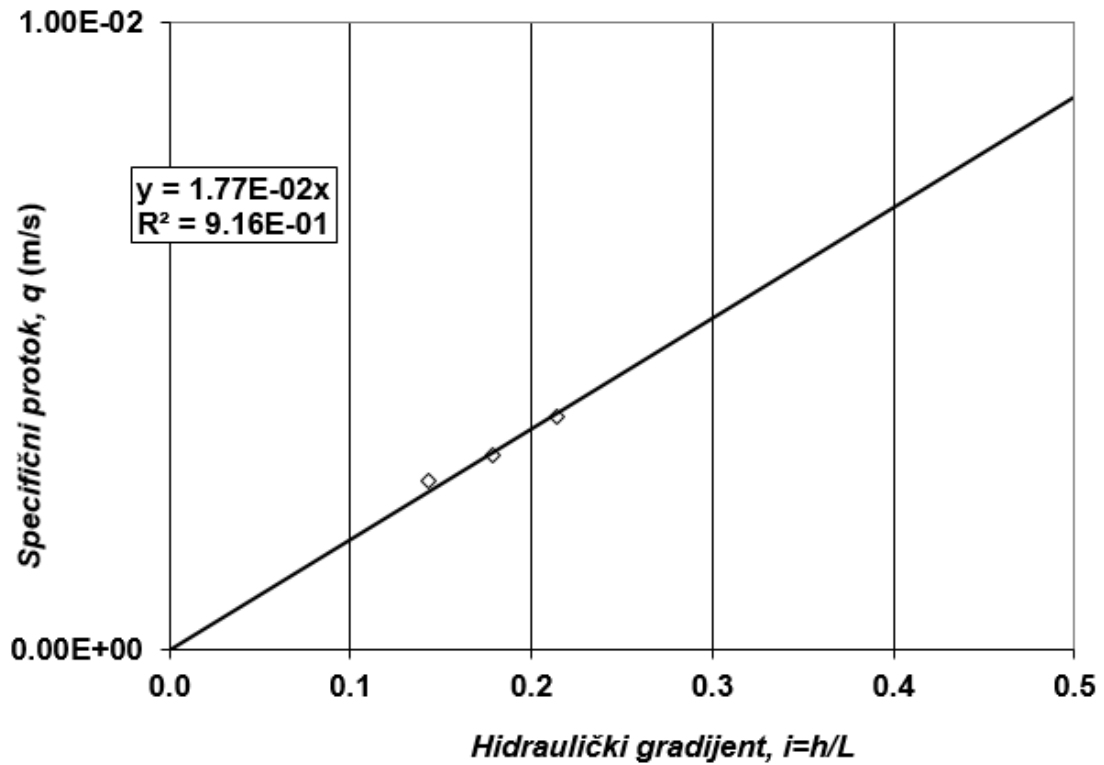
d ₁₀ [mm]	d ₂₀ [mm]	d ₃₀ [mm]	1. uvjet d ₆₀ /d ₁₀ <5	2. uvjet d ₁₀ = 0,1-3
2,2	3,6	4,7	3,59	2,2

Tablica 5.2 Rezultati granulometrijske analize

Šljunak (udio frakcije u %)	Pijesak (udio frakcije u %)	Prah (udio frakcije u %)	Glina (udio frakcije u %)
84,02	15,4	0,58	/

Tablica 5-3 Izračun hidrauličke vodljivosti

Hazen (K m/s)	Slichter (K m/s)	USBR (K m/s)	Permeametar (K m/s)
$7,6 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$



Slika 5.1 Graf ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta

Hidraulička vodljivost dobivena metodom permeametra sa stalnom razinom bitno se ne razlikuje od hidrauličkih vrijednosti dobivenih Slicherovom, Hazenovom i USBR formulom. Treba napomenuti sa su korištene empirijske formule, koje se najčešće navode u literaturi, su pojednostavljene formule za izračun hidrauličke vodljivosti.

5. Zaključak

Područje vodocrpilišta Bikana daje velike hidrauličke vodljivosti izmjerene permeametrom, u veličinama 10^{-2} . Dobivene vrijednosti trebaju biti razmatrane s oprezom radi velike brzine vode kod mjerenja volumena što bi moglo utjecati na izmjerene vrijednosti.

Na uzorku je napravljena je granulometrijska analiza suhim sijanjem te je na temelju empirijskih formula određena hidraulička vodljivost. Na istom uzorku također je laboratorijskim mjerenjem permeametrom sa stalnom razinom izmjerena hidraulička vodljivost.

Na temelju granulometrijske analize suhim sijanjem izrađena je kumulativna granulometrijska krivulja iz koje su očitane vrijednosti efektivnih veličina zrna koje nam služe kao ulazni parametar za određivanje hidrauličke vodljivosti pomoću empirijskih formula. Također, granulometrijskom analizom utvrđeno je da uzorak pjeskoviti šljunak.

Metodom permeametra rađenom na jednom uzorku dobivena je hidraulička vodljivost K u iznosu od $1,73 \cdot 10^{-2}$ m/s. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti dobivene metodom permeametra sa stalnom razinom dao je visoke vrijednosti hidrauličke vodljivosti te tu dolazi i do sličnosti vrijednostima dobivenim pomoću empirijskih formula: $7,6 \cdot 10^{-2}$ (Hazen), $2,8 \cdot 10^{-2}$ (Slichter) te $6,9 \cdot 10^{-2}$ (USBR). Razni faktori mogli su utjecati na točnost eksperimenta. Pokusnim crpljenjem u zdencu B 1-1 izbušenom na području crpilišta Bikana, iz kojeg je uzet uzorak, dobivena je vrijednost hidrauličke vodljivosti od 113 m/dan.

U ovom radu također smo potvrdili da granična vrijednost Reynoldsovog broja ($1 - 10$) u ovom slučaju ne vrijedi, jer je u sva 3 mjerenja Reynoldsov broj veći od 10 (11,7; 13,5; 16,1), a graf nam pokazuje da ta mjerenja još uvijek spadaju u laminarni tok.

Izvođenje eksperimenta je jednostavno što je i glavna prednost laboratorijskih metoda te je eksperiment bio uspješan. Terenska metoda pokusnog crpljenja daje preciznije rezultate, ali zahtjeva puno više vremena i resursa. Obje metode imaju prednosti i mane te njihov odabir prvenstveno ovisi o iskustvu s prijašnjim mjerenjima, vremenu izvršavanja i o financijskim sredstvima.

6. Literatura

ALILOVIĆ, V. (2014): Hidrogeološke značajke aluvijalnog kvartarnog vodonosnika na području Virovitice. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 4-12.

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 I. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 45-151.

BALAŠKO, N. (2011): Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra s promjenjivom razinom. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1-35.

BAN, A. (2011): Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1-36.

BOUWER, H. & RICE, R.C. (1976): A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, Water Resources Research, vol. 12, no. 3, pp. 423-428.

CARMAN, P. (1937): Fluid flow through granular beds. Transactions-Institution of Chemical Engineeres 15: 150-166.

ČAMBALA, M. (2017): Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom na lijevom zaobalju istočnog dijela zagrebačkog vodonosnika. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1-33.

DUIĆ, Ž., HLEVNJAK, B. (2018): Vodoopskrbni sustav Virovitice, Izvedba zdenca B 1-1 na crpilištu Bikana u Virovitici. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1-15.

FREEZE, R. A., CHERRY, J. A. (1979): Groundwater. Prentice Hall. p. 15.

GELO, N. (2014): Određivanje hidrauličke vodljivosti holocenskih naslaga zagrebačkog vodonosnika na području budućeg vodocrpilišta Črnkovec (uža lokacija). Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1-43.

HAZEN, A. (1892): 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

IVAČIĆ, V. (2014): Određivanje hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom na budućem vodocrpilištu Črnkovec. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1-37.

KOZENY, J. (1953): *Hydraulik: Ihre Grundlagen und Praktische Anwendung*. Wien, Austria. Springer.

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

MALAMA, B., REVIL, A. (2014): Modeling Transient Streaming Potentials in Falling-Head Permeameter Tests. *Groundwater*, 52: 535-549. doi:10.1111/gwat.12081.

MIHELČIĆ, D. et al. (2007): Plan i program razvitka vodoopskrbe na području Virovitičko – podravske županije. *Hidroprojekt – ing*, Zagreb, 2-13.

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

NILSEN, D. M. (2006): *Practical handbook of environmental site characterization and ground-water monitoring*, Second edition. Taylor & Francis Group, Boca Raton, 923-939.

ORIENT, J. P., NAZAR, A., RICE, R. C. (1987): Vacuum and pressure test methods for estimating hydraulic conductivity. *Ground Water Monitoring Rev.*, 7(1), 49, 1987.

PARLOV, J. (2012): *Hidrogeologija krša*, Skripta za akademsku godinu 2012/2013, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 96-113.

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, 1-31.

Roscoe Moss Company (2008): Handbook of Ground Water Development. Print ISBN:9780471856115 |Online ISBN:9780470172797 |DOI:10.1002/9780470172797. John Wiley & Sons, Inc.

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

TERZAGHI, K. (1925): Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Leipzig, Germany: Deuticke.

TIŠLJAR, J. (2004): Sedimentologija klastičnih i silicijskih taložina. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 91-108.

TODD, K. D., MAYS, L. W (2005): Groundwater Hydrology, 3rd Edition

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

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

URUMOVIĆ, K., HERNITZ, Z., ŠIMON, J., VELIĆ, J. (1976): O propusnom mediju kvartarnih te gornjo i srednjopliocenskih naslaga Sjeverne Hrvatske. IV jug. simp. o hidrogeol. i inž. geol., 2, 395-410, Skopje.

URUMOVIĆ, K., HLEVNJAK, B., DUIĆ, Ž. (2008): Crpilište Bikana, elaborat o zaštitnim zonama izvorišta. Projekt. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

VUKOVIĆ, M., SORO, A. (1992): Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Distribution. Littleton, Colorado: Water Resources Publication, LLC.

WALTHALL, S. (1990): Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 6, 345-350, 1990, <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1990.006.01.38>

WEB IZVORI:

Popis stanovništva 2011., www.dzs.hr (27.07.2018., 20:12h)