Određivanje hidrauličke vodljivosti permeametrom na uzorcima žumberačkog gornjotrijaskog dolomitnog grusa

Ravnjak, Ilija

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:437457

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



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 PERMEAMETROM NA UZORCIMA ŽUMBERAČKOG GORNJOTRIJASKOG DOLOMITNOG GRUSA

Diplomski rad

Ilija Ravnjak

GI – 260

Zagreb, 2017.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Ivanu Dragičeviću na mentorstvu, predloženoj temi i pomoći pri izradi diplomskog rada.

Hvala asistentu mag. ing. geol. Ivici Pavičiću na strpljenju, trudu, pomoći i kolegijalnosti pri izradi diplomskog rada.

Hvala docentu dr. sc. Dubravku Domitroviću na pomoći prilikom izvoda pokusa u laboratoriju.

Hvala članovima komisije prof. dr. sc. Davoru Paveliću i doc. dr. sc. Željku Duiću na prijedlozima i savjetima pri pisanju diplomskog rada.

Na kraju, veliko hvala roditeljima Moniki i Ivanu na bezuvjetnoj potpori te Marini na podršci i toploj riječi.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko – geološko – naftni fakultet

Diplomski rad

ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI PERMEAMETROM NA UZORCIMA ŽUMBERAČKOG GORNJOTRIJASKOG DOLOMITNOG GRUSA

ILIJA RAVNJAK

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

Sažetak

U diplomskom radu je ispitivana hidraulička vodljivost dolomitnog grusa s područja Žumberka na permeametru sa stalnom razinom. Dolomitni grus se nalazi u rasjednim zonama u različitim mjerilima u području Žumberka te je posebno zanimljiv s hidrogeološkog stajališta. Ukupno 5 uzoraka je prikupljeno terenskim radom, a u laboratoriju je uz mjerenja permeametrom napravljena i granulometrijska analiza tih uzoraka. Rezultati dobiveni mjerenjima u permeametru su uspoređeni s rezultatima dobivenim pomoću empirijskih formula. Pomoću rezultata ispitivanja su dobiveni Reynoldsovi brojevi R_e na temelju kojih se može pretpostaviti laminaran ili turbulentan tok. Obratila se posebna pozornost na veličine Reynoldsovog broja kao i na valjanost Darcyeva zakona.

Ključne riječi: dolomitni grus, permeametar, hidraulička vodljivost, Žumberak

Diplomski sadrži: 63 stranice, 19 slika, 7 tablica, 6 grafova, 6 priloga, 39 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr.sc. Ivan Dragičević, redoviti profesor Rudarsko – geološko – naftnog fakulteta

Pomoć pri izradi: Ivica Pavičić, mag. ing. geol., asistent

Ocjenjivači:
1. Dr.sc. Ivan Dragičević, redoviti profesor RGNF – a u Zagrebu
2. Dr.sc. Davor Pavelić, redoviti profesor RGNF – a u Zagrebu
3. Dr.sc. Željko Duić, docent RGNF – a u Zagrebu

Datum obrane: 21.7.2017.

University in Zagreb Master's thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

DETERMINATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY USING CONSTANT HEAD PERMEABILITY TEST METHOD ON SAMPLES OF ŽUMBERAK'S UPPER TRIASSIC DOLOMITES GRUS

ILIJA RAVNJAK

Master's thesis completed in: University in Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Institute of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In this master's thesis is tested hydraulic conductivity of dolomite grus (sand to gravel size particles resulting from tectonic crushing and weathering of dolomites) from the Žumberak area using Constant Head Permeability Test Method. Dolomite grus is located in fault zones in Žumberak area and it's very interesting from the hydrogeological stand. Constant Head Permeability Test Method was conduceted on five samples from five placemarks. Also, granulometric analysisareconducetd on all tested samples. Results from the Constant Head Permeability Test are compared with those obtained from empirical equations. Reynolds numbers are obtained from the results of permeability method and those numbers are telling is it laminar or turbulent flow. Special attention is dedicated on sizes of Reynolds numbers and Darcy law validity.

Key words: dolomites grus, permeameter, hydraulic conductivity, Žumberak

Thesis contains: 63 pages, 19 figures, 7 tables, 6 graphs, 6 attachments and 39 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD. Ivan Dragičević, Full Professor, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Reviewers:

1. PhD. Ivan Dragičević, Full Professor, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb
2. PhD. Davor Pavelić, Full Professor, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb
3. PhD. Željko Duić, Assistant Professor, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb

Date of defense: 21st of July, 2017

Sadržaj

Popis slika

Popis tablica

Popis grafova

Popis priloga

1. UVOD 1

2. GEOGRAFSKA, GEOMORFOLOŠKA I KLIMATSKA OBILJEŽJA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA 4

2.1. Geografski položaj Žumberka 4

2.2. Geomorfološka obilježja 5

2.3. Klimatska obilježja 7

3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOGA PODRUČJA 10

3.1. Litostratigrafski opis 10

3.1.1. Mezozoik 10

3.1.1.1. Formacija Slapnica 11

3.1.1.2. Formacija Glavni dolomit 11

3.1.1.3. Formacija Posinak 12

3.2. Tektonika 13

4. METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI 16

4.1. Terenske metode 16

4.1.1. "Slug" metoda(BOUWER & RICE, 1976) 16

4.1.2. "Packer" metoda(WALTHALL, 1990) 16

4.1.3. "Pressure test" metoda (ORIENT et al., 1987) 17

4.1.4. Metoda trasiranjem (PARLOV, 2012) 17

4.1.5. Pokusno crpljenje (BAČANI, 2006) 18

4.2. Laboratorijske metode 19

4.2.1. Empirijske formule 19

4.2.2. Permeametar 21

4.2.2.1. Permeametar sa stalnom razinom 21

4.2.2.2. Permeametar s promjenjivom razinom 23

5. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI PERMEAMETROM SA STALNOM RAZINOM (Constant Head) 24

5.1. Terenski rad 24

5.2. Granulometrijska analiza 30

5.3. Hidraulička vodljivost i poroznost 31
6. METODA PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM 33
6.1. Postupak pripreme uzorka i ugradnje 33
6.2. Postupak ispitivanja 37
7. REZULTATI I RASPRAVA 41
8. ZAKLJUČAK 58
9. LITERATURA 59
9.1. Objavljeni radovi 59
9.2. Neobjavljeni radovi 62
9.3. Internet izvori 62

Popis slika

Slika 2.1. Područje Parka prirode "Žumberak – Samoborsko gorje" 4
Slika 2.2. Položaj speleoloških pojava na području PP "Žumberak – Samoborsko gorje" ... 6
Slika 2.3. Srednja godišnja količina oborina Republike Hrvatske 8
Slika 3.1. Odnos navlačne bore i horizontalnih mehanizama dijela Žumberka u Savskoj navlaci 13
Slika 5.1. Zona dolomitnog grusa u pukotini (placemark_24) 26
Slika 5.2. Zona dolomitnog grusa u pukotini (placemark_38) 27
Slika 5.3. a) slika iznad i b) slika ispod – veliki izdanak dolomitnog grusa u blizini izvora Kupčine u mjestu Stupe (placemark_43) 28
Slika 5.4. Zona dolomitnog grusa, nedaleko od izvora Slapnice (placemark_42) 29
Slika 6.1. Slika a) gornja; Slika b) donja porozna ploča permeametra 34
Slika 6.2. Ćelija permeametra i odgovarajući manometri 35
Slika 6.3. Permeametar prije ugradnje uzorka 35
Slika 6.4. Priprema uzorka za ugradnju 36
Slika 6.5. Permeametar pripremljen za testiranje 36
Slika 6.6. Saturacija uzorka u permeametru 37
Slika 6.7. Početno stanje u manometarskim cjevčicama 38
Slika 6.8. Tablica definirana normom 39
Slika 6.9. Korištena aparatura pri mjerenju 40
Slika 6.10. Električni motor 40

Popis tablica

Tablica 7-1. Podaci uzoraka dolomitnog grusa ispitivanih permeametrom 41
Tablica 7-2. Rezultati hidrauličkih vodljivosti uzoraka 46
Tablica 7-3. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 21 – per – grus 1+2+3 48
Tablica 7-4. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 38 – per – rp 49
Tablica 7-5. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 40 – per – rp1 50
Tablica 7-6. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 40 – per – rp2 51
Tablica 7-7. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 43 – per – rpi 52

Popis grafova

Graf 7.1. Granulometrijska analiza uzoraka ispitivanih permeametrom 42
Graf 7.2. Krivulja hidrauličke vodljivosti i pravca linearnosti uzorka 21 – per – grus 1+2+3 43
Graf 7.3. Krivulja hidrauličke vodljivosti i pravca linearnosti uzorka 38 – per – rp 44
Graf 7.4. Krivulja hidrauličke vodljivosti i pravca linearnosti uzorka 40 – per – rp1 44
Graf 7.5. Krivulja hidrauličke vodljivosti i pravca linearnosti uzorka 40 – per – rp2 45
Graf 7.6. Krivulja hidrauličke vodljivoti i pravca linearnoti uzorka 43 – per – rpi 45

Popis priloga

Prilog 1. Karta s točkama grusa 25
Prilog 2. Granulometrijska analiza uzorka 21 – per – grus 1+2+3 53
Prilog 3. Granulometrijska analiza uzorka 38 – per – rp 54
Prilog 4. Granulometrijska analiza uzorka 40 – per – rp1 55
Prilog 5. Granulometrijska analiza uzorka 40 – per – rp2 56
Prilog 6. Granulometrijska analiza uzorka 43 – per – rpi 57

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

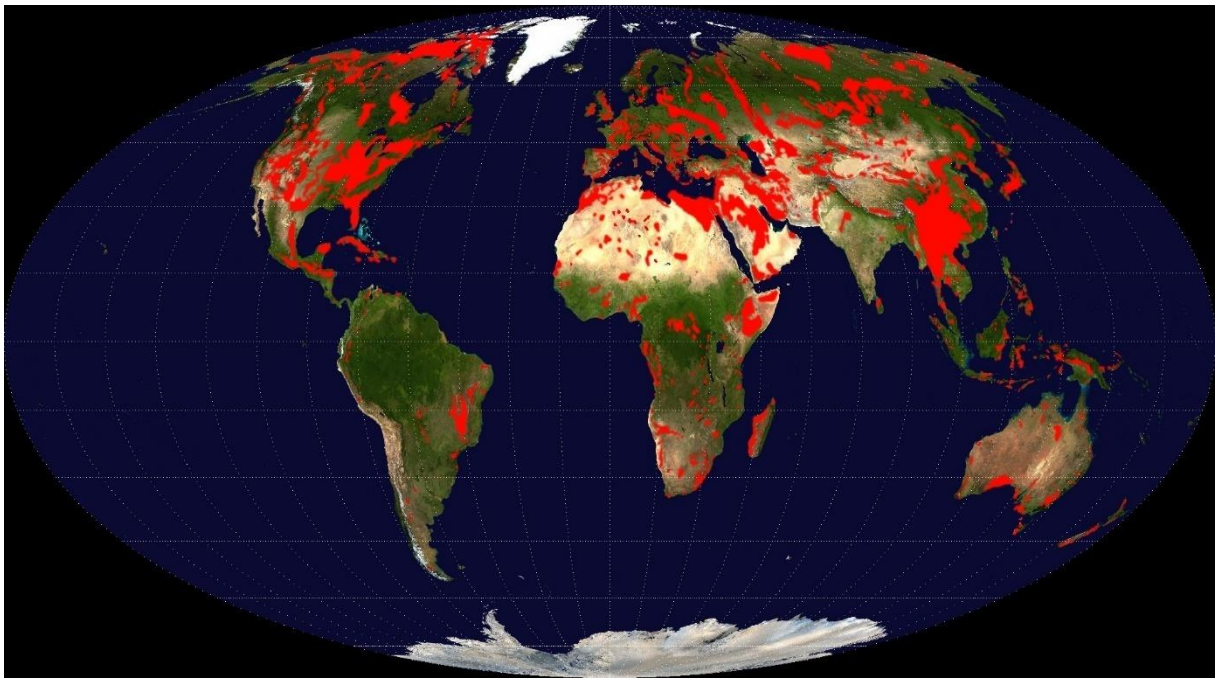
K	hidraulička vodljivost	(m/s)
C_H	0,0016 (za K u m/s)	(-)
d_{10}	efektivni polumjer zrna	(mm)
T	temperatura	(ºC)
C	0,00574 (za K u m/s)	(-)
d_{20}	efektivni promjer zrna	(mm)
d_{60}	efektivni promjer zrna	(mm)
C	0,0036 (za K u m/s)	(-)
V	brzina	(m/s)
Q	protok	(m^3/s)
A	površina poprečnog presjeka	(m^2)
a	površina poprečnog presjeka cjevčice	(m^2)
i	hidraulički gradijent	(-)
h	piezometarska razina	(m)
l	duljina	(m)
c_u	koeficijent jednoličnosti	(-)
c_c	koeficijent zakrivljenosti	(-)
D_t	promjer istaloženog zrna	(mm)
η	viskoznost vode	(-)
ρ_s	gustoća čestica	(kg/m^3)
ρ_w	gustoća vode	(kg/m^3)
t	vrijeme	(s)
F	površina protjecanja	(m^2)
ρ_{d0}	početna gustoća suhog tla	(kg/m^3)
ρ_0	početna gustoća suspenzije	(kg/m^3)
S_r	stupanj zasićenosti	(-)
c	bezdimenzijski koeficijent koji ujedinjuje značajke stijene	(-)
n	relativni porozitet	(-)
N_{Di}	koeficijent prolaska mase	(%)
g	gravitacija	(m/s^2)

μ	dinamički viskozitet	(Pa·s)
k	propusnost	(-)
V	volumen vode	(m^3)

1. UVOD

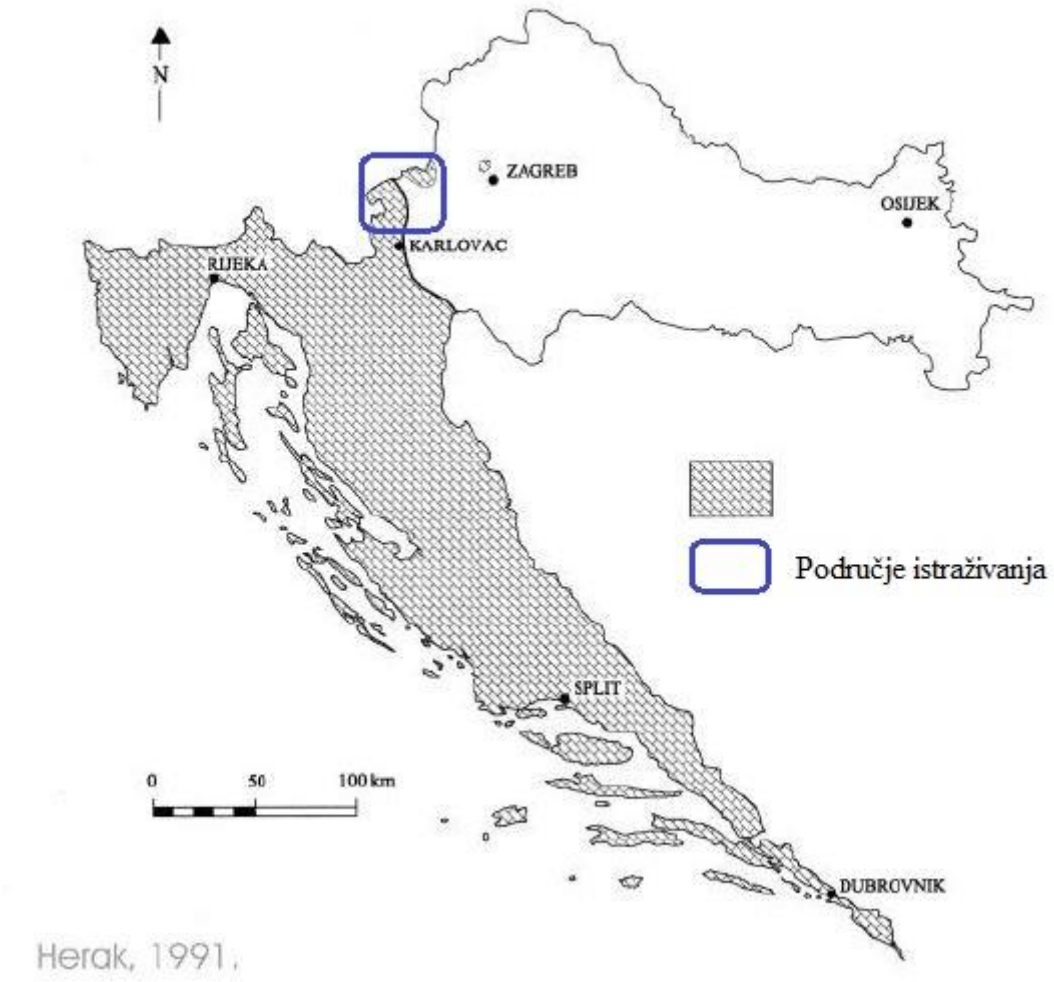
Voda je osnovna potreba ljudi. Zbog vode su ljudi putovali svaki dan na izvore po nove zalihe potrebne za svakodnevni život. Tehnologija je pak omogućila da vodu s tih izvora dovedemo u kućanstva. Danas, u vremenu kad se stanovništvo povećava i centralizira po većim gradovima, novi izvori vode koji se mogu po potrebi priključiti vodoopskrbi su prijeko potrebni. Stoga nije teško zaključiti da obnovljive zalihe pitke vode čine veliko bogatstvo svakog društva i gospodarstva u cjelini. Prema „*The United Nations World Water Development Report"* (WWDR), na temelju izvješća o vodnim zalihama, Hrvatska je smještena na treće mjesto u Europi. Navedeno je da Hrvatska raspolaže s 32 818 m^3 godišnje obnovljive pitke vode po stanovniku, što ju svrstava u društvo od 30 vodom najbogatijih zemalja svijeta. Na Zemlji je procijenjeno 1386 x 10^6 km^3 vode koju nazivamo hidrosferom (UNESCO, 1978). Od te količine, 97,5 % otpada na slanu vodu koja se nalazi u oceanima i morima. Ostatak čini slatka voda, od čega se 69,4 % od ukupne količine slatke vode nalazi u obliku vječitog snijega i leda na polarnim krajevima (MAYER, 1996).

U novije vrijeme se sve više uočava i priznaje važnost podzemnih voda. Podzemne vode predstavljaju glavni izvor pitke vode te kao takve su od krucijalne važnosti. Ukupno oko 12 % Zemljine površine je izgrađeno od karbonatnih stijena i ta krška područja osiguravaju pitku vodu za četvrtinu ukupne svjetske populacije (FORD & WILLIAMS, 1989) (Slika 1.1).



Slika 1.1. Karbonatne stijene (crveno) na karti svijeta
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Carbonate-outcrops_world.jpg)

U Republici Hrvatskoj su najznačajniji i najizdašniji krški izvori. Krški izvori mogu se pojaviti na svakoj točci gdje nepropusne stijene ili geološke strukture, kao primjerice rasjedi, prekidaju tokpodzemne vode i tako ograničavaju nastajanje podzemnih kanala u topivoj stijeni. Krški izvori predstavljaju glavnu točku istjecanja ili pražnjenja krškog vodonosnika. Stijene podložne okršavanju čine ukupno 50 % teritorija Republike Hrvatske što dovodi do zaključka da Hrvatska ima veliko bogatstvo u krškim izvorima (Slika 1.2). Udio krških vodonosnika za potrebe javne vodoopskrbe Republike Hrvatske je 36 % (COST, 1995).



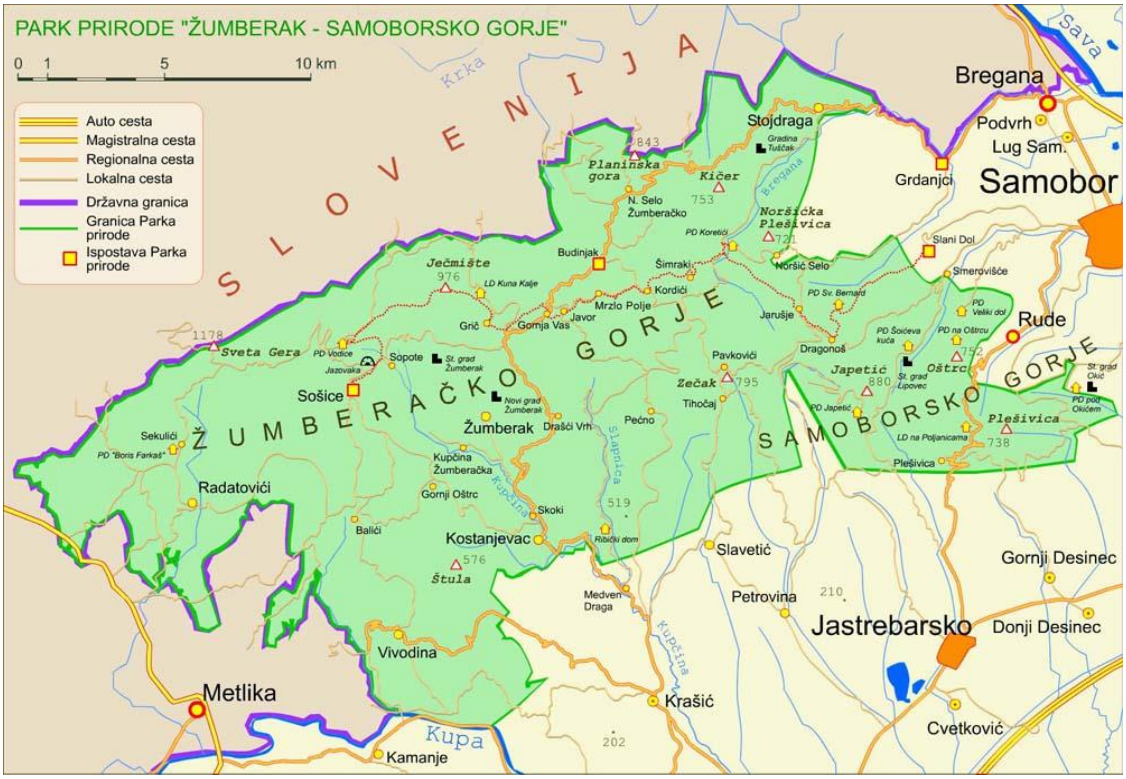
Slika 1.2. Karbonatne stijene u Hrvatskoj (HERAK, 1991)

Cilj diplomskog rada je određivanje hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom (engl. „Constant Head“), na uzorcima u laboratoriju. Uzorci su uzeti s područja Žumberka s karakterističnih mjesta koja su određena geološkim kartiranjem. Hidraulička vodljivost, koja predstavlja parametar proporcionalnosti u Darcyjevom zakonu izražava lakoću gibanja tekućine kroz zasićeni porozni medij (URUMOVIĆ, 2003). Hidraulička vodljivost (eng. *hydraulic conductivity*) K se računa kao količine vode koja prolazi kroz poprečni presjek vodonosne stijene jedinične površine uz jedinični hidraulički gradijent, tj. pad potencijala za 1 m na udaljenosti od 1 m u smjeru tečenja podzemne vode (BAČANI, 2006). Dimenzija hidrauličke vodljivosti je L/T, primjerice m/dan, m/s, cm/s. Može se određivati terenskim i laboratorijskim metodama. Ovaj diplomski rad navodi postupak i način ispitivanja te dobivanja rezultata, te stavlja naglasak na mogućnost pogrešaka prilikom izvođenja pokusa i njihov utjecaj na rezultate.

2. GEOGRAFSKA, GEOMORFOLOŠKA I KLIMATSKA OBILJEŽJA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

2.1. Geografski položaj Žumberka

Žumberak ili Žumberačka gora se nalazi u sjeverozapadnoj Hrvatskoj, zapadno od Zagreba uz granicu s Republikom Slovenijom (Slika 2.1.). Okružen je rijekama Krkom, Savom i Kupom. Sv. Gera je najviši vrh Žumberka s 1 178 m.n.m. Prostire se većim dijelom kroz Zagrebačku županiju te manjim kroz Karlovačku županiju.



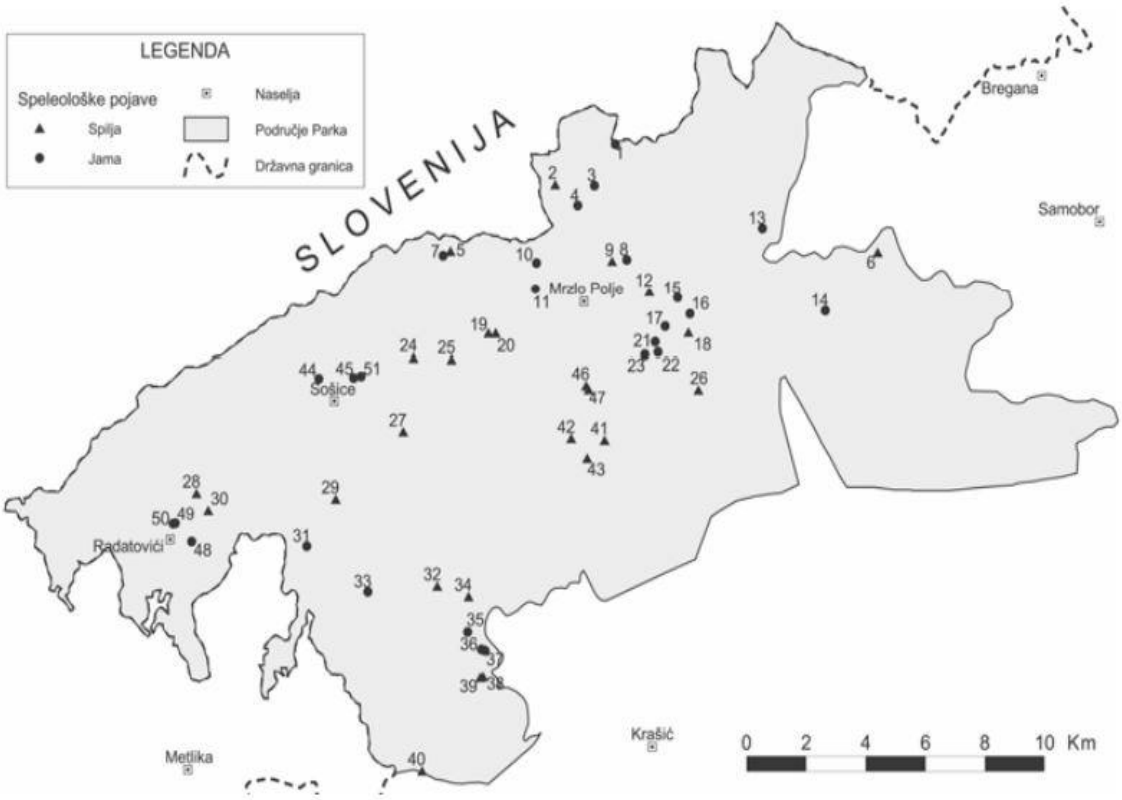
Slika 2.1. Područje Parka prirode "Žumberak – Samoborsko gorje"
(http://uskok-sosice.hr/wp-content/uploads/2016/12/Karta_put_kraljice_bukve.jpg)

Žumberačko gorje se sastoji od 3 cjeline: Žumberka koje je površinom najveće, Samoborskog gorja i Plešivice te se u Sloveniji nastavlja u Gorjance. Žumberačko gorje zauzima površinu od 333 km^2 (http://www.park-zumberak.hr/uvodne_informacije.html). Proteže se od Bregane na sjeveroistoku te uz državnu granicu sa Republikom Slovenijom do rijeke Kupe na jugu. Jugoistočna granica se proteže od Kupe do Plešivice (uključujući Krašić i Pribić), a onda od Plešivice uz rijeku Breganu do državne granice na sjeveru.

Samoborsko gorje zauzima površinu od oko 100 km^2. Prostire se do Plešivice na jugu, Okića na istoku, naselja Bregane na sjeveru, a zapadna granica prati rijeku Breganu do Plešivice na jugu. Najviši vrh Samoborskog gorja je Japetić 879 m.n.m. Plešivica kao najmanje područje ima površinu od oko 10 km^2. Nalazi se na jugu Samoborskog gorja, a prostire se do Okića na sjeveroistoku te završava u Pokuplju. Zbog svojih kulturnih lokaliteta, ali i bogate flore i faune je proglašen parkom prirode PP "Žumberak – Samoborsko gorje“ 28. svibnja 1999. godine (http://www.park-zumberak.hr/opcenite_informacije.html).

2.2. Geomorfološka obilježja

Područje Žumberačkog gorja je s obzirom na strukturno – geomorfološke značajke denudacijsko – tektonska morfostruktura rasjedno – boranih masiva mezozojskog nabiranja heterogenog tipa (BOGNAR, 1980). Heterogenost reljefa je rezultat složenosti geološke građe i tektonske strukture šireg područja (BUZJAK, 2001). Većim dijelom trijaske, te nešto manjim dijelom kredne karbonatne naslage, točnije dolomiti i vapnenci, prevladavaju sastavom i građom terena (BUZJAK, 2006). Zahvaljujući takvoj građi prevladava krški i fluviokrški reljef (Slika 2.2.). Postoje znatne razlike između trijaskih i krednih, prvenstveno litostratigrafske značajke stijena, ali i značajke morfogenetskih procesa i reljefnih oblika (BUZJAK, 2006).



Slika 2.2. Položaj speleoloških pojava na području PP "Žumberak – Samoborsko gorje" (Speleološke pojave u PP "Žumberak – Samoborsko gorje"; Buzjak, 2001)

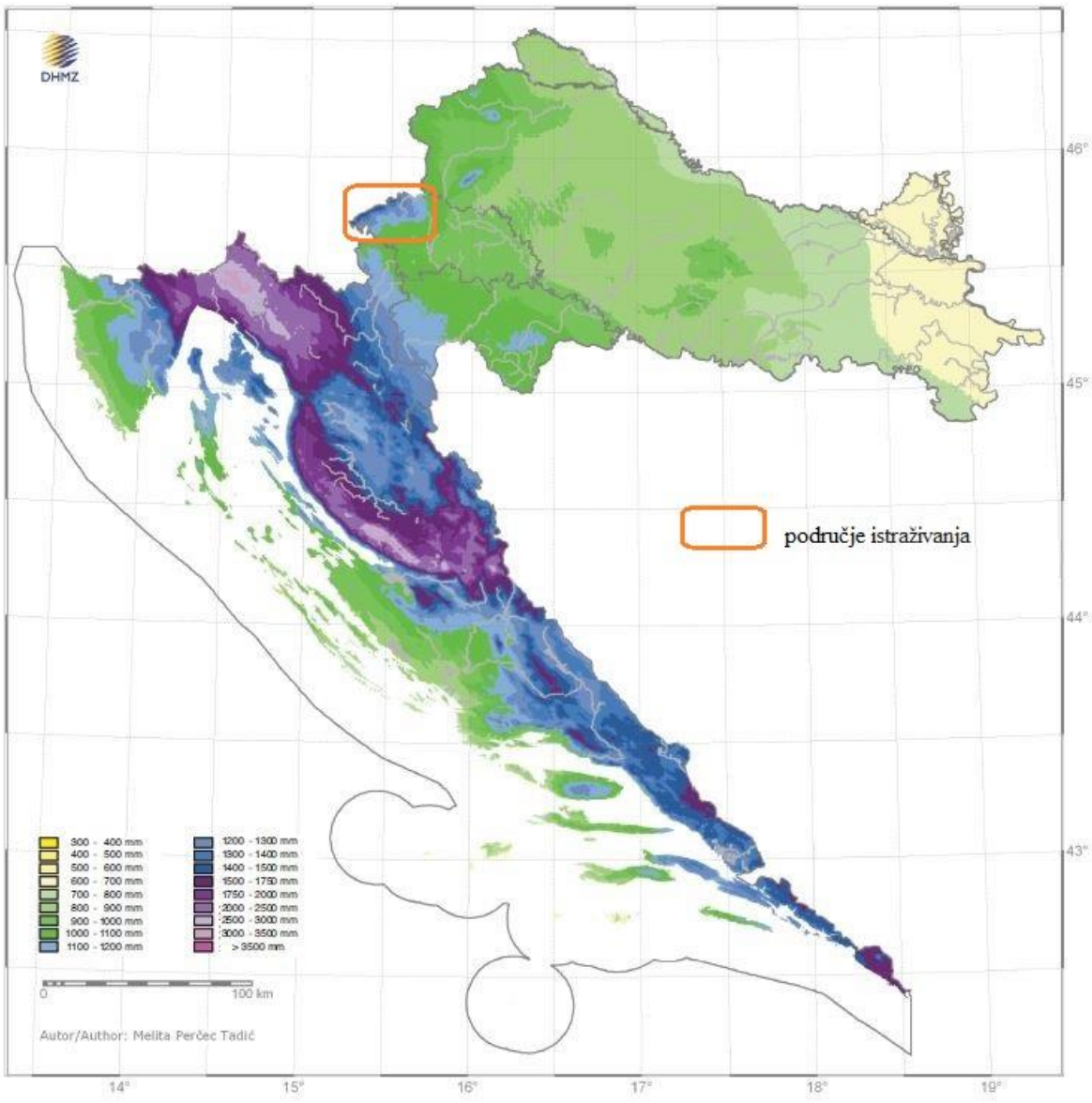
Oko 90 % područja Žumberačkog gorja otpada na razna krška obilježja i oblike od kojih su najdominantnije vrtače (ponikve) (BUZJAK, 2001). Prema Buzjaku (2006) u granicama PP "Žumberak – Samoborsko gorje" dokazano je 2 869 vrtača. Izračunao je gustoću od 80 – 85 vrtača/km^2 u području između Rajića, potoka Jarak i doline Slapnice gdje je gornjotrijaski glavni dolomit u kontaktu s karbonatima donje i srednje jure. Nakon tog područja, ističe se i krška zaravan južno od Tisovca s 75 – 80 vrtača/ km^2 u trijaskim dolomitima. Prema Buzjaku (2006) vrtače su uglavnom tanjuraste i ljevkaste te korozijskog postanka. Povećana gustoća vrtača nekog terena upućuje na veću razlomljenost i okršenost što je posljedica cirkulacije podzemne vode. Najveće gustoće vrtača se nalaze na topografski najvišim područjima, gdje je ujedno i najviše oborina, pa je na tom području omogućena velika infiltracija. Kao rezultat, u području Žumberačkog gorja postoji velik broj izvora na kontaktima propusnih i nepropusnih naslaga. Najvećim dijelom se ti izvori pojavljuju na kontaktu gornjokrednih vapnenaca i fliša.

Vezano uz brojne izvore, ističu se doline rijeka Kupčine, Slapnice i Sušice koje odvodnjavaju veći dio središnjeg i zapadnog Žumberka. Na fluviokrškim i u manje krškim

područjima Žumberka te tamo gdje teren izgrađuju nekarbonatne naslage dominantni padinski procesi su klizanje, spiranje i jaružanje. Procesi spiranja i jaružanja posebno su izraženi u područjima građenim od dolomita te u području pokrivenog krša zapadnog i jugozapadnog Žumberka. U dijelovima s krškim reljefom javljaju se tamo gdje je matična stijena pokrivena debljim slojem tla. Doline su vrlo čest reljefni oblik na Žumberku, osim u području gdje se na površini pojavljuju izdanci vapnenaca. Uz spomenute doline, od ostalih reljefnih formi postoje uvale i zavale. Najveće zavale su Sošičko polje, Mrzlo polje i Budinjačko polje.

2.3. Klimatska obilježja

Kontinentalni dio ima umjereno kontinentalnu klimu. Zbog položaja u cirkulacijskom pojasu umjerenih širina stanje je vrlo promjenjivo s intenzivnim promjenama cijele kalendarske godine. Klima u kontinentalnom dijelu, kojem pripada i Žumberak, se nalazi pod utjecajem Sredozemlja koji se više ističe južnije od Save i slabi prema istoku. Jedan od značajnijih modifikatora klime je i orografija, odnosno gorje gdje dolazi do intenzifikacije kratkotrajnih oborina na navjetrinskoj strani gorja. Srednja godišnja količina oborine na području Hrvatske u rasponu je od oko 300 mm do nešto iznad 3500 mm. U SZ Hrvatskoj najveće su količine oborina na području Žumberačkog i Samoborskog gorja, te istočnije na području Medvednice i Kalnika 1000 do 1500 mm (http://klima.hr/razno/publikacije/klimatski_atlas_hrvatske.pdf). Količina oborina, prateći orografiju, raste od juga prema sjeveru te od istoka prema zapadu (Slika 2.3.)



Slika 2.3. Srednja godišnja količina oborina Republike Hrvatske (http://klima.hr/razno/publikacije/klimatski_atlas_hrvatske.pdf)

Prema Thornthwaiteovoj klasifikaciji klime baziranoj na odnosu količine vode potrebne za potencijalnu evapotranspiraciju i oborinske vode – postoji pet tipova. Od tih pet tipova, u Hrvatskoj se javljaju perhumidna, humidna i subhumidna klima. U gorskom području kojem pripada istraživano Žumberačko gorje prevladava perhumidna klima (http://klima.hr/razno/publikacije/klimatski_atlas_hrvatske.pdf).

Prema Köppenovoj klasifikaciji područje Žumberačkog gorja ima umjereno toplu kišnu klimu bez suhog razdoblja, a označava se kao klima Cfwbx. Postoje dva podjednaka kišovita razdoblja od kojih je jedno u ranom ljetu, a drugo za vrijeme jeseni. Mjeseci s najmanje oborina su oni u hladnijoj polovici godine (KÖPPEN, 1918; VUJNOVIĆ, 2010).

Srednja godišnja temperatura zraka na području Hrvatske kreće se od 3°C na najvišim planinskim predjelima do 17 °C uz samu obalu i na otocima srednje i južne Dalmacije zbog njihovog geografskog položaja i neposrednog utjecaja mora. U sjeverozapadnoj Hrvatskoj temperatura zraka također je niža uz obronke Bilogore, Kalničkog gorja, Ivanščice i Medvednice, na čijim je vrhovima najniža temperatura zraka od 8 °C. Najniže srednje godišnje temperature zraka od 6 °C pojavljuju se u tom dijelu Hrvatske na vršnom području Žumberka (http://klima.hr/razno/publikacije/klimatski_atlas_hrvatske.pdf).

3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOGA PODRUČJA

3.1. Litostratigrafski opis

Najstarije stijene na području Žumberka potječu iz perma, dok one najmlađe naslage predstavljaju recentne aluvijalne taložine, les i proluvij. Prikaz površinske geološke građe je načinjen na temelju listova i njihovih pripadajućih tumača OGK Zagreb (ŠIKIĆ et al., 1972), Črnomelj (BUKOVAC et al., 1984) i Novo Mesto (PLENIČAR et al., 1975) mjerila 1 : 100 000 te pripadajućih tumača za Zagreb (ŠIKIĆ et al., 1977), Črnomelj (BUKOVAC et al., 1984) i Novo Mesto (PLENIČAR et al, 1977).

3.1.1. Mezozoik

Stijene koje pripadaju razdoblju su pronađene na većim površinama istočnog Žumberka. Najvećim dijelom su to gornjotrijaske ($\mathbf{T_3}$) i gornjokredne ($\mathbf{K_2}$) stijene. Naslage gornjeg trijasa su izgrađene od ranodijagenetskog i ponekad rekristaliziranog dolomita.

Naslage donjeg, srednjeg i gornjeg trijasa imaju najveće rasprostiranje, a ukupna duljina trijaskih naslaga iznosi oko 2 550 m (GRGASOVIĆ, 1998). Sedimenti donjeg trijasa ($\mathbf{T_1}$) imaju najveće rasprostiranje u Samoborskom gorju. U sastav donjotrijaskih sedimenata ubrajamo pješčenjake, siltite, vapnence, dolomitizirane vapnence, dolomite i kalcitične lapore.

Razvoj dolomita s vrlo oskudnim fosilima i malim brojem litoloških repera slijede fragmentalno otkriveni sedimenti srednjeg trijasa ($\mathbf{T_2}$). Dolomiti srednjeg trijasa s fosilnim ostatcima neodredivih školjkaša pripadaju starijem dijelu anizičke i dijelom donjoladiničke starosti. U sjevernim područjima Samoborskog gorja naslage sedimenata srednjeg trijasa imaju svoje izdanke u području Mokrice – Ribnica i između Gabrovice i Stojdrage. U području razlomljene zone Draganje Selo – Božnjačko Selo – Gregurić brijeg – Pozorin potok – Mali Črnec ih također pronalazimo. Gregurić brijeg je otprije poznat kao bogato nalazište fosila. Također su otkriveni u dolini Konščice, Lipovečke Gradne, širem području cerja te između Konščice i Okića. Najzastupljeniji litološki član srednjeg trijasa je dolomit. Iz cefalopodnih vapnenaca Gregurić brijega je Salopek (1918, 1936) odredio bogatu donjoladiničku zajednicu amonita. Srednjotrijaske sedimente u južnim predjelima Žumberka pronalazimo na širem području Strmac – Sorževo – dolina Kupčine – potok

Slapnica – Slavetić – Goljak. Još jedno bitno nalazište je između Vranov Dola i Malog Lipovca, a pripadaju mu predjeli od Ličeg potok i doline Sopotnjaka do Lipovečke Gradne. U navedenim područjima kao dominantan litološki član su također dolomiti. Maksimalna debljina srednjotrijaskih naslaga nigdje ne prelazi preko 500 m.

Dolomiti gornjeg trijasa (**T_3**) su najznačajniji litološki element u strukturnoj građi i sastavu istočnog Žumberka. Prostiru se od Save i Krke na sjeveru do linije Plešivica – Slavetić – Rude na jugu. Debljine dolomita se procjenjuju na oko 800 m. Količina $CaCO_3$ rijetko prelazi 10 %. Ovisno o sadržaju glinovite komponente boja im varira od svijetlosive do tamnosive. Najveći dio dolomita se odlikuje jasno izraženom ravnom laminacijom algalnog porijekla. Za dolomitizaciju karbonata stromatolitnog porijekla se vjeruje da je došla u ranoj fazi dijageneze. Dio gornjotrijaskih sedimenata, iz doba prijelaza u lijas, se sastoji od izmjene dolimita, sivih vapnenaca i dolomitiziranih vapnenaca.

Grgasović (1998) je u gornjotrijaskim naslagama izdvojio 3 formacije i 3 člana. Formaciju Slapnica (debljine oko 340 m) slijedi formacija Glavni dolomit (debljine oko 960 m) te potom formacija Posinak (debljine oko 270 m). Opis formacija i članova gornjotrijaskih dolomita preuzet je iz Grgasović, 1998.

3.1.1.1. Formacija Slapnica

Formacija je dobila ime po istoimenoj riječici unutar čijeg se kanjon nalazi njen stratotip. Naslage ove formacije su dolomitne, dok se samo mjestimično javljaju proslojci slabo litificiranih šejlova i karbonatnih laminita, a rjeđe pjeskoviti i siltozni šejlovi. Mjestimično se pojavljuje kerogen – organska tvar. Osnovna značajka formacije je manje ili više pravilna ciklička izmjena dolomikrita, fenestralnih dolomikrita i dolostromatolita. Naslage su taložene pretežito u subtajdalnoj zoni u otvorenim lagunama s utjecajem tajdala i povremenim izranjanjem u intertajdal.

3.1.1.2. Formacija Glavni dolomit

Naziv Glavni dolomit je hrvatski prijevod izvornog njemačkog naziva "Hauptdolomit" koji je izvorno uveo Gümbel 1873. g. Starost ove formacije je definirana kao norik – donji ret. Naslage su slabo fosiliferne, a među tim rijetkim fosilifernim proslojcima su ostatcima raznih foraminifera i algi. Tri glavna strukturna tipa ranodijagenetskih dolomita (dolomikrit, dolomitni stromatolit i fenestralni dolomikrit) karakteriziraju naslage ove formacije u relativnoj nepravilnoj vertikalnoj i bočnoj izmjenu. Taloženje ove formacije se

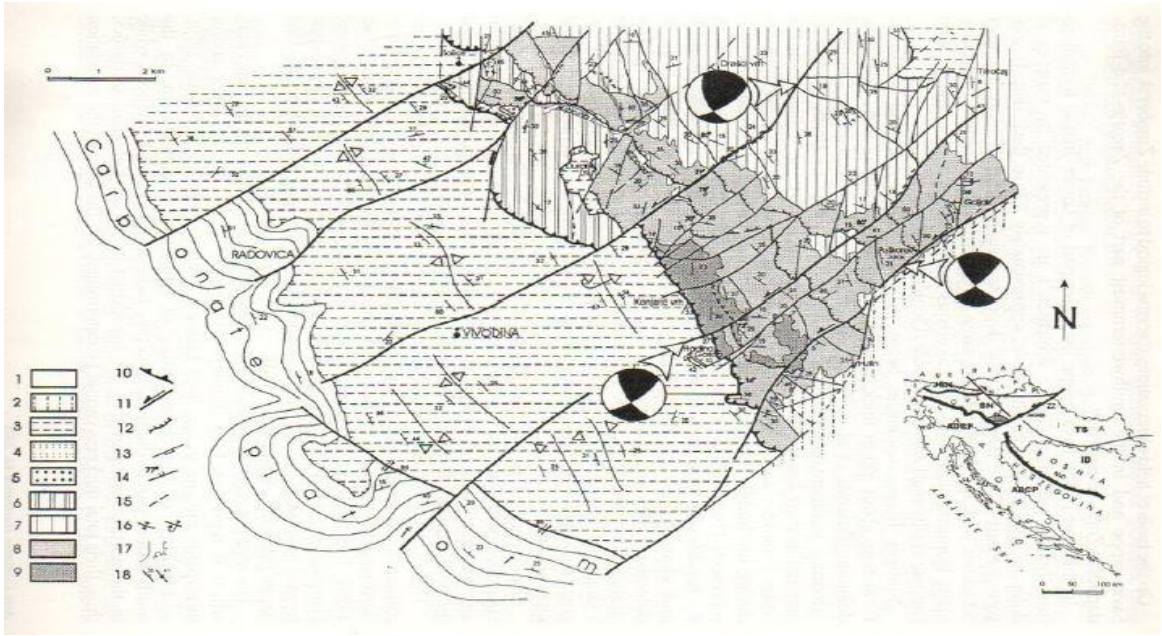
odvijalo spojem olujnih i plimnih struja, odnosno može se interpretirati kao zaštićeni subtajdal s otvorenom cirkulacijom morske vode. Cikličnost nije jako izražena kao kod formacije Slapnica.

3.1.1.3. Formacija Posinak

Formacija je nazvana po istoimenom zaseoku u blizini sela Pećno. Debljina formacije je oko 270 m. Pomoću superpozicije određena je retska starost formacije jer se nalazi na formaciji Glavni dolomit. Naslage formacije Posinak se razlikuju od naslaga formacije Glavni dolomit na kojim se nalaze po povećanju udjela dolomikrita te po promjeni tipa stromatolita te po javljanju jasnih slojnih ploha. Također, cikličnost nije zapažena u ovoj formaciji. Kalcitični dolomiti, vapnenci i dolomitični vapnenci se javljaju podređeno uz ranodijagenetske dolomite. Veći udio mikrita i izostanak fenestri ukazuje o dominantnosti subtajdalnih okoliša nad intertajdalnim odnosno na produbljivanje sedimentacijskog prostora.

3.2. Tektonika

Područje Žumberka je prožeto složenim strukturno – tektonskim odnosima (Slika 3.1.). Područje je na geološkoj karti obuhvaćeno trima listovima – OGK Zagreb (ŠIKIĆ et al., 1972), OGK Črnomelj (BUKOVAC et al., 1984) i OGK Novo Mesto (PLENIČAR et al., 1975) mjerila 1 : 100 000. Iz tog razloga je i različit pristup i opis strukturno – tektonskih odnosa. Listovi Zagreb i Črnomelj definiraju tangencijalne tektonske pokrete, odnosno navlačne strukturno – tektonske odnose između pojedinih članova. List Novo Mesto definira radijalnu (blokovsku) tektoniku s normalnim rasjedima bez navlačenja.



Slika 3.1. Odnos navlačne bore i horizontalnih mehanizama dijela Žumberka u Savskoj navlaci

(PRTOLJAN, 2001)

Žumberačko gorje pripada geotektonskoj jedinici Unutrašnjih Dinarida ili Supradinarika, točnije cijelo područje Samoborskog gorja i središnji dio Žumberka do linije Konjarić vrh – Gornji Oštrc – Sošice i dalje na zapad s vršnim grebenom do Sv. Gere (HERAK, 1986, 1991). Zona kontakta Supradinarika i Dinarika predstavlja njegov južni dio gdje se odvija podvlačenje Dinarika pod Supradinarik što uzrokuje značajne strukturno – tektonske pomake. (HERAK, 1986, 1991; HERAK & BUKOVAC, 1988; BUKOVAC, 1988). Prema Dimitrijeviću (1982) Žumberačko gorje zajedno s Medvednicom, Ivančicom i Kalnikom čine zonu Julijske Alpe – Posavske bore – Zagrebačka zona. Takvu podjelu Pamić (1998) naziva Zagrebačko – srednjodanubijska zona, a ona zajedno s Vanjskim Dinaridima, Apeninima i Južnim Alpama je dio Afričkog kontinentalnog ruba. Herak i Bukovac (1988) autohtononim područjem smatraju rubno područje naslaga karbonata jure i krede koji su pokriveni gornjokrednim transgresivnim flišem na zapadnom dijelu Žumberka. Isto tako, kod sela Duralije pojava krednog fliša i jurskih vapnenaca su definirali kao tektonsko okno koje potvrđuje ranije navedene navlačne odnose (HERAK & BUKOVAC, 1988).

Dragutin Gorjanović – Kramberger (1894) je napravio prva zapažanja specifičnih razlika u orijentaciji morfostrukturnih elemenata Žumberačke gore gdje je razlikovao JZ – SI i SZ – JI linije pružanja struktura te ih interpretirao kao posljedicu višefazne tektonike. Razumijevanju neotektonskih pomaka uvelike su zaslužni Prelogović (1969) te Šikić i Basch (1977). Babić (1974) je proučavao stratigrafiju naslaga iz razdoblja hauterivij – cenoman, kao i poziciju granica između karbonatne platforme i susjednih bazenskih područja. Pleničar i Premu (1977) su pozicionirali sjeverozapadni dio regije, koji je u teritorijalnom području Slovenije, u Balatonski dio. Bitno je navesti da je Bukovac (1988) napravio razliku strukture Vanjskih i Unutrašnjih Dinarida. Bukovac i Sokač (1989) su opisali kontakt gornjotrijaskih i donjelijaskih jedinica vapnenca kao posljedicu navlačenja.

Navedene teorije ukazuju na 3 glavna sklopa struktura: paleogenske, neogenske i kvartarne (POLJAK & RIŽNAR, 2005). Paleogenskom sklopu pripadaju kompresivne Dinarske strukture, tj. longitudinalne bore, rasjedi i navlake pružanja SZ – JI. Neogenskom sklopu pripadaju kompresivne Alpske, odnosno Južnoalpske strukture, tj. longitudinalne bore, rasjedi i navlake generalnog pružanja I – Z. Kvartarne strukture sastoje se od reaktiviranih regionalnih smičnih Balatonskih rasjeda pružanja SI – JZ do ZSZ – ISI duž kojih su, uslijed lijevih horizontanih pomaka, nastale sekundarne prateće strukture i to uglavnom bore u sjeru S – J do SZ – JI.

Na području Žumberka, Prelogović (1969) iznosi dokaze o značajnim neotektonskim pokretima. Uz njih su vezani 3 sustava rasjeda pružnja: SZ – JI, približno S – J i SI – JZ. Oko Stojdrage je zapaženo skretanje u smjeru SSI – JJZ. U Samoborskom gorju su izraziti rasjedi smjera smjera SI – JZ i S – J. Rasjedi smjera SZ – JI značajni su za Žumberačko gorje za koje se pretpostavljakasnije oblikovanje reljefa. Pretpostavlja se da je duž njih došlo uglavnom do vertikalnihpokreta. U zonama sukobljavanja pojedinih rasjeda je došlo i do pomaka po pružanju na što ukazuju skretanja pojedinih manjih rasjeda od generalnog pravca pružanja (npr. kod Stojdrage i u Samoborskom gorju). Izdizanja su najznačajnija duž trasa rasjeda. Područje izdizanja se pruža unutar rubnih rasjeda Žumberačkog i Samoborskog gorja. Intenzivna zona izdizanja je između Stojdrage i Vinog vrha i kod Bregane.

Neotektonska aktivnost se odražava i u recentnim epicentrima potresa na području istraživanja. Dokaz tomu su nekolicina slabijih potresa u siječnju 2010. godine (prema http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/024899-jan2010.pdf): potres od 14. 1. 2010. s epicentrom kod Klinča Sela i magnitudom 1.6 po Richteru, potres od 21. 1. 2010. s epicentrom 5 km jugozapadno od Ruda magnitude 2.9 po Richteru, potres s epicentrom kod Metlike 24. 1. 2010. magnitude 1.2 po Richteru. Značajni su izvori geotermalne vode Sv. Helena (Šmidhen) kod Samobora i Sv. Jana koji se nalaze uz najaktivnije rasjede i epicentre potresa.

4. METODE ODREĐIVANJA HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

Hidrauličku vodljivost možemo odrediti terenskim mjerenjima, ali i raznim laboratorijskim mjerenjima i postupcima.

4.1. Terenske metode

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

4.1.1. "Slug" metoda(BOUWER & RICE, 1976)

„Slug“ metoda se ponajviše koristi za određivanje hidrauličke vodljivosti u zdencima i piezometrima, a prema tome pogodna je i za tla i za stijene. Metoda se izvodi utiskivanjem ili crpljenjem vode iz zdenca ili piezometra te praćenjem promjene razine vode *H* prilikom težnje povratka u ravnotežno stanjeu vremenu *t*. Najviše se metoda koristi kod vodonosnih slojeva velike hidrauličke vodljivosti. Nedostatak ove metode je upravo taj da bi kod materijala s malom hidrauličkom vodljivosti proces trajao danima ili tjednima, a u tom slučaju se preporuča „pressure“ test metoda. Kod vertikalno orijentiranih zdenaca ili piezometara „slug“ metodom se mjeri horizontalna hidraulička vodljivost.

4.1.2. "Packer" metoda(WALTHALL, 1990)

Metoda se koristi za mjerenja u konsolidiranim stijenama ili u otvorenim bušotinama sa stabilnim stijenkama. Pri tome se može koristiti metoda s jednim ili dva pakera. Pakeri se postavljaju na odabranu dubinu bušotinu. Metoda s jednim pakerom služi za testiranje dijela bušotine od dna bušotine do postavljenog pakera. Mjerenja se izvode tokom napredovanja bušenja, te nakon određene dubine postavlja se paker na točno određenoj dubini bušotine. Nakon toga se paker ispuni plinom ili vodom dok ne dođe do njegovog pomicanja. Obavlja se mjerenje te se potom nastavlja bušenje, a testiranja se mogu provoditi i tokom napredovanja bušenja. Ovisno o hidrauličkoj vodljivosti pokus može trajati između 15 minuta i 2 sata te se istovremeno mjere razine podzemne vode. Što je hidraulička vodljivost manja, pokus traje duže. Kod metode s dva pakera izvedba je drugačija – prvo se izbuši bušotina do kraja, a potom se instaliraju pakeri. Izvedba je takva da se s testiranjem započne na dnu bušotine i napreduje prema površini jer u suprotnom redoslijedu može doći do narušavanja stabilnosti bušotine. Prednost ove metode je u

kraćem trajanju što omogućava ponavljanje postupka više puta radi preciznijih rezultata. Također, ova metoda omogućava izbjegavanje efekta bušotinskog uskladištenja. Rabi se najčešće za slabije propusne stijene.

4.1.3. ''Pressure test'' metoda (ORIENT et al., 1987)

Metoda se koristi kod materijala koji imaju malu hidrauličku vodljivost, odnosno manju od 1×10^{-7} cm/s (NILSEN, 2006). Prilikom testiranja koristi se sustav pakera koji se postavlja u bušotinu. Promatra se tlak, odnosno pad tlaka koji se očitava i ucrtava više puta prilikom testiranja. Prostor između pakera se napregne tlakom te se praćenjem promjene tlaka dobiju podatci o koeficijentu uskladištenja *S* i hidrauličkoj vodljivosti *K* jer je brzina pada tlaka povezana i s hidrauličkom vodljivosti materijala i koeficijentom uskladištenja. Pokuse izvodi u bušotini u stijenskoj masi za koju se određuje hidraulička vodljivost *K*. Dakle, pokus uključuje primjenu vode pod tlakom u cijevima i zoni pakera kao i bilježenje rezultata trenutnog tlaka kao funkcije vremena. Ako su stijene propusnije, pokus traje vremenski kraće od pokusnog crpljenja ili "slug" metode.

4.1.4. Metoda trasiranjem (PARLOV, 2012)

Trasiranje je općenito često korištena metoda u području hidrogeologije jer se s njom dobiju podatci o različitim veličinama, a jedna od njih je i hidraulička vodljivost. U ovom slučaju se koristi za dobivanje horizontalne hidrauličke vodljivosti u stijenama i u nekonsolidiranim naslagama. Postupak se izvodi utiskivanjem trasera u jedan ili više zdenaca te se detektira na istražnim bušotinama. U slučaju utiskivanja u jedan zdenac, on se radijalno širi od zdenca. Zbog toga se istražne bušotine postavljaju radijalno u smjeru toka od utisne bušotine i iz njih se vade uzorci prema kojima se dobivaju podaci o količini trasera. Mjeri se vrijeme koje je potrebno traseru da prođe put od zdenca do istražne bušotine sa svojom najvećom koncentracijom. Preporuča se utiskivanje trasera na više različitih dubina radi preciznijih podataka. Traser koji se koristi ne smije biti radioaktivan, mora biti vidljiv pri malim koncentracijama te ne smije biti toksičan. Metoda se za ove potrebe rijetko koristi jer je izvedba dugotrajna i skupa. Jedna od mana je i ta što je potrebno detaljno planiranje i iskustvo, kako u interpretaciji rezultata tako i u cjelokupnoj izvedbi metode.

4.1.5. Pokusno crpljenje (BAČANI, 2006)

Metodom pokusnog crpljenja voda se crpi iz zdenca određenim kapacitetom kroz određeno vrijeme i opažaju se podaci piezometarskih visina u okolnim piezometrima, te se na temelju tih podataka izračunavaju hidrogeološki parametri. Kod ove metode poznate su vrijednosti piezometarskih razina, odnosno sniženja, a nepoznanice su hidrogeološki parametri. Ono može imati dva cilja. Prvi se odnosi na određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnog sloja, a drugi se odnosi na određivanje specifičnog kapaciteta zdenca, dozvoljenog sniženja, izbor odgovarajuće crpke itd. (BAČANI, 2006). Hidrogeološki parametri vodonosnika izračunavaju se pomoću određenih formula (analitičkih rješenja jednadžbi toka) u koje uvrštavamo poznate i izmjerene veličine: sniženja u piezometrima, udaljenosti piezometara od zdenca i crpnu količinu (BAČANI, 2006). Preporuča se postavljanje barem 3 opažačka piezometra na različitim udaljenostima od crpnog zdenca. Hidraulička vodljivost vodonosnog sloja iz kojeg se crpi voda ima veliku ulogu u odabiru udaljenosti piezometara od zdenca. U slučaju kad je hidraulička vodljivost velika, opažački piezometri se postavljaju bliže crpnom zdencu (10 – 100 m) jer je pritom konus depresije strmiji i kraći. Za vodonosne slojeve manjih hidrauličkih vodljivosti zdenci postavljaju na veće udaljenosti (100 – 250 m) od crpnog zdenca jer je tada konus depresije manjeg nagiba i veće dužine. Broj piezometara ovisi o detaljnosti istraživanja, o svrsi istraživanja te o raspoloživom budžetu.

4.2. Laboratorijske metode

4.2.1. Empirijske formule

Hidrauličku vodljivost možemo odrediti pomoću empirijskih formula ako postoje podaci, odnosno rezultati granulometrijske analize.

Bitno je izdvojiti na početku da ***Hazenova***, kao jedna od često korištenih formula pri izračunu hidrauličkih vodljivosti kod mnogih autora, u ovom radu nije korištena. Razlozi su ti jer rezultati granulometrijske analize nisu zadovoljavali uvjete u kojima bi Hazenova formula bila valjana. Uvjeti koji nisu zadovoljeni na ispitivanim uzorcima su:

- $D_{10} = 0{,}1 - 3\ mm$
- $\frac{D_{10}}{D_{60}} < 5$

Jedna od često korištenih jednadžbi je ***Kozeny – Carmanova*** (URUMOVIĆ, 2013). Prednost te jednadžbe je što teorijski korektno opisuje odnose propusnosti i geometrijskih karakteristika poroznog medija kao vodiča. Njena korištenje za prognoze propusnosti nije toliko uobičajeno zbog poteškoća pri samoj primjeni. Pod time se misli na izražavanje efektivne poroznosti,specifične površine i osjetljivost cjelokupnog postupka pri određivanju efektivnog promjera zrna (URUMOVIĆ, 2013.)

Formula koja je korištena za usporedbu s vrijednostima hidrauličke vodljivosti permeametra je:

$$\mathrm{K} = \frac{\rho g}{\mu} \frac{D_m^2}{180} \frac{n^3}{(1-n)^2} \tag{4-1}$$

- K – hidraulička vodljivost (m/s)
- D_m – veličina zrna (mm)
- μ – kinematička viskoznost (kg/ms)
- n – poroznost

Od iznimnog značaja kod primjene Kozeny – Carmanove jednadžbe su podaci granulometrijske analize zbog određivanja veličine srednjeg zrna. Pri izračunu je ovdje korištena aritmetička sredina prema izrazu:

$$D = \sqrt{D_{i<} \cdot D_{i>}} \qquad (4-2)$$

- $D_{i<}$ - najmanje zrno u segmentu
- $D_{i>}$- najveće zrno u segmentu

Druga u ovom radu korištena empirijska formula je ***Slichterova*** (URUMOVIĆ, 2013):

$$K = 0{,}0104 \frac{\rho g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)} d_e^2 \qquad (4-3)$$

- K – hidraulička vodljivost (m/s)
- μ – kinematička viskoznost (kg/ms)
- d_e – srednji promjer zrna (mm)

Slichterova formula daje vrlo precizan izračun hidrauličke vodljivosti na temelju rezultata granulometrijske analize.

Treća korištena formula je ***USBR*** (VUKOVIĆ & SORO, 1991):

$$K = \frac{\rho g}{\mu} 4{,}87 \cdot 10^{-4} \cdot D_{20}^{0,3} \cdot D_{20}^2 \qquad (4-4)$$

- K – hidraulička vodljivost (m/s)
- μ – kinematička viskoznost (kg/ms)
- D_{20} – efektivni promjer zrna (mm)

Četvrta korištena empirijska formula je ***Beyerova*** (1964, 1966) koja se može smatrati korekcijom Hazenove formule:

$$K = C \cdot D_{10}^2 . log \frac{500}{C_U} \qquad (4-5)$$

- K – hidraulička vodljivost (m/s)

- C – iznosi 0,0045 ($m^{-1}s^{-1}$) (za K u m/s)
- D_{10} – efektivno zrno (mm)
- $C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Uvjeti valjanosti Beyerove formule su: 0,06 mm > D_{10} < 0,6 mm te kad je C_U < 20. U slučaju kad je $C_U = 3$ tada je identična Hazenovoj formuli (URUMOVIĆ, 2013).

4.2.2. Permeametar

Laboratorijskim metodama hidraulička se vodljivost određuje pomoću tzv. permeametra pri čemu se koriste mali uzorci izdvojeni na različitim točkama vodonosnika ili neke druge stijene. Uzorci se mogu dobiti iz raskopa ili iz bušotina (URUMOVIĆ, 2003). Hidraulička vodljivost određuje se na uzorcima koji se ugrađuju u ćeliju prema definiranoj normi. Prilikom pripreme potrebno paziti na zbijenost i saturiranost uzorka kao i na pojavu mjehurića zraka koji mogu utjecati na dobivanje krivih rezultata. Hidraulička vodljivost se može odrediti metodama permeametra sa stalnom razinom ili metodom permeametra s promjenjivom razinom (ovisno o veličini zrna ugrađenog materijala).

4.2.2.1. Permeametar sa stalnom razinom

U permeametru sa stalnim tlakom strujanje je ustaljeno i jednodimenzijsko (URUMOVIĆ, 2003). U njemu mjerimo hidrauličku vodljivost dobro propusnih materijala. Uzorak je izložen stalnoj razlici piezometarske razine *h*, koja osigurava stalnu količinu toka *Q*, mjerljivu na donjem preljevu. Pri takvim uvjetima i uz dužinu uzorka *L*, te površinu presjeka uzorka *A*, hidraulička vodljivost i unutarnja propusnost mogu se izravno odrediti iz Darcyjeva zakona (URUMOVIĆ, 2003). Reynoldsov broj R_e je računat prema formuli:

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \qquad (4-6)$$

- ρ gustoća vode (kg/m^3)
- v brzina dobivena iz omjera $\frac{Q}{A \cdot t}$ (m/s)
- L je duljina uzorka (m)
- μ dinamički viskozitet (Pa·s) koji iznosi 0,001

Prema normi *Standard Test Method for Permeability of Granular soils* (*Constant Head*) ASTM 2434 – 68 hidraulička vodljivost se računa prema sljedećem izrazu:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \qquad (4-7)$$

- k – hidraulička vodljivost (cm/s)
- Q – volumen istekle vode (cm^3)
- L – udaljenost između manometara (cm)
- A – površina poprečnog presjeka uzorka (cm^2)
- t – ukupno vrijeme istjecanja određenog volumena (s)
- h – udaljenost između manometra izlaza i manometra ulaza (cm)

Kako bi odredili hidrauličku vodljivost nužno je napraviti niz testiranja s različitim razlikama u potencijalu odnosno, razlikom između razine vode u instaliranom rezervoaru i visine na kojoj se nalazi cjevčica izlaznog manometra. Kraće rečeno, s različitim hidrauličkim gradijentima. Vrijednosti koje se dobiju unošenjem brzine ($v = \frac{Q}{A \times t}$) na ordinatu i hidrauličkog gradijenta i ($i = \frac{h}{L}$) na apscisu daju točke, a točke koje se povežu daju krivulju. Kada krivulja postane nelinearna to znači da se izašlo iz područja valjanosti Darcyevog zakona.

Metoda je pogodna za propusna tla jer je na opisan način teško izmjeriti male izdašnosti, a da pri tome ne dođe do velikih pogrešaka.

4.2.2.2. Permeametar s promjenjivom razinom

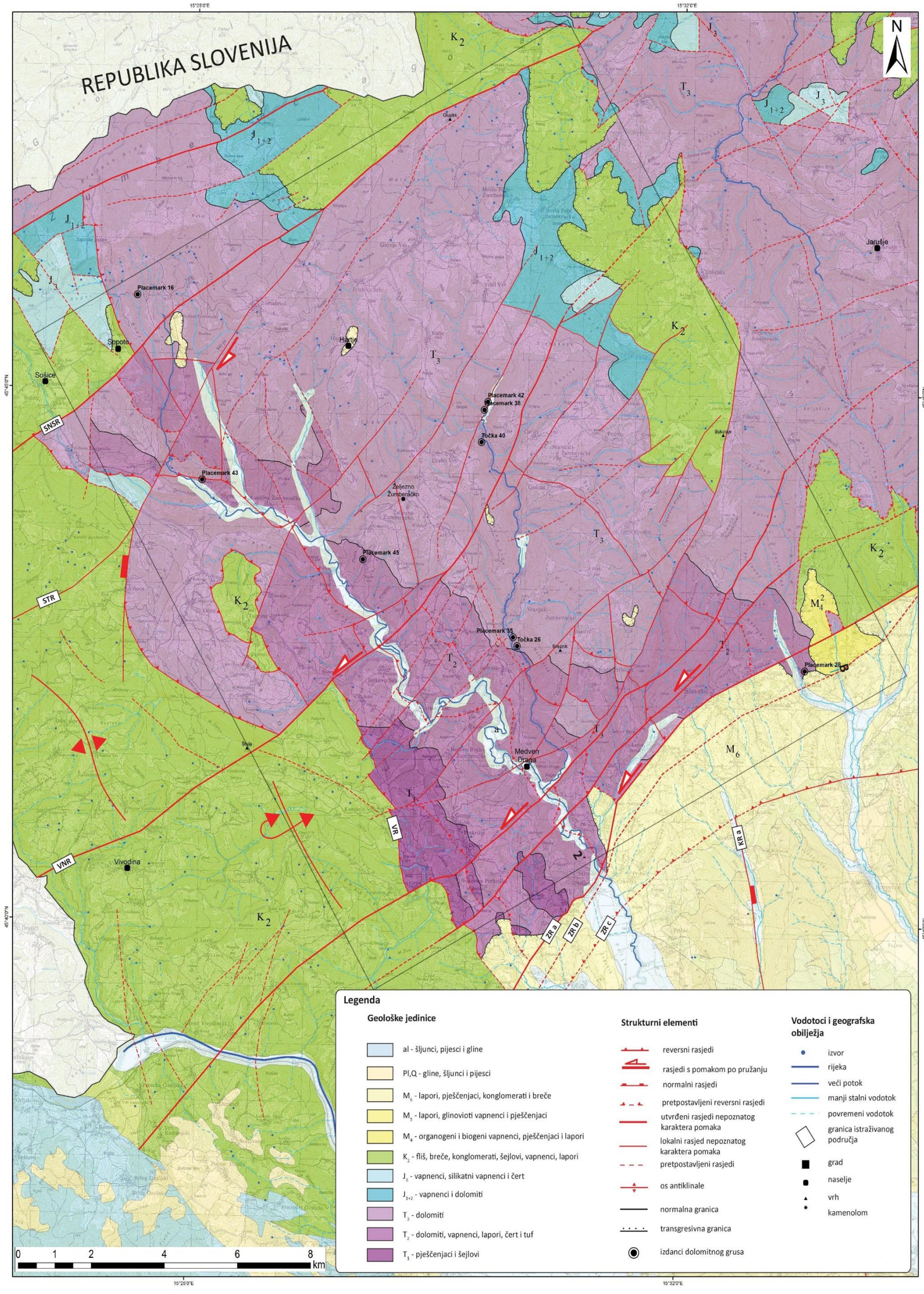
Permeametar s promjenjivom razinom obično se primjenjuje kada je nužno dobiti relativno velike gradijente, a posebno je prikladan za određivanje hidrauličke vrijednosti sitnozrnatih tvorevina (LEE ET FETTER, 1994). Uzorak je smješten u ćeliju koja ima oblik pravilnog kružnog cilindra, a na vrhu i dnu je omeđen poroznim pločama zanemarivog otpora (URUMOVIĆ, 2003). Voda se može dodati na dno ili na vrh uzorka, kao i kod permeametra sa stalnom razinom. U ovom slučaju saturacija uzorka traje puno duže. Kod ove metode određuje se količina protjecanja vode u vremenu kroz uzorak opažanjem iznosa pada visine u uspravnoj cijevi (BALAŠKO, 2011). U vremenu t_1, visina vode padne s početne visine Δh_1 na Δh_2. Uz podatke o visini uzorka u ćeliji L i površini poprečnog presjeka cjevčice A, hidraulička vrijednost dobije se iz izraza:

$$K = \frac{a \times L}{A \times \Delta t} \times \ln(\frac{h_1}{h_2}) \qquad (4-8)$$

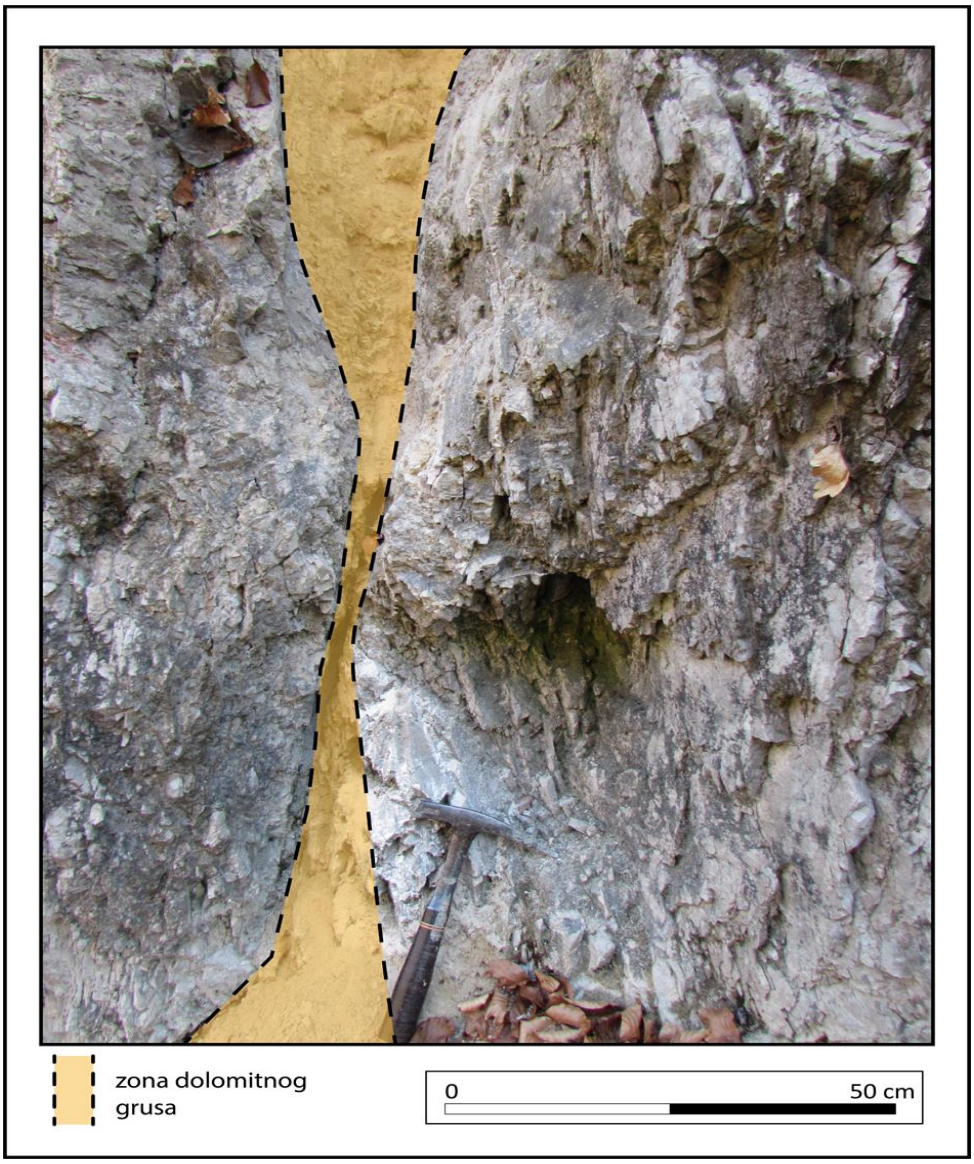
5. ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI PERMEAMETROM SA STALNOM RAZINOM (Constant Head)

5.1. Terenski rad

Terenski rad se sastojao od prikupljanja uzoraka za laboratorijska mjerenja s područja Žumberka. Uzorci dolomitnog grusa za laboratorijska mjerenja permeametrom, granulometrijsku analizu i areometriranjesu prikupljeni sukupno 13 lokacija (Prilog 1.). Od 13 uzoraka prikupljenih, na njih 5 se provodila laboratorijska testiranja permeametrom. Postoji razlika između pojedinih uzoraka i to ne samo u veličini čestica nego i u geološkoj strukturi u kojem se nalaze. Pojedini uzorci su ispunjavali pukotine, a drugi se nalaze kao zasebni izdanci u zonama glavnih rasjeda strukturnog sklopa. Primjerice uzorak dolomitnog grusa s točke placemark_24 (Slika 5.1.) je prikupljen geološkim čekićem i lopaticom iz pukotine. Iako se nalazi u samom izdanku, nije bio toliko konsolidiran pa se s lakoćom mogao prikupiti.

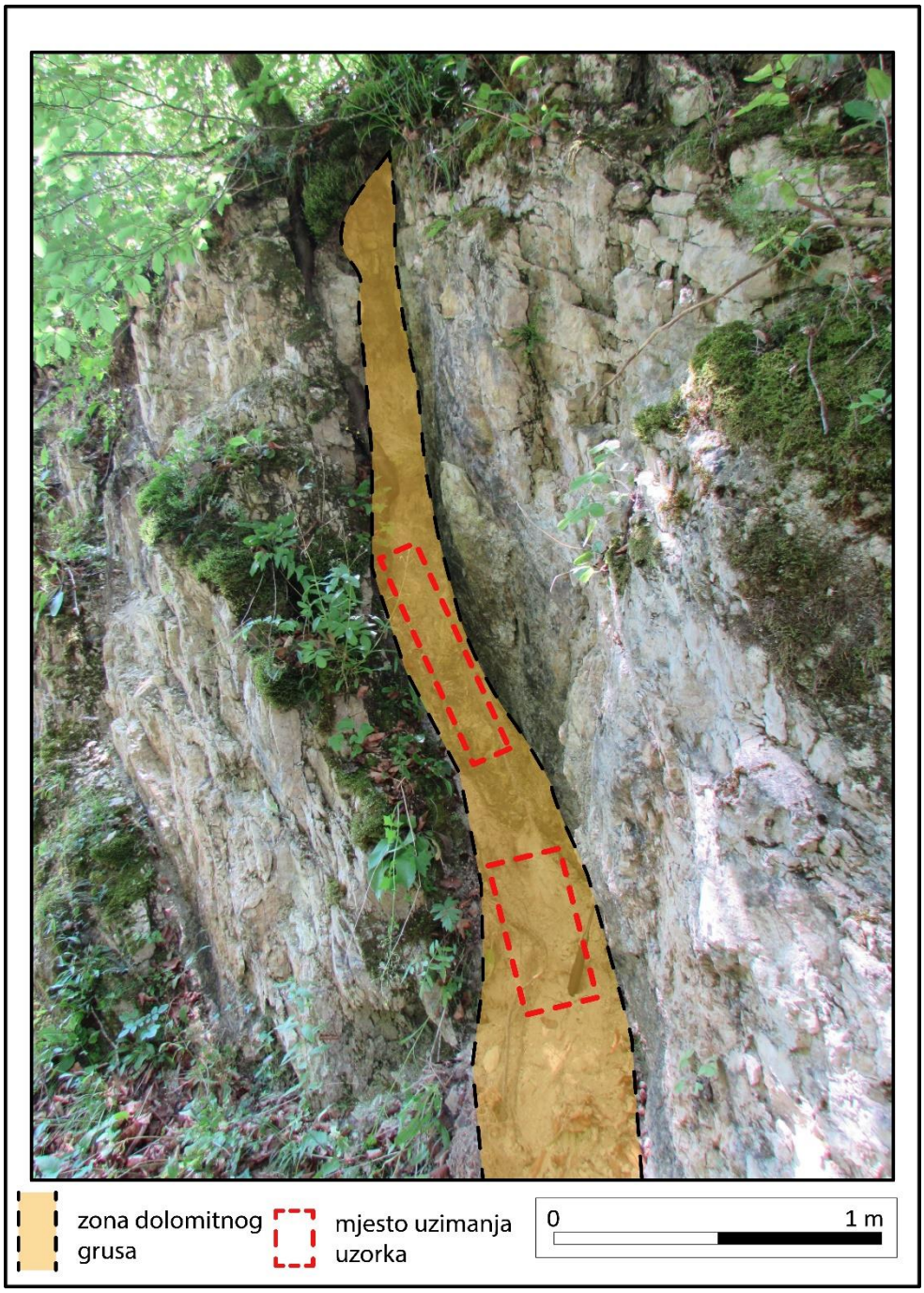


Prilog 1. Karta s točkama grusa



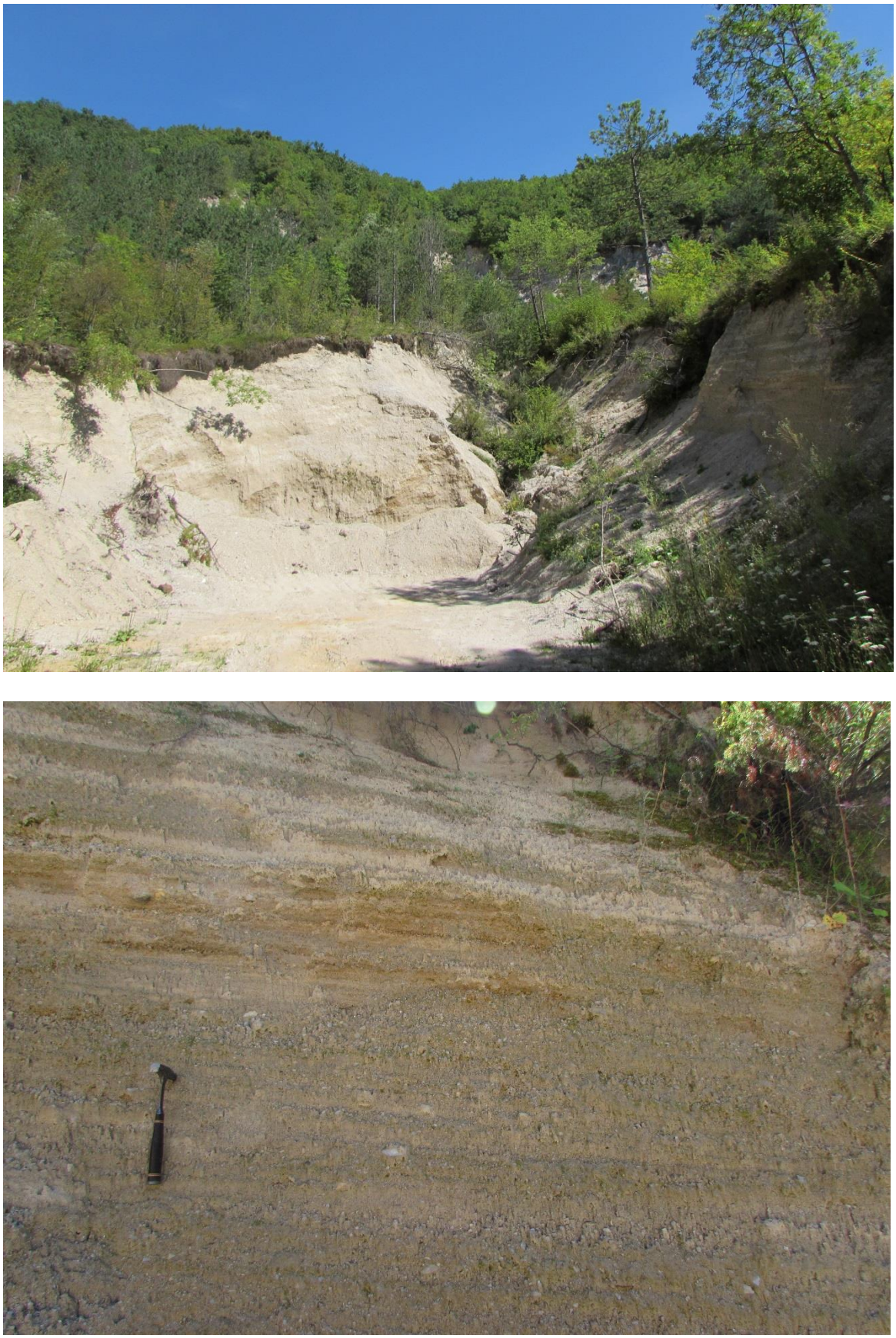
Slika 5.1. Zona dolomitnog grusa u pukotini (placemark_24)

Zona u kojoj se dolomitni grus nalazi je značajna pukotinska zona. Tektonska aktivnost je dovoljno snažna da već dijagenetski predisponirano razlomljene dolomite da u zoni pukotinestijenu usitnjava do dimenzija šljunka i pijeska čestice veličine pijeska i šljunka. Tijekom terenskih istraživanja pronađeno je više lokacija s dolomitnim grusom u pukotinama, a jedna od njih je i placemark_38 (Slika 5.2.).



Slika 5.2. Zona dolomitnog grusa u pukotini (placemark_38)

Druga skupina uzoraka je s izdanaka dolomitnog grusa iz zona značajnih rasjeda strukturnog sklopa što se može vidjeti na slici 5.3. (placemark_43) i 5.4. (placemark_42).



Slika 5.3. a) slika iznad i b) slika ispod – veliki izdanak dolomitnog grusa u blizini izvora Kupčine u mjestu Stupe (placemark_43)



Slika 5.4. Zona dolomitnog grusa, nedaleko od izvora Slapnice (placemark_42)

Uzorci dolomitnog grusa poput ovog na slici 5.3 a) i b) te 5.4. imaju određenu količinu organske i glinovite komponente više jer su izloženiji vanjskim utjecajima od onih u pukotinama. Takve okolnosti su mogle utjecati na vrijednosti hidrauličke vodljivosti pri laboratorijskim mjerenjima pa se i na to obratila pozornost pri promatranju rezultata ispitivanja permeametrom.

Svi uzorci su nastali kao posljedica tektonske aktivnosti. Dolomitni grus iz rasjednih zona su veličine od praškastih glinovitih čestica do krupnog šljunka zbog čega je na tim uzorcima morala biti obavljena granulometrijska analiza. U rasjednim zonamase odvijalo trošenje dolomita, te je došlo do stvaranja dolomitnog grusa. Materijal u tim zonama nam je s hidrogeološkog stajališta vrlo zanimljiv jer je povezan s cirkulacijom vode.

5.2. Granulometrijska analiza

Granulometrijski sastav je raspodjela čestica tla po veličini, a izražena u postotku mase (KVASNIČKA, 2007). On je za neki uzorak tla veza (relacija, odnos) svih razreda promjera zrna i njihovih postotaka masa. Na temelju granulometrijskog sastava mogu se odrediti fizikalne karakteristike tla primjerice vodopropusnost, stišljivost, kapilarnost, filtarska svojstva itd. (KVASNIČKA, 2007).

Prema dominantnoj veličini zrna svrstavamo tla u skupine: pijesci i šljunci (krupnozrnati materijal) te prahove i gline (sitnozrnati materijal). Dominantna veličina zrna se određuje tako da se uzorak materijala tla prosijava kroz sita različite veličine okca i dobiju ostatci na sitima koji se važu i tako odrede razredi promjera zrna izraženi u masama. Dominantna veličina zrna je na čiji razred ima najveći postotak u ukupnoj masi uzorka (KVASNIČKA, 2007).

Za karakterizaciju granulometrijskog sastava tla definiraju se dva koeficijenta: koeficijent jednoličnosti i koeficijent zakrivljenosti. Oni se definiraju na temelju karakterističnih vrijednosti promjera zrna (KVASNIČKA, 2007).

Koeficijent ujednačenosti:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad (5-1)$$

Koeficijent zakrivljenosti:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \qquad (5-2)$$

Karakteristični promjeri zrna D_{10}, D_{30} i D_{60} se dobiju tako da se u granulometrijskom dijagramu povuče horizontala na odgovarajućim postotcima (10 %, 30 % i 60 %) te očitaju odgovarajuće vrijednosti promjera u mm (KVASNIČKA, 2007).

Uzorci koji su odabrani za permeametar su prvotno stavljeni na sušenje na sobnoj temperaturi. Nakon sušenja uzoraka napravljeno je suho sijanje, a korištena su sita u razmaku od 0,032 do 16 mm (0,032 mm, 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm i 16 mm). Sijanje se radi kroz sita standardnih dimenzija, koja su postavljena jedno ispod drugog tako da se otvori sita smanjuju prema dolje. Bitno je napomenuti da je sito prethodno izvagano jer smo vagali prosijan uzorak. Iz dobivenih rezultata analize dobivene su granulometrijske krivulje. Kumulativna granulometrijska krivulja je glavni i najčešći način prikazivanja rezultata granulometrijske analize jer se iz nje izravno mogu očitati udjeli bilo kojih frakcija, a prikazuje cjelokupan sastav i raspored zrna, pa se iz nje mogu očitati i izračunati i važni granulometrijski koeficijenti (TIŠLJAR, 2004).

Prema korištenoj normi ASTDM 2434 – 68 zrna koja se koriste u postupku s permeametrom ne smiju biti veća od 19 mm. Zrna koja su preostala na situ veličine otvora 19 mm nisu ugrađivana u permeametar nego se izvažu kako bi odredili postotak krupnijih frakcija u uzorku.

5.3. Hidraulička vodljivost i poroznost

Hidraulička vodljivost se definira kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne stijene jedinične površine (F = 1 m^2) uz jedinični hidraulični gradijent, odnosno pad potencijala za 1 m na udaljenosti od 1 m u smjeru tečenja podzemne vode (BAČANI, 2006). Hidraulička vodljivost ovisi o značajkama stijene kroz koju tekućina prolazi te o značajkama tekućine. Hidraulička vodljivost, koja predstavlja parametar proporcionalnosti u Darcyevu zakonu izražava lakoću gibanja tekućine kroz zasićeni porozni medij (URUMOVIĆ, 2003). Izvorni oblik Darcyeva zakona odnosi se na linearno strujanje vode kroz zrnatu poroznu sredinu i proizlazi iz eksperimenata u koji masu promatrane osrednjene posljedice mikroskopskog gibanja vode kroz šupljine između zrna pijeska različite veličine. Njegovim svođenjem na opći slučaj gibanja različitih tekućina, dobije se izraz za hidrauličku vodljivost (URUMOVIĆ, 2003):

$$K = Cd^2 \frac{\rho_v g}{\mu} = k \frac{\rho_v g}{\mu} \qquad (5-3)$$

u kojem je *K* hidraulička vodljivost (m/s), *C* bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje značajke stijene (poroznost, zbijenost, oblik zrna o čemu ovisi geometrija pore), zatim *d* promjer pore kroz koju prolazi fluid (m), *g* gravitacija (m/s^2), ρ_v gustoća fluida (kg/m^3) i μ dinamički viskozitet fluida (Pa·s = kg/ms). Parametar *K* nije konstanta jer značajke tekućine (ρ, μ) ovise o temperaturi i tlaku (NUTTING, 1930). Parametar *k* uzima se kao stalna veličina, a zove se *unutarnja propusnost* ili, kraće, *propusnost* (URUMOVIĆ, 2003): k = Cd^2 (m^2), te predstavlja propusnost krutog matriksa. Izraz $\frac{\rho_v g}{\mu}$ (m^{-1}s $^{-1}$) odnosi se na značajke fluida (BAČANI, 2006).

Hidraulička vodljivost ovisi o izotropiji i anizotropiji materijala. Materijali u kojima je hidraulička vodljivost jednaka u svim smjerovima se nazivaju izotropnima ($K_x = K_y = K_z$). Materijali u kojima je hidraulička vodljivost različita u različitim smjerovima je anizotropan ($K_x \neq K_y \neq K_z$) (BAČANI, 2006). Iz tog razlog prilikom određivanja hidrauličke vodljivosti nekog vodonosnog sloja, iznimno jebitno odrediti da li je vodonosni sloj heterogen ili homogen. Homogeni vodonosnici su iznimno rijetki u prirodi, a njima se granulometrijski sastav u prostoru i po dubini ne mijenja. Kod heterogenih vodonosnika se mijenja, pa se na taj način mijenja i hidraulička vodljivost. Iz toga proizlazi zaključak da je za heterogene vodonosne slojeve potrebno odabrati reprezentativne uzorke.

Poroznost stijena određuje prostor između čvrstih sastojaka stijene. Poroznost može biti primarna i sekundarna. Primarna poroznost obilježava prije svega zrnate stijene, a ovisi o rasporedu i veličini zrna. Ona nastaje u samom procesu stvaranja stijene. Primarnih šupljina ispunjenih vodom može biti i u drugim stijenama, ali su one manje rasprostranjene i nepravilnije raspoređene (HERAK, 1986).

Sekundarna poroznost nastaje nakon formiranja stijene djelovanjem različitih sila. Tako nastaje pukotinska poroznost karakteristična za sve guste i čvrste stijene koje su praktički netopive u vodi. U vapnencima i dolomitima koji su više ili manje topivi u vodi koja sadržava CO_2 i neke druge agresivne sastojke, pukotinske se šupljine šire pa nastaje pukotinsko – disolucijska (krška) poroznost (HERAK, 1986).

6. METODA PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM

6.1. Postupak pripreme uzorka i ugradnje

Prema normi *Standard Test Method for Permeability of Granular soils* (*Constant Head*) ASTM 2434 – 68 postupak je sljedeći:

- Dobiveni uzorak se četvrta, uzima reprezentativni primjerak koji se suši na sobnoj temperaturi
- Uzima se određena količina uzorka za ugrađivanje te izvaže
- Osušeni uzorak se prosija na situ promjera 19 mm te izvaže neprosijani ostatak pomoću čega se odredi postotak krupnijih frakcija u uzorku
- Ugradnja se odvija sloj po sloj
- Svaki sloj u prosjeku treba biti 2 – 3 cm debljine (ne manje od 1,5 cm) te zbijen s 10 udaraca bata s oko 2 cm visine
- Uzorak se ugrađuje do visine oko 2 cm iznad izlaznog manometra
- Mjeri se H_2 koja označava visinu od gornjeg ruba cilindra permametra do uzorka. Visinu H_2 treba oduzeti od ukupne visine cilindra H_1 kako bi se dobila visina uzorka H
- Nakon ugradnje potrebno je izvagati preostali neugrađeni uzorak kako bismo znali masu ugrađenog uzorka
- Namješteni permeametar treba spojiti na manometre i vakuum pumpu kako bi se saturirao vodom
- Uzorak se saturira od dna prema vrhu izvlačenjem zraka uz pomoć vakuumske pumpe
- Nakon saturiranja uzorka isključi se vakuum pumpa i zatvori dovod vode
- Saturirani uzorak je spreman za mjerenje, a manometri su redom postavljeni. Donji manometar se očitava na prvom stupcu vode, a gornji manometar na posljednjem stupcu vode
- Za mjerenje nam je potrebna štoperica, menzura za mjerenje količine istekle vode, tablica za upisivanje potrebnih podataka (definirana normom) i stvorena razlika potencijala kako bi voda protjecala uzorkom

Prije ugradnje uzorka izmjere se dimenzije ćelije. Prema normi potrebno je izmjeriti udaljenost između manometara L (m), poprečni presjek A (cm^2), srednja vrijednost unutarnjeg promjera ćelije D (m). Bitno je pripremiti uzorak, odnosno ponovo ga četvrtati do željene količine kako bi ga ugradili jednoliko duž ćelije (Slika 6.4.). Korištena norma ASTM D 2434 – 68 nalaže da se iz uzorka moraju ukloniti zrna veća od 19 mm i da u uzorku ne smiju biti više od 10 % čestica manjih od 75 μm. Taj se podatak sazna iz rezultata granulometrijske analize te su prema tim rezultatima svi uzorci sadržavali manje od 10 % čestica navedene veličine.

Postoje 2 porozne pločice, jedna je bazna na koju se postavlja gumica s nanešenim vazelinom, filterska mrežica, tronožni stativ i ćelija permeametra (Slika 6.1.).



Slika 6.1. Slika a) gornja; Slika b) donja porozna ploča permeametra

Ćelija permeametra se sastoji od 3 manometra, a udaljenost između njih je standardna kao i širina poprečnog presjeka ćelije (Slika 6.2.).



Slika 6.2. Ćelija permeametra i odgovarajući manometri

Prije ugradnje materijala uzorka, a nakon što su do tad spojeni svi bitni dijelovi permeametra prikazanisu na slici 6.3.



Slika 6.3. Permeametar prije ugradnje uzorka

Nakon ugradnje ćelije i tronožnog stativa, ugrađuje se uzorak sloj po sloj kao što je definirano normom. Prije ugradnje uzorak je na staklenoj ploči učetvrtan kako ne bi došlo do pogreški tijekom mjerenja, odnosno kako bi materijal bio što bliži simulaciji prirodnog stanja (Slika 6.4.).



Slika 6.4. Priprema uzorka za ugradnju

Kad je završena ugradnja, postavlja se filterska mrežica te potom gornja porozna pločica, a na manometre se spoje cjevčice koje su spojene na stupce vode (Slika 6.5.).



Slika 6.5. Permeametar pripremljen za testiranje

Kao što je vidljivo na slici 6.5., na gornju ploču je postavljen mali uteg od 1 kg na imbus ključu. To je učinjeno kao dodatno osiguranje da tlak u ćeliji ne bi podignuo gornju ploču, iako je ona zategnuta mehanizmom. Saturacija (Slika 6.6.) počinje od donjeg manometra i to s deaeriranom vodom kako se ne bi unosili dodatni mjehurići, a kako bi brže "istjerali" one u uzorku. Kao pomoć pri stvaranju realnije simulacije prirodnih uvjeta iz uzorka smo isisali zrak uz pomoć električnog motora (Slika 6.10.).



Slika 6.6. Saturacija uzorka u permeametru

Kad se uzorak ispuni vodom i kad izađe sav zrak u obliku mjehurića, kreće druga faza. U drugoj fazi se otvara dovodni ventil iz gornje komorekoja propušta vodu u uzoraka, a zatvara se ventil prema vakuumskoj pumpi. Otvaranjem odvodnog ventila na donjoj baznoj ploči započinje postupak ispitivanja.

6.2. Postupak ispitivanja

Pri laboratorijskom ispitivanju hidrauličke vodljivosti permeametrom sa stalnom razinom mjeri se razlika u manometarskim cjevčicama h (m) (slika) i vrijeme t (s) potrebno da se kroz donji ventil napuni menzura (od 100 mL) do određenog volumena i temperatura vode T (˚C).



Slika 6.7. Početno stanje u manometarskim cjevčicama

Dobiveni rezultati su zapisani u tablicu koja je definirana normom *Standard Test Method for Permeability of Granular soils (Constant Head)*ASTM D 2434 – 68 (Slika 6.8.).

D 2434 – 68 (2000)

PERMEABILITY TEST ON GRANULAR SOIL

Test No. Date of Test

Location of Sample Date Sampled Report

Boring— Sample— Depth—

(a) DESCRIPTION OF SOIL

MATERIALS USED:

(b) UNIT WEIGHT DETERMINATION:

Diameter, D, cm — Height Before, H_1 — Weight Before, W_1

Area, A, cm^2 — Height After, H_2 — Weight After, W_2

Length, L, cm — Height Net, cm — Weight Net, g

Moisture Content (air-dried)

W (max) — Dry Unit Weight, lb/ft^3 W

W (min) — Void Ratio, e

Relative Density, RD

(c) PERMEABILITY TEST (DEGREE OF COMPACTNESS)

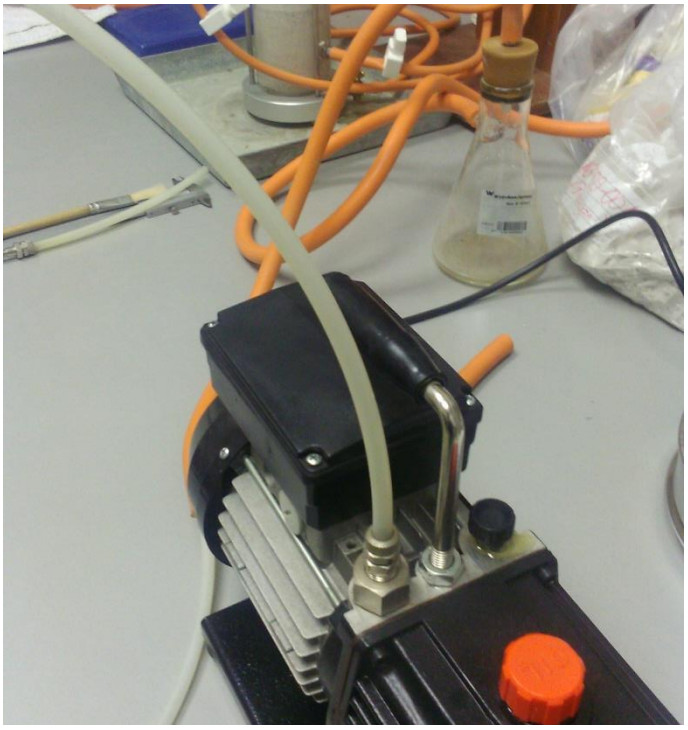
Test No.	Manometers H_1	Manometers H_2	Head, h cm	Q cm^3	t s	Q/At	h/L	Temperature, °C	k cm/s
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Slika 6.8. Tablica definirana normom

Volumen koji se mjeri ovisi o propusnosti ugrađenog uzorka. U uzorcima koji su propusniji menzura bi u kratkom vremenu (manje od minute) napunila menzuru pa bi se u tim slučajevima gledao veći volumen kao referentan (primjerice 70 ml), a u uzorcima koji su manje propusni promatrao bi se manji volumen (primjerice 5 ml). Postupak se ponavlja s povećanjem razlike potencijala za 1 cm. Nakon više mjerenja, razlika potencijala bi se povećala za 2, 3, 4 ili 5 cm da bi vidjeli kako dobivena krivulja reagira. Razlika potencijala se gleda kao razlika između visine na kojoj se nalazi cjevčica izlaznog manometra i razine vode u rezervoaru instaliranom na zidu. Kako bi se krenulo od najmanje razlike, stalak koji drži cjevčicu izlaznog manometra je postavljen na improviziranom postolju (Slika 6.9.).



Slika 6.9. Korištena aparatura pri mjerenju



Slika 6.10. Električni motor

7. REZULTATI I RASPRAVA

Laboratorijsko ispitivanje permeametrom sa stalnom razinom je provedeno na ukupno 5 uzoraka (Tablica 7 – 1.). Kao što je već navedeno, uzorci su uzeti s područja Žumberka.

Tablica 7-1. Podaci uzoraka dolomitnog grusa ispitivanih permeametrom

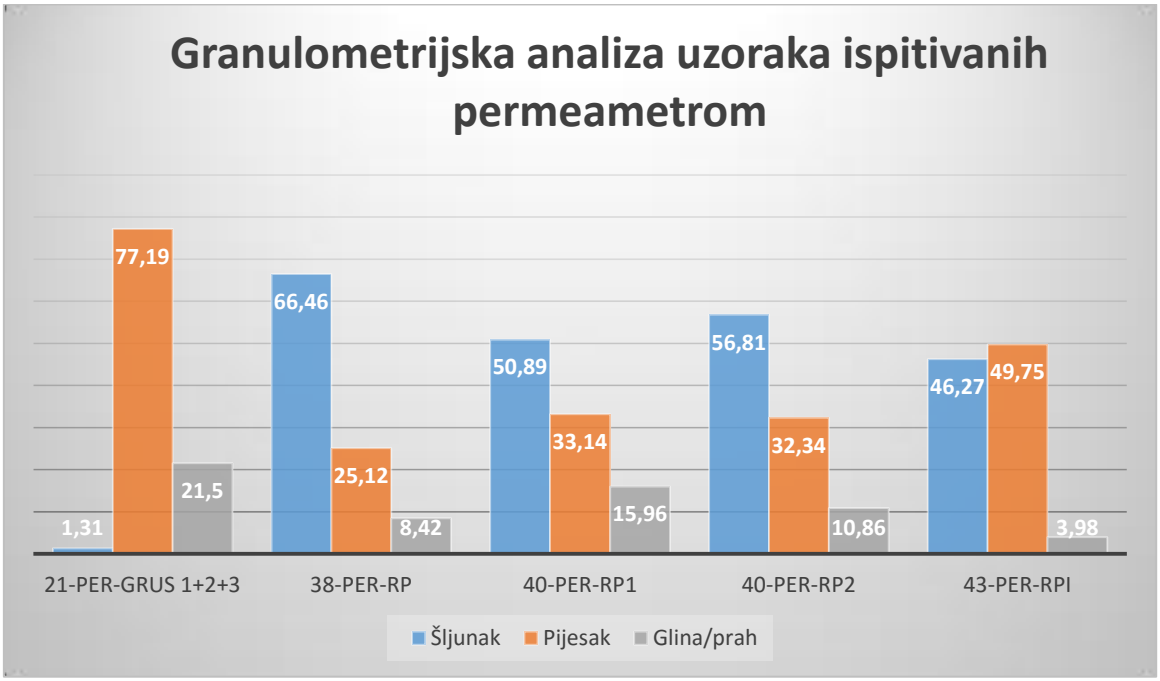
Oznake geomehaničkog laboratorija	**Oznake s terena**	**Mjerilo**	**Osrednjena hidraulička vodljivostK**(m/s)*
16-009-003	21-per-grus 1+2+3	izdanak	$3{,}9 \cdot 10^{-6}$
16-009-009	38-per-rp	rasjed/pukotina	$1{,}31 \cdot 10^{-3}$
16-009-010	40-per-rp1	rasjed/pukotina	$1{,}36 \cdot 10^{-4}$
16-009-011	40-per-rp2	rasjed/pukotina	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$
16-009-012	43-per-rpi	izdanak	$7{,}63 \cdot 10^{-4}$

**osrednjena aritmetičkom sredinom svih mjerenih vrijednosti*

Jedino na uzorku 38 – per – rp se postupak mjerenja morao ponoviti zbog povećanog sadržaja organskih ili glinovitih čestica koje su uzrokovale začepljenje cjevčice uređaja što je rezultiralo nemogućnošću obavljanja postupka. Uzorak se ponovno prikupio na terenu te je granulometrijska analiza tog uzorka pokazala da je udio glinovite (praškaste) komponente minimalan. To dovodi do zaključka da se prvotni uzorak prikupio neposredno s površine gdje je povećan udio organske i glinovite komponente. Od ukupne količine svih uzoraka prikupljenih na terenu uz pomoć lopatice i čekića, jedan manji udio tog uzorka se odvajao za ispitivanja permeametrom. Dakle, pri četvrtanju određene količine uzorka prije ugrađivanja u permeametar, odvaže se količina iz ukupnog uzorka. Tu se otvara prostor za pogrešku pri dobivanju preciznijih vrijednosti hidrauličke vodljivosti. Bolje rečeno, rezultati hidrauličke vodljivosti dobiveni ispitivanjem permeametrom neće moći dati vrijednosti koje u potpunosti odgovaraju stvarnoj hidrauličkoj vodljivosti u prirodi jer ne mogu u potpunosti simulirati prirodne uvjete.

Svi rezultati testiranja uzoraka permeametrom sa stalnom razinom su prikazani grafički i tablično. Rezultati granulometrijske analize također su prikazani i grafički i tablično i vidljivi su u prilozima (Prilog 2. – Prilog 6.). Uspoređujući krivulje granulometrijskih

analiza vidljivo je da prevladavaju čestice veličine šljunka na gotovo svim uzorcima (Graf 7.1. i Prilozi 2. – 6.). To su većinom uzorci koji gu granulometrijskom analizom definirani kao dobro ili slabo graduirani šljunci s ili bez pijeska. Veliki izuzetak je uzorak 21 – per – grus 1+2+3 (Prilog 2.) koji sadrži 1,3 % šljunka. Uzorak 43 – per – rpi (Prilog 6.) sadrži 49,75 % pijeska i 46,27 % šljunka što, unatoč velikoj količini pijeska, ipak potvrđuje pravilo da je šljunak u velikom postotku prisutan u gotovo svim uzorcima. Važna je činjenica da prahovite komponente u tri uzoraka ima vrlo malo ili u tragovima. Poveći udio glinovite i prahovite komponente sadrži uzorak 21 – per – grus 1+2+3 (Prilog 2.) s 21,5 % i uzorak 40 – per – rp1 (Prilog 6.) s približno 16 %.



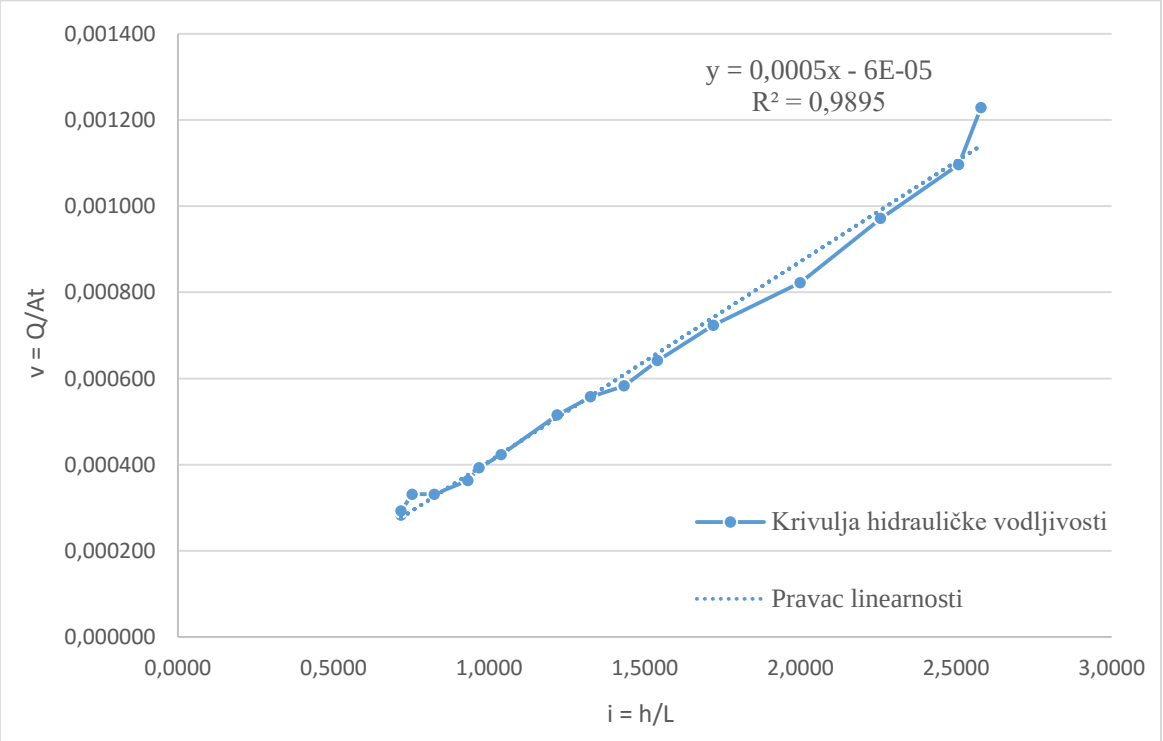
Graf 7.1. Granulometrijska analiza uzoraka ispitivanih permeametrom

Rezultati ispitivanja svih uzoraka permeametrom su pokazali da Reynoldsov broj prelazi vrijednosti 10 što ukazuje na ulazak u prijelazno područje i/ili turbulentni tok što upućuje na zaključak o prestanku valjanosti Darcyeva zakona. Ovisno o razlici potencijala točke ulaza i točke izlaza vode iz permeametra, brzina istjecanja odnosno protoka vode kroz uzorak se povećava što je vidljivo u tablicama 7 – 3. do 7 – 7.

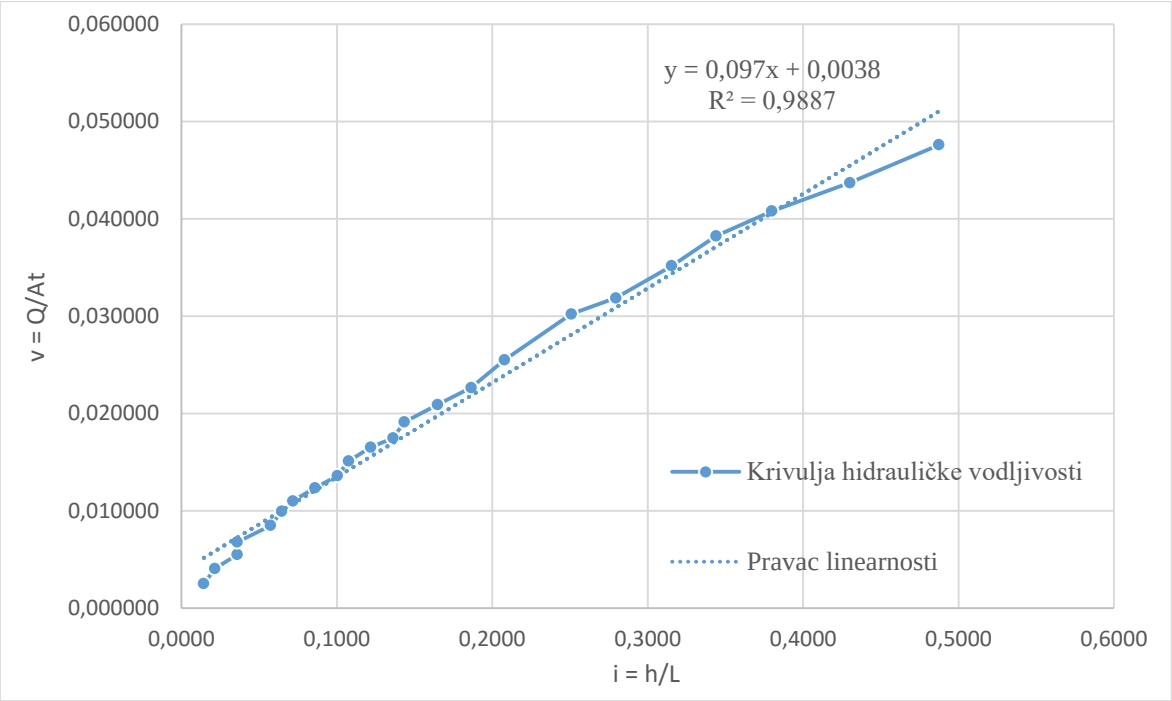
Pri porastu brzine q (d, ρ i μ su konstantni) dolazi do porasta R_e što dovodi do postupnoga odstupanja od linearnoga odnosa. Među znanstvenicima vlada opća suglasnost da je u gotovo u svim slučajevima Darcyev zakon valjan dok R_e, koji je temeljen na promjeru efektivnog zrna, ne dođe na vrijednost između 1 i 10 (URUMOVIĆ, 2003). Na većini uzoraka ispitivanih permeametrom nakon određenog broja mjerenjase došlo do

turbulentnog toka (Tablica 7 – 4. do Tablica 7 – 7.). Izuzetak je jedino uzorak 21 – per – grus 1+2+3 gdje vrijednost Reynoldsovog broja nije prešla vrijednost 10 što daje na zaključak da se vrlo vjerojatno radi o laminarnom toku tj. valjanosti Darcyeva zakona (Tablica 7-3.).

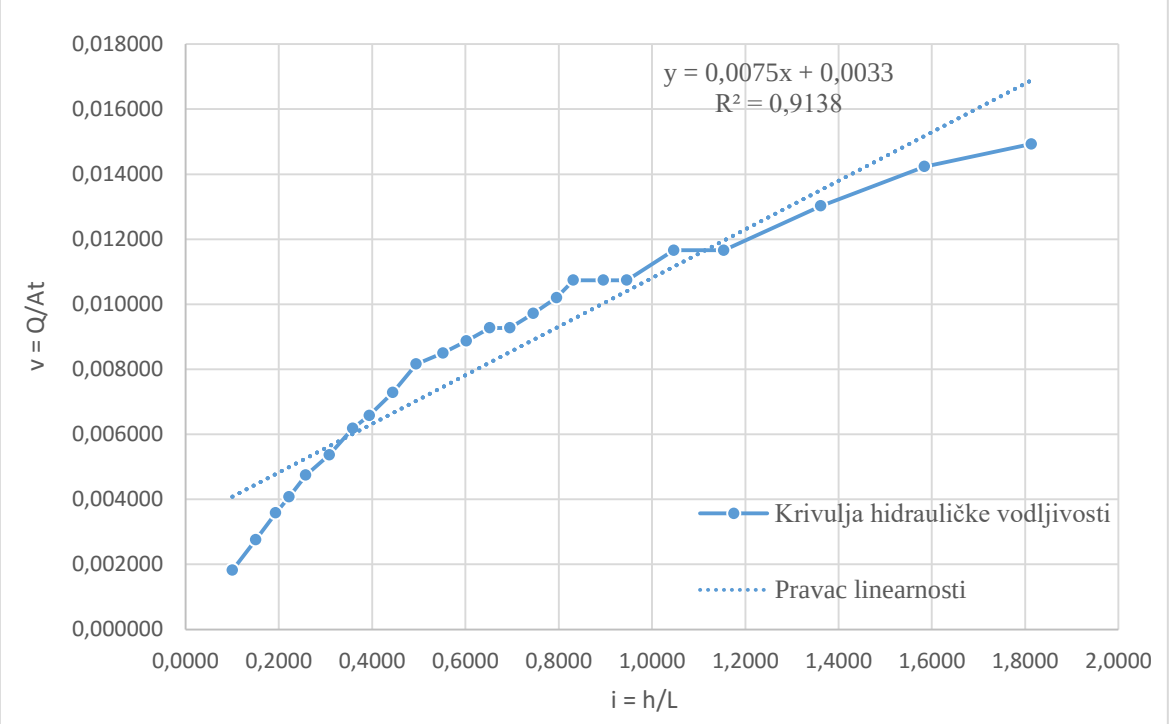
Na grafovima 7.2. do 7.6. je grafički prikazana krivulja hidrauličke vodljivosti na temelju rezultata permeametra. Linearnom regresijom je dobiven pravac linearnosti čija je jednadžba zapisana u obliku y=ax+b. Broj koji dolazi iza R^2 predstavlja koeficijent, odnosno postotak u kojem se krivulja hidrauličke vodljivosti poklapa s pravcem linearnosti.



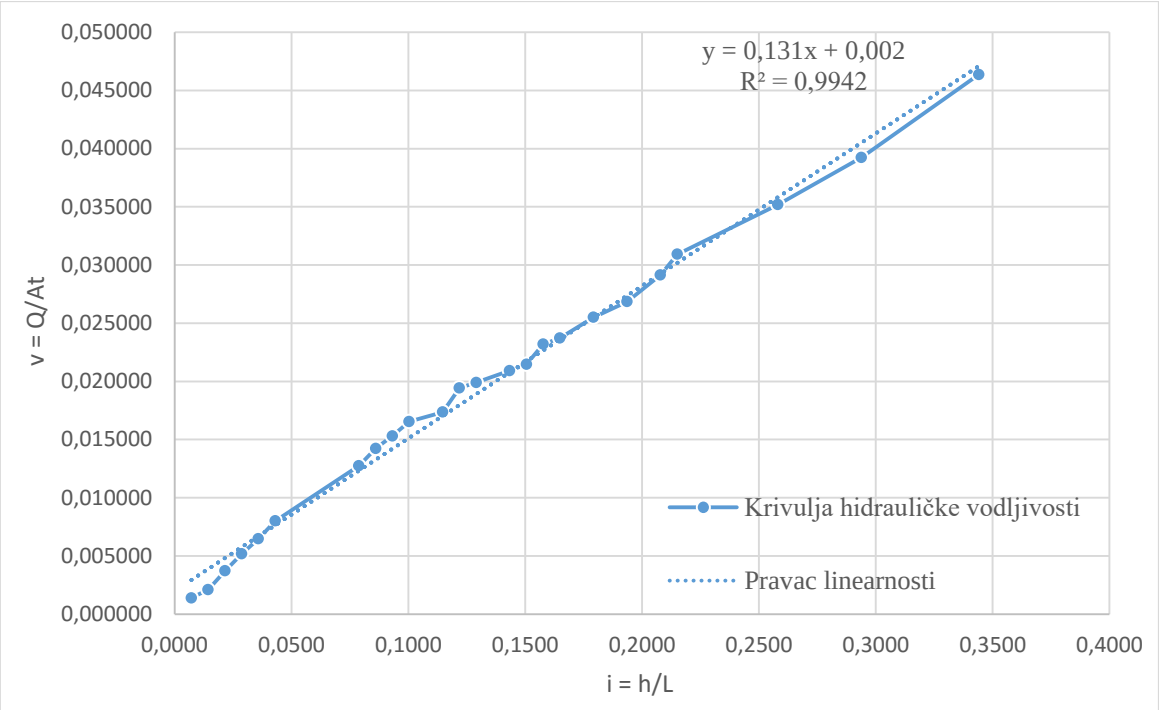
Graf 7.2. Krivulja hidrauličke vodljivosti i pravca linearnosti uzorka 21 – per – grus 1+2+3



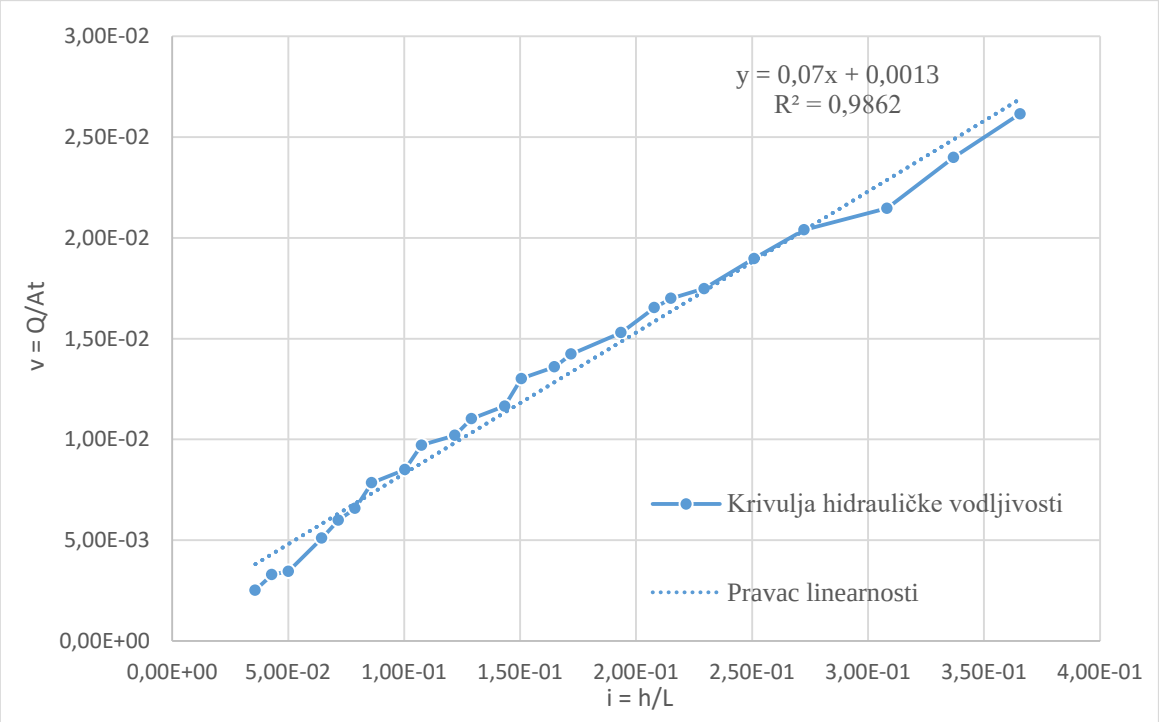
Graf 7.3. Krivulja hidrauličke vodljivosti i pravca linearnosti uzorka 38 – per – rp



Graf 7.4. Krivulja hidrauličke vodljivosti i pravca linearnosti uzorka 40 – per – rp1



Graf 7.5. Krivulja hidrauličke vodljivosti i pravca linearnosti uzorka 40 – per – rp2



Graf 7.6. Krivulja hidrauličke vodljivoti i pravca linearnoti uzorka 43 – per – rpi

Također, ispravnost rezultata hidrauličke vodljivosti dobivenih permeametrom se mogu usporediti s rezultatima hidrauličke vodljivosti dobivenih iz empirijskih formula Kozeny –

Carman (izraz 4 – 1), Schlichtera (izraz 4 – 3), USBR (izraz 4 – 4) i Beyera (izraz 4 – 5). Vrijednosti svih rezultata su prikazane u tablici 7.2.

Tablica 7-2. Rezultati hidrauličkih vodljivosti uzoraka

	Oznake uzorka				
Oznake GML-a	**16-009-003**	**16-009-009**	**16-009-010**	**16-009-011**	**16-009-012**
Oznake s terena	**21-per-grus 1+2+3**	**38-per-rp**	**40-per-rp1**	**40-per-rp2**	**43-per-rpi**
Hidraulička vodljivost(m/s)-**Kozeny-Carman**	4,36E-06	4,82E-04	5,88E-06	3,21E-04	3,09E-04
Hidraulička vodljivost (m/s)-**Schlichter**	4,96E-06	6,35E-04	7,23E-06	3,92E-04	4,03E-04
Hidraulička vodljivost (m/s)-**USBR**	7,17E-06	1,55E-03	5,47E-05	4,50E-04	6,11E-04
Hidraulička vodljivost(m/s)-**Beyer**	/	/	/	/	1,09E-04
Hidraulička vodljivost(m/s)-**rezultati permeametra**	3,90E-06	1,31E-03	3,60E-04	1,50E-03	7,63E-04

Iz tablice 7 – 2. je vidljivo da izračunate vrijednosti hidrauličkih vodljivosti uz pomoć Kozeny- Carman i Schlichter empirijskih formula daju gotovo identične vrijednosti. Hidraulička vodljivost Beyerovom formulom se može izračunati samo za uzorak 43 – per – rpi jer valjanost tog izraza je ograničena uvjetima (URUMOVIĆ, 2013):

- 0,06 mm > D_{10} < 0,6 mm
- $C_u < 20$ …. koeficijent ujednačenosti

Ostali uzorci nisu ispunjavali uvjete pa njihovi podatci nisu ni uvrštavani u proračun. Vrijednost hidrauličke vodljivost za uzorak 43 – per – rpi je približno jednakog iznosa kao i vrijednost hidrauličke vodljivosti istog uzorka dobivena Kozeny – Carman i Schlichterovom empirijskom formulom. Vrijednosti dobivene USBR formulom za uzorke 21 – per – grus 1+2+3, 40 – per – rp2 i 43 – per – rpisu također približno identičnih iznosa kao i vrijednosti hidrauličkih vodljivosti dobivenih Kozeny – Carman i Schlichterovom formulom, dok se za uzorke 38 – per – rp i 40 – per – rp1 razlikuje za otprilike jedan red veličine.

U usporedbi srezultatima hidrauličkih vodljivosti dobivenih permeametrom može se primijetiti da oni odgovaraju tj. istog su reda veličine za uzorke 21 – per – grus 1+2+3 i 43 – per – rpi za rezultate svih empirijskih formula. Za uzorke 38 – per – rp i 40 – per – rp2 razlika rezultata permeametrom su jedan red veličine, odnosno za uzorak 40 – per – rp1 dva reda veličine.

Tablica 7-3. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 21 – per – grus 1+2+3

Mjerenje	Manometar ***H1***	Manometar ***H2***	Udaljenost manometara	Volumen pražnjenja	Vrijeme pražnjenja	Brzina istjecanja ***v***	Hidraulički gradijent ***i***	Temperatura vode ***T***	Hidraulička vodljivost ***k***	Hidraulička vodljivost ***k***	Viskozitet vode pri test temp. ***μ***	Viskozitet vode ***μ-20ºC***	Korigirana hidraulička vodljivost ***k***	Osrednjena hidraulička vodljivost	Reynoldsov broj R_e
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm^3)	(s)	(m/s)	/	ºC	(cm/s)	(m/s)	(Pa·s)	(Pa·s)	m/s		/
1	85,5	95,5	10,00	5	361	2,83E-04	7,17E-01	22,9	3,94E-04	3,94E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,68E-06		0,394
2	85,5	95,5	10,00	5	349	2,92E-04	7,17E-01	22,9	4,08E-04	4,08E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,81E-06		0,408
3	85,0	95,5	10,50	5	308	3,31E-04	7,53E-01	22,9	4,40E-04	4,40E-06	9,35E-01	1,0E+00	4,11E-06		0,462
4	84,0	95,5	11,50	5	308	3,31E-04	8,24E-01	22,9	4,02E-04	4,02E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,75E-06		0,462
5	82,5	95,5	13,00	5	281	3,63E-04	9,32E-01	22,9	3,90E-04	3,90E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,64E-06		0,506
6	82,0	95,5	13,50	5	260	3,92E-04	9,68E-01	22,9	4,05E-04	4,05E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,79E-06		0,547
7	81,0	95,5	14,50	5	241	4,23E-04	1,04E+00	22,9	4,07E-04	4,07E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,80E-06		0,590
8	78,5	95,5	17,00	5	198	5,15E-04	1,22E+00	22,9	4,23E-04	4,23E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,95E-06		0,719
9	77,0	95,5	18,50	5	183	5,57E-04	1,33E+00	22,9	4,20E-04	4,20E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,93E-06		0,778
10	75,5	95,5	20,00	5	175	5,83E-04	1,43E+00	22,9	4,07E-04	4,07E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,80E-06		0,813
11	74,0	95,5	21,50	5	159	6,42E-04	1,54E+00	22,9	4,16E-04	4,16E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,89E-06		0,895
12	71,5	95,5	24,00	5	141	7,23E-04	1,72E+00	22,9	4,21E-04	4,21E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,93E-06		1,009
13	67,6	95,5	27,90	5	124	8,23E-04	2,00E+00	22,9	4,11E-04	4,11E-06	9,35E-01	1,0E+00	3,84E-06		1,148
14	64,0	95,5	31,50	5	105	9,71E-04	2,26E+00	22,9	4,30E-04	4,30E-06	9,35E-01	1,0E+00	4,02E-06		1,355
15	60,5	95,5	35,00	5	93	1,10E-03	2,51E+00	22,9	4,37E-04	4,37E-06	9,35E-01	1,0E+00	4,08E-06		1,530
16	59,5	95,5	36,00	5	83	1,23E-03	2,58E+00	22,9	4,76E-04	4,76E-06	9,35E-01	1,0E+00	4,45E-06		1,714

Tablica 7-4. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 38 – per – rp

Mjerenje	Manometar ***H1***	Manometar ***H2***	Udaljenost manometra ***h***	Volumen pražnjenja ***Q***	Vrijeme pražnjenja ***T***	Brzina istjecanja ***v***	Hidraulički gradijent ***i***	Temperatura vode ***T***	Hidraulička vodljivost ***k***	Hidraulička vodljivost ***k***	Viskozitet vode pri test temp. ***μ***	Viskozitet vode ***μ- 20°C***	Korigirana hidraulička vodljivost ***k***	Osrednjena hidraulička vodljivost	Reynoldsov broj R_e
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm^3)	(s)	(m/s)	/	ºC	(cm/s)	(m/s)	(Pa·s)	(Pa·s)	m/s		/
1	99,3	99,5	0,20	10	81	2,52E-03	1,43E-02	17,2	1,76E-01	1,76E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,70E-03		3,514
2	99,1	99,4	0,30	10	50	4,08E-03	2,15E-02	17,2	1,90E-01	1,90E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,83E-03		5,692
3	98,9	99,4	0,50	10	37	5,51E-03	3,58E-02	17,2	1,54E-01	1,54E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,49E-03		7,692
4	98,8	99,3	0,50	10	30	6,80E-03	3,58E-02	17,2	1,90E-01	1,90E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,83E-03		9,487
5	98,5	99,3	0,80	10	24	8,50E-03	5,73E-02	17,2	1,48E-01	1,48E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,43E-03		11,858
6	98,2	99,1	0,90	20	41	9,95E-03	6,45E-02	17,2	1,54E-01	1,54E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,49E-03		13,883
7	98,0	99,0	1,00	20	37	1,10E-02	7,17E-02	17,2	1,54E-01	1,54E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,49E-03		15,384
8	97,8	99,0	1,20	20	33	1,24E-02	8,60E-02	17,2	1,44E-01	1,44E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,39E-03		17,248
9	97,6	99,0	1,40	20	30	1,36E-02	1,00E-01	17,2	1,36E-01	1,36E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,31E-03		18,973
10	97,4	98,9	1,50	20	27	1,51E-02	1,08E-01	17,2	1,41E-01	1,41E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,36E-03		21,081
11	97,1	98,8	1,70	30	37	1,65E-02	1,22E-01	17,2	1,36E-01	1,36E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,31E-03		23,075
12	96,9	98,8	1,90	30	35	1,75E-02	1,36E-01	17,2	1,28E-01	1,28E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,24E-03		24,394
13	96,7	98,7	2,00	30	32	1,91E-02	1,43E-01	17,2	1,33E-01	1,33E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,29E-03		26,681
14	96,3	98,6	2,30	40	39	2,09E-02	1,65E-01	17,2	1,27E-01	1,27E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,23E-03		29,189
15	96,0	98,6	2,60	40	36	2,27E-02	1,86E-01	17,2	1,22E-01	1,22E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,18E-03		31,622
16	95,6	98,5	2,90	40	32	2,55E-02	2,08E-01	17,2	1,23E-01	1,23E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,19E-03		35,575
17	94,8	98,3	3,50	40	27	3,02E-02	2,51E-01	17,2	1,20E-01	1,20E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,16E-03		42,163
18	94,3	98,2	3,90	50	32	3,19E-02	2,80E-01	17,2	1,14E-01	1,14E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,10E-03		44,468
19	93,7	98,1	4,40	50	29	3,52E-02	3,15E-01	17,2	1,12E-01	1,12E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,08E-03		49,068
20	93,2	98,0	4,80	60	32	3,83E-02	3,44E-01	17,2	1,11E-01	1,11E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,08E-03		53,362
21	92,6	97,9	5,30	60	30	4,08E-02	3,80E-01	17,2	1,07E-01	1,07E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,04E-03		56,919
22	91,6	97,6	6,00	60	28	4,37E-02	4,30E-01	17,2	1,02E-01	1,02E-03	9,68E-01	1,0E+00	9,83E-04		60,985

Tablica 7-5. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 40 – per – rp1

Mjerenje	Manometar ***H1***	Manometar ***H2***	Udaljenost manometra ***h***	Volumen pražnjenja ***Q***	Vrijeme pražnjenja ***T***	Brzina istjecanja ***v***	Hidraulički gradijent ***i***	Temperatur a vode ***T***	Hidraulička vodljivost ***k***	Hidraulička vodljivost ***k***	Viskozitet vode pri test temp. ***μ***	Viskozitet vode ***μ-20°C***	Korigirana hidraulička vodljivost ***k***	Osrednjena hidraulička vodljivost	Reynoldsov broj R_e
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm^3)	(s)	(m/s)	/	ºC	(cm/s)	(m/s)	(Pa·s)	(Pa·s)	m/s		/
1	94,7	96,1	1,40	10	112	1,82E-03	1,00E-01	21,4	1,82E-02	1,82E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,76E-04		2,541
2	94,0	96,1	2,10	10	74	2,76E-03	1,51E-01	21,4	1,83E-02	1,83E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,77E-04		3,846
3	93,2	95,9	2,70	10	57	3,58E-03	1,94E-01	21,4	1,85E-02	1,85E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,79E-04		4,993
4	92,6	95,7	3,10	10	50	4,08E-03	2,22E-01	21,4	1,84E-02	1,84E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,78E-04		5,692
5	91,9	95,5	3,60	10	43	4,74E-03	2,58E-01	21,4	1,84E-02	1,84E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,78E-04		6,619
6	91,0	95,3	4,30	10	38	5,37E-03	3,08E-01	21,4	1,74E-02	1,74E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,68E-04		7,489
7	90,2	95,2	5,00	10	33	6,18E-03	3,58E-01	21,4	1,72E-02	1,72E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,67E-04		8,624
8	89,6	95,1	5,50	10	31	6,58E-03	3,94E-01	21,4	1,67E-02	1,67E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,61E-04		9,181
9	88,8	95,0	6,20	10	28	7,29E-03	4,44E-01	21,4	1,64E-02	1,64E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,59E-04		10,164
10	88,1	95,0	6,90	10	25	8,16E-03	4,95E-01	21,4	1,65E-02	1,65E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,60E-04		11,384
11	87,3	95,0	7,70	10	24	8,50E-03	5,52E-01	21,4	1,54E-02	1,54E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,49E-04		11,858
12	86,5	94,9	8,40	10	23	8,87E-03	6,02E-01	21,4	1,47E-02	1,47E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,42E-04		12,374
13	85,7	94,8	9,10	10	22	9,27E-03	6,52E-01	21,4	1,42E-02	1,42E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,37E-04		12,936
14	85,0	94,7	9,70	10	22	9,27E-03	6,95E-01	21,4	1,33E-02	1,33E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,29E-04		12,936
15	84,3	94,7	10,40	10	21	9,71E-03	7,46E-01	21,4	1,30E-02	1,30E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,26E-04		13,552
16	83,6	94,7	11,10	10	20	1,02E-02	7,96E-01	21,4	1,28E-02	1,28E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,24E-04		14,230
17	83,0	94,6	11,60	10	19	1,07E-02	8,32E-01	21,4	1,29E-02	1,29E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,25E-04		14,979
18	82,1	94,6	12,50	10	19	1,07E-02	8,96E-01	21,4	1,20E-02	1,20E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,16E-04		14,979
19	81,3	94,5	13,20	10	19	1,07E-02	9,46E-01	21,4	1,13E-02	1,13E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,10E-04		14,979
20	79,8	94,4	14,60	20	35	1,17E-02	1,05E+00	21,4	1,11E-02	1,11E-04	9,68E-01	1,0E+00	1,08E-04		16,263
21	78,2	94,3	16,10	20	35	1,17E-02	1,15E+00	21,4	1,01E-02	1,01E-04	9,68E-01	1,0E+00	9,77E-05		16,263
22	75,1	94,1	19,00	30	47	1,30E-02	1,36E+00	21,4	9,56E-03	9,56E-05	9,68E-01	1,0E+00	9,25E-05		18,166
23	71,9	94,0	22,10	30	43	1,42E-02	1,58E+00	21,4	8,98E-03	8,98E-05	9,68E-01	1,0E+00	8,69E-05		19,856
24	68,6	93,9	25,30	30	41	1,49E-02	1,81E+00	21,4	8,23E-03	8,23E-05	9,68E-01	1,0E+00	7,96E-05		20,824
														3,60E-04	

Tablica 7-6. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 40 – per – rp2

Mjerenje	Manometar ***H1***	Manometar ***H2***	Udaljenost manometara ***h***	Volumen pražnjenja ***Q***	Vrijeme pražnjenja ***T***	Brzina istjecanja ***v***	Hidraulički gradijent ***i***	Temperatura vode ***T***	Hidraulička vodljivost ***k***	Hidraulička vodljivost ***k***	Viskozitet vode pri test temp. ***μ***	Viskozitet vode ***μ- 20°C***	Korigirana hidraulička vodljivost ***k***	Osrednjena hidraulička vodljivost	Reynoldsov broj R_e
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm^3)	(s)	(m/s)	/	ºC	(cm/s)	(m/s)	(Pa·s)	(Pa·s)	m/s		/
1	97,4	97,5	0,10	10	147	1,39E-03	7,17E-03	21,4	1,94E-01	1,94E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,87E-03		1,936
2	96,9	97,1	0,20	10	97	2,10E-03	1,43E-02	21,4	1,47E-01	1,47E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,42E-03		2,934
3	96,1	96,4	0,30	20	110	3,71E-03	2,15E-02	21,4	1,72E-01	1,72E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,67E-03		5,174
4	95,7	96,1	0,40	20	79	5,16E-03	2,87E-02	21,4	1,80E-01	1,80E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,74E-03		7,205
5	95,3	95,8	0,50	20	63	6,48E-03	3,58E-02	21,4	1,81E-01	1,81E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,75E-03		9,035
6	95,0	95,6	0,60	20	51	8,00E-03	4,30E-02	21,4	1,86E-01	1,86E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,80E-03		11,161
7	94,9	96,0	1,10	30	48	1,28E-02	7,89E-02	21,4	1,62E-01	1,62E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,56E-03		17,787
8	94,7	95,9	1,20	30	43	1,42E-02	8,60E-02	21,4	1,65E-01	1,65E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,60E-03		19,856
9	94,5	95,8	1,30	30	40	1,53E-02	9,32E-02	21,4	1,64E-01	1,64E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,59E-03		21,345
10	94,3	95,7	1,40	30	37	1,65E-02	1,00E-01	21,4	1,65E-01	1,65E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,59E-03		23,075
11	94,1	95,7	1,60	40	47	1,74E-02	1,15E-01	21,4	1,51E-01	1,51E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,46E-03		24,221
12	93,8	95,5	1,70	40	42	1,94E-02	1,22E-01	21,4	1,59E-01	1,59E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,54E-03		27,104
13	93,7	95,5	1,80	40	41	1,99E-02	1,29E-01	21,4	1,54E-01	1,54E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,49E-03		27,766
14	93,5	95,5	2,00	40	39	2,09E-02	1,43E-01	21,4	1,46E-01	1,46E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,41E-03		29,189
15	93,2	95,3	2,10	40	38	2,15E-02	1,51E-01	21,4	1,43E-01	1,43E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,38E-03		29,958
16	93,0	95,2	2,20	50	44	2,32E-02	1,58E-01	21,4	1,47E-01	1,47E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,42E-03		32,341
17	92,9	95,2	2,30	50	43	2,37E-02	1,65E-01	21,4	1,44E-01	1,44E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,39E-03		33,093
18	92,5	95,0	2,50	50	40	2,55E-02	1,79E-01	21,4	1,42E-01	1,42E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,38E-03		35,575
19	92,2	94,9	2,70	50	38	2,68E-02	1,94E-01	21,4	1,39E-01	1,39E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,34E-03		37,447
20	91,8	94,7	2,90	50	35	2,91E-02	2,08E-01	21,4	1,40E-01	1,40E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,36E-03		40,657
21	91,2	94,2	3,00	50	33	3,09E-02	2,15E-01	21,4	1,44E-01	1,44E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,39E-03		43,121
22	90,5	94,1	3,60	50	29	3,52E-02	2,58E-01	21,4	1,36E-01	1,36E-03	9,68E-01	1,0E+00	1,32E-03		49,068
23	89,5	93,6	4,10	50	26	3,92E-02	2,94E-01	21,4	1,33E-01	1,33E-03	9,68E-01	1,00E+00	1,29E-03		54,730
														1,50E-03	

Tablica 7-7. Rezultati ispitivanja permeametrom uzorka 43 – per – rpi

Mjerenje	Manometar ***H1***	Manometar ***H2***	Udaljenost manometara ***h***	Volumen pražnjenja ***Q***	Vrijeme pražnjenja ***T***	Brzina istjecanja ***v***	Hidraulički gradijent ***i***	Temperatura vode ***T***	Hidraulička vodljivost ***k***	Hidraulička vodljivost ***k***	Viskozitet vode pri test temp. ***μ***	Viskozitet vode ***μ- 20°C***	Korigirana hidraulička vodljivost ***k***	Osrednjena hidraulička vodljivost	Reynoldsov broj R_e
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm^3)	(s)	(m/s)	/	ºC	(cm/s)	(m/s)	(Pa·s)	(Pa·s)	m/s		/
1	98,0	98,5	0,50	10	81	2,52E-03	3,58E-02	18,5	7,03E-02	7,03E-04	9,68E-01	1,00E+00	6,80E-04	7,63E-04	3,514
2	97,6	98,2	0,60	10	62	3,29E-03	4,30E-02	18,5	7,65E-02	7,65E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,40E-04		4,590
3	97,4	98,1	0,70	10	59	3,46E-03	5,02E-02	18,5	6,89E-02	6,89E-04	9,68E-01	1,00E+00	6,66E-04		4,824
4	97,1	98,0	0,90	10	40	5,10E-03	6,45E-02	18,5	7,91E-02	7,91E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,64E-04		7,115
5	96,9	97,9	1,00	10	34	6,00E-03	7,17E-02	18,5	8,37E-02	8,37E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,09E-04		8,370
6	96,7	97,8	1,10	20	62	6,58E-03	7,89E-02	18,5	8,35E-02	8,35E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,07E-04		9,181
7	96,5	97,7	1,20	20	52	7,85E-03	8,60E-02	18,5	9,12E-02	9,12E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,82E-04		10,946
8	96,3	97,7	1,40	20	48	8,50E-03	1,00E-01	18,5	8,47E-02	8,47E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,19E-04		11,858
9	96,1	97,6	1,50	20	42	9,71E-03	1,08E-01	18,5	9,03E-02	9,03E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,74E-04		13,552
10	95,9	97,6	1,70	20	40	1,02E-02	1,22E-01	18,5	8,37E-02	8,37E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,09E-04		14,230
11	95,7	97,5	1,80	20	37	1,10E-02	1,29E-01	18,5	8,55E-02	8,55E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,26E-04		15,384
12	95,5	97,5	2,00	20	35	1,17E-02	1,43E-01	18,5	8,13E-02	8,13E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,86E-04		16,263
13	95,3	97,4	2,10	30	47	1,30E-02	1,51E-01	18,5	8,65E-02	8,65E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,37E-04		18,166
14	95,1	97,4	2,30	30	45	1,36E-02	1,65E-01	18,5	8,25E-02	8,25E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,98E-04		18,973
15	94,9	97,3	2,40	30	43	1,42E-02	1,72E-01	18,5	8,27E-02	8,27E-04	9,68E-01	1,00E+00	8,00E-04		19,856
16	94,5	97,2	2,70	30	40	1,53E-02	1,94E-01	18,5	7,91E-02	7,91E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,64E-04		21,345
17	94,3	97,2	2,90	30	37	1,65E-02	2,08E-01	18,5	7,96E-02	7,96E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,69E-04		23,075
18	94,1	97,1	3,00	30	36	1,70E-02	2,15E-01	18,5	7,91E-02	7,91E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,64E-04		23,716
19	93,9	97,1	3,20	30	35	1,75E-02	2,29E-01	18,5	7,62E-02	7,62E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,37E-04		24,394
20	93,5	97,0	3,50	40	43	1,90E-02	2,51E-01	18,5	7,56E-02	7,56E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,31E-04		26,474
21	93,1	96,9	3,80	40	40	2,04E-02	2,72E-01	18,5	7,49E-02	7,49E-04	9,68E-01	1,00E+00	7,24E-04		28,460
22	92,5	96,8	4,30	40	38	2,15E-02	3,08E-01	18,5	6,97E-02	6,97E-04	9,68E-01	1,00E+00	6,74E-04		29,958
23	92,0	96,7	4,70	40	34	2,40E-02	3,37E-01	18,5	7,12E-02	7,12E-04	9,68E-01	1,00E+00	6,89E-04		33,482
24	91,4	96,5	5,10	50	39	2,62E-02	3,66E-01	18,5	7,15E-02	7,15E-04	9,68E-01	1,00E+00	6,92E-04		36,487

Prilog 2. Granulometrijska analiza uzorka 21 – per – grus 1+2+3

Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
HR-10000 Zagreb, Pierottijeva 6, p.p. 679

Zavod za rudarstvo i geotehniku
GEOMEHANIČKI LABORATORIJ
Tel./Fax: +385 1 48 36 061

IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU
Granulometrijski sastav tla

Radni nalog: 16-009 Datum ispitivanja: 02.02.2017.

Naručitelj: RGNF

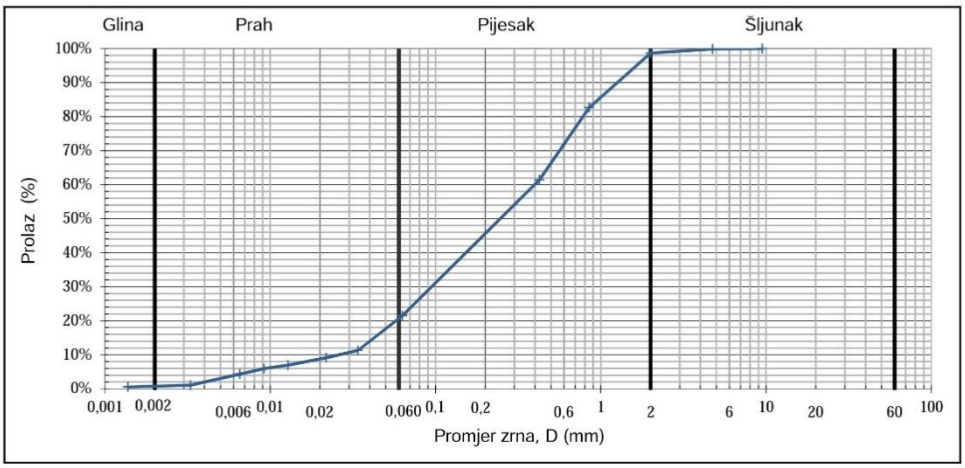
Projekt: Disertacija Pavičić

Lokacija: Žumberak, 21-per-grus 1+2+3

Uzorak br.: 16-009-003 Bušotina: - Dubina: - m

Opis uzorka: -

Metoda ispitivanja: ASTM D 422



G	**Ukupno**	**1,31**	%
	Krupan	0,00	%
	Srednji	0,08	%
	Sitan	1,24	%
S	**Ukupno**	**77,19**	%
	Krupan	17,18	%
	Srednji	20,01	%
	Sitan	40,00	%
M-C	**Ukupno**	**21,50**	%

D10	**0,026**	mm
D30	**0,095**	mm
D60	**0,412**	mm

C_C	**0,84**
C_U	**15,86**

Masa uzorka:	**905,4**	g
Gustoća čvrstih čestica:	-	Mg/m^3

Klasifikacijska oznaka
Prahoviti, glinoviti pijesak SC-SM

Napomena: -

Analiza: Sijanje i are. Antikoagulans: Sodium hexametaphosphate

Hidrometar: 151H

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditeljica odjela :
Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović	16-009-003PSA 19.4.2017	Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

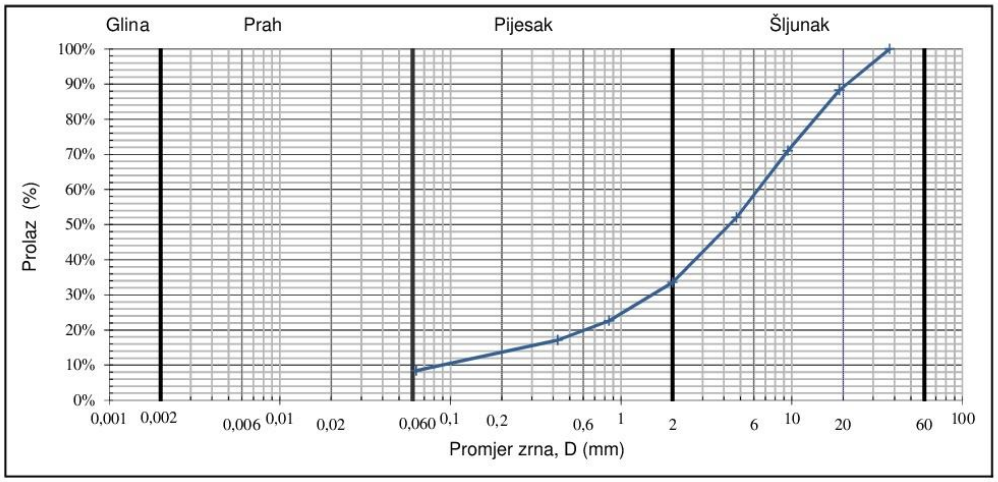
Prilog 3. Granulometrijska analiza uzorka 38 – per – rp

Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
HR-10000 Zagreb, Pierottijeva 6, p.p. 390

Zavod za rudarstvo i geotehniku
GEOMEHANIČKI LABORATORIJ
Tel./Fax: +385 1 48 36 061

IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU
Granulometrijski sastav tla

Radni nalog:	16-009	Datum ispitivanja:	03.02.2017.
Naručitelj:	RGNF		
Projekt:	Disertacija Pavičić		
Lokacija:	Žumberak		
Uzorak br.:	16-009-009	Bušotina: -	Dubina: - m
Opis uzorka:	-		
Metoda ispitivanja:	ASTM D 422		



G	**Ukupno**	**66,46**	%
	Krupan	11,14	%
	Srednji	30,66	%
	Sitan	24,66	%
S	**Ukupno**	**25,12**	%
	Krupan	13,54	%
	Srednji	6,00	%
	Sitan	5,58	%
M-C	**Ukupno**	**8,42**	%

D10	**0,090**	mm
D30	**1,626**	mm
D60	**6,300**	mm

C_C	**4,66**
C_U	**70,00**

Masa uzorka:	**1254,5**	g
Gustoća čvrstih čestica:	**-**	Mg/m^3

Klasifikacijska oznaka
Slabo graduirani šljunak s pijeskom GP

Napomena: -

Analiza: Sijanje Antikoagulans: -

Hidrometar: -

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditeljica odjela :
Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović	16-009-009PSA 27.2.2017.	Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

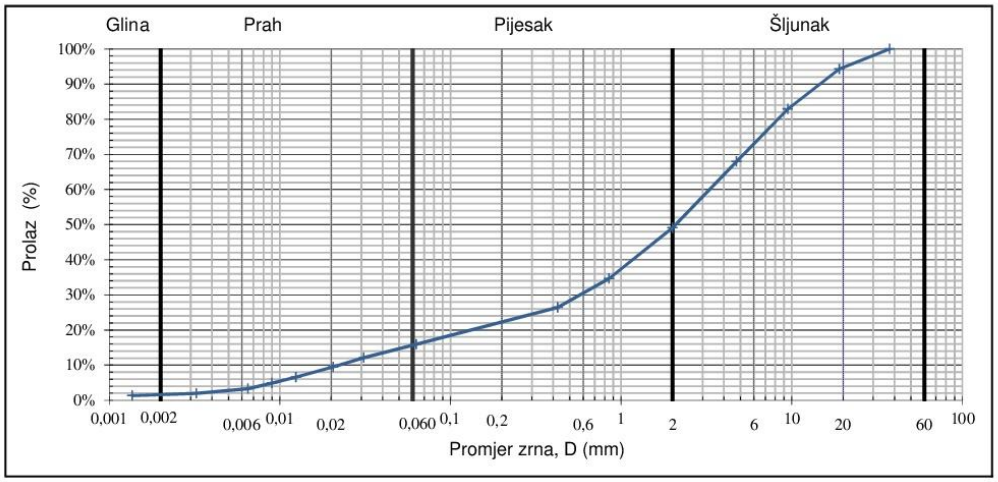
Prilog 4. Granulometrijska analiza uzorka 40 – per – rp1

Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
HR-10002 Zagreb, Pierottijeva 6, p.p. 390

Zavod za rudarstvo i geotehniku
GEOMEHANIČKI LABORATORIJ
Tel./Fax: +385 1 48 36 061

IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU
Granulometrijski sastav tla

Radni nalog:	16-009	Datum ispitivanja:	03.02.2017.
Naručitelj:	RGNF		
Projekt:	Disertacija Pavičić		
Lokacija:	Žumberak, 40-per-rp1		
Uzorak br.:	16-009-010	Bušotina: -	Dubina: - m
Opis uzorka:	-		
Metoda ispitivanja:	ASTM D 422		



G	**Ukupno**	**50,89**	%
	Krupan	5,37	%
	Srednji	21,63	%
	Sitan	23,89	%
S	**Ukupno**	**33,14**	%
	Krupan	19,11	%
	Srednji	8,00	%
	Sitan	6,03	%
M-C	**Ukupno**	**15,96**	%

D10	**0,023**	mm
D30	**0,609**	mm
D60	**3,300**	mm

C_C	**4,88**
C_U	**143,48**

Masa uzorka:	**1510,8**	g
Gustoća čvrstih čestica:	**-**	Mg/m^3

Klasifikacijska oznaka
Prahoviti, glinoviti šljunak s pijeskom GC-GM

Napomena: -

Analiza: Sijanje i areom. Antikoagulans: Sodium hexametaphosphate

Hidrometar: 151H

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditeljica odjela :
Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović	16-009-010PSA 19.4.2017.	Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

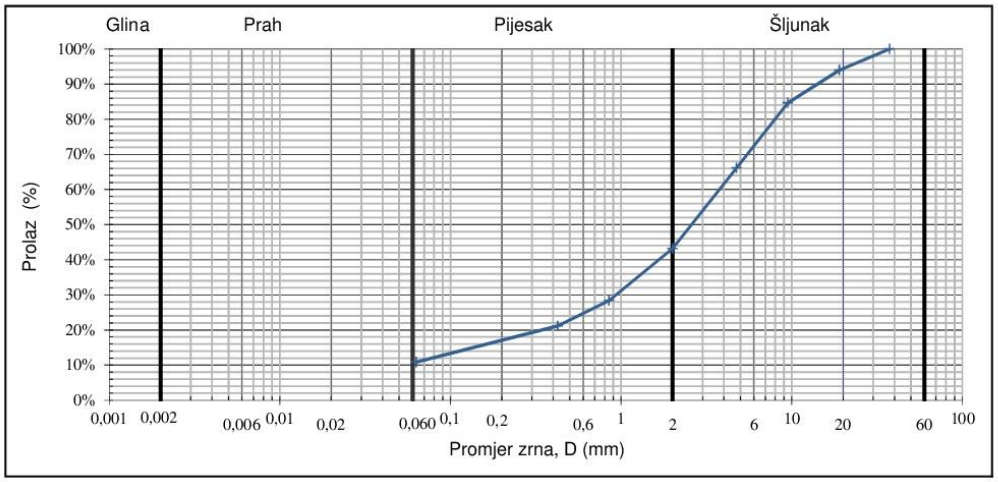
Prilog 5. Granulometrijska analiza uzorka 40 – per – rp2

Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
HR-10002 Zagreb, Pierottijeva 6, p.p. 390

Zavod za rudarstvo i geotehniku
GEOMEHANIČKI LABORATORIJ
Tel./Fax: +385 1 48 36 061

IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU
Granulometrijski sastav tla

Radni nalog:	16-009	Datum ispitivanja:	03.02.2017.
Naručitelj:	RGNF		
Projekt:	Disertacija Pavičić		
Lokacija:	Žumberak		
Uzorak br.:	16-009-011	Bušotina: -	Dubina: - m
Opis uzorka:	-		
Metoda ispitivanja:	ASTM D 422		



G	**Ukupno**	**56,81**	%
	Krupan	5,74	%
	Srednji	23,23	%
	Sitan	27,83	%
S	**Ukupno**	**32,34**	%
	Krupan	18,89	%
	Srednji	7,31	%
	Sitan	6,14	%
M-C	**Ukupno**	**10,86**	%

D10	-	mm
D30	**0,976**	mm
D60	**3,700**	mm

C_C	-
C_U	-

Masa uzorka:	**1302,1**	g
Gustoća čvrstih čestica:	-	Mg/m^3

Klasifikacijska oznaka
Prahoviti, glinoviti šljunak s pijeskom GC-GM

Napomena: -

Analiza: Sijanje Antikoagulans: -

Hidrometar: -

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditeljica odjela :
Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović	16-009-011PSA 27.2.2017.	Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

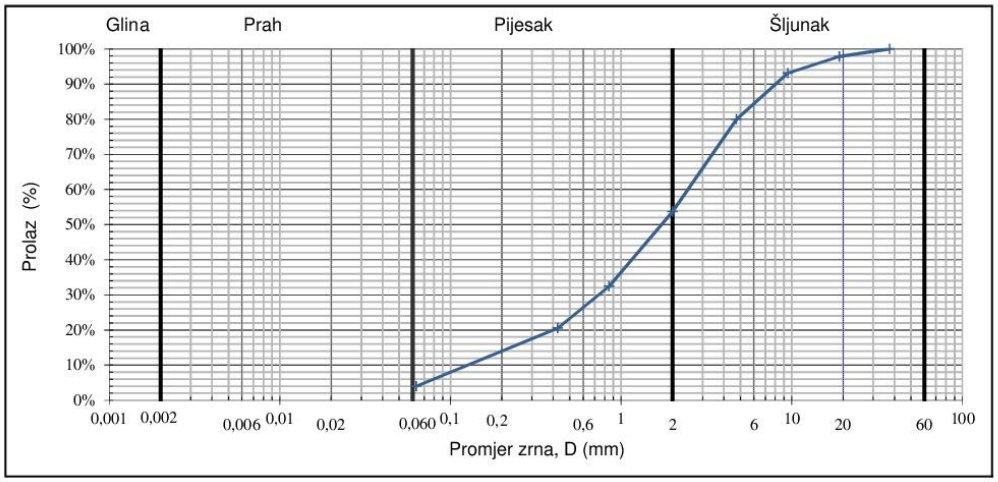
Prilog 6. Granulometrijska analiza uzorka 43 – per – rpi

Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
HR-10002 Zagreb, Pierottijeva 6, p.p. 390

Zavod za rudarstvo i geotehniku
GEOMEHANIČKI LABORATORIJ
Tel./Fax: +385 1 48 36 061

IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU
Granulometrijski sastav tla

Radni nalog:	16-009	Datum ispitivanja:	01.02.2017.
Naručitelj:	RGNF		
Projekt:	Disertacija Pavičić		
Lokacija:	Žumberak		
Uzorak br.:	16-009-012	Bušotina: -	Dubina: - m
Opis uzorka:	-		
Metoda ispitivanja:	ASTM D 422		



G	**Ukupno**	**46,27**	%
	Krupan	2,05	%
	Srednji	13,45	%
	Sitan	30,77	%
S	**Ukupno**	**49,75**	%
	Krupan	28,30	%
	Srednji	11,43	%
	Sitan	10,02	%
M-C	**Ukupno**	**3,98**	%

D10	**0,130**	mm
D30	**0,764**	mm
D60	**2,400**	mm

C_C	**1,87**
C_U	**18,46**

Masa uzorka:	**1378,3**	g
Gustoća čvrstih čestica:	**-**	Mg/m^3

Klasifikacijska oznaka
Dobro graduirani pijesak sa šljunkom SW

Napomena: -

Analiza: Sijanje Antikoagulans: -

Hidrometar: -

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditeljica odjela :
Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović	16-009-012PSA 27.02.2017.	Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditeljice odjela.

8. ZAKLJUČAK

Dolomitni grus istraživanoga područja Žumberka je nastao u rasjednim zonama gdje se odvijalo trošenje dolomitnih stijena, koje su dominantne na istraživanom području, te je došlo do stvaranja dolomitnog grusa. Dolomitni grus u tim zonama nam je s hidrogeološkog stajališta jako zanimljiv jer je povezan s cirkulacijom vode. Većina oborina upravo tim putem prolazi u podzemlje gdje prihranjuje vodonosnike. Također bilo bi zanimljivo istražiti i odrediti geometriju dolomitnog grusa te dubine do čvrste stijene.

Odabir reprezentativnih područja za prikupljanje uzoraka je određen terenskom prospekcijom. Pri prikupljanju je korišten geološki čekić, a na rastresitijim mjestima obična lopatica. Takav jednostavan način prikupljanja s jednog mjesta (točkasto prikupljanje) je mogao utjecati na rezultate hidrauličkih vodljivosti. Kako bi vrijednosti hidrauličkih vodljivosti iz laboratorija mogle biti što bliže vrijednostima s terena, trebalo bi prikupiti uzorke s više mjesta na istoj točki na terenu. Nakon toga bi trebalo i obaviti više ispitivanja permeametrom uzorka s iste točke na terenu kako bi se uprosječila vrijednost hidrauličke vodljivosti. No, rezultati ispitivanja permeametrom se generalno u velikom postotku slažu s brojevima dobivenim empirijskim formulama (Tablica 7 – 2.). Time je potvrđeno da je metoda permeametrom sa stalnom razinom (*Constant Head*) odgovarajuća metoda za računanje hidrauličkih vrijednosti. Iz tablica 7.3. do 7.7. je vidljivo da povećavanjem razlike potencijala se u četiri od pet uzoraka prešlo iz laminarnog tečenja u turbulentni, odnosno došlo je do prestanka valjanosti Darcyeva zakona. O tome svjedoče Reynoldsovi brojevi R_e koji prelaze vrijednost 10 što je vidljivo u tablicama 7.3. do 7.7.

Metoda permeametrom sa stalnom razinom je dokazala da se mogu dobiti vrijednosti dovoljno blizu vrijednostima dobivenim empirijskim formulama. To je bitna informacija za daljnja istraživanja gdje bi se rezultati permeametra mogli usporediti s metodom pokusnog crpljenja kao financijski izdašnijom, ali i puno preciznijom metodom za određivanje hidrauličke vodljivosti. Također, bilo bi zanimljivo pogledati prostorno kao i dubinsko rasprostiranje dolomitnog grusa. Bušenjem i pokusnim crpljenjem bi se dobio bolji uvid u dimenzije dolomitnog grusa čime bi se uz određivanje geometrije i dubine do koje doseže mogla bolje definirati hidrogeološka uloga te mogućnost korištenja podzemne vode iz takvih vodonosnika u području Žumberka.

9. LITERATURA

9.1. Objavljeni radovi

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

BAČANI, A. (2006): Hidrogeologija I. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 1-198, Zagreb

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

BOGNAR, A. (1980): Tipovi reljefa kontinentalnog dijela Hrvatske. Spomen-Zbornik o 30. obljetnici Geografskog društva Hrvatske, Zagreb, pp. 39-60.

BUKOVAC, J., POLJAK, M., ŠUŠNJAR, M., ČAKALO, M. (1984): Osnovna geološka kartaSFRJ, 1:100 000, list Črnomelj L 33-91, Beograd.

BUKOVAC, J., POLJAK, M., ŠUŠNJAR, M., ČAKALO, M. (1984): Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100 000, Tumač za list Črnomelj L 33-91, Beograd

BUKOVAC, J. & SOKAČ, B. (1989): O gornjotrijaskim i donjolijaskim vapnencima sjeverne padine Gorjanaca, južno od Kostanjevice (JI Slovenija) i njihovom značenju za tumačenje geotektonskih odnosa u širem prostoru. Geol. Vjesnik, Vol. 42, Zagreb, pp. 7-13.

BUKOVAC, J., GRGASOVIĆ, T., GLOVACKI JERNEJ, Ž., JERINIĆ, G., GALOVIĆ, I., PRTOLJAN, B., (1995): Litostratigrafska raščlamba dolomitnih naslaga jugozapadnog Žumberka u okviru radova na geološkoj karti Republike Hrvatske 1:50 000. Zbornik radova 1. Hrvatskog geološkog kongresa Opatija, Zagreb, pp. 137-143.
GORJANOVIĆ-KRAMBERGER, D. (1894): Geologija gore Samoborske i Žumberačke. RadJAZU, KNJIGA CXX, Zagreb, pp. 1-82.0

GRGASOVIĆ, T. (1998): Stratigrafija gornjotrijaskih naslaga Žumberka. Magistarski rad, PMF, Zagreb, pp. 136.

FORD, D. C. & WILLIAMS, P. W. (1989): Karst geomorphology and hydrology. Unwin-Hyman, London, 601 pp.

HERAK, M. (1956): Geologija Samoborskog gorja. Acta geologica 1, JAZU, Zagreb.

HERAK, M., JAMIČIĆ, D., ŠIMUNIĆ, A., BUKOVAC, J. (1990): The northern boundary ofthe Dinarides (Sjeverna granica Dinarida), Acta Geologica, 20/1, (Prirodoslovna istraživanja,60), Zagreb, pp. 5-27.

HERAK, M. (1991): Dinaridi-mobilistički osvrt na genezu i strukturu. Acta Geologica, 21/2,(Prirodoslovna istraživanja, 63), Zagreb, pp. 1-83 (35-117).

KÖPPEN, W., 1918: Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle). Petermanns Geogr. Mitt., 64, 193-203, 243-248. map 1 and map 2

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

MAYER, D. (1996): Zalihe pitkih voda u Republici Hrvatskoj. Izlaganje na znanstvenom skupu, RGNF, Sveučilište u Zagrebu.

MILETIĆ, P., HEINRICH-MILETIĆ, M. (1981): Uvod u kvantitativnu hidrogeologiju. 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.

PAMIĆ, J. & TOMLJENOVIĆ, B. (1998): Basic geologic data from the Croatian part of the Zagorje-Mid-Transdanubian Zone. -Acta Geologica Hungarica, 41/4, Budapest, pp. 389-400.

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

PLENIČAR, M., PREMRU, U., HERAK, M. (1975): Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100 000, list Novo Mesto L 33-79, Geološki zavod Ljubljana, Beograd.

PLENIČAR, M., PREMRU, U. (1977): Osnovna geološka karta SFRJ ,1:100.000, Tolmač za list Novo Mesto L 33-79, Geološki zavod Ljubljana, Savezni geološki zavod Beograd.

POLJAK, M. & RIŽNAR, I. (2005): Geologija južnog ruba krške kotline i sjevernih padina Žumberka. Zbornik sažetaka Znanstveno-stručnog skupa istraživača krša Žumberačke gore, Samobor: Park prirode "Žumberak-Samoborsko gorje" i Speleološki klub "Samobor", pp. 23.

PRELOGOVIĆ, E. (1969): Neotektonska kretanja u području između Orlice, Samoborske gore i Medvednice. Magistarski rad, PMF, Sveučilište u Zagrebu.

PRTOLJAN, B. (2001): Relations of thrust-fold and horizontal mechanism of the Mt.Žumberak part of the Savva nappe in northwestern Dinarides, West Croatia. Acta Geologica Hungarica, Vol. 44/1, Budapest, pp. 67-80.

SALOPEK, M. (1918): O srednjem trijasu Gregurić-Brijega u Samoborskoj gori i o njegovoj fauni. Djela JAZU 20, Zagreb.

SALOPEK, M (1936): O Ccefalopodnim vapnencima Gregurić Brijega u Samoborskoj gori. Prirodosl. Istraž. JAZU 20, Zagreb.

ŠIKIĆ, K., BASCH, O. I ŠIMUNIĆ A. (1972): Osnovna geološka karta, M 1:100000. List ZAGREB. Institut za geološka istraživanja, Zagreb

ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A. (1977): Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100 000, Tumač za list Zagreb L 33-80, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod Beograd.

TIŠLJAR, J. (2004): Sedimentologija klastičnih i silicijskih taložina. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 91-111, Zagreb

URUMOVIĆ, K. (2003): Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 266-272, Zagreb

URUMOVIĆ, K. (2013.) Parametarska kvantifikacija hidrogeoloških svojstava klastičnih naslaga na primjerima pokusnog polja u sjevernoj Hrvatskoj. Doktorski rad, RGNF, Sveučilište u Zagrebu

VUJNOVIĆ, T. (2010): Hidrogeološke značajke Parka prirode „Žumberak-Samoborskogorje“. Doktorska disertacija, RGNF, Sveučilište u Zagrebu

9.2. Neobjavljeni radovi

BUZJAK, N. (2001): Speleološke pojave u PP "Žumberak- Samoborsko gorje"

BUZJAK, N. (2006): Geomorfološke i speleomorfološke značajke Žumberačke gore i geoekološko vrednovanje endokrškog reljefa. Disertacija, PMF, Sveučilište u Zagrebu

KVASNIČKA, P. (2007): Mehanika tla; Interna skripta. RGNF, Sveučilište u Zagrebu.

9.3. Internet izvori

Ministrstvo za okolje in prostor(2016)
URL: http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/024899-jan2010.pdf(17.5.2017.)

Općenite informacije (2017)
URL: http://www.park-zumberak.hr/opcenite_informacije.html (13.5.2017.)

The United Nations World Water Development Report (2016)
URL: http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/(10.5.2017)

Uvodne informacije (2017)
URL: http://www.park-zumberak.hr/uvodne_informacije.html (13.5.2017.)

ZANINOVIĆ, K. (2008) Klimatski atlas Hrvatske
URL: http://klima.hr/razno/publikacije/klimatski_atlas_hrvatske.pdf(15.5.2017.)