In-situ testiranje pukotinskog vodonosnika crpljenjem

Vučković, Željko

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:169:993493

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

In-situ testiranje pukotinskog vodonosnika crpljenjem

Diplomski rad

Željko Vučković
GI369

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu Diplomski studij
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

IN-SITU TESTIRANJE PUKOTINSKOG VODONOSNIKA CRPLJENJEM

Željko Vučković

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Za potrebe vodoopskrbe Klinča Sela i okolnih sela u blizini naselja Gonjeva izbušen je zdenac Z-1/16. Zdencem je zahvaćen pukotinski vodonosnik izgrađen od trijaskih dolomita. Cilj rada je prikazati presjek in-situ metoda ispitivanja hidrogeoloških značajki pukotinskih vodonosnika s naglaskom na pokusno crpljenje, te reinterpretacija podataka pokusnog crpljenja metodama prikladnima za pukotinske vodonosnike uz prikaz teorijske osnove. U prvoj polovini ovog rada prikazane su osnovne značajke pukotinskih vodonosnika, in-situ metode testiranja i teoretske osnove o pokusnom crpljenju. Drugi dio rada prikazuje geografske, geološke i hidrogeološke značajke područja u kojem se nalazi zdenac, te reinterpretaciju podataka pokusnog crpljenja i usporedbu s rezultata proizašlih iz različitih metoda interpretacije.

Ključne riječi: pukotinski vodonosnici, pokusno crpljenje, Warren Root metoda, Moench metoda
Diplomski rad sadrži: 36 stranica, 22 slike, 7 tablica i 21 referencu
Jezik izvornika: hrvatski
Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb
Voditeljica: Izv. prof. dr. sc. Jelena Parlov, RGNf
Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Jelena Parlov, RGNf
Izv. prof. dr. sc. Željko Duić, RGNf
Izv. prof. dr. sc. Dario Perković, RGNf

Datum obrane: 15.01.2021.

University of Zagreb Master's Thesis
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

IN-SITU TESTING OF A FRACTURED AQUIFER BY PUMPING TEST

Željko Vučković

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department od Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Abstract

For the purposes of water supply of Klinča Selo and it's sorounding villages it was necessary to build well Z-1/16. The well was penetrated a fractured aquifer built of Triassic dolomites. Goal of this thesis is to present a intersection of in-situ methodes for testing hydrogeological characteristics of fractured aquifers with emphasis on pumping tests and reinterpretation of the pumping test data by methods suitable for fractured aquifers with a teoretical basis. In the first half of the thesis, the basic characteristics of fractured aquifers, in-situ testing methods and theoretical basis of pumping tests are presented. The second part of the thesis presents geographical, geological and hidrogeological characteristics of the area in which the well is located, as well as reinterpretation of pumping test data and a comparison with the results derived form different interpretation methods.

Key words: fissure aquifers, pumping test, Warren Root method, Moench method
The thesis contains: 36 pages, 22 images, 7 tables and 21 references
Original in: Croatia
Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb
Supervisor: Associate Professor Jelena Parlov, PhD
Reviewers: Associate Professor Jelena Parlov, PhD
Associate Professor Željko Duić, PhD
Associate Professor Dario Perković, PhD

Date of defence: January 15, 2021..

Sadržaj

1. UVOD..... 1
2. PUKOTINSKI VODONOSNICI..... 3
3. IN-SITU METODE TESTIRANJA..... 6
4. TESTIRANJE PUKOTINSKOG VODONOSNIKA CRPLJENJEM.....9
4.1. Metode interpretacije pokusnog crpljenja..... 11
4.2. Warren Root metoda.....12
4.3. Moench metoda..... 15
5. ZNAČAJKE TESTIRANOG PODRUČJA.....20
5.1. Geografske značajke.....20
5.2. Geološke značajke.....21
5.3. Hidrogeološke značajke..... 24
6. REINTERPRETACIJA REZULTATA POKUSNOG CRPLJENJA..... 28
6.1. Ulazni podaci.....28
6.2. Primjena Warren Root metode..... 32
6.3. Primjena Moench metode.....34
7. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK.....36
8. LITERATURA..... 37

Popis slika:

Slika 2.1. Shematski dijagram tečenja podzemne vode u vadoznoj zoni (Sighal i Gupta, 1999).....3

Slika 2.2. Postojanost diskontinuiteta (Singhal i Gupta, 1999).....4

Slika 2.3. Profili hrapavosti i odgovarajuće vrijednosti JCR (preuzeto iz ISMR, 1987)...4

Slika 3.1. Standardni Lugeonov test (Singhal i Gupta, 1999).....6

Slika 3.2. Modificirani Lugeonov test (Singhal i Gupta, 1999).....7

Slika 3.3. *Slug* test u završenom zdencu (Singhal i Gupta, 1999).....7

Slika 3.4. Prikaz sniženja vode nastalog uslijed crpljenja iz vodonosnika visoke (a) i niske (b) transmisivnosti..... 8

Slika 4.1. Slučaj zatvorenog vodonosnika.....11

Slika 4.2. Model dvostruke poroznosti.....12

Slika 4.3. Primjer analize podataka Warren Root metodom (*AquiferTest Pro 10.0 User's manual*)..... 14

Slika 5.1. Geografski položaj zdenca.....20

Slika 5.2. Zdenac Z-1/16.....20

Slika 5.3. Isječak OGK list Zagreb. *Oznake na karti: $P_{2,3}$ srednji-gornji perm: klastiti, karbonati i gips; T_1 donji trijas: klastiti i karbonati; T_3 gornji trijas:karbonati i klastiti; $K_{1,2}$ apt-turon: dijabazi, spiltiti; K_2 gornja kreda: vapnoviti i glinoviti lapori, šejlovi, kankareniti; Pc paleocen: klastiti i vapnenci; ${}_2M^2{}_2$ baden : klastiti, vapnenci i ugljen; ${}_1M^1{}_3$ sarmat: biokalkareniti, pjeskovito-laporoviti vapnenci; $M_3^{1,2}$ panon: pješčenjaci, konglomerati, brečokonglomerati, vapnenačke mikrobreče* (Šikić i dr., 1977).....21

Slika 5.4. Litološki i tehnički profil zdenca Z-1/16..... 25

Slika 5.5. Izmjereno sniženje u vremenu (konstant test) (GEOID-BEROŠ d.o.o., 2014.) 27

Slika 6.1. Prikaz vertikalnog zdenca i njegovih parametara..... 28

Slika 6.2. Početno sučelje *AquiferTest*-a..... 29

Slika 6.3. Sučelje "*Discharge*" u *AquiferTest*-u.....30

Slika 6.4. Sučelje "*Water levels and measurements*"..... 31

Slika 6.5. Sučelje "*Analysis*" u *AquiferTest*-u..... 32

Slika 6.6. Najbolje preklapanje izmjerenih podataka s Warren Root tipskom krivuljom 33

Slika 6.7. Krivulja sniženja s podacima koji najviše odgovaraju za Moench analizu..... 34

Popis Tablica:

Tablica 4.1 Vremenski interval očitanja piezometarske visine (sniženja) za vrijeme pokusnog crpljenja..... 10
Tablica 4.2. Hidrogeološki parametri pukotinskog vodonosnika.....12
Tablica 5.1. Crpljenje u koracima (Z-1/16).....26
Tablica 5.2. Pokusno crpljenje konstantnom količinom (Z-1/16).....26
Tablica 6.1. Ulazni podaci za *AquiferTest*.....28
Tablica 6.2. Hidrogeološki i statistički parametri korišteni u interpretaciji pokusnog crpljenja Warren Root metodom..... 33
Tablica 6.3. Veličine parametara unesenih i zaključanih u *AquiferTest*-u za Moench-ovu metodu..... 34

Popis korištenih oznaka i mjernih jedinica

Q (l/s)	izdašnost zdenca
T (m^2/s)	transmisivnost
Δs (m)	sniženje
K (m/s)	hidraulička vodljivost
b (m)	debljina vodonosnika
S (-)	koeficijent uskladištenja
r (m)	polumjer zdenca
r_D	bezdimenzionalna udaljenost
t_D	bezdimenzionalno vrijeme
h_D	bezdimenzionalno sniženje
σ	bezdimenzionalni parametar ležišta
SF	bezdimenzionalni parametar infiltracijskog sloja
K_S	hidraulička vodljivost inkrustacijskog sloja
K’	hidraulička vodljivost matriksa
b_S	debljina inkrustacijskog sloja
b’	debljina sloja
W_D	uskladištenje bušotine

1. UVOD

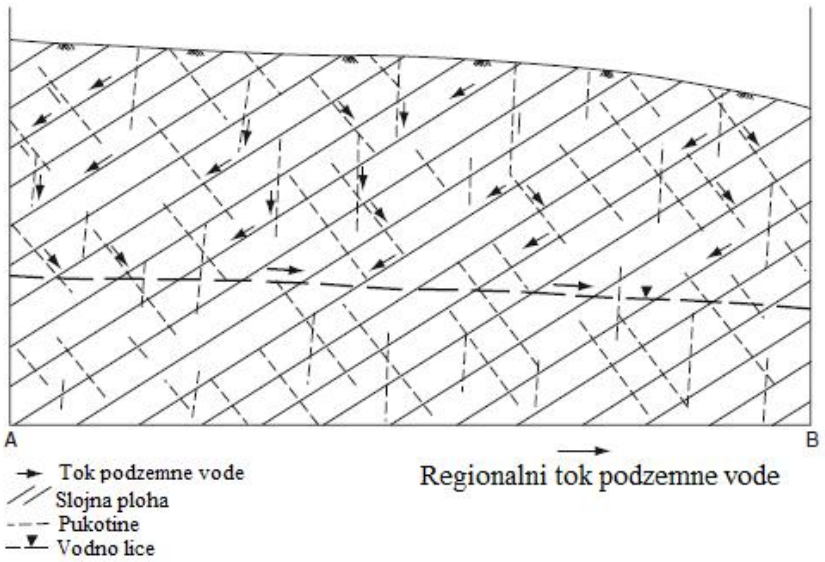
Hidrogeološke značajke vodonosnika možemo odrediti primjenom različitih metoda ispitivanja, laboratorijskih i terenskih. Odabir metode ovisi o cilju i razmjerima istraživanja. Laboratorijske metode su jeftinije i brže za razliku od terenskih ali ne daju točan odraz stanja proučavane formacije u cjelini. Laboratorijske metode su primjerice testiranje uzorka u permeametru sa stalnom ili promjenjivom razinom te proračun protoka na temelju zjevova pukotina, odnosno njihove hrapavosti. Prikladne su za rješavanje problema malih razmjera poput prodiranja vode u rudnike i geotehničkih istraživanja. U terenske metode testiranja ubrajamo metode ulijevanja, utiskivanja te pokusno crpljenje. Metode ulijevanja i utiskivanja prikladne su za testiranje manjeg volumena stijenske mase. Ukoliko je cilj pridobivanje reprezentativnih značajki vodonosnika tj. ukoliko je cilj istraživanja većih razmjera, poput razvoja i upravljanja podzemnim vodama na regionalnoj razini, ispitivanja se izvode metodama pokusnog crpljenja. Pomoću navedenih metoda dobivaju se parametri poput hidrauličke vodljivosti, propusnosti i uskladištenja.

Cilj rada je prikazati presjek in-situ metoda ispitivanja hidrogeoloških značajki pukotinskih vodonosnika s naglaskom na pokusno crpljenje. U pukotinskim vodonosnicima, za razliku od vodonosnika s međuzrnskom poroznosti, tečenje se dominantno odvija kroz sekundarnu poroznost tj. diskontinuitete u stijenskoj masi, za koje se u pravilu ne zna njihova brojnost i smještaj u prostoru. Diskontinuitet je skupni naziv koji podrazumijeva klivaže, folijacije, pukotine, rasjede, zone smicanja i slojne plohe. Diskontinuiteti su definirani orijentacijom, razmakom, postojanošću, zijevom, hrapavošću stijenki, ispunom, brojem skupova, gustoćom pukotina, veličinom i oblikom bloka, površinom, oblikom i volumnim brojem pukotina te njihovom povezanošću. Diskontinuiteti nastaju različitim prirodnim i geološkim procesima, te omogućuju tečenje fluida kroz stijensku masu. Ispucalu stijensku masu dijelimo na tri osnovne komponente, a to su: matriks (stijenska masa), mreža pukotina i ispuna pukotina u obliku fluida ili krutog materijala. Mnogi uvjeti poput naprezanja, temperature, geometrije loma i ostalih kontroliraju tečenje podzemne vode kroz pukotine. Obzirom da je u pravilu nepoznat njihov položaj unutar stijenske mase kao i njihov broj i ostale značajke, pukotinske vodonosnike je neophodno „pojednostaviti“ izradom konceptualnog modela. Shodno tome, tečenje podzemne vode u pukotinskim vodonosnicima kao i interpretaciju pokusnih crpljenja ne može se opisivati uobičajenim izrazima i metodama razvijenima za međuzrnske vodonosnike. Pukotinske vodonosnike potrebno je aproksimirati / pojednostaviti izradom različitih konceptualnih modela poput modela paralelnih ploča,

modela dvostruke poroznosti, ekvivalentnog modela poroznog medija, modela diskretne pukotinske mreže i modela ekvivalentnih paralelnih ploča, te za opis tečenja i interpretaciju pokusnog crpljenja koristiti posebno razvijene izraze. U ovom radu prikazati će se dvije metode interpretacije pokusnog crpljenja u slučaju kada se vodonosnik prikazuje modelom dvostruke poroznosti. Za reinterpretaciju pokusnog crpljenja i izračun hidrogeoloških parametara koristiti će se softver *AquiferTest*, te će parametri biti uspoređeni s rezultatima dobivenima pomoću metoda razvijenih za međuzrnske vodonosnike.

2. PUKOTINSKI VODONOSNICI

Za pukotinske vodonosnike, dobro poznavanje značajki diskontinuiteta od presudne je važnosti jer se kroz njih odvija glavnina tečenja podzemne vode. Također, diskontinuiteti mogu imati ulogu barijera. Na tečenje vode kroz diskontinuitete utječe velik broj faktora kao što su hidrostatski tlak, temperatura, značajke pukotina, ali i značajke matriksa. Diskontinuitet je pojam koji se koristi za sve pukotine, rasjede, klivaže, folijacije i ostale kontakte u stijenama. Prema tome, diskontinuiteti se dijele na slojne plohe, folijacije uključujući i klivaže, pukotine, rasjede, te druge geološke diskontinuitete. Tečenje podzemne vode odvija se kroz međusobno povezane pukotine, odnosno diskontinuitete kao što je i prikazano na Slici 2.1.



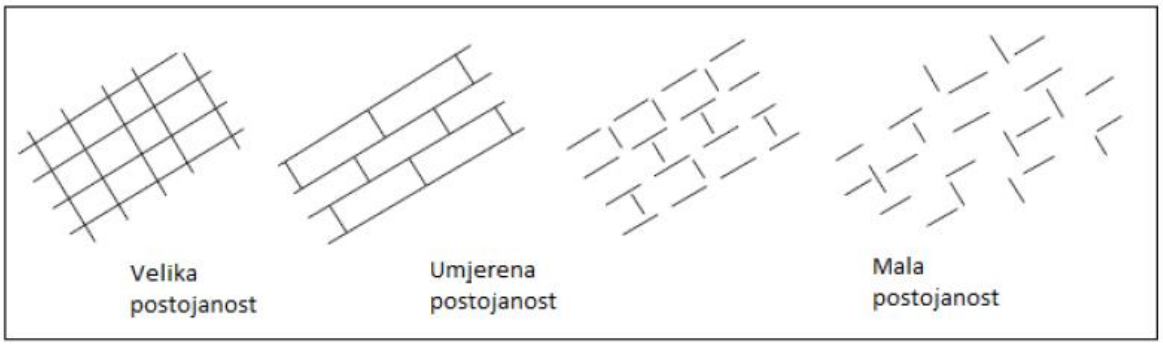
Slika 2.1. Shematski dijagram tečenja podzemne vode u vadoznoj zoni (Sighal i Gupta, 1999)

U većini slučajeva, slojna ploha najznačajniji je diskontinuitet sedimentnih stijena kao što je pješčenjak, silt, šejl. Folijacije su pojava na stijenama gdje one pucaju duž približno paralelnih površina. Pukotine u stijenama nastaju zbog pritiska na stijenu i gubitka kohezije stijene i predstavlja najslabiju točku stijene.

Rasjedi nastaju pod velikim tlakom rupturama u stijeni i pomicanjem duž te pukotine. Rezultat tlaka u stijenama je tektonskog porijekla. S hidrogeološkog gledišta rasjedi su vrlo važni diskontinuiteti u stijenama. Što se tiče ostalih diskontinuiteta, postoje nonkonformiteti i intruzivni kontakti koji se mogu ponašati kao diskontinuiteti.

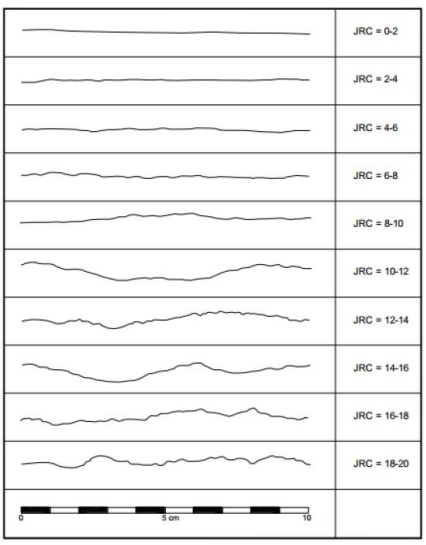
Ispucala stjenska masa može biti sastavljena od tri komponente; pukotinska mreža, blok matriksa i eventualna ispuna unutar pukotina koje može, ali i ne mora biti. Jedna

pukotina okarakterizirana je svojom orijentacijom, razmakom, hrapavosti stijenke, ispunom, veličinom i oblikom bloka, volumnim brojem pukotina, prirodom nastanka, zijevom i postojanosti. Prema Singhalu i Gupti (1999) zijev, odnosno otvor, diskontinuiteta je okomita udaljenost između susjednih stijenki otvorenog diskontinuiteta, ispunjena zrakom, vodom ili materijalom ispune. Postojanost (Slika 2.2.) predstavlja mjeru za opseg prostiranja diskontinuiteta.



Slika 2.2. Postojanost diskontinuiteta (Singhal i Gupta, 1999)

Hrapavost stijenki, prema Singhalu i Gupti (1999), predstavlja sva izbočenja na njihovim površinama. U slučaju većih izbočenja riječ je o valovitosti, a u slučaju manjih izbočenja o neravninama na stijenkama diskontinuiteta. Postoji više načina za određivanje hrapavosti, a izbor metode ovisi o svrsi istraživanja. Kad snimanje nije moguće na uzorke se primjenjuju tipični profili hrapavosti unaprijed opisani i pripremljeni na veliko (metarsko) i malo (centimetarsko) mjerilo. Najčešće korištena metoda kojom se opisuje hrapavost je JCR (*eng. Joint Roughness Coefficient*). Postupak se provodi vizualnom usporedbom hrapavosti diskontinuiteta i standardiziranih profila diskontinuiteta s pridruženim vrijednostima JCR (Slika 2.3.).



Slika 2.3. Profili hrapavosti i odgovarajuće vrijednosti JCR (preuzeto iz ISMR, 1987)

Ispuna je materijal koji se nalazi između susjednih stijenki diskontinuiteta, a najčešće je od gline ili fragmenata stijene. Ukoliko postoji više pukotina istih karakteristika, one tvore set pukotina koje su imaju svoj specifični raspored. Više setova pukotina koji su međusobno povezani tvore mrežu pukotina pomoću koje se tečenje vode može nesmetano odvijati. Iz tog razloga, važno je karakterizirati diskontinuitet, a neki od parametara su broj seta pukotina, orijentacija, raspored, gustoća (linearna, volumna), povezanost pukotina...

Nekoliko se setova diskontinuiteta, najčešće tri do četiri, razvije unutar jedne stijenske mase. Broj setova može se determinirati brojanjem pukotina u stereografskoj projekciji pri čemu se moraju sakupiti relevantni podaci orijentacije rasporeda i duljine za sve diskontinuitete.

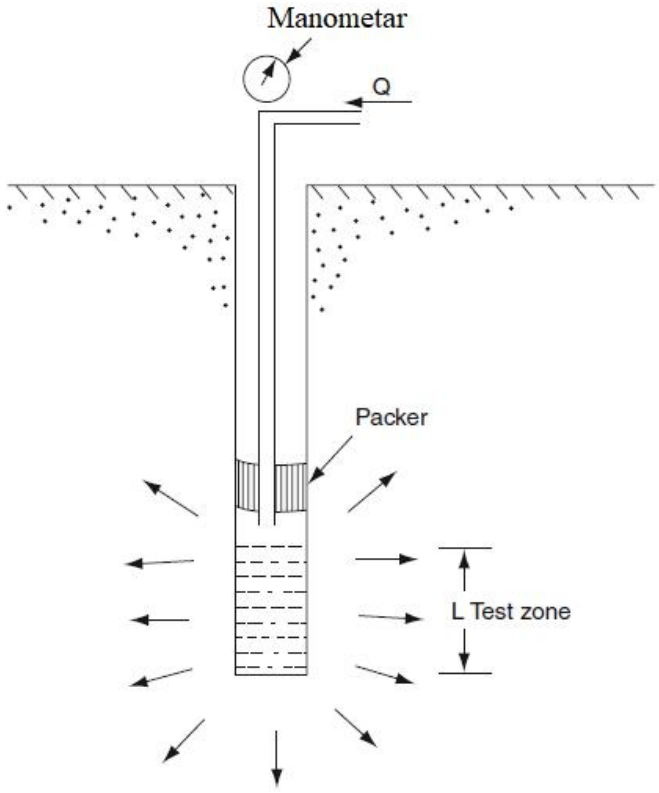
Orijentacija je parametar koji određuje položaj u prostoru pojedine pukotine koristeći se kutem kao i orijentacija bilo kojeg geološkog sloja. Orijentacija se određuje obzirom na sjever i obzirom na horizontalnu plohu, a izražava se u obliku 25°/N 330°, pri čemu je 25° nagib, a 330° azimut mjeren od sjevera u smjeru kazaljke na satu. Rose dijagram koristi se za prikaz orijentacije i rasprostranjenosti pojedinih setova pukotina.

Dokaz raznovrsnosti i nepredvidivosti pukotina su i tokovi podzemnih voda koji su nepravilni u prostoru te imaju nepravilnu geometriju i položaj. Tečenje podzemne vode u podzemlju može biti laminarno i turbulentno. Laminarno tečenje okarakterizirano je malim brzinama i paralelnim linijama toka, a turbulentno ima velike brzine, nepravilne linije toka i karakterizira ga vrtloženje.

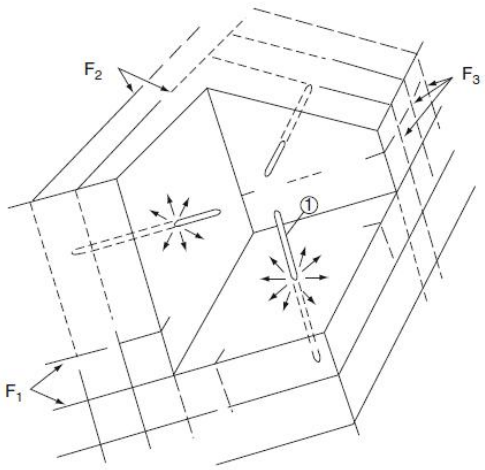
3. IN-SITU METODE TESTIRANJA

Odabir načina testiranja hidrogeoloških značajki vodonosnika ovisi o svrsi istraživanja, te o mjerilu. Prilikom rješavanja problema na lokalnoj razini, kao što su geotehnička istraživanja, prodiranja vode u rudnike, širenja onečišćenja, pogotovo putem pukotina, koriste se *packer* i *slug* testovi. U slučaju istraživanja na regionalnoj razini koriste se pokusna crpljenja. Odabir metode također ovisi i o praktičnim problemima i uvjetima na terenu.

Packer test poznat je i kao test utiskivanja, a koristi se u nezacijevljenim bušotinama u svrhu određivanja hidrauličke vodljivosti za određeni izolirani interval odvojen uz pomoć "*packera*". Najčešće se koristi za procjenu hidrauličkih značajki raspucalih stijena prilikom izgradnje različitih građevina ili geotehničkih zahvata. Prilikom izvođenja *packer* testa voda se utiskuje pod određenim tlakom u izolirani dio bušotine (najčešće sa dva "*packera*") nakon čega se mjeri protok u takvim stacionarnim uvjetima. Bušotina se prethodno mora isprati kako bi se uklonile krhotine sa stijenki bušotine zbog pouzdanosti rezultata. Ovisno o cilju istraživanja, postoje tri tipa *packer* testa, standardni (Slika 3.1.) i modificirani Lugeonov test (Slika 3.2.) te "*cross-hole*" test.



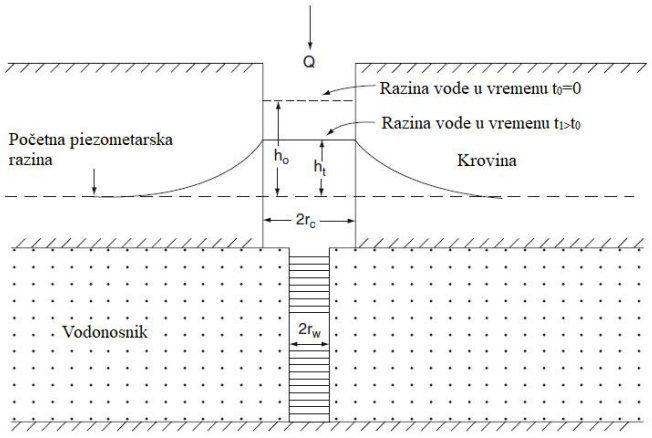
Slika 3.1. Standardni Lugeonov test (Singhal i Gupta, 1999)



Slika 3.2. Modificirani Lugeonov test (Singhal i Gupta, 1999)

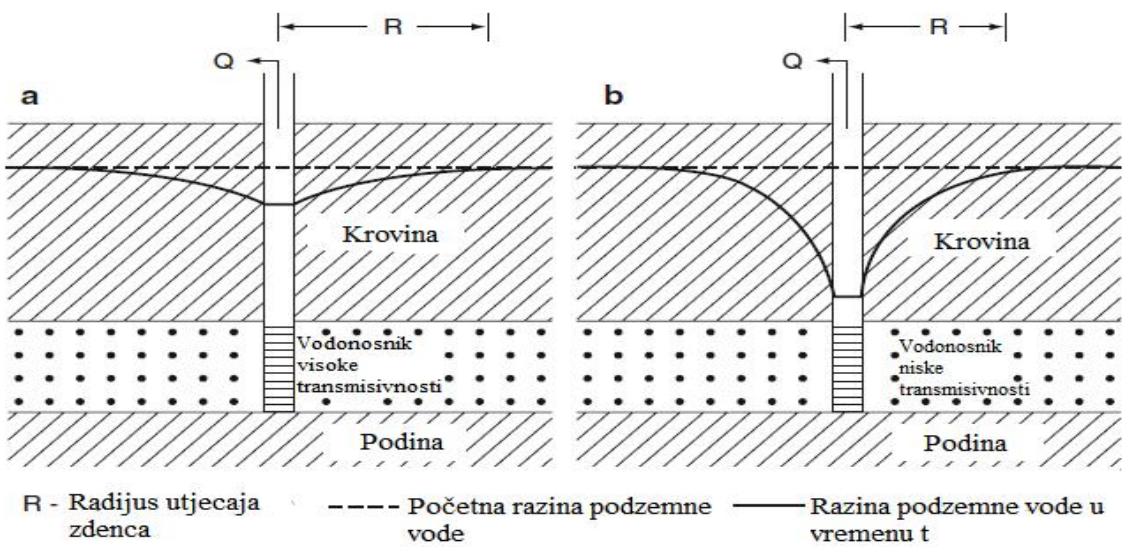
Cross-hole testom dobivaju se podaci o trodimenzionalnim svojstvima saturirane i nesaturirane zone te značajke matriksa zahvaljujući nasumično orijentiranim bušotinama. Najčešće se koristi za određivanje relativnih brzina i povezanosti između setova pukotina što je vrlo važno primjerice kod procjene lokacije za potencijalna odlagališta nuklearnog otpada. U nesaturiranoj zoni koristi se zrak za utiskivanje umjesto vode.

Slug test (Slika 3.3.) uključuje naglo ulijevanje poznatog volumena vode u bušotinu i mjerenje pada razine vode u vremenu. Prednosti *slug* testa su financijske, što znači da je test relativno jeftin, potrebno je malo stručnog osoblja i opreme kako bi se test izveo, vrijeme trajanja testa je relativno kratko i nema potrebe za opažačkim bušotinama. *Slug* test se, kao i *packer* test, provodi u lokalnom mjerilu. Zbog provođenja u malom mjerilu, rezultati dobiveni *slug* testom ne vrijede za cijeli vodonosnik nego samo za područje u neposrednoj blizini bušotine. Trajanje *slug* testa ovisi o propusnosti stijenskog materijala i promjera bušotine, stoga se može zaključiti da, što je propusnost manja test će trajati duže i što je promjer bušotine u slabo propusnim naslagama manji, test će trajati kraće.



Slika 3.3. *Slug* test u završenom zdencu (Singhal i Gupta, 1999)

Za razliku od prethodno spomenutih testova, pokusno crpljenje koristi se za dobivanje informacija u regionalnom mjerilu. Pokusno crpljenje provodi se s konstantnom ili promjenjivom količinom crpljenja pri čemu se u okolnim piezometrima i u zdencu prati sniženje razine podzemne vode. Kao rezultat crpljenja (Slika 3.4.) razvija se konus depresije iz čega se može očitati radijus utjecaja zdenca. U idealnim uvjetima izotropnog homogenog vodonosnika konus depresije vodnog lica bit će simetričan, a konture koje predstavljaju vodno lice su kružnog ili gotovo kružnog oblika. Prema Bačani (2006) prilikom crpljenja baza se povećava, odnosno radijus utjecaja je sve veći, a povećavat će se sve dok se ne postigne ravnoteža između količine ulazne i izlazne vode iz vodonosnika (stacionarno stanje). Podaci o ostvarenim sniženjima u vremenu pomažu u definiranju hidrogeološkog modela, odnosno odabiru metode koju ćemo koristiti za izračun hidrogeoloških parametara. Najčešće se koriste Theisova i Jacob-Cooper-ova metoda. Navedene metode nisu primjenjive na pukotinske vodonosnike zato što pretpostavljaju da su vodonosnici izotropni i homogeni, što u slučaju pukotinskog vodonosnika ne možemo pretpostaviti. Suprotno idealnim uvjetima, u pukotinskim vodonosnicima, zbog anizotropije, radijus utjecaja zdenca tj. konus depresije biti će izdužen ili nepravilan. U skladu s tim, potrebno je primijeniti prikladne metode interpretacije pokusnog crpljenja pukotinskih vodonosnika, a koje su detaljnije opisane u narednom poglavlju.



Slika 3.4. Prikaz sniženja vode nastalog uslijed crpljenja iz vodonosnika visoke (a) i niske (b) transmisivnosti

4. TESTIRANJE PUKOTINSKOG VODONOSNIKA CRPLJENJEM

Pokusno crpljenje služi za određivanje parametara vodonosnika kao što su hidraulička vodljivost, transmisivnost i uskladištenje. Pokusno crpljenje može imati dva cilja, prvi se odnosi na testiranje vodonosnog sloja, odnosno određivanje parametara vodonosnika, a drugi se odnosi na testiranje zdenca, tj. određivanje specifičnog kapaciteta zdenca, dozvoljenog sniženja, izbor odgovarajuće crpke itd. Princip na kojem se temelji pokusno crpljenje sastoji se u tome što se iz zdenca koji ima filterski dio u vodonosnom sloju koji želimo testirati, crpi voda određenim kapacitetom kroz određeno vrijeme. Učinak crpljenja na piezometarsku razinu opaža se mjerenjem sniženja u crpljenom zdencu i opažačkim bušotinama, odnosno piezometrima. Hidrogeološki parametri vodonosnog sloja izračunavaju se pomoću analitičkih rješenja jednadžbi toka u koje uvrštavamo poznate i izmjerene veličine kao što su sniženja u piezometrima, udaljenost piezometara od zdenca i crpnu količinu.

Prilikom odabira lokacije pokusnog crpljenja moramo paziti na sljedeće: hidrogeološki uvjeti se ne smiju mijenjati na malim udaljenostima, iscrpljena voda mora biti odvedena na način da se ne može infiltrirati nazad u vodonosni sloj, hidraulički gradijent mora biti mali, tj. potenciometrijska ploha približno horizontalna i mjesto rada mora biti pristupačno, tako da se može dopremiti oprema. U određenim slučajevima mjesto je unaprijed određeno, a to je kad već postoje zdenci koji će se koristiti za testiranje ili kada se traže podaci o vodonosnom sloju na točno određenim lokacijama.

Zdenac je hidrotehnički uređaj pomoću kojeg se crpi voda iz vodonosnog sloja. Promjer zdenca mora biti takav da omogućuje nesmetanu ugradnju cijevi, filtera i crpke potrebnog kapaciteta. Dubina zdenca određuje se prema dnevniku bušenja strukturne bušotine koja je prethodno izbušena ili se određuje za vrijeme bušenja samog zdenca. Filter mora biti perforiran odnosno mora imati otvore koji osiguravaju male ulazne brzine vode u zdenac. U pravilu ulazna brzina mora biti manja od 3 cm/s. Ulazak vode olakšan je ukoliko se ukloni materijal vodonosnog sloja oko filtra i nadomjesti umjetno graduiranim grubljim materijalom koji se naziva šljunčani nasip. Po završetku bušenja u zdenac se ugrađuje crpka koja mora biti takva da može raditi kontinuirano i stalnim kapacitetom tijekom pokusnog crpljenja koje može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana pa i mjesec dana. Kapacitet crpke i crpna količina moraju biti dovoljno veliki kako bi proizveli mjerljivo sniženje u vremenu.

Piezometar je bušotina koja služi za opažanje potencijala u onom vodonosnom sloju u kojem piezometar ima ugrađen filter. Broj piezometara ovisi o količini i točnosti informacija koje želimo i o raspoloživim financijskim sredstvima. Preporučljivo je imati tri piezometra smještena na različitim udaljenostima od zdenca. Na udaljenost od piezometra utječu razni čimbenici, a neki od njih su: tip vodonosnog sloja, hidraulička vodljivost, završen ili nezavršen zdenac, te promjena litološkog sastava po dubini.

Za vrijeme pokusnog crpljenja mjere se parametri sniženja u vremenu i crpna količina. Prije početka mjerenja treba utvrditi sve postojeće promjene razine podzemne vode uključujući dugotrajne regionalne promjene i kratkotrajne promjene što se može postići mjerenjem razine podzemne vode dva puta dnevno i tako nekoliko dana prije početka mjerenja. Crpljenje počinje kad se objektivno ne očekuju veće promjene potencijala za vrijeme crpljenja, te se mjerenja nastavljaju još jedan do dva dana po završetku crpljenja.

U prvih 60-120 minuta crpljenja piezometarska visina naglo opada pa mjerenja u tom razdoblju moraju biti vrlo učestala. Što se više odmiče početak crpljenja, to je potrebno manje mjerenja. Razina se mora mjeriti u zdencu i u piezometrima. Vremenski intervali mjerenja prikazani su u tablici (Tablica 4.1.).

Tablica 4.1.Vremenski interval očitanja piezometarske visine (sniženja) za vrijeme pokusnog crpljenja

Vrijeme proteklo od početka crpljenja (min)	**Vremenski interval mjerenja (min)**
0-60	2
60-120	5
120-240	10
240-360	30
360-1440	60
1440 do prestanka crpljenja	3 puta dnevno

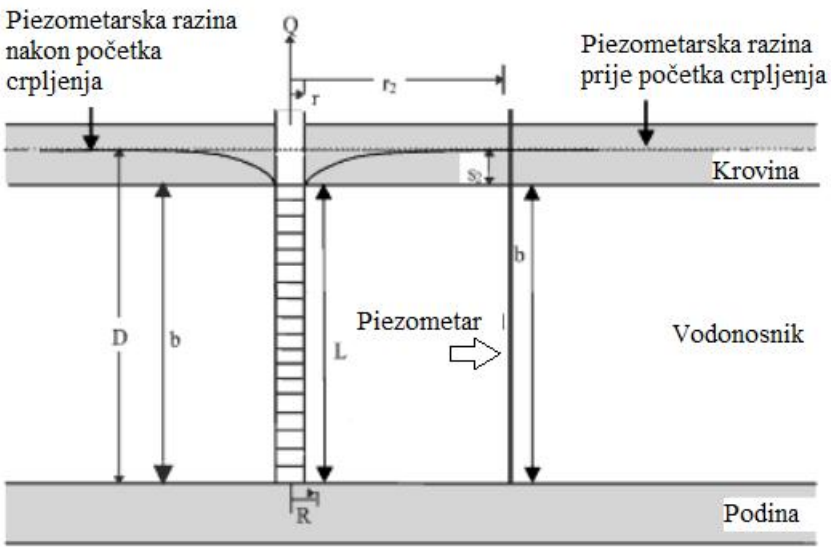
Nakon prekida crpljenja razina vode u zdencu i piezometrima raste. Nastoji se mjeriti povratak razine na početku, onu prije početka crpljenja, no kako se zadnji centimetri vrlo sporo vraćaju smatra se zadovoljavajućim povrat razine od 85-90% ukupnog sniženja.

Mjerenje količine crpljenja može se obavljati vodomjerom koji služi za mjerenje većih crpnih količina. Manje crpne količine mjere se “metodama posude” tj. mjeri se vrijeme potrebno da se napuni posuda poznatog volumena. Ako se radi o velikim crpnim količinama treba raditi preljev.

Poželjno je da pokusno crpljenje traje dok se konus depresije ne stabilizira, odnosno dok se ne uspostave stacionarni uvjeti. U nekim slučajevima stacionarno stanje se uspostavi nakon nekoliko sati, u nekim za nekoliko dana ili tjedana, a u nekim slučajevima je stacionarno stanje nemoguće postići kao što je to slučaj u zatvorenim vodonosnicima.

4.1. Metode interpretacije pokusnog crpljenja

Tečenje podzemne vode u pukotinskom vodonosniku može biti ekstremno kompleksno pa se stoga konvencionalne metode koje podrazumijevaju tečenje kroz homogenu i izotropnu poroznu sredinu ne mogu upotrijebiti. Stoga je neophodno vodonosnik modelirati kao seriju blokova matriksa niske propusnosti odvojenih pukotinama visoke propusnosti, tzv. modelom dvostruke poroznosti. Tečenje podzemne vode iz matriksa u pukotine može biti ili pseudo-stacionarno ili nestacionarno. Rješenja su prikladna u uvjetima zatvorenog vodonosnika, prikazanim na slici (Slika 4.1.).

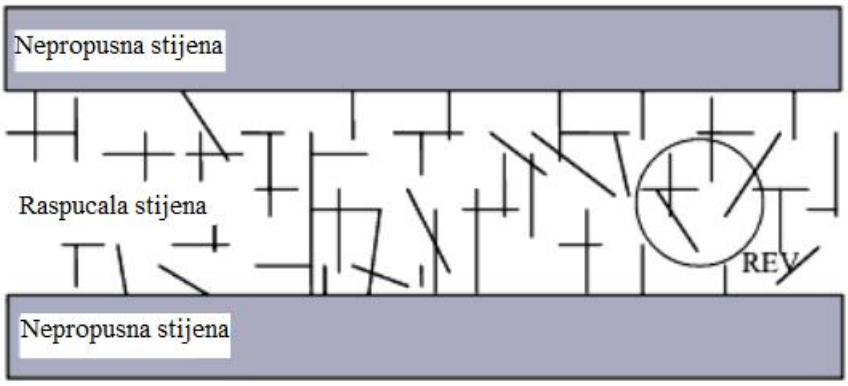


Slika 4.1. Slučaj zatvorenog vodonosnika

Ukoliko bi se vodonosnik prikazivao modelom jednake poroznosti, tečenje vode iz matriksa u pukotine i obrnuto ne bi bilo moguće. U tom slučaju podzemna voda bi tekla jedino kroz pukotine oko blokova, a poroznost bi bila jednaka omjeru volumena pukotina i ukupnom volumenu. U slučaju kad postoji tečenje iz blokova prema pukotinama, smatra se da se ispucala stijenska masa sastoji od dva preklapajuća, međusobno povezana kontinuuma: kontinuum blokova matriksa primarne poroznosti i niske propusnosti i kontinuum pukotina sekundarne poroznosti i visoke propusnosti.

Postoje dva načina rješavanja jednadžbe tečenja podzemne vode kod modela dvostruke poroznosti (Slika 4.2.) koji se koriste u softveru *AquiferTest*, a vrlo su

zastupljeni i prihvaćeni u literaturi. Prvi način pretpostavlja pseudo-stacionaran tok (Warren Root metoda, 1963; Moench metoda, 1984) a drugi način pretpostavlja nestacionaran tok od bloka prema pukotinama (Kazemi, 1969). U okviru ovog rada detaljnije će se prikazati metode koje pretpostavljaju pseudo-stacionarno tečenje.



Slika 4.2. Model dvostruke poroznosti

Pseudo-stacionaran tok uzima kao pretpostavku da je raspodjela piezometarskih razina unutar blokova matriksa nedefinirana, odnosno, pretpostavlja da pukotine i blokovi matriksa unutar reprezentativnog elementarnog volumena (REV) posjeduju različite srednje vrijednosti piezometarske razine . Prema Moenchu (1984), magnituda induciranog toka je, pretpostavlja se, proporcionalna razlici piezometarskih visina.

4.2. Warren Root metoda

Warren i Root (1963) daju rješenje jednadžbe tečenja za pukotinski vodonosnik prikazan modelom dvostruke poroznosti uz pretpostavku pseudo-stacionarnog stanja. Dakle, pukotinski vodonosnik sastoji se od blokova matriksa i pukotina čije se hidrogeološke značajke opisuju pomoću hidrauličke vodljivosti, specifičnog uskladištenja i piezometarske razine (Tablica 4.2.)

Tablica 4.2. Hidrogeološki parametri pukotinskog vodonosnika

Parametar	**Pukotine**	**Matriks (blokovi)**
Piezometarska razina	h	h'
Hidraulička vodljivost	K_h	K'_h
Specifično uskladištenje	S_S	S'_S

Glavna pretpostavka vezana za model dvostruke poroznosti je da se matriks i pukotine mogu smatrati kao dva preklapajuća kontinuuma. Također, pretpostavlja se kretanje vode

od blokova prema pukotinama, a ne s bloka na blok ili iz pukotine prema bloku; te matriks (blok) služi isključivo kao izvor vode.

Stoga je jednadžba tečenja u matriksu definirana kao q_α:

$$-q_\alpha = S'_S \frac{\partial h'}{\partial t} \tag{4.1.}$$

Često se pretpostavlja da je brzina tečenja između matriksa i pukotina proporcionalna hidrauličkoj vodljivosti matriksa i razlici u potencijalima između ta dva sustava (matriksa i pukotina).

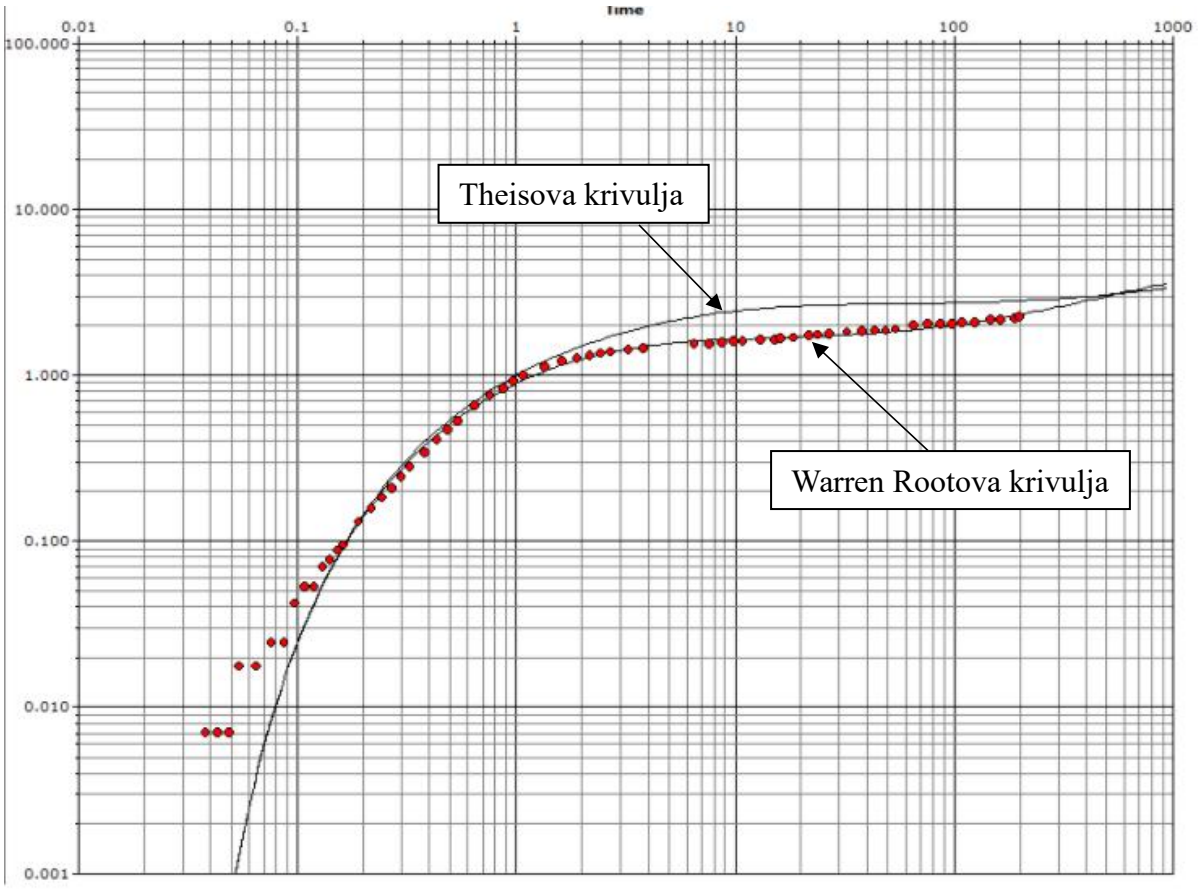
$$-q_\alpha = \alpha K'_h (h'-h) \tag{4.2.}$$

α je parametar koji ovisi o geometriji bloka matriksa. Mjerna jedinica mu je L^{-2} (obrnuto od duljine kvadrata) i definiran je kao:

$$\alpha = \frac{A}{lV} \tag{4.3.}$$

gdje je: A površina bloka matriksa, V volumen matriksa, a l karakteristična duljina bloka.

Na početku pokusnog crpljenja voda se dominantno crpi iz pukotinskog sustava a matriks u tome ne sudjeluje. Na polovini vremena dotok vode povećava se za količinu vode otpuštene iz matriksa ali je sniženje u matriksu malo u odnosu na sniženje u pukotinama. Što se crpljenje više bliži kraju sniženje vode u matriksu izjednačava se sa sniženjem u pukotinama, a vodonosnik se ponaša kao vodonosnik jedinstvene poroznosti tj. sniženje počinje slijediti Theisovu krivulju. Na Slici 4.3. prikazano je sniženje u vremenu u dvostrukom logaritamskom mjerilu s Theisovom i Warren Root krivuljom.



Slika 4.3. Primjer analize podataka Warren Root metodom (*AquiferTest Pro 10.0 User's manual*)

Za rješenje jednadžbe tečenja Warren Root metodom potrebni su podaci sniženja u vremenu, udaljenost između zdenca i opažačkih bušotina te količina crpljenja.

Program *AquiferTest* koristi bezdimenzionalne parametre, σ i λ, kojim se definira tečenje iz matriksa u pukotine i prikazani su sljedećim izrazima:

$$\lambda = \frac{\alpha r^2 K'_h}{K_h} \tag{4.4.}$$

$$\sigma = \frac{S'_S}{S_S} \tag{4.5.}$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \tag{4.6.}$$

gdje je r_D bezdimenzionalna udaljenost (vrijednost veća od ili jednaka 1), r udaljenost između zdenca i piezometra, a r_w efektivni radijus zdenca (uključuje i šljunčani zasip).

Za određenu vrijednost σ (uvijek veća od 1), promjena vrijednosti λ mijenja vrijeme gdje započinje ravni dio krivulje sniženja; što je λ veća, to će biti dulja srednja faza

smanjenog sniženja i biti će potrebno više vremena da linija sniženja počne pratiti Theis-ovu liniju.

Za određenu vrijednost λ (uobičajeno od 0,0001 do 5), promjena vrijednosti σ mijenja vrijeme trajanja ravnog dijela krivulje

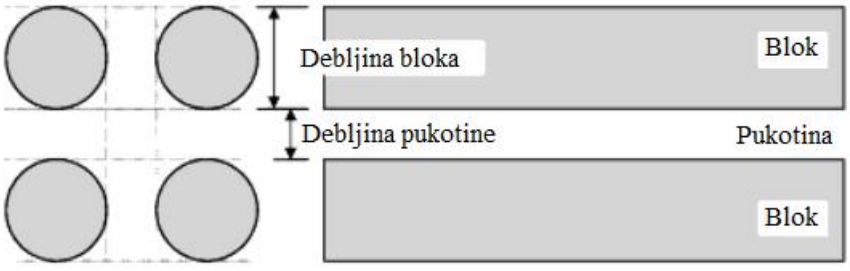
Veće vrijednosti λ znače da će se voda iz pukotina drenirati velikom brzinom, a tek nakon toga iz matriksa, a ako je vrijednost λ mala, drenaža će se odvijati sporije.

4.3. Moench metoda

Moench (1984) daje rješenje jednadžbe tečenja za pukotinski vodonosnik pod sljedećim pretpostavkama:

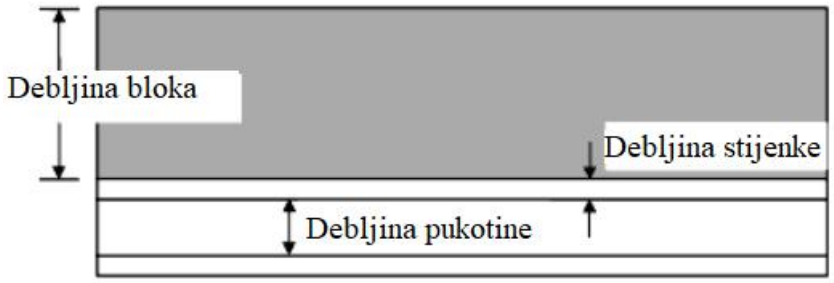
- Vodonosnik je anizotropan i homogen
- Vodonosnik je horizontalno neograničenog prostiranja
- Vodonosnik ima konstantnu debljinu
- Vodonosnik je zatvorenog tipa
- Darcy-jev zakon vrijedi za tečenje u pukotinama i blokovima matriksa
- Voda u zdenac ulazi isključivo iz pukotina
- Piezometri odražavaju piezometarsku razinu u pukotinama u REV-u
- Tečenje u bloku matriksa okomito je na poprečan presjek blok-pukotina
- Crpna količina je konstantna
- Zdenac i piezometri zahvaćaju vodonosnik u cijelosti

Inicijalno pražnjenje modela, uz pretpostavku pseudo-stacionarnog stanja odnosi se na pražnjenje pukotina. Naknadno dolazi do pražnjenja iz blokova matriksa. U ranim i kasnim fazama crpljenja, sniženje slijedi Theis-ovu krivulju. Vodonosnik je idealiziran kao naizmjenična masa blokova matriksa i pukotina. Blokovi su zamišljeni kao niz svojevrsnih "stupova" prikazanih na slici (Slika 4.4.).



Slika 4.4. Prikaz Moench-ovog modela vodonosnika (*AquiferTest Pro 10.0 User's manual*)

Moench uzima u obzir i postojanje inkrustacije stijenki pukotina kako bi objasnio zašto podaci dobiveni pokusnim crpljenjem podupiru i pseudo-stacionarno i nestacionarno tečenje u modelu dvostruke poroznosti. Inkrustacija je tanki sloj niske propusnosti istaložen na zidovima blokova koji ometa nesmetano kretanje fluida između bloka i pukotine.



Slika 4.5. Prikaz stijene s pukotinom i inkrustacijom na stijenkama prema Moenchu (*AquiferTest Pro 10.0 User's manual*)

Ova teorija zasniva se na sljedećim izrazima:

$$t_d = \frac{Kt}{S_S r^2} \tag{4.7.}$$

$$h_d = \frac{4\pi KD}{Q}(h_0 - h_f) \tag{4.8.}$$

gdje je h_d bezdimenzionalno sniženje, a t_d bezdimenzionalno vrijeme.

Ako je inkrustacijski sloj dovoljno nepropusan, većina promjene piezometarske razine između blokova i pukotina javlja se unutar njega prilikom čega nestacionarno tečenje prelazi u pseudo-stacionarno tečenje. Odnosno, inkrustacije onemogućuju dotok vode iz matriksa što uzrokuje stvaranje tlakova sličnih onima koje pretpostavlja pseudo-stacionarno tečenje, a oni su sljedeći:

$$h_{wD} = \frac{4\pi KH}{Q_T}(h_t - h_w) \tag{4.9.}$$

$$h'_D = \frac{4\pi KH}{Q_T}(h_t - h') \tag{4.10.}$$

gdje je h_{wD} bezdimenzionalna razina vode u zdencu, a h'_D bezdimenzionalna razina vode u piezometrima.

Bilo u slučaju nestacionarnog ili pseudo-stacionarnog tečenja iz matriksa u pukotine, tipske krivulje će se pomicati prema gore kako se omjer hidrauličke vodljivosti matriksa i hidrauličke vodljivosti pukotina smanjuje, jer se i voda drenira sve brže iz matriksa.

Analizirati se mogu i podaci sniženja u samom zdencu, ali se za tu svrhu trebaju uzeti u obzir značajke bušotine (uskladištenje bušotine) i stijenki bušotine. Ukoliko se pretpostavi da je uskladištenje bušotine nula i da nema inkrustacije na stijenki zdenca, rješenje jednadžbe tečenja je isto kao u Warren Root metodi. Uskladištenje bušotine može se izraziti kao:

$$W_D = \frac{C}{2\pi r^2 S} \tag{4.11.}$$

gdje je:

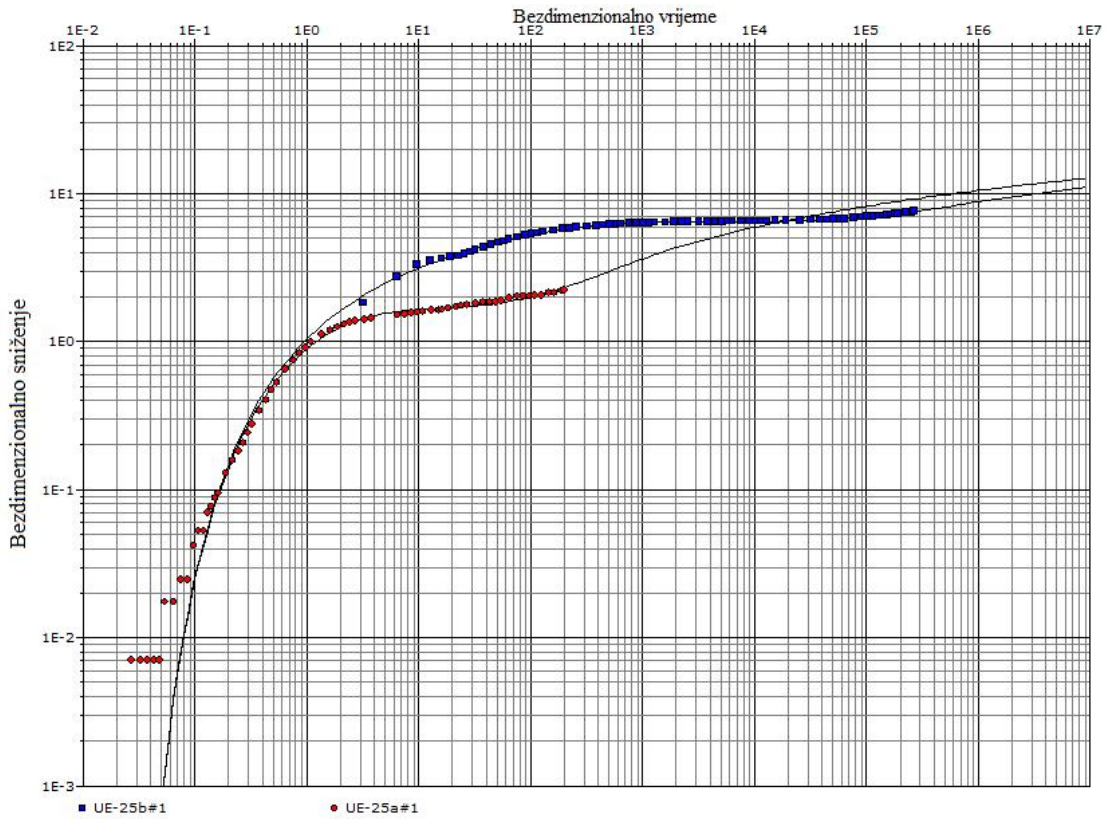
$$C = p R^2 \tag{4.12.}$$

kod promjenjive razine fluida ili:

$$C = V_W r_W g C_{obs} \tag{4.13.}$$

gdje je V_W volumen tekućine pod tlakom, r_W gustoća, g gravitacijska konstanta, C_{obs} stišljivost kompletnog sustava, a S izračunato uskladištenje.

Konačno rješenje dobiva se iterativnim postupkom. Ako se podaci pomiču kako bi padali točno na tipsku krivulju, uskladištenje će se promijeniti do te razine da mijenja i volumen fluida koji se nalazi unutar cijevi bušotine (uskladištenje bušotine). Preklapanje izmjerenih sniženja u vremenu s Moench-ovim tipskim krivuljama prikazano je na Slici 4.6.



Slika 4.6. Primjer preklapanja mjerenih podataka sniženja u vremenu s Moench-ovim tipskim krivuljama (*AquiferTest Pro 10.0 User's manual*)

Kao i u Warren Root metodi, softver *AquiferTest* koristi bezdimenzionalne parametre kojima se definira tečenje iz matriksa u pukotine, te pored izraza (4-5) i (4-6) koristi bezdimenzionalni parametar γ:

$$\gamma = (\frac{r_w}{b'})(\frac{K'}{K})^{\frac{1}{2}} \tag{4.14.}$$

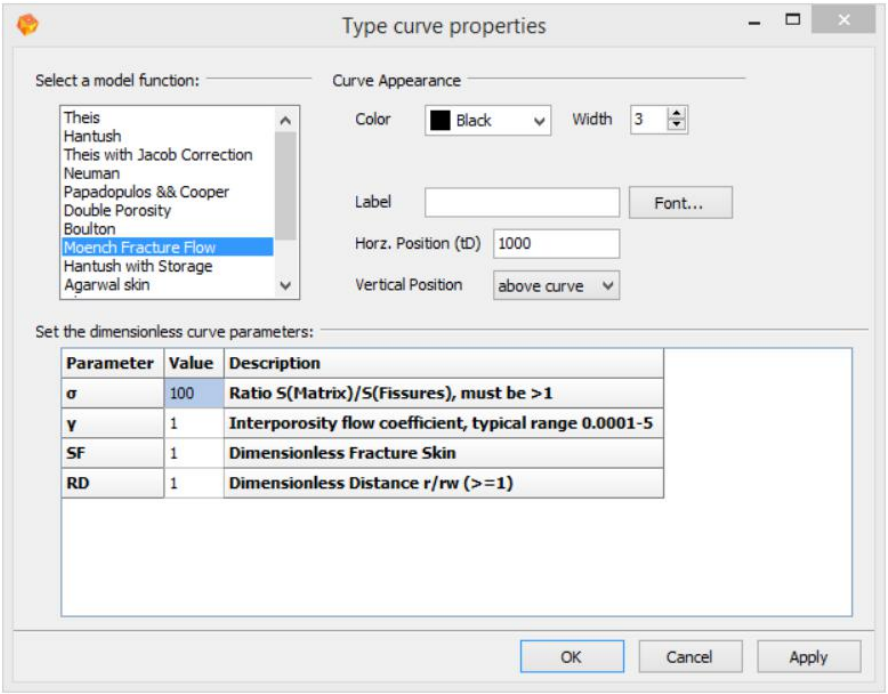
uobičajenog raspona vrijednosti od 0,0001 - 5.

Izraz za bezdimenzionalni parametar SF koji predstavlja inkrustacijski sloj je:

$$SF = \frac{K' b_s}{K_s b'} \tag{4.15.}$$

gdje je K' hidraulička vodljivost matriksa, a b debljina sloja, K_s hidraulička vodljivost inkrustacijskog sloja, a b_s debljina inkrustacijskog sloja.

Na Slici 4.7. prikazano je sučelje u kojem se definiraju parametri iz izraza (4.14) i (4.15).

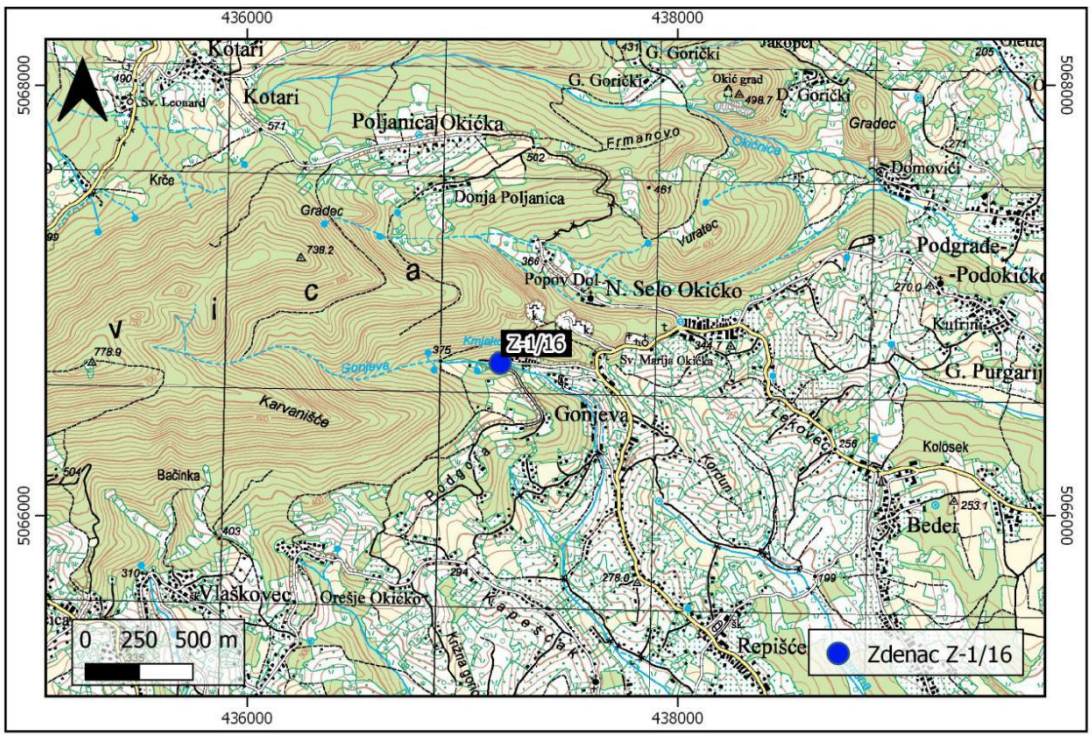


Slika 4.7. "*Analysis panel*" u softver *AquiferTest*

5. ZNAČAJKE TESTIRANOG PODRUČJA

5.1. Geografske značajke

Na području jugoistočnih obronaka Plešivice u blizini naselja Gonjeva (Slika 5.1.), izbušen je zdenac Z-1/16 za potrebe vodoopskrbe Klinča Sela i okolnih mjesta. Zdenac je smješten u neposrednoj blizini potoka Gonjeva koji je okružen strmim padinama (Slika 5.2.). Uzvodno, u blizini lokacije postoje i pojave manjih ali stalnih izvora koji tvore površinski tok, potok Gonjeva.



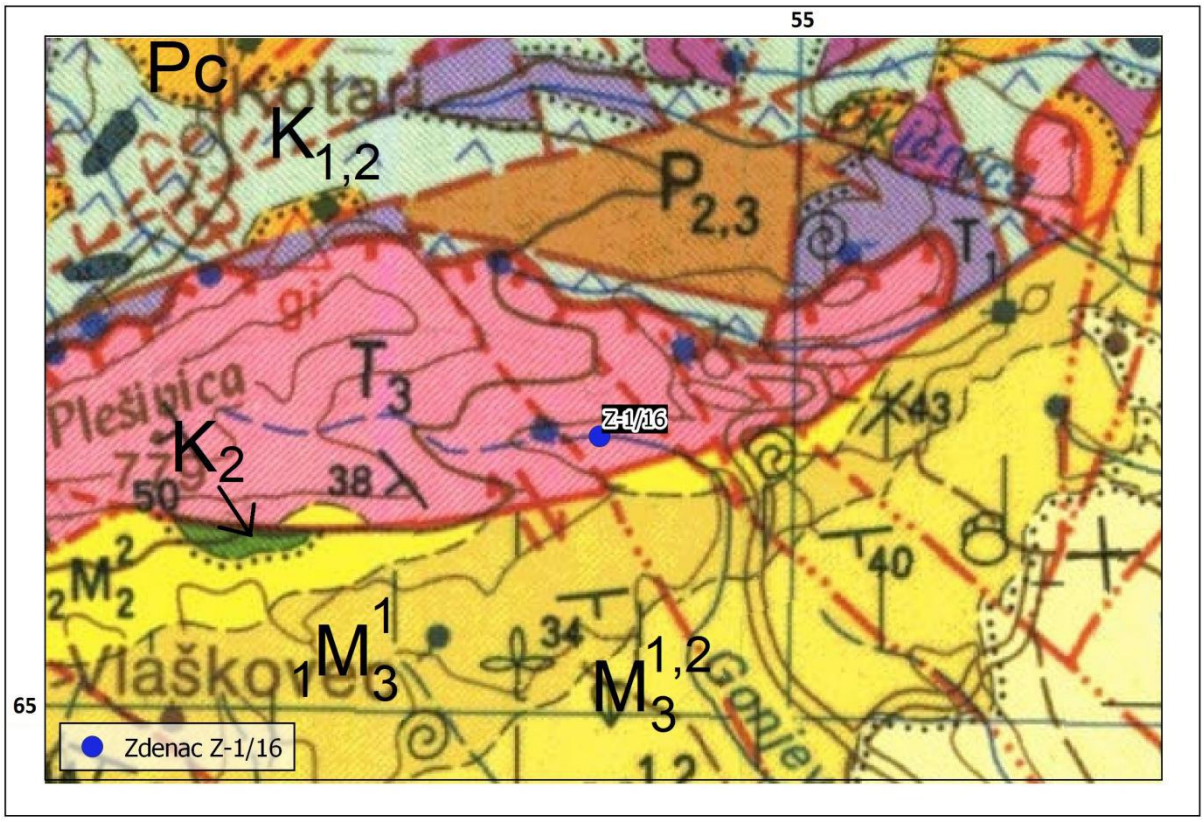
Slika 5.1. Geografski položaj zdenca



Slika 5.2. Zdenac Z-1/16

5.2. Geološke značajke

Prema OGK, list Zagreb (Šikić i dr., 1977), lokacija zdenca nalazi se na naslagama gornjotrijaske starosti T_3 (Slika 5.3.). Naslage gornjotrijaskih dolomita u rasjednom su kontaktu sa naslagama permske, kredne, paleocenske i miocenske starosti.



Slika 5.3. Isječak OGK list Zagreb. *Oznake na karti: $P_{2,3}$ srednji-gornji perm: klastiti, karbonati i gips; T_1 donji trijas: klastiti i karbonati; T_3 gornji trijas:karbonati i klastiti; $K_{1,2}$ apt-turon: dijabazi, spiltiti; K_2 gornja kreda: vapnoviti i glinoviti lapori, šejlovi, kankareniti; Pc paleocen: klastiti i vapnenci; $_2M^2{}_2$ baden : klastiti, vapnenci i ugljen; $_1M^1{}_3$ sarmat: biokalkareniti, pjeskovito-laporoviti vapnenci; $M_3^{1,2}$ panon: pješčenjaci, konglomerati, brečokonglomerati, vapnenačke mikrobreče* (Šikić i dr., 1977)

Prema autorima tumača OGK lista Zagreb (Šikić i dr., 1979) permske naslage imaju šarolik litofacijelni sastav. Pretežno su zastupane pješčenjacima s prelazima u kvarcne konglomerate i brečokonglomerate. Šejlovi i siltiti dolaze kao ulošci i proslojci unutar pješčenjaka s čestom impregnacijom željezovitom supstancom (hematit, limonit), što utječe na boju klastita (tamnosiva, sivosmeđa do crvenkastosmeđa). Crveni i ljubičasti krupnozrni pješčenjaci i brečokonglomerati zapaženi su južno od Mokrica, a česti su i uz granične kontakte s donjotrijaskim sedimentima.

U sastav donjotrijaskih naslaga ulaze pješčenjaci, siltiti, vapnenci, dolomitizirani vapnenci, dolomiti i vapnoviti lapori. U starijem dijelu prevladavaju klastiti terigenog porijekla, dok su karbonatni sedimenti češći u mlađem dijelu naslaga. Najmarkantniji litološki član su ljubičastocrveni, zelenkastosivi, rjeđe sivi do tamnosivi, tankouslojeni tinjčasti pješčenjaci s prelazima u finozrne tinjčaste siltite. Pripadaju uglavnom sajskom dijelu naslaga. Mjestimice se izmjenjuju sa sivim, ružičastosivim i smeđastocrvenim oolitskim kalkarenitima i biokalkarenitima (oospariti, intrabiospariti). Pješčenjaci pripadaju tipu subarkoza. Ovakve pješčenjačke naslage čine nepropusne, odnosno slabo propusne slojeve

Gornjotrijaske naslage najznačajniji su litostratigrafski element potreban za izradu ovog diplomskog rada budući da je zdenac Z-1/16 izbušen upravo u tim naslagama. Debljina im je procijenjena na oko 800 metara, a zbog debele monotone serije dolomita i nedostatka fosila detaljnija podjela gornjeg trijasa na katove nije moguća. U starijem dijelu dolomitne serije zapažena je, nekoliko metara debela zona s proslojcima (do 10 cm) tamnosivih do cnih šejlova. Debljina slojeva gornjotrijaskih dolomita varira od 5 cm do preko 1 metar, a količina $CaCO_3$ rijetko prelazi 10%. Boje su svjetlosive do tamnosive, što ovisi o sadržaju glinovite supstance. Pretežni dio dolomita odlikuje se jasno izraženom, ubranom ili ravnom laminacijom algalnog porijekla. Do dolomitizacije karbonata stromatolitskog porijekla najvjerojatnije je došlo u ranoj fazi dijageneze. Uz dolomite stromatolitskog tipa, u izmjeni se podređeno nađu homogeni mozaični dolomiti, ili pak zrnasti dolomiti sa sačuvanim reliktima prvobitnih struktura kalkarenitskog i biokalkarenitskog tipa. Stromatolitski tip dolomita ukazuje, da se sedimentacija kroz veći period gornjeg trijasa odvijala u vrlo plitkoj litoralnoj sredini. Gornjotrijaski dolomiti čine glavne vodonosnike na istraživanom terenu.

Sedimentna serija krednih naslaga se uglavnom sastoji od izmjene pješčenjaka, šejlova, lapora i radiolarijskih rožnjaka. Rožnjaci su izgrađeni od mikrokristalastog i kripotkristalastog $Si0_2$, u kojem se nalaze brojne radiolarije. Ovisno od željezovite supstance, najčešće hematita, boja rožnjaka varira od sive i smeđe do crvene. Uslojeni pješčenjaci pripadaju tipu feldspatskih i litoidnih grauvaka. Svježi su modrosivi i zelenkastosivi, a trošni postaju zelenkastosmeđi i smeđi. Sivi biomikriti i biokalkareniti dolaze kao rjeđi proslojci i ulošci unutar šejlova i pješčenjaka. Često sadrže uklopke i gomolje rožnjaka. Na nekoliko mjesta unutar klastita prisutne su deblje zone (m) pločastih (5-10 cm) krinoidnih biokalkarenita.

Gornjokredne naslage velike su rasprostranjenosti na istraživanom terenu. Iznad bazalnog dijela slijedi debela serija flišolikih sedimenata smeđastosive do tamnosive boje,

u kojoj prevladavaju vapnoviti i glinoviti lapori, šejlovi i kalkareniti. S njima se izmjenjuju tankoploča sti vapnenci i rožnjaci, a mjestimice su prisutni nepravilni ulošci nesortiranih karbonatnih breča s fragmentima i do 20 cm. Tamnosivi do crni rožnjaci dolaze kao cm proslojci, ulošci i gomolji, a nastali su djelomičnom do potpunom silicifikacijom spomenutih vapnenačkih slojeva. Sadrže brojne radiolarije.

Pojava sedimenata starijeg paleocena prostorno se poklapa s protezanjem stijena vulkanogeno-sedimentnog kompleksa starije krede. Na istraživanom području imaju malu pojavnost. Glavnina paleocenskih naslaga sastoji se od sivo, smeđe i crvenkastosmeđe obojanih lapora, siltita i subgrauvaknih pješčenjaka, unutar kojih također dolaze biokalkareniti i koraljno-algalni grebenski vapnenci.

Badenske naslage izgrađene su pretežno od priobalnih i plitkovodnih marinskih sedimenata: breča, konglomerata, vapnenačkih pješčenjaka, litavca, litotamnijskog vapnenca te glinovito-pjeskovitih i vapnenačkih lapora. To su vapnenačke stijene, koje se genetski mogu podijeliti na sedimente nastale kao rezultat intenzivne organske aktivnosti, dok drugi tip nosi obilježja klastičnih naslaga s prisustvom terigenog materijala. Biogeni vapnenački sedimenti nastali su biogenim procesima posredstvom alga (Lithotamnium). To su gromadaste stijene, bijele, svijetlo sive i žućkastosive boje i veoma porozne. Gusto akumulirani, lomljeni, angularni, biogeni ulomci isključuju bilo kakvo prerađivanje i transport. Zbog toga se ove vapnence smatra autohtonim. Sadrže veliki postotak $CaC0_3$ (93%).

Sarmatske naslage su vapnenci determinirani kao biokalkareniti, oolitični kalkareniti, kalcisiltiti i pjeskovito-laporoviti vapnenci, u kojima morfološke karakteristike detritusa i oolitične tvorevine ukazuju na dužu abraziju i nemirnim uvjetima plitkog obalnog pojasa. U gornjim partijama donjosarmatskih naslaga prevladavaju dobrouslojeni, laporoviti sedimenti s biljnim utruscima, koji ukazuju na smirivanje unutar sedimentacijskog prostora.

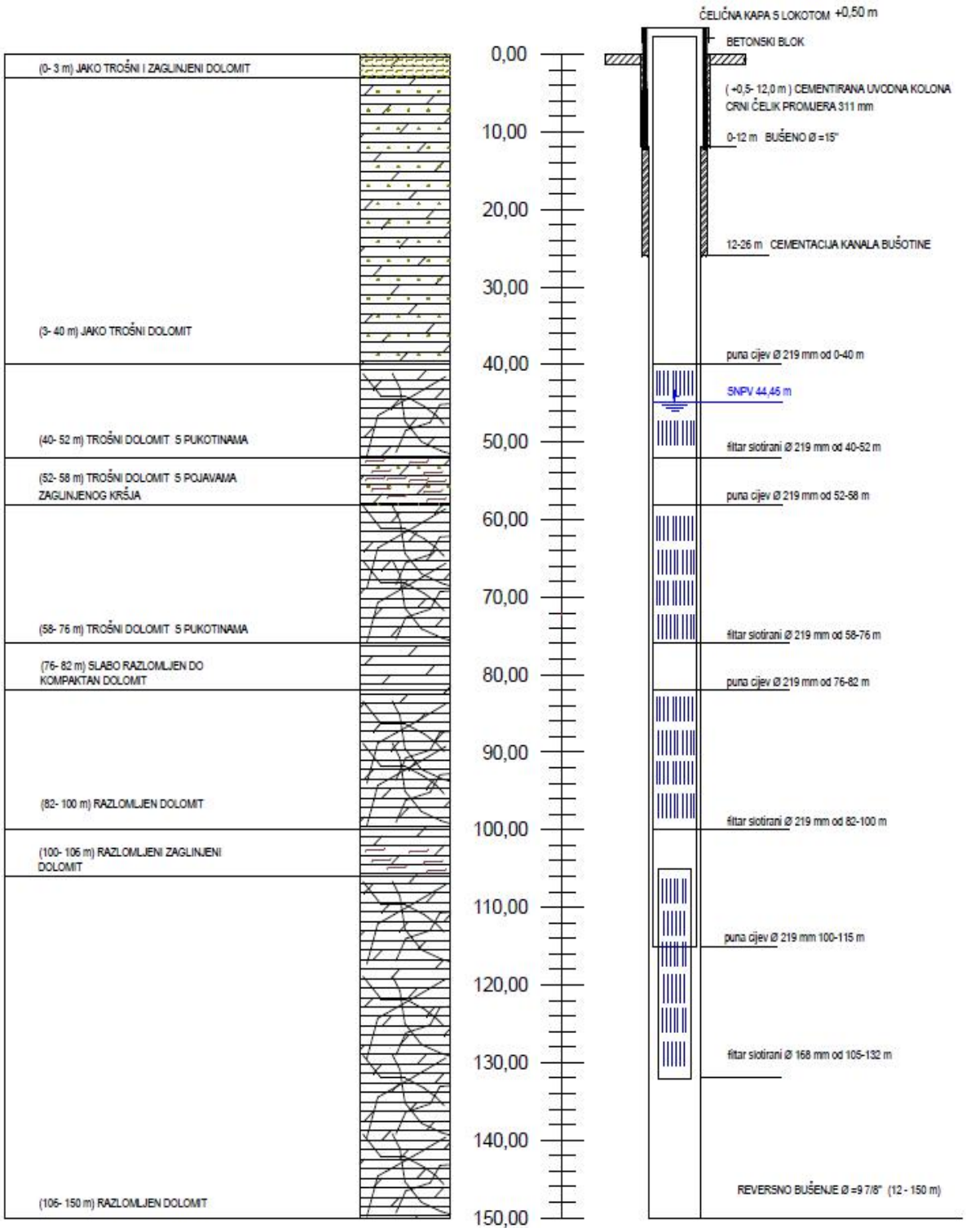
Sedimenti panona u osnovi leže konkordantno na naslagama donjeg sarmata. Pješčenjaci su određeni kao subgrauvake subangularna detritusa, koji se sastoji od zrna kvarca, feldspata, vapnenih čestica, mikrofosila, ulomaka algi, fragmenata mikrokvarcita i rožnjaka, dok vezivo predstavlja zrnati kalcit. Nevezani pijesci sadrže gotovo identičan sastav lake frakcije. Vapnenci su determinirani kao pjeskoviti biokalkareniti. Karbonatni detritus je intrabazenskog i terigenog porijekla. Ove naslage su slabopropusne što ih čini izolatorima u kojima ne postoji mogućnost postojanja vodonosnika. Panonske naslage determinirane kao pješčenjaci određeni su kao subgrauvake subangularna detritusa, koji se sastoji od zrna kvarca, feldspata, vapnenih čestica, mikrofosila, ulomaka algi, fragmenata

mikrokvarcita i rožnjaka, dok vezivo predstavlja zrnati kalcit. Nevezani pijesci sadrže gotovo identičan sastav lake frakcije. Vapnenci su determinirani kao pjeskoviti biokalkareniti. Karbonatni detritus je intrabazenskog i terigenog porijekla.

5.3. Hidrogeološke značajke

Temeljem prethodno opisanih geoloških značajki istraživanog prostora može se iščitati da je područje većinom građeno od slabo propusnih klastičnih i dobro propusnih karbonatnih naslaga. Karbonatne naslage vapnenaca i dolomita tektonski su oštećene te su pogodne za stvaranje vodonosnika. Vapnenci su na ovom prostoru zbog malog prostiranja beznačajni u hidrogeološkom pogledu, dok su donjotrijaski i kredni pješčenjaci slabopropusne stijene te kao takve ne tvore vodonosnike već imaju ulogu izolatora. Dolomitne gornjotrijske naslage radi prisutnosti sekundarne, pukotinske poroznosti čine hidrogeološki povoljnu sredinu koja omogućava infiltraciju površinskih voda u podzemlje i formiranje vodonosnika. Izvedbom bušotine Z-1/16 dubine 150 m potvrđeno je da se radi o raspucalim dolomitima koji su saturirani podzemnom vodom te tvore otvoreni pukotinski vodonosnik, što se može vidjeti i iz litološkog stupa bušotine (Slika 5.3).

Zdenac Z-1/16 je zacijevljen do konačne dubine od 132 metra u izmjenama punih cijevi i filtara. Ugrađena su četiri slotirana filtra s otvorima od 3 mm na dionicama između 40-52 m, 58-76 m, 82-100 m i 115-132 m dubine. Sva četiri filtera postavljeni su na dionice u kojima je utvrđeno da prolaze kroz raspucale dolomitne stijene bez ispune (Slika 5.4.). Podzemna voda registrirana je na dubini od 44,46 metara. Pokusno crpljenje u zdencu izvedeno je potopnom crpkom profila ⌀ = 6 ″, kapaciteta 10 l/s. Mjerenja razine podzemne vode tijekom pokusnog crpljenja obavljana su ručnim električnim mjeračem na izvedenom zdencu.



Slika 5.4. Litološki i tehnički profil zdenca Z-1/16

U svrhu određivanja optimalne količine crpljenja prilikom testiranja hidrogeoloških značajki vodonosnika prvo se provelo crpljenje u koracima čiji su podaci bilježeni i prikazani u tablici (Tablica 5.1.). Crpljenje je provedeno u tri koraka s tri različite crpne količine i trajanja svakog koraka po 4 sata. Nakon prestanka crpljenja praćen je povrat razine podzemne vode.

Tablica 5.1. Crpljenje u koracima (Z-1/16)

Datum	**SRPV (m)**	**Korak**	**Količine crpljenja i trajanje (Q –l/s, t –sati)**	**DRPV (m)**
25.11.16	44,46	1.	Q1= 2,5 ; t=4	44,75
		2.	Q2= 3,5 ; t=4	44,83
		3.	Q3= 5,0 ; t=4	45,92
		Povrat	Q=0,0 ; t=2	44,46

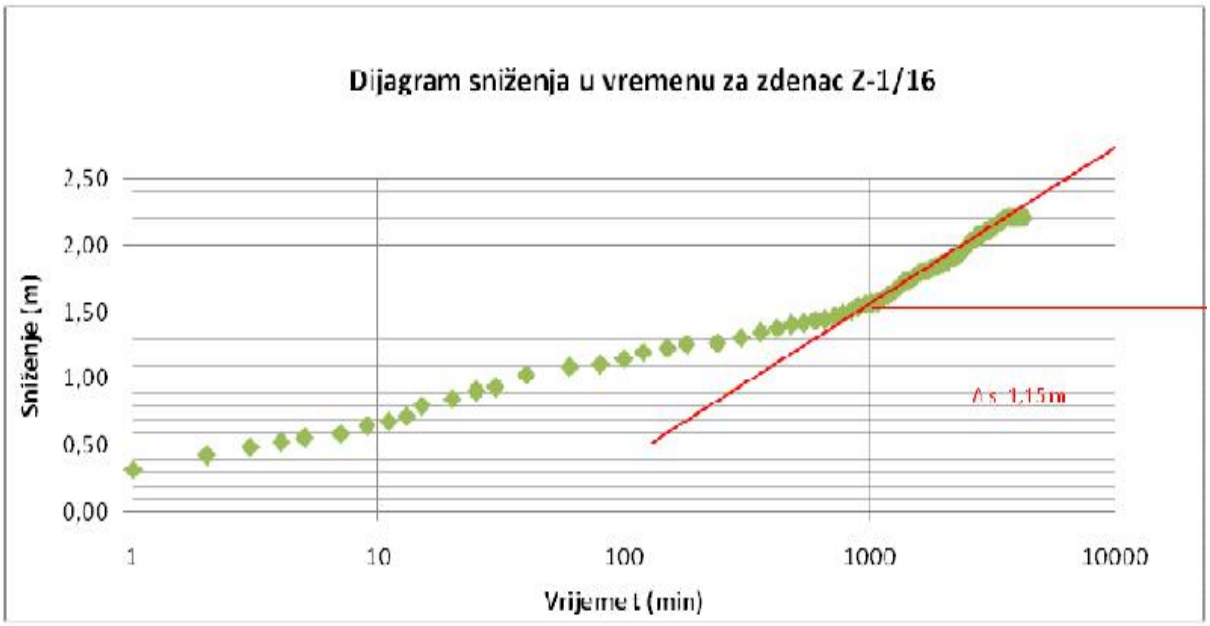
Na temelju rezultata crpljenja u koracima određen je radni kapacitet uronjene crpke za konstant test koji je izveden u trajanju od 72 sata količinom od 5 l/s nakon čega je provedeno mjerenje povrata razine podzemne vode. Kapacitet crpljenja mjeren je mjeračem protoka koji je ugrađen uz pripadajući ventil.

Konstant test, čiji su podaci prikazani u tablici (Tablica 5.2.), na zdencu proveden je nakon step testa.

Tablica 5.2. Pokusno crpljenje konstantnom količinom (Z-1/16)

Datum	**Količina crpljenja i trajanje (Q –l/s, t –sati)**	**DRPV (m)**
26.-29.11.2016.	Q= 5 ; t=72	46,67
	Q= 0 ; t=15	44,46

Nakon provedenog pokusnog crpljenja i praćenja povrata razine podzemne vode korištenjem Cooper-Jacobove semi-logaritamske nestacionarne metode Slika (5.5.) određena je transmisivnost vodonosnika u iznosu od 7 x 10^{-4} m^2/s i hidraulička vodljivost u iznosu od 6x10^{-5} m/s (GEOID-BEROŠ d.o.o., 2014).



Slika 5.5.Izmjereno sniženje u vremenu (konstant test) (GEOID-BEROŠ d.o.o., 2014.)

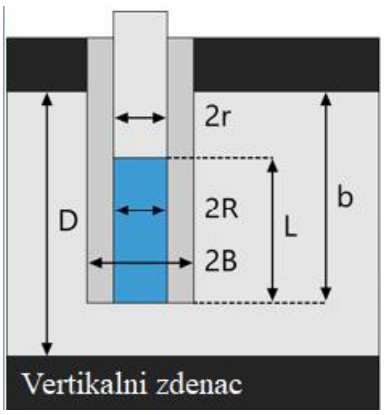
6. REINTERPRETACIJA REZULTATA POKUSNOG CRPLJENJA

6.1. Ulazni podaci

Za reinterpretaciju provedenog pokusnog crpljenja zdenca Z-1/16 koristio se softver *AquiferTest*. Pomoću tog programa na vrlo jednostavan način mogu se izračunati hidrogeološki parametri vodonosnika, poput transmisivnosti, koeficijenta uskladištenja, a pomoću njih indirektno dobiti i vrijednosti hidrauličke vodljivosti. *AquiferTest* kao ulazne podatke traži opis vodonosnika i crpke kojom se provodi crpljenje. Za ulazne podatke odabrani su podaci prikazani u tablici 6.1. s tim da je odabrana i opcija vertikalnog zdenca kakav je i istraživani zdenac Z-1/16. Oznake R, L, b, r i B prikazane su na Slici 6.1. Pored navedenih parametara potrebno je definirati tip i debljinu vodonosnika.

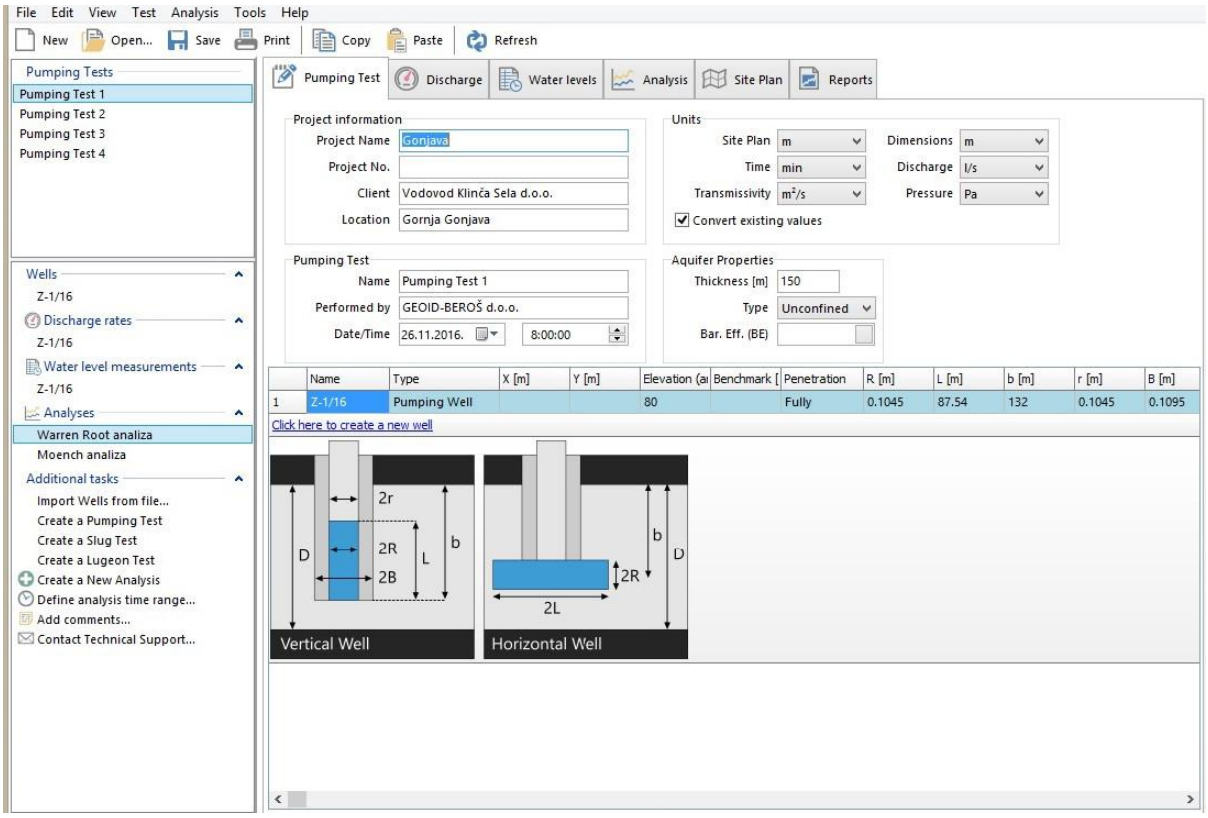
Tablica 6.1. Ulazni podaci za *AquiferTest*

Tip bušotine	**Nadm.visina [m n.m.]**	**Prodiranje**	**R [m]**	**L [m]**	**b [m]**	**r[m]**	**B [m]**
Zdenac	380	Potpuno	0,1045	87,54	132	0,1045	0,1095



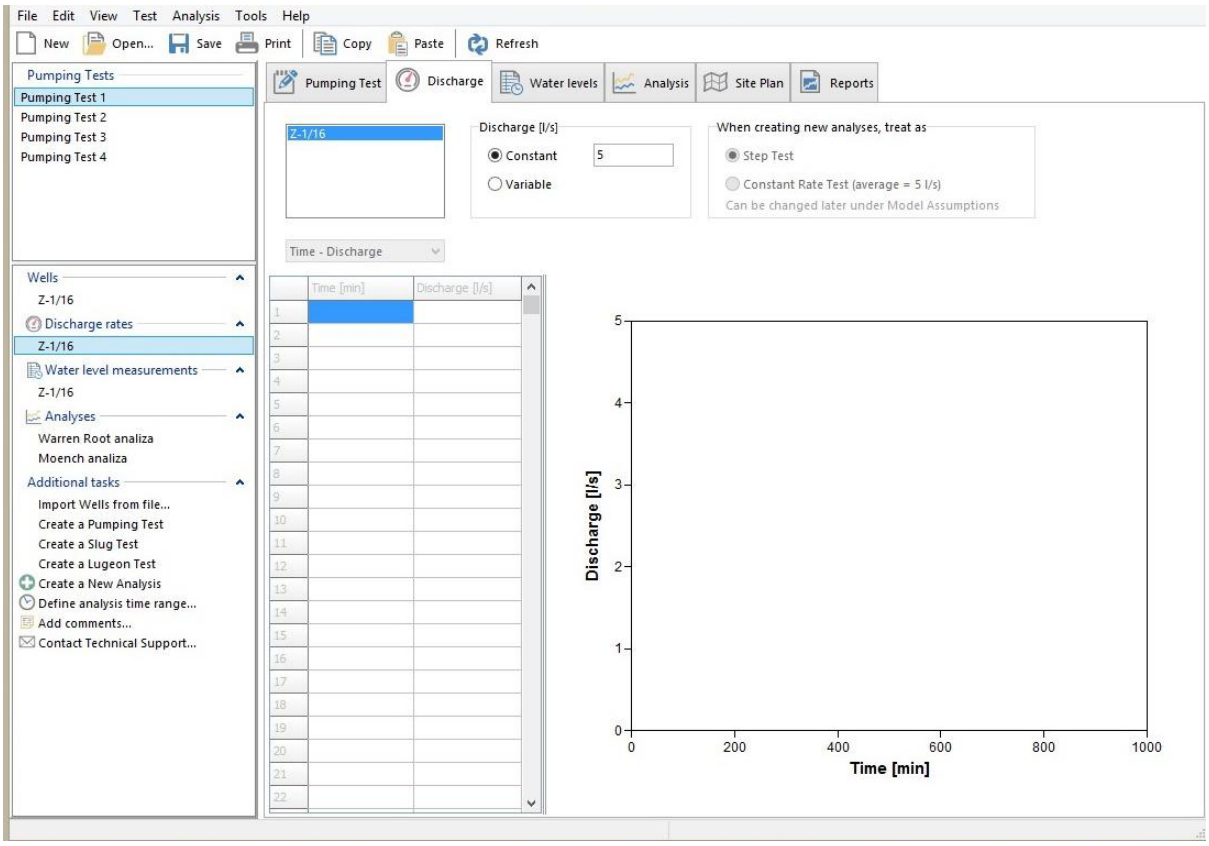
Slika 6.1 Prikaz vertikalnog zdenca i njegovih parametara

Osim tih ulaznih podataka u *AquiferTest* moraju se unijeti, kao što se vidi na slici (Slika 6.2.) i željene mjerne jedinice parametara poput vremena (min), transmisivnosti (m^2/s), izdašnosti (l/s) i duljine (m).



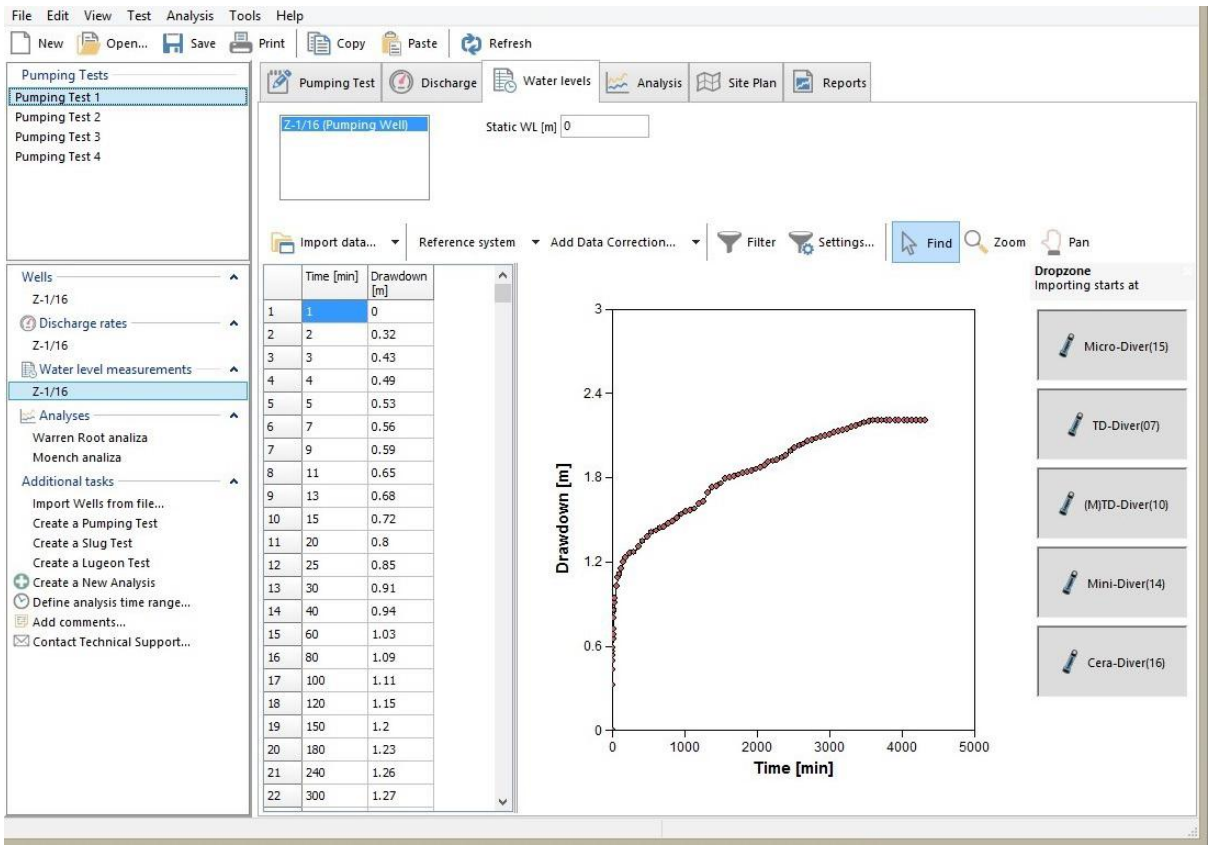
Slika 6.2. Početno sučelje *AquiferTest*-a

Nakon unesenih početnih podataka u softver, u sučelju "*Discharge*" (Slika 6.3.), u slučaju konstant testa postavljena je opcija "constant" prilikom čega se morala odrediti i crpna količina koja je u ovom slučaju iznosila 5 l/s.



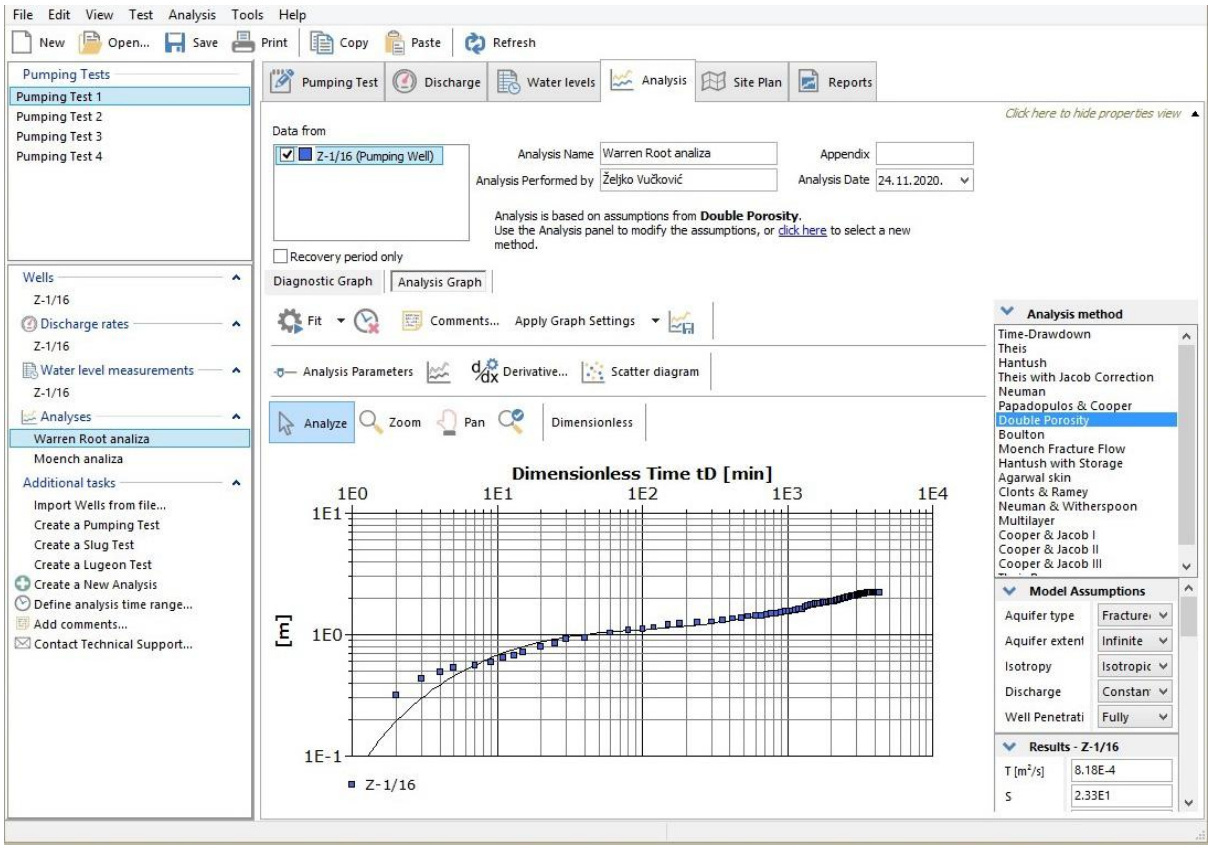
Slika 6.3. Sučelje "*Discharge*" u *AquiferTest*-u

U sučelje "*Water levels and measurements*" unose se podaci sniženja u vremenu provedenog pokusnog crpljenja a program automatski grafički prikazuje podatke s krivulje sniženja u vremenu koju se može, kao i cijelo sučelje, vidjeti na Slici 6.4.



Slika 6.4. Sučelje "*Water levels and measurements*"

Nakon unosa podataka u prethodno sučelje, prelazi se u sučelje "*Analysis*"(Slika 6.5.). Prvi korak nakon ulaska u novo sučelje je odabir metode interpretacije. Za potrebe ovog diplomskog rada odabrana je prvo Warren Root metoda koja se u softveru naziva "Double porosity" a zatim Moench metoda koja je u softveru nazvana "Moench fracture flow". U ovom se sučelju parametri transmisivnosti, koeficijenta uskladištenja, sigme i lambde mogu ručno korigirati kako bi podaci što bolje „sjeli" na tipsku krivulju sniženja. Veličina odstupanja mjerenih podataka od tipske krivulje prati se pomoću standardne devijacije. Korekcijom pojedinih parametara cilj je postići minimalno odstupanje sa što manjom standardnom devijacijom tj. što manje odstupanje krivulje sniženja od tipske krivulje.



Slika 6.5. Sučelje "*Analysis*" u *AquiferTest*-u

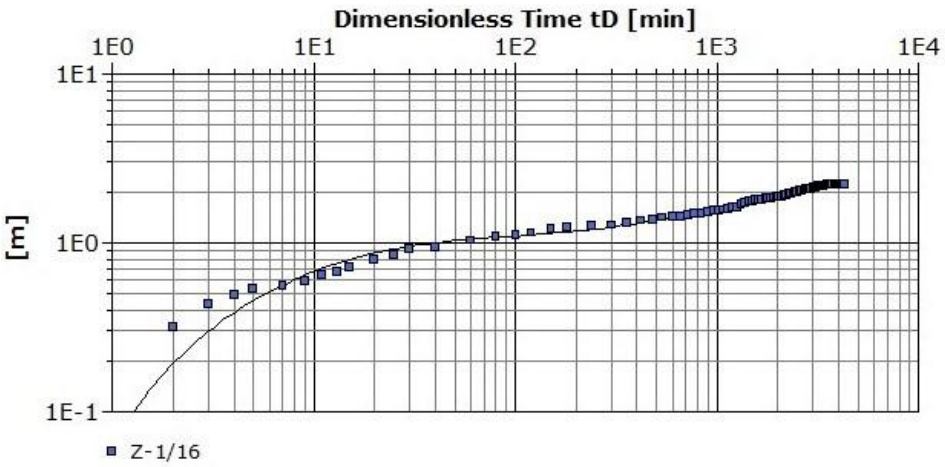
6.2. Primjena Warren Root metode

Nakon unosa podataka sniženja u vremenu softver *AquiferTest* je izvršio automatsko preklapanje izmjerenih podataka s tipskom krivuljom što je rezultiralo sljedećim parametrima: transmisivnost: $1{,}33 \cdot 10^{-4}$ m^2/s, koeficijent uskladištenja: $1{,}07 \cdot 10^{-2}$, sigma: 5000, lambda: $4{,}55 \cdot 10^{-1}$. U sljedećem koraku pristupilo se ručnom korigiranju / preklapanju na način da su se mijenjali pojedini koeficijenti. Izvedeno je deset kombinacija parametara za što bolje poklapanje krivulje sniženja s tipskom Warren Root krivuljom. Također, softver ima mogućnost zaključavanja (fiksiranja) pojedinog parametra kako se njegova veličina ne bi mijenjala kroz iteracije. U tablici 6.2. crvenom bojom označeni su parametri koji su zaključavani, a njihova vrijednost ručno je zadana u cilju što boljeg preklapanja mjerenih podataka s tipskom krivuljom.

Tablica 6.2. Hidrogeološki i statistički parametri korišteni u interpretaciji pokusnog crpljenja Warren Root metodom

Parametar	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Transmisivnost [m²/s]	1,47E-03	1,33E-03	2,17E-03	1,53E-03	1,75E-03	2,00E-03	1,84E-03	2,00E-03	1,33E-03	1,33E-03
Koeficijent uskladištenja	9,90E-01	1,07E-02	9,90E-01	9,90E-01	9,90E-01	9,90E-01	9,90E-01	9,90E-01	2,50E-01	1,40E-01
Sigma	3,00E+01	5,00E+03	1,00E+00	2,53E+01	1,00E+01	7,33E+04	6,00E+00	3,50E+00	2,13E+02	3,83E+02
Lambda	7,93E-01	4,55E-01	1,00E+01	1,00E-01	3,00E-01	5,08E-05	9,98E+00	1,00E+01	4,53E-01	4,54E-01
Statistika										
Srednji Δs [m]	-0,002	0	-0,04	-0,023	-0,006	-0,157	-0,026	-0,001	0	0,002
Zbroj kvadrata grešaka [m²]	1,078	1,053	3,151	1,664	1,623	6,054	1,769	2,395	1,053	1,053
Varijanca [m²]	0,012	0,012	0,035	0,019	0,018	0,068	0,02	0,027	0,012	0,012
Standardna devijacija [m]	0,11	0,109	0,188	0,137	0,135	0,261	0,141	0,164	0,109	0,109

Najbolja opcija (Slika 6.6.) je ona za koju je standardna devijacija najmanja, pa tako možemo vidjeti iz tablice da je standardna devijacija najmanja u drugoj, devetoj i desetoj kombinaciji. Također, iz rezultata je vidljivo da se povećanjem vrijednosti sigme smanjuje standardna devijacija iz čega se vidi da su i rezultati točniji. Budući da su vrijednosti transmisivnosti slične, odnosno istog su reda veličine, može se zaključiti da je sigma najvažniji čimbenik koji utječe na veličinu standardne devijacije i koeficijent uskladištenja. U devetom i desetom slučaju vrijednost sigme je reda veličine 10^2. Krivulja sniženja tj. mjerenih podataka se pomicala postupkom iteracije na temelju promijenjenih podataka, a na Slici 6.2. prikazan je završni korak s najmanjim odstupanjem.



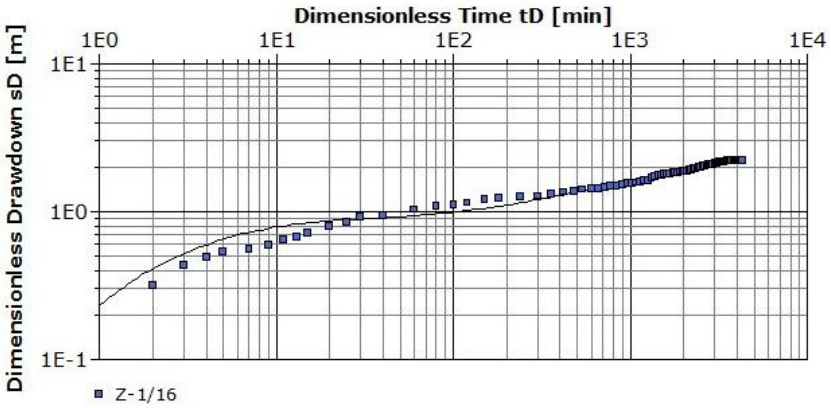
Slika 6.6. Najbolje preklapanje izmjerenih podataka s Warren Root tipskom krivuljom

Program je u svakom koraku izvršavao 500 iteracija. Iz rezultata se može vidjeti da, unatoč tome što se transmisivnost, osim u desetom slučaju, nije previše mijenjala, vrijednost uskladištenja se mijenja za red veličine. Vrijednosti uskladištenja treba uzeti s

posebnim oprezom jer je praćenje utjecaja pokusnog crpljenja vršeno isključivo u samom zdencu, a to u pravilu onemogućuje izračun vrijednosti uskladištenja.

6.3. Primjena Moench metode

Za računanje parametara pomoću Moench-ove metode (Slika 6.7.) korišteni su isti ulazni podaci, ali mijenjani su različiti parametri u cilju dobivanja što manje standardne devijacije što se može i vidjeti iz tablice (Tablica 6.3.)



Slika 6.7. Krivulja sniženja s podacima koji najviše odgovaraju za Moench analizu

Tablica 6.3. Veličine parametara unesenih i zaključanih u *AquiferTest*-u za Moench-ovu metodu

Parametar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Transmisivnost [m²/s]	1,47E-03	4,13E-04	8,49E-04	8,49E-04	1,52E-03	1,50E-04	2,24E-04	2,61E-03	5,00E-03	1,33E-03
Koeficijent uskladištenja	9,90E-01	7,73E-01	4,21E-01	3,00E-01	1,00E-01	1,08E-01	1,02E-01	3,00E-01	1,00E-01	1,42E-01
Sigma	3,00E+01	5,00E+03	9,00E+02	1,26E+03	2,48E+02	3,56E+04	5,14E+04	2,38E+04	3,43E+04	3,78E+02
Gama	9,94E+00	3,22E-01	2,22E-01	2,22E-01	1,14E+03	1,99E+00	8,32E-01	4,50E-02	2,86E-09	3,02E-01
SF	1,24E+02	4,23E-02	1,00E-07	1,00E-07	3,62E+01	9,33E-01	2,50E-01	1,00E+03	6,75E+02	2,01E-01
Statistics of the Fit										
Srednji Δs [m]	-0,002	0	0	0	0,001	-0,069	-0,004	-0,049	0,604	0,002
Zbroj kvadrata grešaka [m²]	1,078	0,641	0,221	0,222	1,11	7,06	1,079	6,136	13,523	1,053
Varijanca [m²]	0,012	0,007	0,002	0,002	0,012	0,079	0,012	0,069	0,152	0,012
Standardna devijacija [m]	0,11	0,085	0,05	0,05	0,112	0,282	0,11	0,236	0,39	0,109

Iz tablice 6.3 može se vidjeti da je najmanja standardna devijacija (treći i četvrti slučaj) dobivena kad je transmisivnost za red veličine manja, a vrijednost sigme povećana za red veličine. No, vrijednosti koeficijenta uskladištenja su u tom slučaju dosta visoke (0,421 i 0,3) i može se reći nerealno visoke. U desetom slučaju smanjenjem sigme transmisivnost

se smanjuje za red veličine, a koeficijent uskladištenja poprima realniju vrijednost od 0,142. Varijacijama koeficijenta SF nije uočen značajni utjecaj na konačni rezultat, pa se može zaključiti da u ovom slučaju inkrustacija stijenki pukotina nema značajnu ulogu.

7. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Usporedbom rezultata interpretacije pokusnog crpljenja dobivenih Warren Root i Moench metodom vidljivo je da su se u ovom slučaju s obje metode dobili vrlo slični rezultati. Prilikom reinterpretacije podataka Warren Root metodom prosječna standardna devijacija bila je 0,1463, dok je prilikom reinterpretacije podataka Moench metodom ona iznosila 0,1534. Unatoč prosječnoj vrijednosti standardne devijacije, njena najmanja zabilježena vrijednost bila je u trećem i četvrtom slučaju Moench metode.

Primjenom Warren Root metode konačna vrijednost vrijednost transmisivnosti iznosi $1{,}33 \times 10^{-3}$ m^2/s, koeficijenta uskladištenja 0,14 do 0,25 te je raspon vrijednosti sigme između 200 i 400.

Primjenom Moench metode konačna vrijednost transmisivnosti iznosi $1{,}33 \times 10^{-3}$ m^2/s, koeficijenta uskladištenja 0,142 uz vrijednost sigme 378.

Ostale veličine koje su zajedničke u obje metode su približno slične.

Usporedbom transmisivnosti ($1{,}33 \times 10^{-3}$ m^2/s) dobivene pomoću ove dvije metode s rezultatima prethodne interpretacije pomoću Cooper-Jacobove semi-logaritamske nestacionarne metode u iznosu od 7×10^{-4} m^2/s, utvrđena je značajna razlika.

Obzirom da je prilikom ove reinterpretacije uzet u obzir cijeli niz mjerenih podataka, za razliku od prvotne interpetacije kada su interpretirane samo zadnje dvije trećine podataka, može se s velikom sigurnošću zaključiti da je rezultat reintrepretacije točniji.

8. LITERATURA

BAČANI, A., 2006. Hidrogeologija I. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, str. 95-107

BRALIĆ, N., 2015. Prikupljanje i obrada podataka o diskontinuitetima potrebnih za procjenu hidrogeoloških parametara stijenskih masa, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni-fakultet, str. 2-21

GEOID-BEROŠ d.o.o., 2014. Tehničko izvješće izvedbe zdenca za istražnu bušotinu IB-2 Donja Gonjeva za potrebe vodoopskrbe Klinča Sela

ISRM, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuitiesin rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 15 (6), str. 319-368.

KAZEMI, H., 1969. Pressure Transient Analysis of Naturally Fractured Reservoirs with Uniform Fracture Distribution. Society of Petroleum Engineers Journal, vol. 9, No. 9, str. 451-462.

MOENCH, A.F., 1984. Double-Porosity Models for Fissured Groundwater Reservoir with Fracture Skin. Water Resources Research, vol. 20, No. 7, str. 831-846.

SINGHAL, B.B.S., GUPTA, R.P., 1999. Applied hydrogeology of fractured rocks. 2. izd. London: Kluwer Academic Publisher, p. 400.

ŠIKIĆ, K., BASCH, D. & ŠIMUNIĆ, A. (1977): Osnovna geološka karta SFRJ (1:100000). List Zagreb. Savezni geološki zavod, Beograd.

ŠIKIĆ, K., BASCH, D. & ŠIMUNIĆ, A. (1979): Tumač Osnovne geološke karte SFRJ (1:100000). List Zagreb. Savezni geološki zavod, Beograd.

Literatura preuzeta s interneta:

https://www.waterloohydrogeologic.com/help/aquifertest/index.html?test_description.htm (22.11.2020.)

KLASA: 602-04/20-01/258
URBROJ: 251-70-14-20-2
U Zagrebu, 11.01.2021.

Željko Vučković, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/258, UR. BROJ: 251-70-14-20-1 od 06.02.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

IN-SITU TESTIRANJE PUKOTINSKOG VODONOSNIKA CRPLJENJEM

Za voditeljicu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Jelena Parlov, izvanredna profesorica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditeljica

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Jelena Parlov

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko Ružičić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)