

# Hidrauličko testiranje pukotinskih vodonosnika ulijevanjem i utiskivanjem

---

Čorak, Goran

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:169:889309>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij geološkog inženjerstva

HIDRAULIČKO TESTIRANJE PUKOTINSKIH VODONOSNIKA ULIJEVANJEM I  
UTISKIVANJEM

Diplomski rad

Goran Čorak

Zagreb, 2021.

HIDRAULIČKO TESTIRANJE PUKOTINSKIH VODONOSNIKA ULIJEVANJEM I  
UTISKIVANJEM

GORAN ČORAK

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

Sažetak

U radu su prikazane metode testiranja hidrogeoloških značajki pukotinskih vodonosnika s naglaskom na „*In situ*“ testiranja ulijevanjem i utiskivanjem. Detaljno su obrađeni podaci testiranja utiskivanjem na području klizišta Kostanjek u Podsusedu, te su reinterpetirani u programu *AquiferTest*. Usporedbom dobivenih i postojećih rezultata primijećena su manja odstupanja što se može obrazložiti prekidima u ispitivanjima zbog nedostatka vremena i vode, nepredviđenim okolnostima tijekom mjerenja te nepreciznim i nepotpunim terenskim zapisima.

Ključne riječi: pukotinski vodonosnici, Lugeonove jedinice, slug test, packer test, reinterpetacija podataka, hidraulička vodljivost

Diplomski rad sadrži: 58 stranica, 38 slika, 12 tablica i 15 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Jelena Parlov, RGNF

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Jelena Parlov, RGNF

Izv. prof. dr. sc. Željko Duić, RGNF

doc. dr. sc. Zoran Kovač, RGNF

Datum obrane: 12. veljače 2021.

HYDRAULIC TESTING OF A FRACTURED AQUIFER BY SLUG AND PACKER  
TEST

GORAN ČORAK

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department Of Geology And Geological Engineering  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

This thesis presents most common testing methods of hydrogeological features in fractured aquifers with emphasis on „*In situ*“ testing by slug and packer test. Processed data, originates from elaborate "Ispitivanja vodopropusnosti" on landslide Kostanjek in Podsused. Data was subjected to reinterpretation using program application *AquiferTest*. While comparing old and new data results and pressure-flow, total height-flow and Lugeon graphs it can be seen that they are similar with some small deviations. It is widely regarded that these deviations are consequence of time and water deficiency, unpredictable circumstances, imprecise and incomplete results.

Keywords: fractured aquifers, Lugeon units, slug test, packer test, data reinterpretation, hydraulic conductivity

Thesis contains: 58 pages, 38 images, 12 tables and 15 references

Original language: Croatian

Thesis deposited in : 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  
Assistant Professor Zoran Kovač, PhD

Date of defense: February 12, 2021.

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. PUKOTINSKI VODONOSNICI .....	2
3. IN-SITU METODE TESTIRANJA .....	4
3.1. Utiskivanje (engl. packer test).....	4
3.2. Ulijevanje (engl. slug test).....	6
3.3. Pokusno crpljenje .....	11
4. TESTIRANJE UTISKIVANJEM.....	13
4.1. Osnovne postavke i postupak testiranja.....	13
4.2. Rezultati testiranja .....	19
5. INTERPRETACIJA REZULTATA TESTIRANJA UTISKIVANJEM.....	21
5.1. Uvod i sučelje programa.....	21
5.2. Lugeon test .....	22
6. REINTERPRETACIJA REZULTATA TESTIRANJA UTISKIVANJEM.....	28
6.1. Rezultati testiranja utiskivanjem .....	31
6.2. Reinterpretacija provedenih mjerenja.....	40
6.3. Usporedba rezultata .....	46
7. ZAKLJUČAK.....	55
8. LITERATURA .....	56

## Popis slika:

Slika 2.1. Shematski prikaz pukotinskog vodonosnika (prema Heath, 1984).....	2
Slika 3.1. Standardni Lugeonov test s jednim ‘pakerom’ (Singhal i Gupta, 2010).....	4
Slika 3.2. Modificirani Lugeonov test u stijeni s tri seta pukotina (Singhal i Gupta, 2010).	5
Slika 3.3. Test ulijevanja (engl. slug test) u zatvorenom vodonosniku (Singhal i Gupta, 2010).....	6
Slika 3.4. Prikaz sniženja vode nastalog uslijed crpljenja iz vodonosnika visoke i niske transmisivnosti (Singhal i Gupta, 2010).....	11
Slika 4.1. Dijelovi aparature za utiskivanje (Milanović, 1979).....	16
Slika 4.2. Mjerenje tlaka bušotinskim pretvaračem (Waterloo Hydrogeologic, 2020).....	18
Slika 4.3. Mjerenje tlaka tlakomjernom stanicom na površini (Waterloo Hydrogeologic, 2020).....	18
Slika 4.4. Prikaz najčešćim dijagrama pri interpretaciji rezultata ispitivanja hidrauličke vodljivosti prema Lugeon metodi (Milanović, 1979).....	20
Slika 5.1. Prikaz kartica u Lugeonovom testu u okružju programa AquiferTest.....	22
Slika 5.2. Prikaz primjera kartice Lugeon Test Data & Analysis za zadane vrijednosti.....	23
Slika 5.3. Prikaz primjera kartice Reports za zadane vrijednosti.....	24
Slika 5.4. Dijagram tlaka (Waterloo Hydrogeologic, 2020).....	25
Slika 5.5. Lugeonov dijagram (Waterloo Hydrogeologic, 2020).....	26
Slika 5.6. Dijagram protok-tlak (Waterloo Hydrogeologic, 2020).....	26
Slika 5.7. Tipični oblici dijagrama i interpretacija Lugeonovog testa (Waterloo Hydrogeologic, 2020).....	27
Slika 6.1. Prikaz korištenog sustava za održavanje konstantnog tlaka i utiskivanje vode (Ortolan i dr., 1989).....	28
Slika 6.2. Litološki stup Kostanjeka i okolice (Štimac, 2016).....	29
Slika 6.3. Geološki profil na području Kostanjek i kamenoloma Bizek (Štimac, 2016).....	30
Slika 6.4. "Q"-t"-dijagram mjerenih podataka prilikom mjerenja slobodnog izlivanja iz piezometra KS-6/I i KS-6/II (Ortolan i dr., 1989).....	37
Slika 6.5. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 7.....	40
Slika 6.6. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 13... 41	
Slika 6.7. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 15... 41	
Slika 6.8. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 19... 42	
Slika 6.9. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 22... 43	

Slika 6.10. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 45.	43
Slika 6.11. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 47.	44
Slika 6.12. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 51..	45
Slika 6.13. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 54..	45
Slika 6.14. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 7 .....	46
Slika 6.15. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 13 .....	47
Slika 6.16. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 15 .....	48
Slika 6.17. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 19 .....	49
Slika 6.18. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 22 .....	50
Slika 6.19. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 45 .....	51
Slika 6.20. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 47 .....	52
Slika 6.21. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 51 .....	53
Slika 6.22. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 54 .....	54

## **Popis tablica:**

Tablica 4-1 Podjela stijena prema specifičnoj propusnosti (Quiñones-Rozo, 2010) .....	14
Tablica 6-1 Reinterpretirani testovi utiskivanja (Ortolan i dr., 1989).....	31
Tablica 6-2 Nereinterpretirani testovi utiskivanja (Ortolan i dr., 1989).....	32
Tablica 6-3 Testiranje broj 7 (Ortolan i dr., 1989) .....	33
Tablica 6-4 Testiranje broj 13 (Ortolan i dr., 1989) .....	34
Tablica 6-5 Testiranje broj 15 (Ortolan i dr., 1989) .....	34
Tablica 6-6 Testiranje broj 19 (Ortolan i dr., 1989) .....	35
Tablica 6-7 Testiranje broj 22 (Ortolan i dr., 1989) .....	36
Tablica 6-8 Testiranje broj 45 (Ortolan i dr., 1989) .....	36
Tablica 6-9 Testiranje broj 47 (Ortolan i dr., 1989) .....	37
Tablica 6-10 Testiranje broj 51 (Ortolan i dr., 1989) .....	38
Tablica 6-11 Testiranje broj 54 (Ortolan i dr., 1989) .....	39

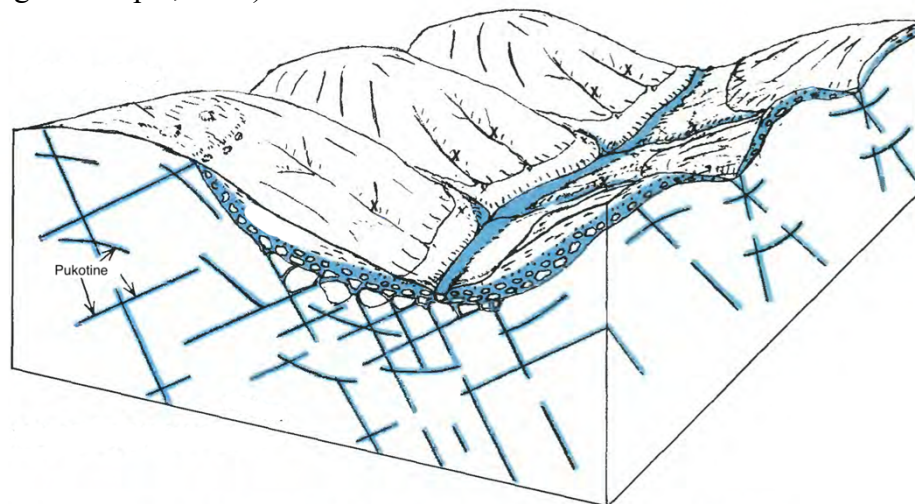


## 1. UVOD

Cilj rada je prikazati presjek metoda ispitivanja hidrogeoloških značajki pukotinskih vodonosnika s naglaskom na „*In situ*“ testiranja ulijevanjem i utiskivanjem. Glavna značajka pukotinskih vodonosnika, za razliku od vodonosnika međuzrnske poroznosti, je prisutnost sekundarne poroznosti tj. pukotina u kojima se fluidi nalaze, kroz koje se kreću, ali i djeluju na njih na način da ih proširuju mehaničkim ili kemijskim trošenjem. Takvi se vodonosnici mogu napajati izravnim ulazom vode kroz raspucalu stijensku masu ili koncentriranim poniranjem površinskih tokova. Diskontinuitet je skupni naziv koji podrazumijeva stijenske kontakte, 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. Pukotine nastaju različitim prirodnim i geološki procesima. Ti procesi uključuju vremenske faktore, djelovanje magme i različita naprezanja. Omogućavaju protok i zadržavanje fluida duž diskontinuiteta. Ispucala stijena se dijeli na tri osnovne komponente, a to su: matriks (stijenska masa), mreža pukotina i ispunjena pukotina u obliku fluida ili krutog materijala. Mnogi uvjeti kao što naprezanje, temperatura, geometrija loma i ostali kontroliraju tečenje podzemne vode kroz pukotine. Tečenje podzemne vode u takvoj sredini aproksimira se različitim modelima poput modela paralelnih ploča, modela dvostruke poroznosti, ekvivalentnog modela poroznog medija, modela diskretne pukotinske mreže i modela ekvivalentnih paralelnih ploča. Hidraulička svojstva stijena mogu se procijeniti pomoću nekoliko metoda u laboratoriju i na terenu. Odabir metode ovisi o cilju i razmjerima istraživanja. Laboratorijske metode jeftinije su i brže za razliku od terenskih, ali ne daju točan odraz stanja proučavane formacije. Podijeljene su na izravne i neizravne metode. Izravne laboratorijske metode su testiranja u permeamtru sa stalnom ili promjenjivom razinom te proračun protoka na temelju zjevova pukotina, odnosno njihove hrapavosti. Za rješavanje problema malih razmjera poput prodiranja vode u rudnike, prijevoza zagađivača i geotehničkih istraživanja, u terenskim metoda koriste se packer test, slug test, cross-hole test i trasiranje. Ako su problemi većih razmjera poput razvoja i upravljanja podzemnim vodama na regionalnoj razini, ispitivanja se izvode metodama pokusnog crpljenja. Pomoću navedenih metoda dobivaju se parametri hidrauličke vodljivosti, propusnosti i ostalih.

## 2. PUKOTINSKI VODONOSNICI

Pukotinska poroznost dominantno se pojavljuje u čvrstim stijenama, pješčenjacima, bazaltnim, granitnim ili karbonatnim stijenama. Njihova je primarna poroznost najčešće izuzetno mala, a efektivna poroznost gotovo zanemariva te se kroz takve stijene, ako nisu tektonski oštećene, ne može odvijati tečenje podzemne vode pod utjecajem gravitacije. Voda u stijenama pukotinske, odnosno sekundarne poroznosti, ispunjava prostor među stijenkama pukotina (slika 2.1.) . Kod pukotinskih vodonosnika, hidrauličke značajke mogu se procijeniti pomoću različitih terenskih metoda. S obzirom na to da parametri, koji su određeni laboratorijski, nisu reprezentativni za cijeli vodonosnik, u pravilu se koriste za dobivanje samo grube slike o vodonosniku (Parlov, 2019a). Dokaz tome jest činjenica da su pukotine i putevi tečenja u pravilu nepravilno raspoređeni u prostoru s nepravilnom geometrijom i položajem (Parlov, 2019b). Tečenje podzemne vode može biti laminarno ili turbulentno. Turbulentno tečenje karakterizirano je velikim brzinama i nastajanjem vrtloga. Kod laminarnog tečenja brzine su manje i ujednačene, a linije toka paralelne. Gibanje tekućine opisuje se pomoću linija toka odnosno strujnica. Strujnice su zamišljene linije u fluidu čija tangenta, za svaku točku zasebno, pokazuje smjer brzine. Preko gustoće strujnica može se dobiti iznos brzine, zato što su gustoća strujnica i brzina međusobno proporcionalne veličine. Dio fluida koji je omeđen strujnicama nazivamo strujnom cijevi. Pri laminarnom toku putanja (niz uzastopnih položaja koje čestice fluida zauzimaju pri gibanju) se poklapa sa strujnicom. Strujnice pri takvom stacionarnom strujanju niti ulaze niti izlaze iz strujne cijevi i to je razlog paralelnih linija toka (Pleslić, 2014). Kod pukotinskih vodonosnika tip tečenja se može promijeniti više puta uzduž iste pukotine i vrlo je česta pojava turbulentnog tečenja (Singhal i Gupta, 2010).



Slika 2.1. Shematski prikaz pukotinskog vodonosnika (prema Heath, 1984)

Specifičnost pukotinskih vodonosnika jest njihova poroznost. Kod takvog tipa vodonosnika često je gotovo nemoguće točno odrediti njihovu hidrauličku vodljivost. Ona može drastično oscilirati unutar vrlo malog područja. Drugim riječima, da bi se odredila prosječna propusnost, trebao bi biti poznat izuzetno veliki broj podataka o propusnosti na pojedinim točkama. Uzrok tome su kanali, kaverne i pukotine koji se nalaze u zoni oscilacije razina podzemne vode. Svi procesi koji djeluju u toj zoni djeluju u smjeru proširivanja kanala, što za posljedicu ima povećanje hidrauličke vodljivosti. Međutim, određivanje zona izraženije hidrauličke vodljivosti važnije je od određivanja prosječne hidrauličke vodljivosti, jer se na jako malim udaljenostima vrijednosti hidrauličke vodljivosti mogu drastično razlikovati. Tečenje je vezano gotovo isključivo uz pukotine i pukotinske zone izvan kojih je mogućnost tečenja izuzetno mala ili je nema.

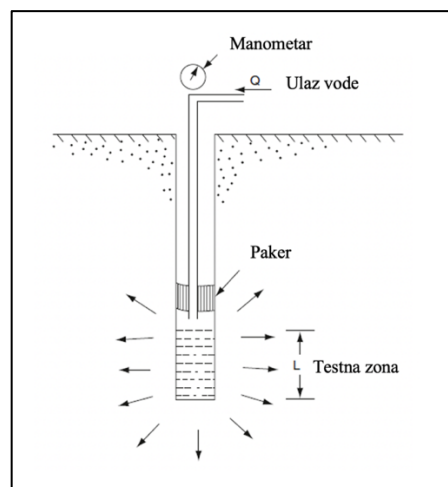
### 3. IN-SITU METODE TESTIRANJA

Odabir metode koja će se koristiti za dobivanje hidrogeoloških parametara stijenske mase ovisi o svrsi istraživanja, mjerilu, praktičnim ograničenjima i uvjetima. Prilikom rješavanja problema na lokalnoj razini, poput geotehničkih istraživanja, prodora vode u rudnike i odlaganja otpada koriste se utiskivanje (engl. packer test), ulijevanje (engl. slug test), cross-hole i tracer testovi. U slučaju istraživanja na regionalnoj razini primjenjuju se pokusna crpljenja (Parlov, 2019a).

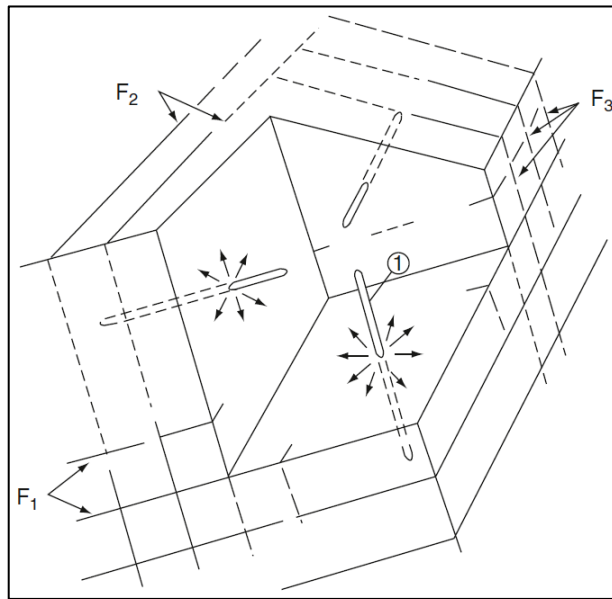
#### 3.1. Utiskivanje (engl. packer test)

Poznat još kao i test utiskivanja, packer test koristi se za rješavanje problema na lokalnoj razini. Test se obavlja u nezacijevljenim bušotinama, kada je cilj određivanje hidrauličkih značajki raspucale stijenske mase (hidrauličke vodljivosti) za određeni interval bušotine izoliran tzv. „pakerima“. Princip rada temelji se na utiskivanju vode pod određenim tlakom u izolirani dio bušotine te mjerenju promjene protoka. U ovisnosti o cilju istraživanja postoje tri tipa testova utiskivanja, a to su: standardni i modificirani Lugeonov (slika 3.1. i 3.2. ) test te „cross-hole“ test (Parlov, 2019a).

Cross-hole test predviđen je za dobivanje značajki matriksa i pukotina saturirane i nesaturirane zone. Izvodi se u nasumično orijentiranim bušotinama. Najčešće se u praksi koristio prilikom istraživanja za odabir lokacije pogodne za odlaganje radioaktivnog otpada. Spada u potkategoriju testova utiskivanja i služi za dobivanje hidrauličkih značajki stijenske mase u prostoru na temelju testiranja „lepeze“ nasumično orijentiranih bušotina (Parlov, 2019a).



Slika 3.1. Standardni Lugeonov test s jednim „pakerom“ (Singhal i Gupta, 2010)

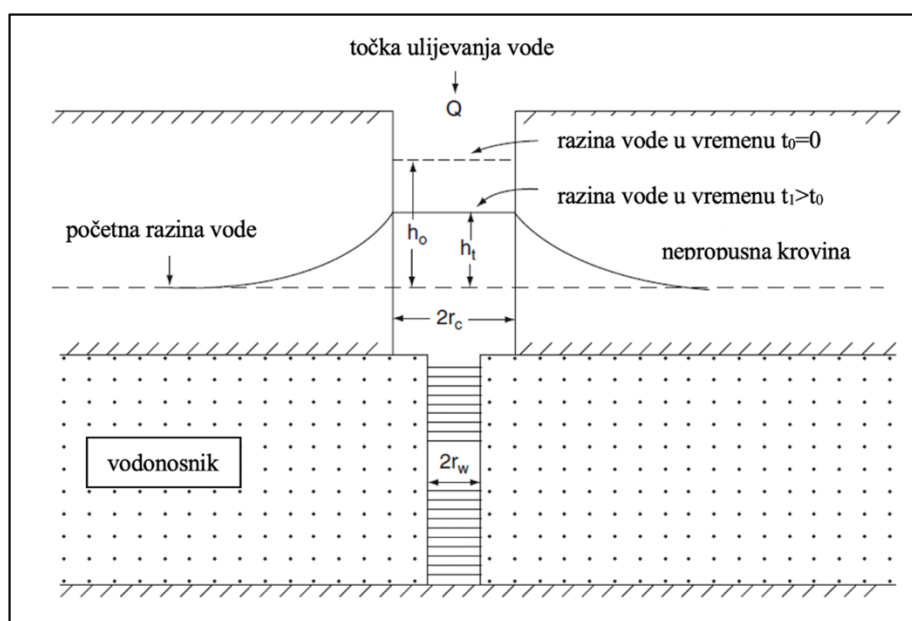


Slika 3.2. Modificirani Lugeonov test u stijeni s tri seta pukotina (Singhal i Gupta, 2010)

Detaljan opis standarnog Lugeonovog testiranja i načina interpretacije rezultata prikazan je u poglavlju 4.

### 3.2. Ulijevanje (engl. slug test)

Test ulijevanja (engl. slug test) (slika 3.3.) sastoji se od naglog ulijevanja poznatog volumena vode u bušotinu i praćenja promjene razine vode u vremenu. Test je poprilično jednostavan i relativno brz. Kao i test utiskivanja, test ulijevanja se provodi za pridobivanje lokalnih hidrogeoloških značajki (zahvaća mali volumen vodonosnika). To znači da dobivena mjerenja nisu reprezentativna za cijeli vodonosnik nego samo za njegov manji dio. Trajanje testa ovisi o propusnosti stijenskog materijala i promjeru bušotine, pa se može zaključiti da, što je propusnost stijenskog materijala manja, test će trajati dulje te što je promjer bušotine u slabo propusnim materijalima manji, test će trajati kraće (Parlov, 2019a). Ulijevanjem vode poznatoga volumena u ispitivanu bušotinu uzrokuje se povećanje razine vode, a zatim se prati promjena razine (pad) u vremenu. Ulijevanje je izuzetno jednostavna i jeftina metoda, zato što ne zahtijeva puno opreme ili ljudstva, te kratko traje. Piezometri također nisu potrebni, a može se primijeniti čak i ako u neposrednoj blizini postoje aktivni zdenci.



Slika 3.3. Test ulijevanja (engl. slug test) u zatvorenom vodonosniku (Singhal i Gupta, 2010)

Najčešće korištene metode analiziranja rezultata testa ulijevanja su Hvorsleva, Bouwer-Riceova, Cooper-Bredehoeft-Papandopulosova, Butlerova, Daganova i Binkhorst-Robbinsonova.

Hvorslev-ovom metodom (Hvorslev, 1951) može se odrediti hidraulička vodljivost. Hvorslev definira vremenski odmak  $T_L$  kao vrijeme koje je potrebno da se početno povećanje ili smanjenje tlaka, uzrokovano promjenom volumena vode koja ulazi ili izlazi iz sustava, rasprši pretpostavljajući konstantan protok (Waterloo Hydrogeologic, 2020):

$$T_L = \frac{\pi * r^2}{F * K} \quad (3-1)$$

gdje je:

$r$  – radijus piezometra [m];

$F$  – predstavlja faktor oblika koji ovisi o dimenzijama ulazne količine vode u piezometar;

$K$  – hidraulička vodljivost unutar radijusa utjecaja [m/s].

Kada se dobiveni izraz za vremenski odmak uvrsti u izraz za hidrauličku vodljivost, terenski podaci iscrtavaju se s izrazom  $\log h_t/h_0$  na x os, a vrijeme na y os (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

Iz toga slijedi izraz za  $K$ :

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_L} \quad (3-2)$$

gdje je:

$L$  – duljina filtera bušotine [m];

$R$  – radijus bušotine uključujući šljunčani zasip [m];

$T_L$  – vremenski odmak kada je  $h_t/h_0=0,37$ .

Hvorslev metoda pretpostavlja otvoren ili zatvoren, homogen, izotropan i vodonosnik neograničenog prostiranja, ujednačene debljine na svakom svome dijelu. Vodno lice u njemu pretpostavljeno je horizontalno prije početka testa. Promjene razine podzemne vode su trenutne, što upućuje na trenutni ulaz ili izlaz određenog volumena vode. Inercija stupca vode i gubici na zdencu su zanemarivi. Bušotina je beskonačno male širine i završava

na kontaktu s podinom, odnosno prodiranje je potpuno, a tok je horizontalan u odnosu na nju (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

Bouwer-Rice metoda primjenjuje se u slučajevima nezavršenih zdenaca. Bouwer-Riceova jednačba za određivanje hidrauličke vodljivosti je:

$$K = \frac{r^2 * \ln\left(\frac{R_{cont}}{R}\right)}{2L} * \frac{1}{t} * \ln\left(\frac{h_0}{h_t}\right) \quad (3-3)$$

gdje je:

- r – radijus utjecaja piezometra [m];
- R – radijus mjeren od sredine bušotine do točke u kojoj materijal vodonosnika nije poremećen prilikom bušenja [m];
- R<sub>cont</sub> – radijus utjecaja ulijane vode u vodonosnik [m];
- L – duljina filtera zdenca bušotine [m];
- B – duljina dijela bušotine koji se nalazi u vodonosniku [m];
- h<sub>0</sub> – početna razina [m];
- h<sub>t</sub> – razina u funkciji vremena [m].

Početne pretpostavke su da je vodonosnik otvoren ili poluzatvoren, homogen i izotropan, ujednačene debljine te beskonačnog prostiranja s vertikalnom drenažom s površine. Također, pretpostavlja da je vodno lice prije testa horizontalno, trenutnu promjenu potencijala u bušotini te potpuno ili djelomično prodiranje zdenca u vodonosnik. Tok je stacionaran i nema tečenja iznad vodne plohe (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

Cooper-Bredehoeft-Papandopulosov metoda primjenjuje se prilikom trenutnog ulijevanja ili crpljenja određenog volumena vode iz zdenca velikog promjera u zatvorenom vodonosniku. Ukoliko se volumen vode upumpava u bušotinu, dolazi do dizanja vodnog lica iznad ravnotežne razine te metoda predviđa zadržavanje, a ukoliko se bilježi smanjenje nivoa vodnog lica ispod ravnotežne razine, pomoću metode se računa sniženje. Zadržavanja ili sniženja razina izražava se formulom (Waterloo Hydrogeologic, 2020):



$$s = \frac{2H_0}{\pi} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\beta u^2}{\alpha}\right) \left[ J_0\left(\frac{ur}{r_c}\right) [uY_0(u) - 2\alpha Y_1(u)] - Y_0\left(\frac{ur}{r_c}\right) [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)] \right] \left(\frac{1}{\Delta(u)}\right) du \quad (3-4)$$

gdje je:

$H_0$  – početna promjena razine vodnog lica zbog ulijevanja ili crpljenja;

$R$  – radijus utjecaja ulijane vode [m];

$r_c$  – efektivni radijus ulaznog dijela bušotine u koji je voda ulijana [m];

$r_w$  – efektivni radijus intervala otvorene bušotine (uključivo zasip) [m];

$T$  – transmisivnost vodonosnika [ $m^2/s$ ];

$S$  – uskladištenje vodonosnika [/];

$t$  – vrijeme koje je prošlo od ulijevanja ili crpljenja (s);

$J_0$  – Besselova funkcija nultog reda prve vrste;

$J_1$  – Besselova funkcija prvog reda prve vrste;

$Y_0$  – Besselova funkcija nultog reda druge vrste;

$Y_1$  – Besselova funkcija prvog reda druge vrste.

Cooper-Bredehoeft-Papadopulos metoda, kao i prethodne dvije metode, podrazumijeva određene pretpostavke, a one su redom: zatvoreni, izotropni i homogeni vodonosnik koji je elastičan i stišljiv. Slojevi su horizontalni i beskonačnog prostiranja. Prvotna razina podzemne vode u piezometru (prije unosa dodatnog volumena) je horizontalna i radijalno se prostire u beskonačnost. Darcyjev zakon primjenjiv je u domeni toka. Također, podrazumijeva se trenutačan unos vode i njezino povlačenje za  $t=0$ . Bušotina se prostire preko cijele saturirane debljine vodonosnika u kojeg u cijelosti prodire (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

Metoda High-K Butler primjerena je korištenju za analizu testova ulijevanja obavljenih u djelomično završenim zdencima u vodonosnicima velike hidrauličke vodljivosti prema formulama 3-5 i 3-6 (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

$$K = \frac{t_D}{t} * \frac{r^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2 * LC_D} \quad (3-5)$$

$$K = \frac{t_D}{t} * \frac{r^2 \ln\left(\frac{L}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r_w}\right)^2}\right)}{2 * LC_D} \quad (3-6)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s);

$t_D$  – bezdimenzijski vremenski parametar;

$t$  – vrijeme koje je prošlo od ulijevanja ili crpljenja (s);

$r$  – radijus utjecaja ulijevanja [m];

$R_e$  – efektivni radijus bušotine [m];

$r_w$  – efektivni radijus intervala otvorene bušotine [m];

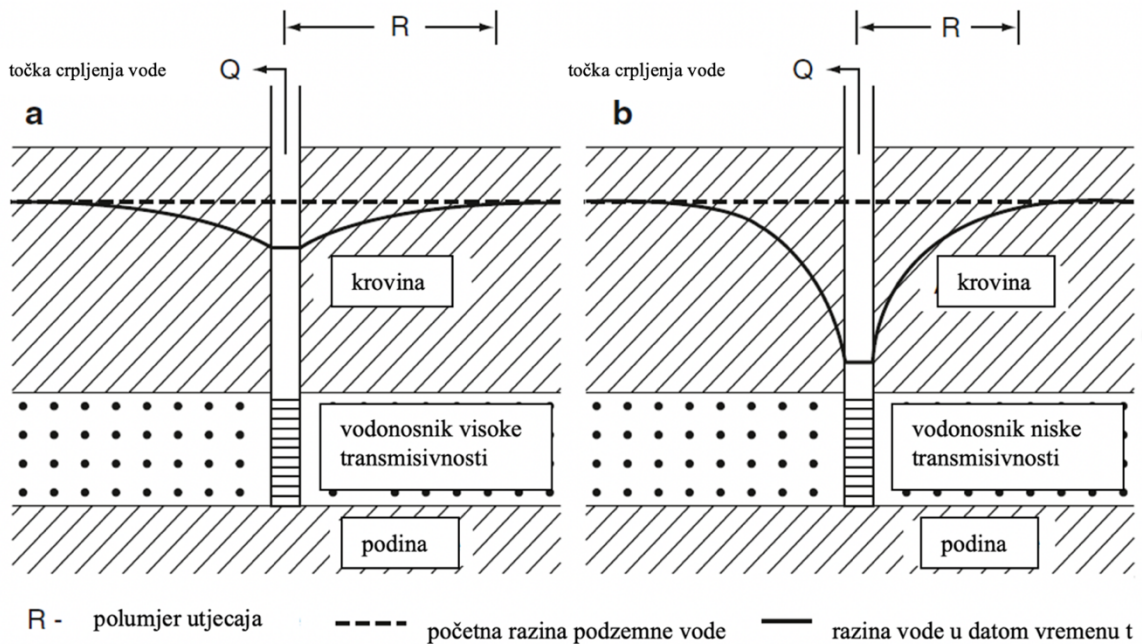
$L$  – duljina filtera bušotine [m];

$C_D$  – bezdimenzijski parametar ulijevanja vode.

Dagan metoda prikladna je za određivanje hidrauličke vodljivosti otvorenih vodonosnika u bušotinama čija je duljina filtera bušotine kroz koji voda ulazi veća od polumjera zdenca, što je ujedno i ograničenje ove metode (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

### 3.3. Pokusno crpljenje

Za razliku od ranije navedenih testova, pokusna crpljenja (slika 3.4.) služe za istraživanja na regionalnoj razini poput istraživanja zaliha podzemne vode. Metode interpretacije rezultata pokusnih crpljenja pukotinskih vodonosnika koji imaju mali razmak između dobro povezanih pukotina, pretpostavljaju da su to vodonosnici zatvorenog i poluzatvorenog tipa (Parlov, 2019a).



Slika 3.4. Prikaz sniženja vode nastalog uslijed crpljenja iz vodonosnika visoke i niske transmisivnosti (Singhal i Gupta, 2010)

Pokusna crpljenja provode se s konstantnom količinom crpljenja ili se crpi u koracima. Voda se crpi iz zdenca te se na okolnim piezometrima i u zdencu promatra promjena razine podzemne vode. Drugim riječima, crpljenjem se uzrokuje sniženje razine podzemne vode koje se pojavljuje u obliku stošca (tzv. konus depresije). Prilikom nastavka crpljenja baza stošca se širi sve dok se ne postigne stacionarno stanje. Ono je postignuto kada se količina crpljenja i dotok vode izjednače. Postoji cijeli niz metoda za analizu podataka dobivenih pokusnim crpljenjem u različitim hidrogeološkim uvjetima, a to su numeričke i grafoanalitičke metode. Prednost numeričkih metoda je da one uzimaju sve složene hidrogeološke odnose u obzir prilikom analize. Grafoanalitičke metode su subjektivnije, ali njihova prednost je u tome što olakšavaju vizualizaciju i određivanje preklapanja s podacima pretpostavljenih uvjeta. Odabir najboljeg intervala koji će dati

pouzdanje podataka je na istraživaču i to je jedan od razloga subjektivnosti. Najčešće korištene metode su Thiemova ravnotežna metoda, metoda Theisove neravnotežne tipske krivulje, Jacobova neravnotežna metoda ravne linije, Theisova metoda oporavka, krivulja Waltonovog tipa za poluzatvoreni vodonosnik, Boultonova krivulja za otvorene vodonosnike, Neumanova krivulja za otvorene vodonosnike i Papadopulos-Cooperova krivulja za zdence velikoga promjera. Metode su razvijene s namjerom da se upotrebljavaju u nekonsolidiranim vodonosnicima, ali njihovi principi se također mogu upotrijebiti i u pukotinskim vodonosnicima. Ove metode primarno su razvijene za interpretaciju pokusnog crpljenja u homogenim međuzrnskim vodonosnicima, ali također se upotrebljavaju i za procjenu hidrauličkih parametara u stijenama s pukotinskom poroznošću (Singhal i Gupta, 2010).

## 4. TESTIRANJE UTISKIVANJEM

### 4.1. Osnovne postavke i postupak testiranja

Testiranje utiskivanjem (engl. packer test) provodi se na način da se voda utiskuje pod tlakom u određeni interval bušotine ograđen pakerima, stoga je potrebno prethodno čišćenje bušotine od eventualnih naslaga na stjenkama. Cementiranje stjenke bušotina (prilikom bušenja) nije dopušteno, a za isplaku se smije koristiti samo voda. Izuzetno je važan tlak vode koji se primjenjuje, iz razloga što je pri povišenom tlaku moguće otvaranje novih i proširenje postojećih pukotina ili ispiranja pukotinske ispune. U ovisnosti o stanju stjenske mase unutar koje se bušotina nalazi, tlak pod kojim voda ulazi može uzrokovati čak i zarušavanje bušotine. Uz sve navedeno postoji opasnost od pojave turbulentnog tečenja. Prilikom provođenja ispitivanja testira se isključivo saturirana zona i to dok ne dođe do uspostavljanja stacionarnih uvjeta. Promjene razine podzemne vode mogu se pratiti i u piezometrima u neposrednoj blizini testirane bušotine (Parlov, 2019a).

Ispitivanje hidrauličke vodljivosti izvodi se duž većeg dijela bušotine, u smjeru odozgo prema dolje, utiskivanjem vode u bušotinu. Naposljetku, hidraulička vodljivost dobiva se mjerenjem količine vode infiltrirane u okolnu stijenu, a izražava se preko specifične propusnosti ili Lugeonovih jedinica prema formuli (Milanović, 1979):

$$q = \frac{Q}{P \cdot h} \quad (4-1)$$

gdje je:

q - specifična propusnost [m/s];

Q - količina vode koja se iz ispitivanog intervala bušotine gubi kroz poroznu sredinu [lit/min];

P - tlak pod kojim se voda utiskuje u ispitivanu zonu, izražen u atmosferama ili metrima vodenog stupca [atm];

H - duljina ispitivanog intervala [m].

Lugeonova jedinica je količina vode koju stijena prima po jednome metru bušotine tijekom jedne minute pod tlakom od 10 atmosfera ili 100 Lungeona = 1 lit/min (m') 0,1 atm. (Lugeon, 1933). U idealnim uvjetima koji pretpostavljaju homogenost i izotropnost, 1

Lugeon je ekvivalent  $1,3 \times 10^{-5}$  cm/s. Podjela stijena prema specifičnoj propusnosti na šest kategorija prikazana je u Tablici 4.1 (Tunbridge, 2017).

Tablica 4-1 Podjela stijena prema specifičnoj propusnosti (Quiñones-Rozo, 2010)

Propusnost (Lugeon)	Klasifikacija	Hidraulička vodljivost (cm/s)	Stanje diskontinuiteta stijenske mase	Preciznost (Lugeoni)
<1	Jako niska	$<1 \times 10^{-5}$	Vrlo mali zijev	<1
1-5	Niska	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	Mali zijev	$\pm 0$
5-15	Umjerena	$6 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4}$	Nekolicina djelomično otvorena	$\pm 1$
15-50	Srednja	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	Nekolicina otvorena	$\pm 5$
50-100	Visoka	$6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	Većina otvorena	$\pm 10$
>100	Vrlo visoka	$>1 \times 10^{-3}$	Veliki zijev	>100

Izraz za hidrauličku vodljivost je:

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{R_0}{R}\right)}{2\pi HL} \quad (4-2)$$

gdje je:

K - hidraulička vodljivost [m/s];

Q - količina utiskivanja [m<sup>3</sup>/s];

R<sub>0</sub> - radijus utjecaja [m];

R - radijus bušotine [m];

H - visina stupca vode [m];

L - duljina ispitivanog intervala [m];

za koje vrijedi:

$$\frac{L}{R} > 10 \quad (4-3)$$

Lugeonova vrijednost se računa pomoću izraza:

$$Lugeon = \frac{Q}{L} \times \frac{P_0}{P} \quad (4-4)$$

gdje je:

Q – količina utiskivanja [ $m^3/s$ ];

L – duljina ispitivanog intervala [m];

$P_0$  – referentni tlak od 1 MPa [Pa];

P – neto tlak utiskivanja [Pa].

Primijenjeni tlak se može prikazati i visinom stupca vode jer je:

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad (4-5)$$

gdje je:

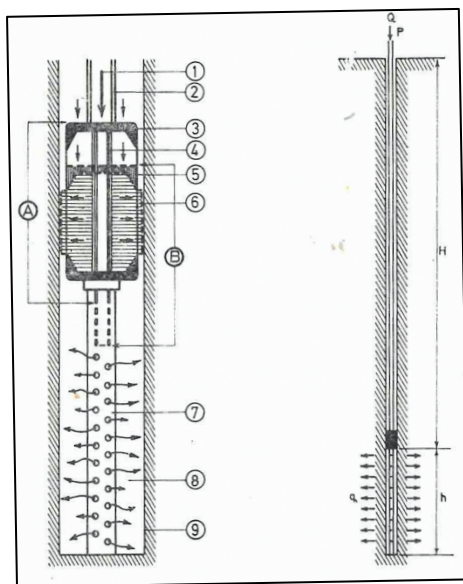
$\rho$  – gustoća vode ( $999,7 \text{ kg/m}^3$ ) [ $\text{kg/m}^3$ ];

g – gravitacijsko ubrzanje ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) [ $\text{m/s}^2$ ].

Lugeon test ili test utiskivanja (engl. packer test) dobio je ime prema švicarskom geologu Mauriceu Lugeonu. Test služi za određivanje prosječne hidrauličke vodljivosti stijena u podzemlju. Provođa se na način da se količina vode u određenim razmacima injektira u pakera izolirani dio bušotine. Tlak pod kojim voda ulazi u podzemlje predodređen je i mijenja se kontrolirano i u pravilnim razmacima. Kada sustav dođe u kvazi-stabilno stanje, počinje se pratiti tlak vode na izlazu. Kvazi-stabilno stanje je stanje u kojem je stopa promjene toliko spora i malena da ga možemo smatrati konstantnim (American Meteorological Society). U tom se dijelu bušotine nalazi i pretvarač tlaka, koji služi za mjerenje tlaka pomoću stanice za očitavanje na površini. Jedan od glavnih nedostataka Lugeonovog testa je ograničeni volumen stijena oko bušotine na koje test može djelovati. Procjenjuje se da je učinak testa, s testnim intervalom duljine 3 metra, ograničen na približni radijus od 9 metara oko bušotine i cilindričnog je oblika. Ispitivanje se može provesti na vertikalnim i kosim, odnosno bušotinama pod kutem. Kako bi se odredila brzina ubrizgavanja vode i vrijednost tlaka koja će se koristiti u testu, prije samog provođenja nužno je jezgrovanje. Temeljem stanja jezgre donose se pretpostavke vezane uz propusnost i količinu vode koju određeni volumen stijene može primiti u zadanom vremenu. Procjeni

pomažu korelacije i prijašnja iskustva prilikom određivanja uvjeta kod drugih bušotina jer je u interesu odrediti vrijednosti tlakova koji će se testirati kako ne bi došlo do pucanja stijenske mase (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

Na slici 4.1 prikazan je presjek aparature za ispitivanje hidrauličke vodljivosti metodom utiskivanja vode u bušotinu. Pojedini dijelovi numerirani su znamenkama od 1 do 9.



- 1 – Pravac kretanja vode pod pritiskom
- 2 – Bušaća cijev
- 3 – Pakerska čaša
- 4 – Pakerska cijev
- 5 – Gumeno tijelo pakera u normalnom položaju
- 6 – Tijelo pakera u položaju brtvljenja
- 7 – Perforirana cijev kroz koju izlazi voda pod pritiskom u izolirani dio bušotine
- 8 – Ispitivani dio bušotine
- 9 – Stijenka bušotine

Slika 4.1. Dijelovi aparature za utiskivanje  
(Milanović, 1979)

Prilikom ispitivanja hidrauličke vodljivosti ovom metodom u krškim područjima mora se uzeti u obzir da je prvih nekoliko metara često izravno vezano s epikršnom zonom koja obiluje pukotinama. Stoga, ispitivanja počinju ispod granice tog kontakta, koji obično počinje na oko 3 metra dubine (Milanović, 1979).

Proces započinje s izoliranjem dionice prosječne duljine 5 metara, pomoću gumenih pakera, od ostatka bušotine. Prilikom spuštanja paker se nalazi u položaju A (slika 4.1.), te nije priljubljen uz zidove bušotine. Nakon inicijalnog pozicioniranja pakera bušaći pribor se spušta u niže dijelove bušotine, te se na taj način paker širi i priljubljuje uz zidove bušotine (položaj B na Slika 4.1.). Nakon pravilnog postavljanja pakera voda se pušta pod tlakom kroz bušaće cijevi, tijelo pakera i perforiranu cijev, te se ona u ovisnosti o samoj hidrauličkoj vodljivosti tog dijela stijene u većoj ili manjoj mjeri u nju infiltrira. Tijekom bušenja može



se naići na kavernozone zone. Ako je kapacitet hidrauličke vodljivosti takve zone veći od kapaciteta pumpe, neće se zabilježiti razlika u tlaku na manometru, stoga se taj dio označava kao zona nedefinirano velike hidrauličke vodljivosti. Bez obzira na veličinu kaverni ili kanala te njihovu dobru povezanost s pukotinskim sustavom, čija je odvodnja velika, niti jedan isječak ne može imati beskonačno veliku hidrauličku vodljivost pa se zato koristi termin nedefinirano velika hidraulička vodljivost (Milanović, 1979). Taj problem bi se mogao riješiti na način da se koriste pumpe i cijevi većega kapaciteta od onih koji se najčešće koriste prilikom ovakvih ispitivanja. Ako brtvljenje pakera nije moguće, on se pomiče na prethodno ispitivanu etažu. Samo mjerenje tlakova može se vršiti na dva različita načina, pomoću bušotinskog pretvarača ili pomoću tlakomjerne stanice (slika 4.2. i slika 4.3.). Ciljani tlakovi su 2, 4, 6, 8 i 10 atmosfera, a oni se postižu postepeno unutar bušotine kako ne bi došlo do hidrauličkoga udara. Svaki od navedenih tlakova se održava 15 minuta te se bilježe promjene na brojilu vodomjera i zapisuju se u dnevnik. Odabir tlakova ovisi o svojstvima etaže. Ukoliko se na etaži ne mogu postići veći tlakovi, mjerenja se obavljaju pod manjih tlakovima kao što su 2, 4 ili 6 atmosfera, a po potrebi i manje. Ako se i dalje ne može postići željeni tlak onda se etaže smanjuju i izdvajaju se zone visoke hidrauličke vodljivosti. Također se na etaži, ako je ispitana metar po metar, mogu izdvojiti i nepropusne zone. Ako se i dalje ni pod kojim uvjetima ne može postići željeni tlak, ispitivanja se obustavljaju. Kontrola ispitivanja se odvija uz dijagrame ovisnosti protoka i tlaka. Tlak se prema formuli dijeli na 4 komponente, a one su:

$$P = 10p_1 + p_2 + p_3 - \Delta p \quad (4-6)$$

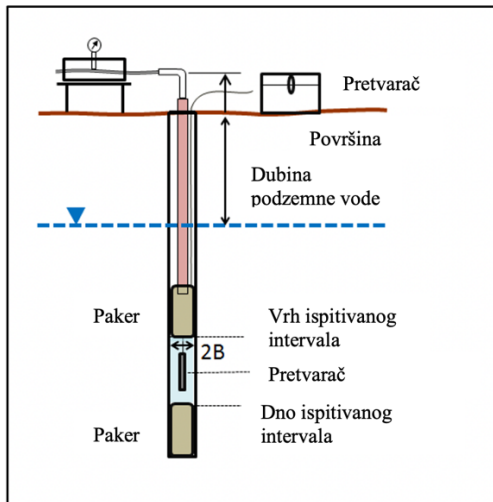
gdje je:

$p_1$  – tlak na manometru izražen u atmosferama [atm];

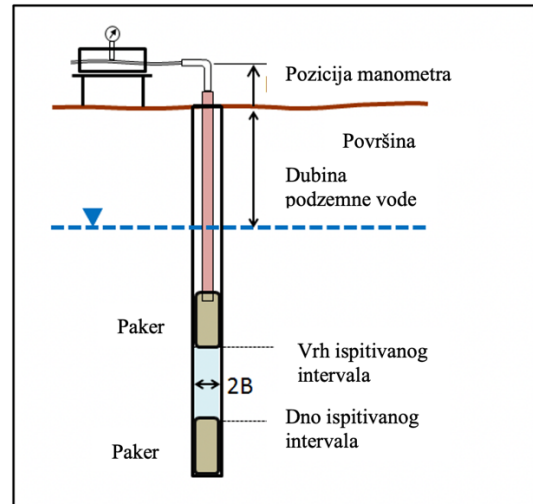
$p_2$  – pritisak stupca vode od manometra do ušća bušotine [atm];

$p_3$  – pritisak stupca vode od usta bušotine do razine podzemne vode [atm];

$\Delta p$  – gubici uzrokovani trenjem u cijevima, prijelazima, pakerima [atm].



Slika 4.2. Mjerenje tlaka bušotinskim pretvaračem (Waterloo Hydrogeologic, 2020)



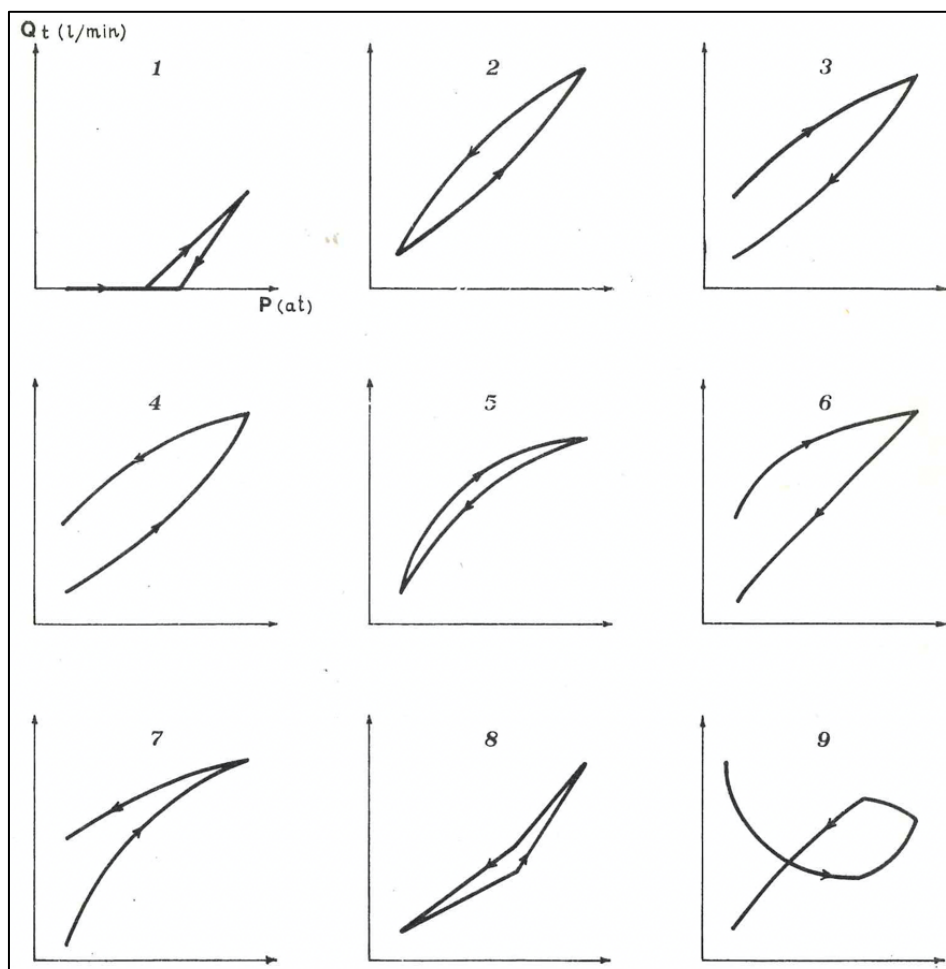
Slika 4.3. Mjerenje tlaka tlakomjernom stanicom na površini (Waterloo Hydrogeologic, 2020)

Lugeonov test provodi se najčešće u pet koraka. U svakome koraku primjenjuje se konstantan tlak vode u trajanju od 10 minuta ili dok se ne postigne stacionarno tečenje. Tijekom izvođenja testa svakih minutu očitavaju se podaci o protoku i tlaku vode. Podaci o protoku mogu se bilježiti kao volumen ili fluks, ovisno o mjerачu protoka. U prvome koraku obično koristimo mali tlak vode, dok se u drugom koraku tlak povećava i podaci o protoku bilježe se idućih 10 minuta ili dok se ne uspostavi ravnoteža (dok tečenje ne prestane biti turbulentno). Korak se ponavlja dok se ne odredi maksimalan iznos tlaka. Nakon što je on određen, tlak se u jednakim intervalima smanjuje na početnu vrijednost. Pomoću dobivenih podataka konstruira se tlačna krivulja. U nekim slučajevima test se sastoji od tri koraka, ako se maksimalni tlak može postići već u drugom koraku. Test se odvija duž nekoliko vertikalnih intervala unutar iste bušotine. Nakon što se mjerenja obave, pakeri se ispušu te se premještaju na novu poziciju i procedura se ponavlja (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

## 4.2. Rezultati testiranja

Podaci dobiveni u prethodno opisanom postupku ne mogu se međusobno uspoređivati jer su dobiveni na različitim intervalima pojedinih i pri različitim pritiscima. Rješenje spomenutog problema je da rezultate ispitivanja treba preračunati na specifičnu propusnost svakog metra bušotine. Jedini nedostatak je pretpostavka linearne zavisnosti. Za razliku od vodonosnika međuzrnske poroznosti u vodonosnicima s disolucijsko-pukotinskom poroznosti razvijeni su glavni putevi tečenja. Tijekom provedbe ispitivanja, jedan od glavnih ciljeva je locirati upravo te zone. Uz činjenicu da su pukotinski vodonosnici anizotropni i heterogeni to je izuzetno težak zadatak. Međutim, uz optimalan raspored bušotina moguće je okvirno određivanje dijelova u kojima se pojavljuju zone jače raspucalosti. U nekim slučajevima potreban je detaljniji pregled i prikaz hidrauličke vodljivosti kroz podzemlje, no to ponekad nije moguće. Stoga, potrebno je detaljnom analizom iz testa propusnosti definirati što više parametara sredine (Milanović, 1979).

Na Slici 4.4 prikazani su tipični primjeri rezultata testiranja utiskivanjem. Dijagram 1 prikazuje bušotinu u nepropusnoj sredini u kojoj pri povećanju tlaka dolazi do otvaranja pukotina. Dijagram 2 upućuje na cirkulaciju vode kroz uske pukotine na zidu bušotine i neposrednu okolinu. Dijagram 3 upućuje na proces kolmiranja pukotinske mreže u toku mjerenja hidrauličke vodljivosti. Dijagram 4 upućuje na proces ispiranja materijala iz disolucijsko-pukotinskog sustava. Dijagram 5 upućuje na postojanje proširenih pukotina koje omogućuju pojavu turbulentnog tečenja. Dijagram 6 upućuje na proces kolmacije pukotina. Dijagram 7 upućuje na efekte ispiranja. Dijagram 8 upućuje na ovisnost protoka o povećanju tlaka vode. Dijagram 9 upućuje na različite anomalije (Milanović, 1979).



Slika 4.4. Prikaz najčešćim dijagrama pri interpretaciji rezultata ispitivanja hidrauličke vodljivosti prema Lugeon metodi (Milanović, 1979)

Ispitivanja hidrauličke vodljivosti su posebno korisna ako se planira sprječavanje podzemnih otjecanja pomoću injekcijskih radova. U ovakvim slučajevima profili se izvode na vrlo bliskim bušotinama te se uz geološko određivanje jezgri, geofizička mjerenja, trasiranje i rezultate ostalih raspoloživih metoda dobivaju izdvojene zone koje posjeduju približno jednaku hidrauličku vodljivost. S obzirom na dobivene rezultate zna se na kojim područjima postoji potreba za povećanim utroškom smjese za injektiranje. Problem kod uspoređivanja rezultata dobivenih ispitivanjem hidrauličke vodljivosti i količine utrošene injektirane smjese jest da se injektiranje vrši pod višestruko većim tlakovima (40-90 atmosfera), za razliku od ispitivanja hidrauličke vodljivosti koje se vrši na, već prije spomenutih, 1-10 atmosfera. To za posljedicu može imati širenje i pucanje pukotina, što rezultira povećanjem volumena smjese potrebne za injektiranje (Milanović, 1979).

## 5. INTERPRETACIJA REZULTATA TESTIRANJA UTISKIVANJEM

### 5.1. Uvod i sučelje programa

*AquiferTest* je program američke tvrtke Waterloo Hydrogeologic koji raspolaže s alatima i rješenjima za olakšavanje analize i interpretacije podataka te rezultata hidrauličkih testiranja. Podaci mjerenja mogu se unositi u program neposredno pomoću tipkovnice ili izravno iz Microsoft Excel-a, odnosno bilo kojeg programa koji služi za bilježenje podataka. U programu je moguće analizirati rezultate pokusnog crpljenja, testa ulijevanja (engl. slug test) i Lugeonovog (engl. packer) testa (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

Unutar okružja *AquiferTest* programa podaci pokusnog crpljenja mogu se interpretirati nizom različitih metoda, primjerice: Theis Recovery, Cooper-Jacob Time-Drawndown, Cooper-Jacob Distance-Drawndown i Cooper-Jacob Time-Distance-Drawndown. Tijekom analiziranja značajki zdenca mogu se dobiti podaci o specifičnom kapacitetu, učinkovitosti zdenca i Hantush-Bierschenk gubicima na zdencu (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

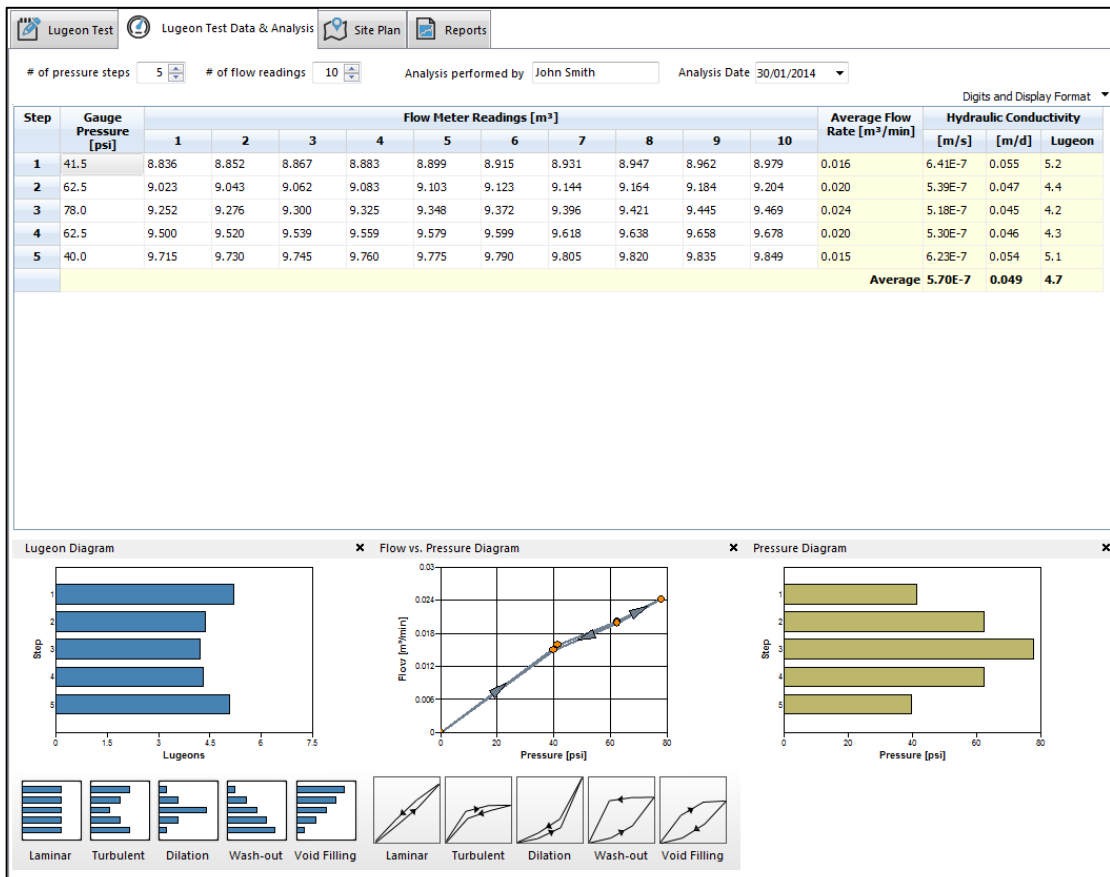
*AquiferTest* dizajniran je za rješavanje većine problema s kojima se susreću hidrogeolozi prilikom planiranja i analiziranja rezultata dobivenih mjerenjima u vodonosniku. On omogućuje učinkovito upravljanje rezultatima i obavljanje dodatnih analiza. Ulaskom u program prvo se odabire vrsta testa koji će se koristiti. Ponuđeno je pokusno crpljenje, predviđanje za pokusno crpljenje, test ulijevanja i Lugeon test.

## 5.2. Lugeon test

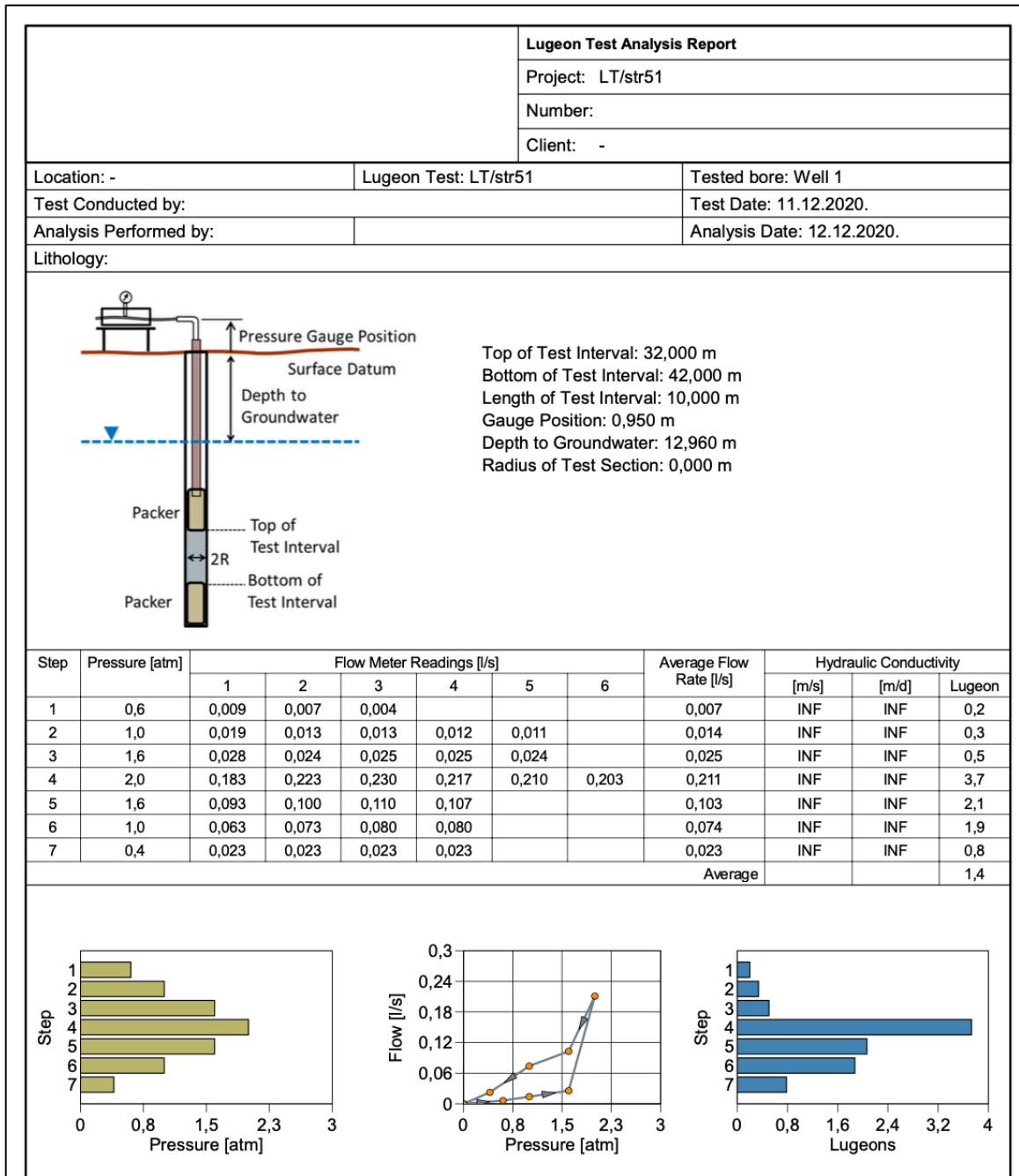
S obzirom da je u ovome radu naglasak na Lugeonovom testu, on će se detaljnije opisati. Odabirom Lugeonovog testa ponuđene su četiri kartice: *Lugeon test*, *Lugeon test data & analysis*, *Site plan* i *Reports* (slika 5.1.). U kartici *Lugeon test* unose se osnovne informacije o projektu, poput imena, broja i vremena provođenja projekta, lokacije i sl. U potkartici nazvanoj *Geometry* definira se način mjerenja tlaka i granice ispitivanog intervala te radijus bušotine i njezinog utjecaja. U potkartici *Units* odabiru se mjerne jedinice koje će se koristiti prilikom postupka analize. Unutar kartice također je moguće unesti litološke značajke materijala i način mjerenja protoka. U kartici *Lugeon Test Data & Analysis* odabire se u koliko tlačnih koraka se ispitivanje izvodi te broj mjerenja protoka unutar svakog pojedinačnog koraka. Unutar te kartice odabire se i format prikaza rezultata i mjerne jedinice (slika 5.2.). Unutar kartice *Site plan* moguće je uvesti geološke, topografske i ostale vrste karata te ih koristiti kao podlogu prilikom prikaza rezultata. Rezultate dobivene iz više bušotina moguće je korelirati, interpolirati te prikazati na karti. Kartica *Reports* nudi pregled svih podataka, rezultata i dobivenih dijagrama, u obliku tablica i dijagrama (slika 5.3.).

Test bore	Name	X [m]	Y [m]	Elevation [a]	Benchmark [B [m]	Dip [°]
1	BH-01	0	0	0	0	0.096

Slika 5.1. Prikaz kartica u Lugeonovom testu u okruženju programa AquiferTest



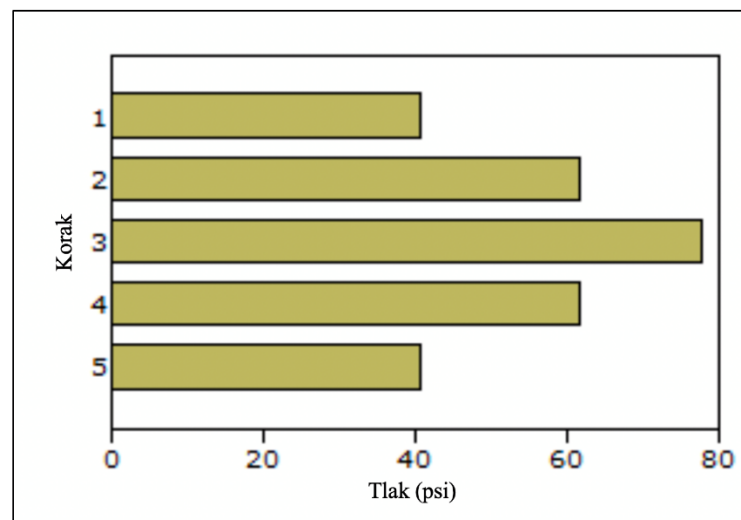
Slika 5.2. Prikaz primjera kartice *Lugeon Test Data & Analysis* za zadane vrijednosti



Slika 5.3. Prikaz primjera kartice *Reports* za zadane vrijednosti

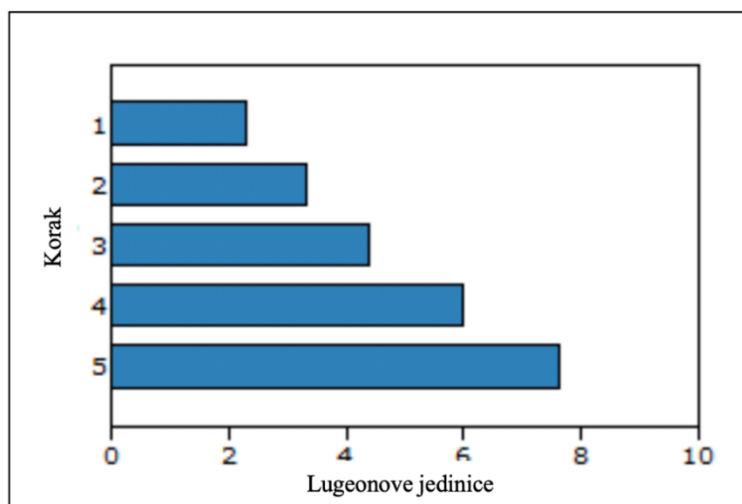


Podaci potrebni kako bi se provela interpretacija Lugeonovog testa u *AquiferTest* -u su očitavanje tlaka provedeno površinskim mjeračem ili bušotinskim pretvaračem, gornja i donja visina intervala ispitivanja (mjerena od površine), razina podzemne vode koja se, ako nije poznata, uzima kao vrijednost mjerena u testnom intervalu. Također, mora se unijeti radijus utjecaja i testnog ispitivanja te tip mjerača protoka (zato što se protok može izražavati kao volumen i fluks). Radijus testnog intervala, ako nije posebno određen, definira se radijusom bušotine. Za radijus utjecaja pretpostavlja se da je jednak dužini testnog intervala, ako nije drugačije određeno. Okruženje *AquiferTest* -a, radi lakše interpretacije rezultata, nudi prikaz najčešćih tipova tečenja u pukotinskim vodonosnicima u obliku Lugeonovog dijagrama i krivulje tlak-protok. U dijagramu tlaka dobivene vrijednosti se jednostavno prikazuju s pripadajućim koracima. Primjeri dijagrama dobivenih u *AquiferTest* -u nalaze se na slikama 5.4., 5.5. i 5.6. (Waterloo Hydrogeologic, 2020).



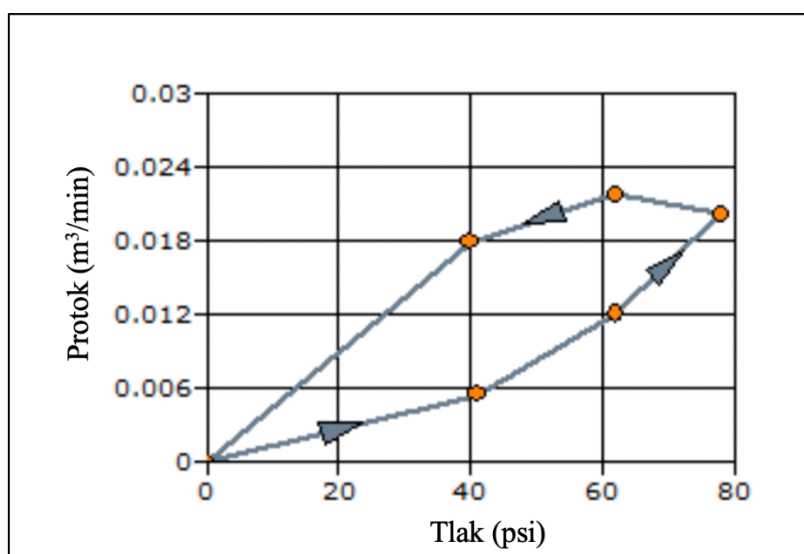
Slika 5.4. Dijagram tlaka (Waterloo Hydrogeologic, 2020)

U Lugeonovom dijagramu se za svaki korak posebno računa vrijednost u Lugeonovim jedinicama i prikazuje kao na primjeru na slici 5.5. Promjene unutar dijagrama mogu se uspoređivati s ostalim rezultatima kako bi se odabrala prikladna Lugeonova vrijednost.



Slika 5.5. Lugeonov dijagram (Waterloo Hydrogeologic, 2020)






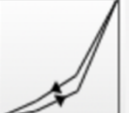



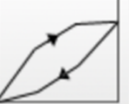
Rezultate Lugeonovog testa analizira se pomoću grafa protok-tlak. U tom slučaju gubitak protoka definira se kao omjer količine protoka na datom intervalu. Za svaki korak određuje se prosječan protok iz mjerenih podataka i mjeri se tlak te se to prikazuje kao na slici 5.6. (Waterloo Hydrogeologic, 2020).



Slika 5.6. Dijagram protok-tlak (Waterloo Hydrogeologic, 2020)

Na slici 5.6. svaka narančasta točka predstavlja jedan korak, a sastoji se od očitavanja srednje vrijednosti protoka za dati tlak. Povlači se linija s početkom u ishodištu spajajući narančaste točke, ali poštujući redoslijed koraka, na što ukazuju strelice koje označavaju smjer. Nagib svake pojedine linije upućuje na vrijednost Lugeonovih jedinica. Mali kut upućuje na malu, a veliki na veću vrijednost Lugeonovih jedinica. Oblik same krivulje

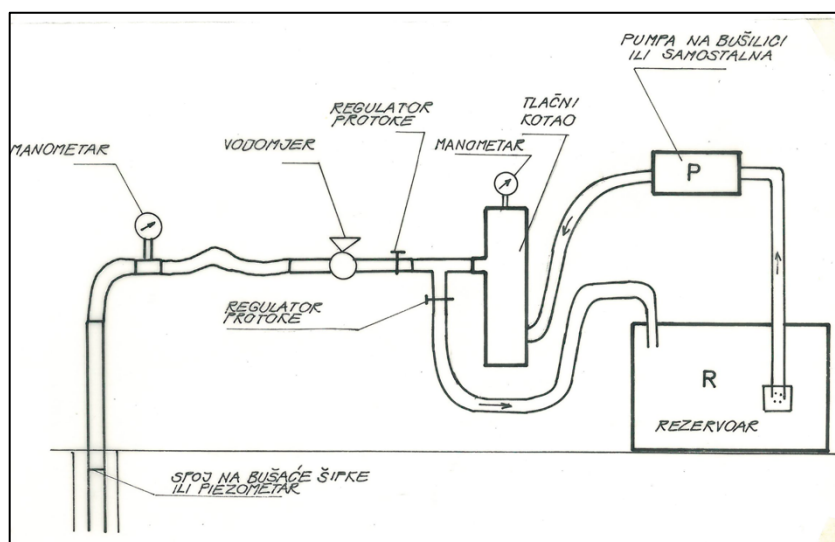
omogućuje i olakšava interpretaciju i nadzor podataka na samom terenu (Waterloo Hydrogeologic, 2020). Slika 5.7. (slično kao i slika 4.4.) prikazuje neke tipične oblike dijagrama i način interpretacije. Kod laminarnog tečenja hidraulička vodljivost stijenske mase neovisna je o tlaku vode koji se koristi. Ovakvo ponašanje karakteristično je za stijenske mase male hidrauličke vodljivosti, gdje su brzine procjeđivanja relativno male (ispod četiri Lugeona). Kod pojave turbulentnog tečenja, hidraulička vodljivost se smanjuje kako se tlak povećava. Takvo ponašanje karakteristično je za stijenske mase koje imaju djelomično do širok otvorene pukotine. Dilatacija upućuje da primijenjeni tlak uzrokuje i potiče trajnu i nepovratnu štetu na stijenskoj masi uzrokujući privremeno proširenje pukotina i privremeno povećava hidrauličku vodljivost. S druge strane, kod ispiranja dolazi do trajnog povećanja hidrauličke vodljivosti uslijed ispiranja ispune pukotina. Kod popunjavanja praznina, hidraulička vodljivost opada s napredovanjem testa, bez obzira na promjene u tlaku. Ovo ponašanje upućuje na to da voda ispunjava izolirane diskontinuitete male postojanosti, ili da fini sediment polako ulazi u diskontinuitet te ga na taj način začepљуje (Waterloo Hydrogeologic, 2020).

Ponašanje	Lugeonov dijagram	Graf protok-tlak	
Laminarni tok			Srednja Lugeonova vrijednost za sve korake
Turbulentni tok			Lugeonova vrijednost koja odgovara najvećem tlaku vode (treći korak)
Dilatacija			Najmanja zabilježena Lugeonova vrijednost, koja odgovara ili najmanjoj ili srednjoj vrijednosti vodenog tlaka (1. ,2. ,3. ,4. ili 5. korak)
Ispiranje			Najveća zabilježena Lugeonova vrijednost (peti korak)
Popunjavanje praznina			Posljednja Lugeonova vrijednost (peti korak)

Slika 5.7. Tipični oblici dijagrama i interpretacija Lugeonovog testa (Waterloo Hydrogeologic, 2020)

## 6. REINTERPRETACIJA REZULTATA TESTIRANJA UTISKIVANJEM

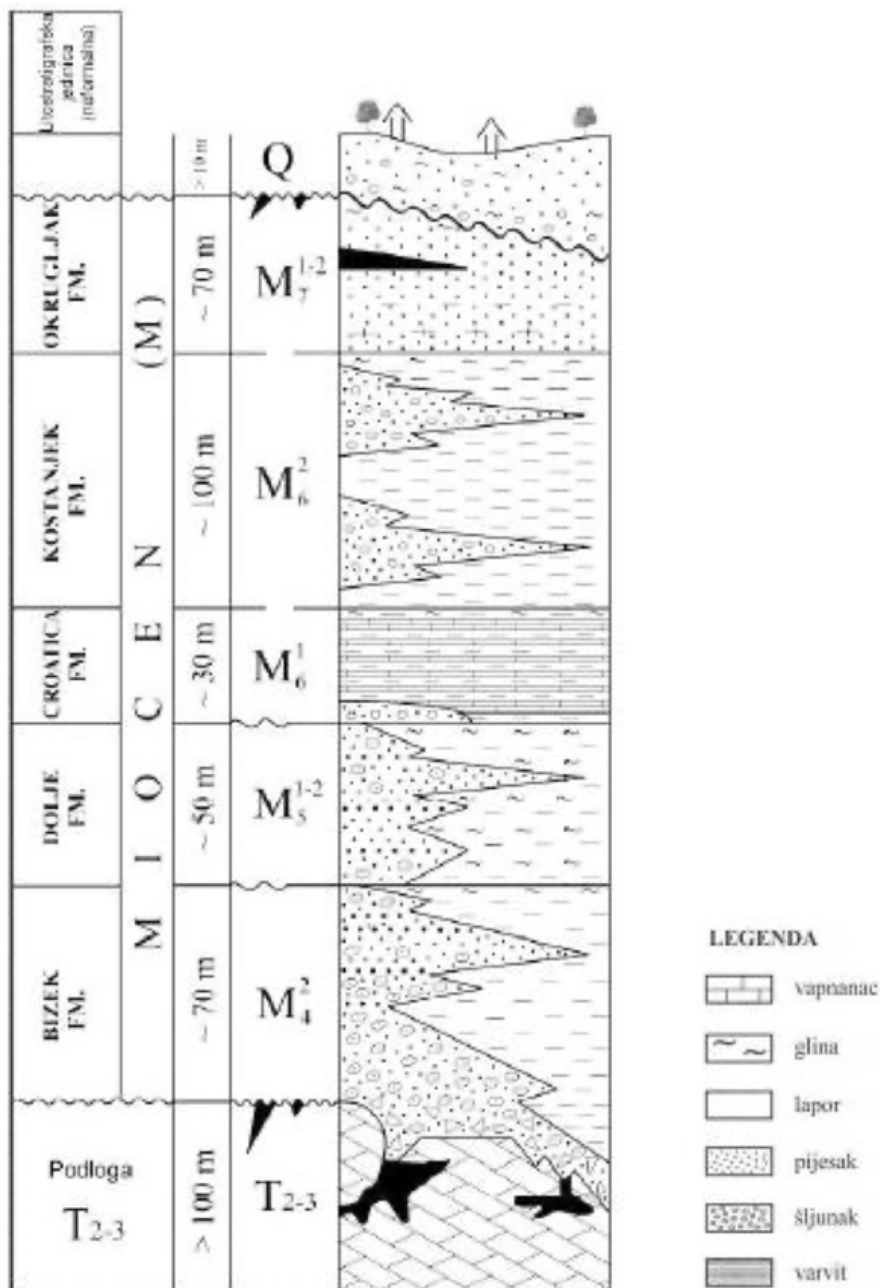
Na području klizišta Kostanjek kod bivše tvornice cementa "Sloboda" u Podsusedu (Zagreb) provedena su in-situ ispitivanja hidrauličke vodljivosti utiskivanjem u tri navrata. U prvom navratu, koji se izvodio u razdoblju od veljače do travnja 1988. godine, tijekom istražnog bušenja provedeno je testiranje stupnjevitim utiskivanjem vode pri konstantnim tlakovima (Lugeonov test). U drugom navratu tijekom aktiviranja piezometra praćenjem povrata razine podzemne vode i crpljenjem iz bušotine B-1 u travnja 1988. godine. Zadnje ispitivanje provedeno je tijekom prosinca 1988. godine prilikom utiskivanja vode pri konstantnom tlaku i praćenjem povrata razine podzemne vode u piezometrima. Pokusi utiskivanja vode provedeni su tijekom istražnog bušenja utiskivanjem vode kroz bušaće šipke profila 50/38,5 mm sa spojnicama na svaka tri metra, dužine 18 cm, unutrašnjeg promjera u iznosu od 22 mm. Dionica se zatvarala tlačnim pakerom dužine 30 cm. Sustav za održavanje konstantnog tlaka prikazan je na slici 6.1. Aktiviranje piezometra provedeno je sistemom "air lift-a", nakon čega je praćen porast razine podzemne vode u piezometrima kod kojih je to bilo moguće. Testiranje piezometara stupnjevitim utiskivanjem vode provedeno je na način prikazan na slici 6.1. Piezometri su promjera  $\frac{3}{4}$ ". Nakon svih testova praćen je pad razine podzemne vode.



Slika 6.1. Prikaz korištenog sustava za održavanje konstantnog tlaka i utiskivanje vode  
(Ortolan i dr., 1989)

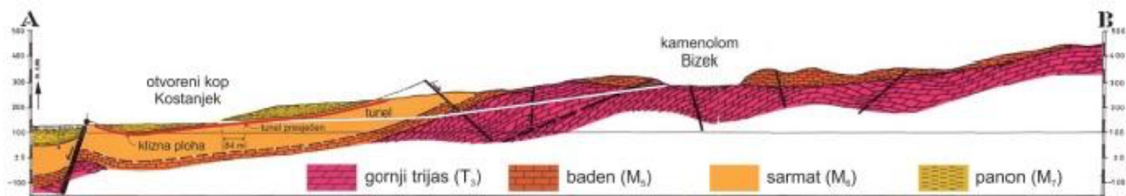
Hidraulički gubici kod testova utiskivanja vode određeni su proračunski. U navedenom elaboratu cilj je bio interpretirati dijagrame protok-tlak i tlak-vrijeme u svrhu određivanja hidrauličke vodljivosti (Ortolan i dr., 1989).

Klizište u Podsusedu jedno je od najvećih klizišta u Europi. Poznato je i pod imenom Kostanjek. Zbog potrebe nekadašnje tvornice cementa "Sloboda" eksploatiran je lapor, što je dovelo do klizanja 1963. godine. Na slici 6.2. prikazan je litološki stup "Kostanjek formacije" s okolnim područjima (Štimac, 2016).



Slika 6.2. Litološki stup Kostanjeka i okolice (Štimac, 2016)

Slika 6.3. prikazuje geološki profil na području klizišta Kostanjek i kamenoloma Bizek. Na području klizišta Kostanjek debljina donjopanonskih naslaga iznosi oko 30 metara. Donjopanonske naslage sadrže fosile puževa *Radix Croatica* stoga je cijela litostratigrafska jedinica nazvana "Croatica formacija". Kostanjek formacija (slika 6.2.) građena je od gornjopanonskih lapora taloženih u dubljim dijelovima bazena. Drugo ime "Banatica naslage" dobila je prema fosilima školjkaša od kojih je najznačajniji *Congeria banatica*. Za razliku od "Croatica formacije" čije su naslage taložene u slatkovodnim uvjetima, "Banatica naslage" su taložene u dubljim dijelovima bazena. Debljina "Kostanjek formacije" iznosi oko 100 metara. U podlozi se nalaze sarmatske naslage. U njima dolazi do izmjene slojeva i lamina svijetlih, kalcitom bogatih, lapora s tamnijih laporom koji sadrži organsku tvar i glinu (Štimac, 2016).



Slika 6.3. Geološki profil na području Kostanjek i kamenoloma Bizek (Štimac, 2016)

## 6.1. Rezultati testiranja utiskivanjem

Provođeno je stupnjevito utiskivanje vode pri konstantnim tlakovima u izolirane dijelove bušotina KS-2, KS-3, KS-4, KS-5, KS-6 i KS-8.

U tablici 6-1 prikazani su osnovni podaci korišteni prilikom reinterpretacije podataka u okruženju *AquiferTest* sučelja, a oni su: dubina vrha i dna ispitivanog intervala iz kojih se dobiva duljina intervala, visina manometra iznad bušotine te dubina do podzemne vode. Svi su parametri iskazani u jedinici metar. U slučaju arteškog vodonosnika kod rezultata dubine podzemne vode dodaje se oznaka ART te dolazi do promjene predznaka kod vrijednosti dubine podzemne vode. To je vidljivo na testu broj 45.

Tablica 6-1 Reinterpretirani testovi utiskivanja (Ortolan i dr., 1989)

Broj testa	Vrh ispitivanog intervala (m)	Dno ispitivanog intervala (m)	Dužina ispitivanog intervala (m)	Pozicija manometra (m)	Dubina do podzemne vode (m)	Bušotina
7	47	52	5	2,5	15	KS-2
13	34,4	38,4	4	2,5	11	3/88
15	34,4	38,4	4	2,5	11	3/88
19	38,4	43,3	5	2,5	12	3/88
22	46,7	50	3,3	2,5	13	3/88
45	22,6	36	13,4	0,85	-2,2 (ART.)	KS-6
47	75	90	15	1	4,52	KS-8
51	32	42	10	0,95	12,96 (13,96)	KS-4
54	54	66	12	0,90	16,15	KS-4

U tablici 6-2 prikazani su podaci koji nisu korišteni za reinterpretaciju u programu *AquiferTest*. Njihovo dobivanje je otežano ili onemogućeno. Razlozi tome su nepropusnost ispitivane serije, probijanje vode oko pakera te njezino prelijevanje preko vrha kolone, probijanje vode kod povratnog pritiska, pokvaren vodomjer, probijanje stjenke, stanke radi nedostatka vode, teško održavanje pritiska konstantnim zbog duljine i krutosti crijeva, nemogućnost praćenja slobodnog ulijevanja zbog premalih količina, piezometar koji vraća vodu u sustav, nedostatak vremena, pritisci pojedinih ispitivanja se vraćaju na nulu i količine

koje su unutar točnosti mjerenja sustava. Svi od navedenih razloga uzrokuju nepreciznosti u mjerenjima te se kao takvi ne mogu koristiti za donošenje zaključaka vezanih za hidrauličke vodljivosti i prirodu toka.

Tablica 6-2 Nereinterpretirani testovi utiskivanja (Ortolan i dr., 1989)

Broj testa	Vrh ispitivanog intervala (m)	Dno ispitivanog intervala (m)	Dužina ispitivanog intervala (m)	Pozicija manometra (m)	Dubina do podzemne vode (m)	Bušotina
5	42	47	5	2	15	KS-2
8	52	57	5	2,4	15	2/88
9	57	62	5		15	2/88
10	24,5	30	5,5	2	6	4/88
17	28,4	38,4	10	2,5	11	3/88
20	43,40	46,70	3,3	2,5	1,3	3/88
21	46,70	50	3,3	2,5	13	3/88
33	23	37	14	0,9	3,8	KS-5
34	23	37	14	0,8	3,46	KS-5
36	42,5	48,7	6,2	0,7	18,13	KS-3
38	42,5	48,7	6,2	0,7	11	KS-3
39	36	40	4	0,7	15,41	KS-3
40	55	65,5	10,5	0,85	-4,7 (ART)	KS-6
41	55	65,5	10,5	0,85	-4,7 (ART)	KS-6
49	32	42	10	0,95	13,96	KS-4
56	35	50	15	0,4	18,14	KS-2
57	35	50	15	0,4	18,14	KS-2
60	70	91	21	0,65	60,78	KS-2
61	70	91	21	0,65	60,78	KS-2



U tablici 6-3 prikazano je testiranje utiskivanjem provedeno 1.3.1988. godine. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini KS-2 na intervalu od 47 do 52 metra je 223,25 metara. Promjer cijevi je 50/38 mm, dok je promjer spojnice 50/22 mm. Promjer bušotine na ispitivanoj dionici iznosi 131 mm. Tip stijene koji prevladava je siltozni šejl. U ispitivanju su korišteni tlačni pakeri.

Tablica 6-3 Testiranje broj 7 (Ortolan i dr., 1989)

Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	1,0	10,0	0,0	27,5	0,02	0,07
2.	3,0	30,0	0,0	47,5	0,04	0,08
3.	5,0	50,0	0,0	47,5	0,04	0,06
4.	3,0	30,0	0,0	47,5	0,03	0,06
5.	1,0	10,0	0,0	27,5	0,02	0,07

U tablici 6-4 prikazano je testiranje utiskivanjem provedeno 23.2.1988. godine. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini 3/88 na intervalu od 34,4 do 38,4 metra je 193,71 metara. Promjer cijevi je 50/38,5 mm, dok je promjer spojnice 50/22 mm. Promjer bušotine na ispitivanoj dionici iznosi 146 mm. Tip stijene koji prevladava je siltozni šejl. Tijekom izvođenja testa je došlo kraćih prekida između 1. i 2. ispitivanja, a između 3. i 4. ispitivanja došlo je do dužih prekida zbog nedostatka vode. Vrijednosti su ekstrapolirane na osnovu mjerenja u piezometrima. Količine vode koje su se probile kraj pakera zanemarene su u proračunu.

Tablica 6-4 Testiranje broj 13 (Ortolan i dr., 1989)

Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	1,0	10,0	0,0	23,5	0,2	0,9
2.	3,0	30,0	1,8	41,7	8,5	20,4
3.	4,0	40,0	5,8	47,7	14,8	31,0
4.	3,0	30,0	2,7	40,8	10,3	25,2
5.	1,0	10,0	0,2	23,3	3,7	15,9

U tablici 6-5 prikazano je testiranje utiskivanjem provedeno 1.3.1988. godine. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini 3/88 na intervalu od 34,4 do 38,4 metra je 193,71 metara. Promjer cijevi je 50/38,5 mm, dok je promjer spojnice 50/22 mm. Promjer bušotine na ispitivanoj dionici iznosi 146 mm. Tip stijene koji prevladava je siltozni šejl. Sarmatske je starosti te se nalazi ispod donjopanonskih naslaga (slika 6.2.). Prema Hrvatskoj enciklopediji uvelike je građen od kvarca, glina i feldspata, a može sadržavati i željezne okside te organsku tvar (Hrvatska enciklopedija – mrežno izdanje).

Tablica 6-5 Testiranje broj 15 (Ortolan i dr., 1989)

Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	1,0	10,0	0,0	23,5	1,6	6,8
2.	3,0	30,0	2,7	30,8	10,3	33,4
3.	5,0	50,0	21,8	41,7	30,5	73,1
4.	3,0	30,0	19,5	24,0	28,8	120,0
5.	1,0	10,0	9,0	14,5	18,5	127,6

U tablici 6-6 prikazano je testiranje utiskivanjem provedeno 2.3.1988. godine. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini 3/88 na intervalu od 38,4 do 43,4 metra je 193,71 metara. Promjer cijevi je 50/38,5 mm, dok je promjer spojnice 50/22 mm. Promjer bušotine na ispitivanoj dionici iznosi 131 mm. Tipovi stijena koji prevladavaju su siltozni šejl i "tripoli". U ispitivanju su korišteni tlačni pakeri. "Tripoli naslage" su kao i siltozni šejl gornjomiocenske (sarmat) starosti (slika 6.2.). Za razliku od siltoznog šejla koji u sebi može imati organske tvari te na taj način dobiti tamniju boju, "tripoli" se sastoji od bijelih listićavih naslaga nastalih od ljuštura radiolarija i dijatomeja (Hrvatska enciklopedija – mrežno izdanje).

Tablica 6-6 Testiranje broj 19 (Ortolan i dr., 1989)

Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	1,0	10,0	0,0	24,5	0,0	-
2.	3,0	30,0	0,0	44,5	0,0	-
3.	5,0	50,0	17,4	47,1	20,1	42,7
4.	3,0	30,0	10,0	34,5	14,9	43,2
5.	1,0	10,0	4,3	20,2	9,5	47,0

U tablici 6-7 prikazano je testiranje utiskivanjem provedeno 4.3.1988. godine. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini 3/88 na intervalu od 46,7 do 50 metra je 193,71 metara. Promjer cijevi je 50/38,5 mm, dok je promjer spojnice 50/22 mm. Promjer bušotine na ispitivanoj dionici iznosi 116 mm. U ispitivanju su korišteni tlačni pakeri. Tipovi stijena koji prevladavaju su pješčenjak i lapor (slika 6.2.).

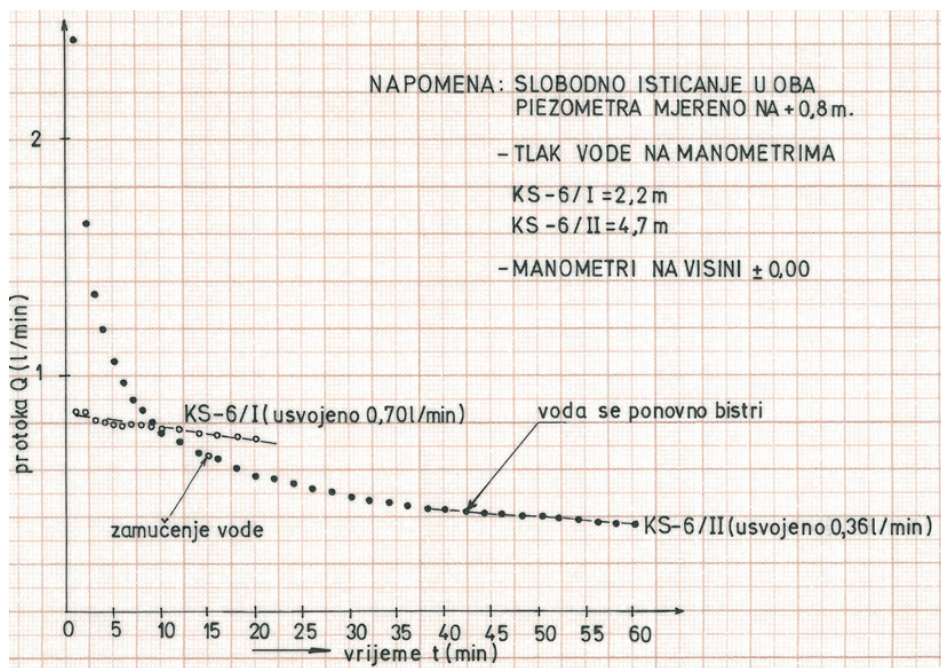
Tablica 6-7 Testiranje broj 22 (Ortolan i dr., 1989)

Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	1,0	10,0	0,0	25,5	1,8	7,1
2.	1,5	15,0	0,0	30,5	2,1	6,9
3.	2,0	20,0	0,0	35,5	2,4	6,8
4.	1,5	15,0	0,0	30,5	1,8	5,9
5.	1,0	10,0	0,0	25,5	1,5	5,9

Prilikom ispitivanja prikazanog u tablici 6-8 nakon četvrtog testa tlak na manometru je uz otvoreni preljev bio 0,35 bar-a. Pritisak na KS-6/II nije se mijenjao. Podaci u tablici prikazani u 6. redu preuzeti su sa slike 6.2. Datum provođenja ispitivanja je 21.12.1988. godine, a vrijeme je bilo sunčano. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini KS-6 na intervalu od 22,6-36 metra je 171,71 metara. Promjer cijevi je 19,05 mm. Bunar je arteškog tipa.

Tablica 6-8 Testiranje broj 45 (Ortolan i dr., 1989)

Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	0,5	5,0	-	3,65	0,2985	8,18
2.	1,0	10,0	-	8,65	0,5149	5,95
3.	1,5	15,0	-	13,65	0,7015	5,14
4.	1,0	10,0	-	8,65	0,4757	5,50
5.	0,8	8,0	-	6,65	0,2328	3,50
6.	-	-	-	1,4	-0,052	-



Slika 6.4. "Q"-t"-dijagram mjerenih podataka prilikom mjerenja slobodnog izlivanja iz piezometra KS-6/I i KS-6/II (Ortolan i dr., 1989)

U tablici 6-9 prikazano je testiranje utiskivanjem provedeno 22.12.1988. godine. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini KS-8 na intervalu od 22,6 do 36 metra je 149,30 metara. Promjer cijevi je 19,05 mm. Tijekom provođenja testiranja tlakovi nakon pojedinih ispitivanja vraćali su se na 0. Jedan od uzroka oscilacije protoka je teško održavanje tlaka konstantnim zbog duljine i krutosti crijeva.

Tablica 6-9 Testiranje broj 47 (Ortolan i dr., 1989)

Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	0,5	5,0	-	10,52	0,122	1,16
2.	1,1	11,0	-	16,52	0,254	1,54
3.	1,7	17,0	-	22,52	0,335	1,49
4.	1,1	11,0	-	16,52	0,208	1,26
5.	0,5	5,0	-	10,52	0,122	1,16

U tablici 6-10 prikazano je testiranje utiskivanjem provedeno 23.12.1988. godine. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini KS-4 na intervalu od 32 do 42 metra je 167,20 metara. Promjer cijevi je 19,05 mm. Prilikom provođenja ispitivanja slobodno nalijevanje nije se moglo pratiti zbog premalih količina, a zbog istog je prekinuto ispitivanje na 0,6 bar-a. Ispitivanja su prekinuta i zbog nedostatka vremena te su nastavljena kasnije.

Tablica 6-10 Testiranje broj 51 (Ortolan i dr., 1989)

Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	1,0	10,0	-	24,91	0,072	0,289
2.	1,6	16,0	-	30,91	0,1485	0,480
3.	2,0	20,0	-	33,91	1,3	3,834
4.	1,6	16,0	-	29,91	0,165	2,056
5.	1,0	10,0	-	23,91	0,467	0,698
6.	0,4	4,0	-	17,91	0,14	0,782

U tablici 6-11 prikazano je testiranje utiskivanjem provedeno 23.12.1988. godine. Kota terena na kojoj se izvodilo ispitivanje na bušotini KS-4 na intervalu od 54 do 66 metra je 167,20 metara. Promjer cijevi je 19,05 mm. Posljednji (šesti) test proveden je nalijevanjem u slobodnim razinama uz ostvarenu ukupnu visinsku razliku od 13,4 metra, a protok je izmjeren 4 dana kasnije nego kod prethodnih testova unutar ovog ispitivanja.

Tablica 6-11 Testiranje broj 54 (Ortolan i dr., 1989)

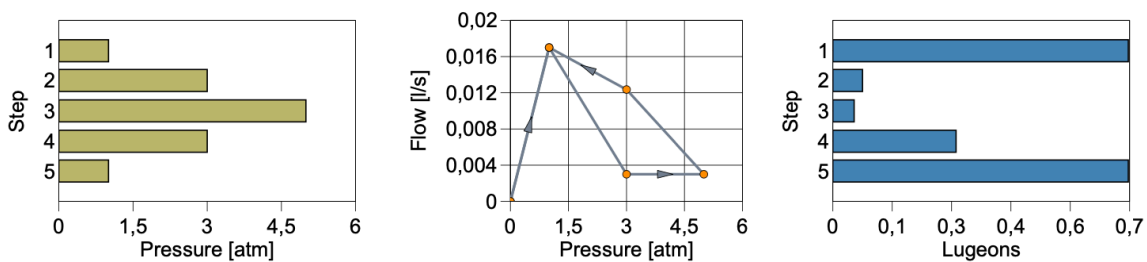
Ispitivanje	Manometarski pritisak (bar)	Manometarska visina (m)	Gubici visine od trenja (m)	Ukupna visina (m)	Protok (lit/min/m')	Lugeonova vrijednost (lit/min/m'/10 bar)
1.	0,4	4,0	-	21,05	0,255	1,069
2.	0,8	8,0	-	25,05	0,706	2,817
3.	4,2	12,0	-	29,05	0,725	2,496
4.	0,8	8,0	-	25,05	0,575	2,295
5.	0,4	4,0	-	21,05	0,481	2,286
6.	-	-	-	13,4	0,302	2,254

## 6.2. Reinterpretacija provedenih mjerenja

Provedena testiranja utiskivanjem opisana u prethodnom poglavlju ponovno su interpretirana pomoću programa *AquiferTest*.

Na slici 6.5. prikazana je reinterpretacija ispitivanja broj 7 (ulazni podaci u tablici 6-3). Usporedbom rezultata s tipičnim dijagramima prikazanih na slici 5.7. može se zaključiti da se dogodilo turbulentno tečenje. Ako se pogleda dijagram tlak-korak može se vidjeti da je treći korak, onaj sa najvećom vrijednosti tlaka, ujedno i onaj kojem odgovara najmanja vrijednost Lugeonovih jedinica. To potvrđuje činjenicu da se radi o turbulentnom toku.

Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]			Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity		
		1	2	3		[m/s]	[m/d]	Lugeon
1	1,0	0,017	0,017	0,017	0,017	INF	INF	0,7
2	3,0	0,003	0,003	0,003	0,003	INF	INF	0,1
3	5,0	0,003	0,003	0,003	0,003	INF	INF	0,1
4	3,0	0,003	0,017	0,017	0,012	INF	INF	0,3
5	1,0	0,017	0,017	0,017	0,017	INF	INF	0,7
Average								0,4

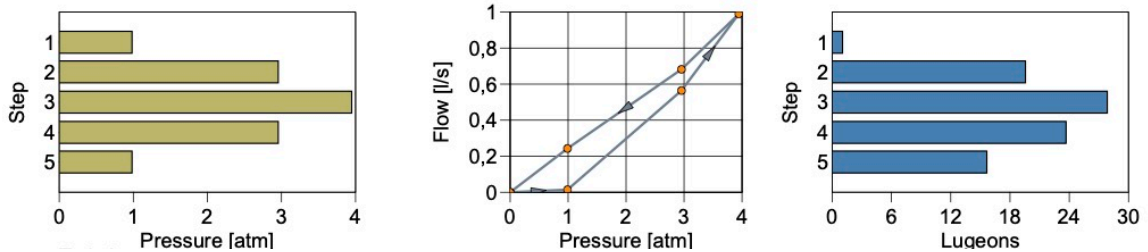


Slika 6.5. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 7

Na slici 6.6. prikazana je reinterpretacija ispitivanja broj 13 (ulazni podaci u tablici 6-4). Idealni dijagram dilatacije je zapravo Gaussova krivulja. Kao pokazna Lugeonova vrijednost uzima se najmanja vrijednost koja odgovara ili najmanjoj ili srednjoj vrijednosti tlaka za korake 1., 2., 3., 4., i 5. Usporedbom rezultata s tipičnim dijagramima prikazanih na slici 5.7. može se zaključiti da je došlo do dilatacije. Kod dilatacije trend rasta i pada vrijednosti Lugeonovih jedinica po koracima odgovara trendu promjene tlaka u dijagramu tlak-korak.



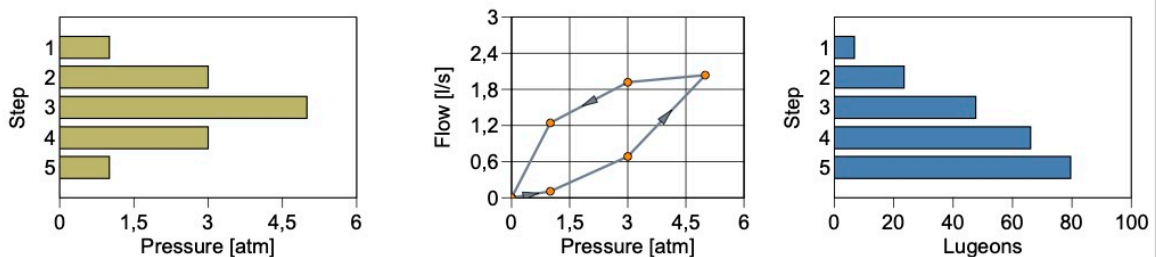
Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]				Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity		
		1	2	3	4		[m/s]	[m/d]	Lugeon
1	1,0	0,017	0,017	0,013		0,016	INF	INF	1,01
2	3,0	0,557	0,553	0,566	0,580	0,564	INF	INF	19,57
3	3,9	0,983	0,990	0,990		0,988	INF	INF	27,83
4	3,0	0,693	0,663	0,690		0,682	INF	INF	23,66
5	1,0	0,240	0,240	0,246		0,242	INF	INF	15,62
						Average			17,54



Slika 6.6. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 13

Na slici 6.7. prikazana je reinterpetacija ispitivanja broj 15 (ulazni podaci u tablici 6-5). Usporedbom rezultata s tipičnim dijagramima prikazanih na slici 5.7. može se zaključiti da je došlo do ispiranja. Dijagram ispiranja je specifičan, zato što vrijednosti Lugeonovh jedinica rastu s povećavanjem broja koraka, dok su vrijednosti tlaka u dijagramu tlak-korak u obliku Gaussove krivulje.

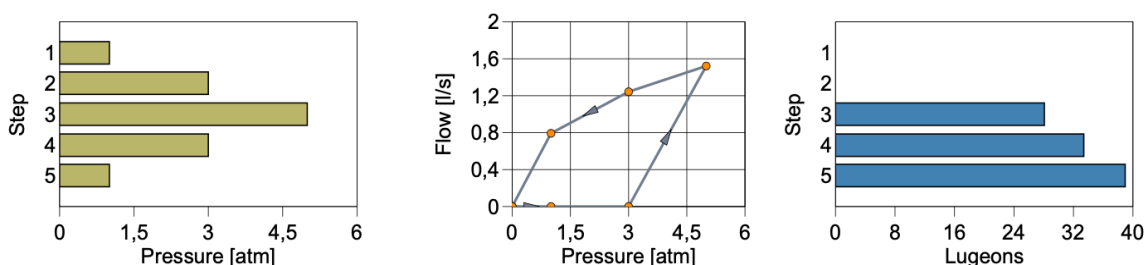
Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]			Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity			
		1	2	3		[m/s]	[m/d]	Lugeon	
1	1,0	0,103	0,103	0,107	0,104	INF	INF	6,7	
2	3,0	0,710	0,650	0,690	0,683	INF	INF	23,5	
3	5,0	2,083	2,000	2,010	2,031	INF	INF	47,7	
4	3,0	1,867	1,923	1,970	1,920	INF	INF	66,0	
5	1,0	1,250	1,223	1,250	1,241	INF	INF	79,6	
						Average			44,7



Slika 6.7. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 15

Na slici 6.8. prikazana je reinterpretacija ispitivanja broj 19 (ulazni podaci u tablici 6-6). Unatoč činjenici da nedostaju podaci 1. i 2. koraka, interpolacijom i usporedbom rezultata s tipičnim dijagramima prikazanih na slici 5.7. može se zaključiti da je došlo do ispiranja.

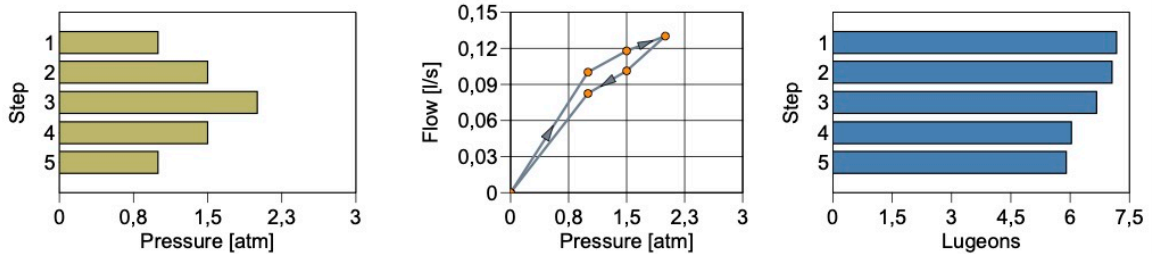
Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]				Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity		
		1	2	3	4		[m/s]	[m/d]	Lugeon
1	1,0								
2	3,0								
3	5,0	1,057	1,650	1,697	1,673	1,519	INF	INF	28,1
4	3,0	1,250	1,233	1,237		1,240	INF	INF	33,3
5	1,0	0,823	0,783	0,767		0,791	INF	INF	39,0
						Average			33,5



Slika 6.8. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 19

Na slici 6.9. prikazana je reinterpretacija ispitivanja broj 22 (ulazni podaci u tablici 6-7). Za laminarno tečenje karakteristično je da se vrijednost Lugeonovih jedinica ne mijenja značajno povećavanjem koraka. Vrijednosti tlaka svoj maksimum imaju na trećem koraku, od kojeg nadalje padaju. Trend opadanja vrijednosti Lugeonovih jedinica s povećanjem broja koraka upućuje na zapunjavanje pukotina. Uzevši navedeno u obzir, ali i usporedbu rezultata s tipičnim dijagramima prikazanih na slici 5.7., zaključuje se da je u pitanju ili laminarno tečenje ili zapunjavanje pukotina.

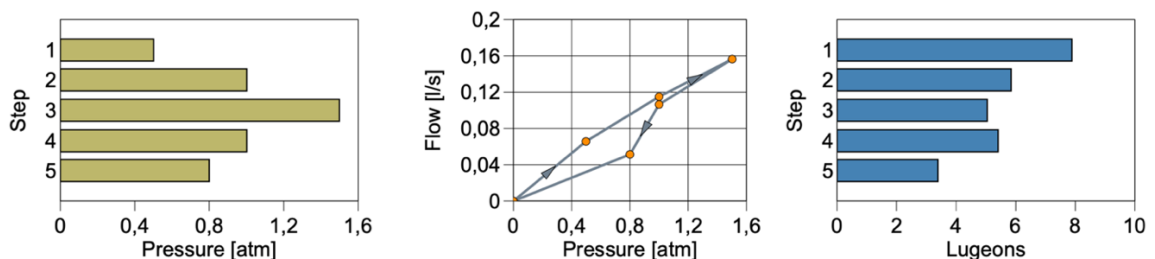
Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]				Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity		
		1	2	3	4		[m/s]	[m/d]	Lugeon
1	1,0	0,103	0,100	0,097		0,100	INF	INF	7,2
2	1,5	0,120	0,117	0,117		0,118	INF	INF	7,1
3	2,0	0,140	0,130	0,130	0,121	0,130	INF	INF	6,7
4	1,5	0,100	0,100	0,103		0,101	INF	INF	6,0
5	1,0	0,083	0,083	0,080	0,083	0,082	INF	INF	5,9
Average									6,6



Slika 6.9. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 22

Na slici 6.10. prikazana je reinterpretacija ispitivanja broj 45 (ulazni podaci u tablici 6-8). Usporedbom rezultata s tipičnim dijagramima prikazanih na slici 5.7. može se zaključiti da je došlo do zapunjavanja pukotina. Vrijednosti Lugeonovih jedinica u dijagramu procesa zapunjavanja pukotina u idealnom slučaju padaju s porastom broja koraka. Kod testa broj 45 u koraku četiri došlo je do anomalije radi pada tlaka na manometru uz otvoreni preljev na 0,35 bar-a.

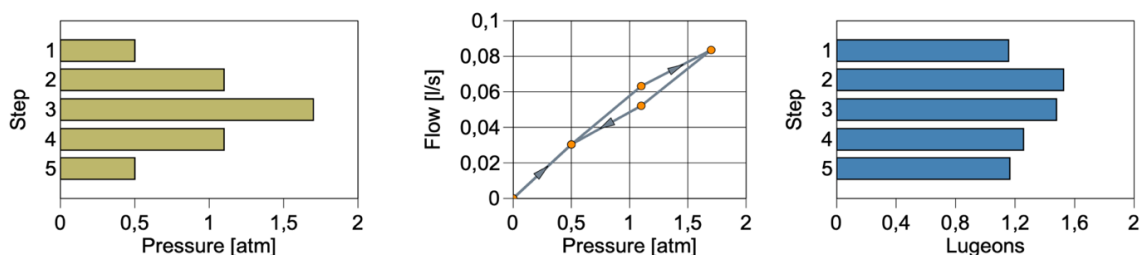
Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]				Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity		
		1	2	3	4		[m/s]	[m/d]	Lugeon
1	0,5	0,070	0,067	0,063	0,064	0,066	INF	INF	7,9
2	1,0	0,120	0,115	0,112	0,113	0,115	INF	INF	5,8
3	1,5	0,157	0,160	0,156	0,153	0,157	INF	INF	5,1
4	1,0	0,105	0,107	0,107	0,107	0,107	INF	INF	5,4
5	0,8	0,054	0,052	0,050	0,050	0,052	INF	INF	3,4
Average									5,5



Slika 6.10. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 45

Na slici 6.11. prikazana je reinterpretacija ispitivanja broj 47 (ulazni podaci u tablici 6-9). Usporedbom rezultata s tipičnim dijagramima prikazanih na slici 5.7. može se zaključiti da je došlo do dilatacije.

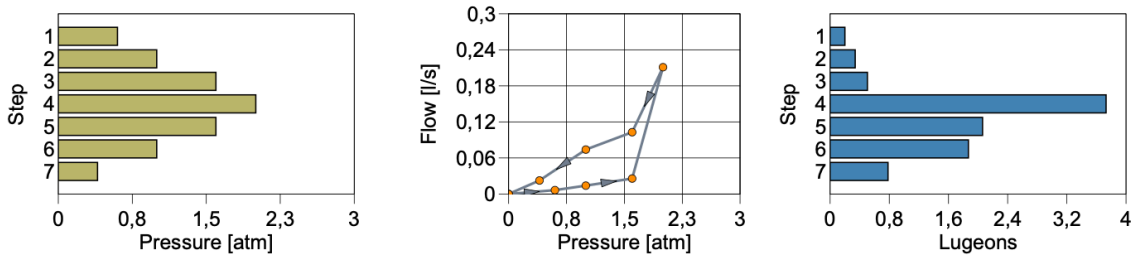
Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]				Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity		
		1	2	3	4		[m/s]	[m/d]	Lugeon
1	0,5	0,030	0,030	0,033	0,028	0,030	INF	INF	1,2
2	1,1	0,066	0,063	0,062	0,062	0,063	INF	INF	1,5
3	1,7	0,086	0,087	0,080	0,082	0,084	INF	INF	1,5
4	1,1	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	INF	INF	1,3
5	0,5	0,028	0,030	0,031	0,033	0,031	INF	INF	1,2
Average									1,3



Slika 6.11. Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 47

Pod pretpostavkom da bi prva dva testa slijedila trend ostalih, oblik dijagrama (slika 6.12.) u ispitivanju 51 upućuje da se radi o dilataciji. Vrijednosti u 1. i 2. koraku su mnogo manje od ostalih, a razlog tome je što su se ispitivanja odvijala u dva navrata zbog nedostatka vremena. U međuvremenu razina podzemne vode promijenila se za jedan metar, s 12,96 metara na 13,96 metara. Idealni dijagram dilatacije je Gaussova krivulja. Kao pokazna Lugeonova vrijednost uzeta je najmanja vrijednost koja odgovara ili najmanjoj ili srednjoj vrijednosti tlaka za korake 1., 2., 3., 4., 5., 6. i 7. Kod dilatacije trend rasta i pada vrijednosti Lugeonovih jedinica po koracima je isti kao trend promjene tlaka u dijagramu tlak-korak.

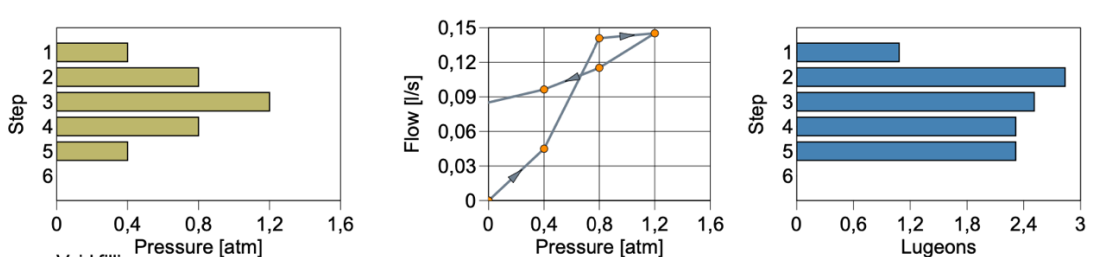
Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]						Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity		
		1	2	3	4	5	6		[m/s]	[m/d]	Lugeon
1	0,6	0,009	0,007	0,004				0,007	INF	INF	0,2
2	1,0	0,019	0,013	0,013	0,012	0,011		0,014	INF	INF	0,3
3	1,6	0,028	0,024	0,025	0,025	0,024		0,025	INF	INF	0,5
4	2,0	0,183	0,223	0,230	0,217	0,210	0,203	0,211	INF	INF	3,7
5	1,6	0,093	0,100	0,110	0,107			0,103	INF	INF	2,1
6	1,0	0,063	0,073	0,080	0,080			0,074	INF	INF	1,9
7	0,4	0,023	0,023	0,023	0,023			0,023	INF	INF	0,8
Average											1,4



Slika 6.12 Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 51

Na slici 6.13. prikazana je reinterpretacija ispitivanja broj 54 (ulazni podaci u tablici 6-11). Usporedbom rezultata s tipičnim dijagramima prikazanih na slici 5.7. može se zaključiti da je bilo prisutno laminarno tečenje uz pojavu dilatacije. U dijagramu Lugeonova jedinica-korak možemo vidjeti da vrijednosti Lugeonove jedinice dosižu svoj maksimum na drugom koraku nakon kojeg padaju. Sličan oblik takvom dijagramu je dijagram dilatacije, samo što u njegovom idealiziranom obliku, vrijednost Lugeonove jedinice raste s vrijednošću tlaka. Vrijednosti četvrtog i petog koraka su jednake, što upućuje na laminarno tečenje.

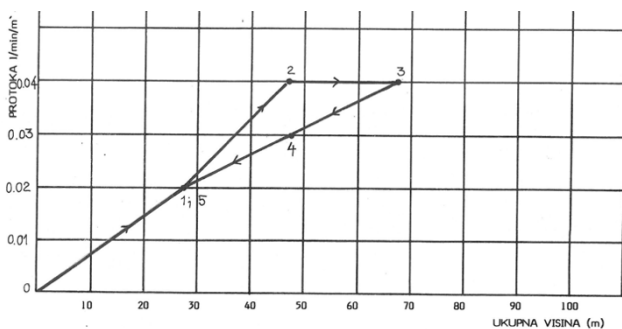
Step	Pressure [atm]	Flow Meter Readings [l/s]				Average Flow Rate [l/s]	Hydraulic Conductivity			
		1	2	3	4		[m/s]	[m/d]	Lugeon	
1	0,4	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	INF	INF	1,1	
2	0,8	0,143	0,143	0,137		0,141	INF	INF	2,8	
3	1,2	0,150	0,150	0,140	0,140	0,145	INF	INF	2,5	
4	0,8	0,120	0,117	0,113	0,110	0,115	INF	INF	2,3	
5	0,4	0,092	0,095	0,100	0,098	0,096	INF	INF	2,3	
6		0,062	0,055	0,073	0,051	0,060				
Average										2,2



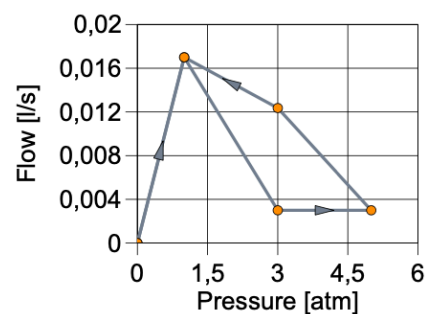
Slika 6.13 Dijagrami tlak-korak, tlak-protok i Lugeonova jedinica-korak za test broj 54

### 6.3. Usporedba rezultata

Prilikom usporedbe dijagrama iz elaborata (slika 6.14.a) s izgledom dijagrama na slici 5.7. zaključuje se da je riječ o pojavi turbulentnog tečenja. Rezultati reinterpetacije koji su rađeni u okružju programa *AquiferTest* prikazani na slici 6.5. i slici 6.14.b potvrđuju pojavu turbulentnog tečenja, unatoč razlici u dobivenim vrijednostima propusnosti. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 7 (tablica 6-3) iznosi 0,07, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest* -a (slika 6.5.) iznosi 0,38. Razlika je posljedica sljedećih činjenica: u elaboratu za test br. 7 nisu naznačene mjerne jedinice za vrijednosti tlaka, pa u usporedbi s ostalim provedenim testovima u kojima je korištena jedinica atmosfera (atm), pretpostavljeno je da su iste jedinice i u testu br. 7. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 7 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpetacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.14. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine, raste i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima, što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.



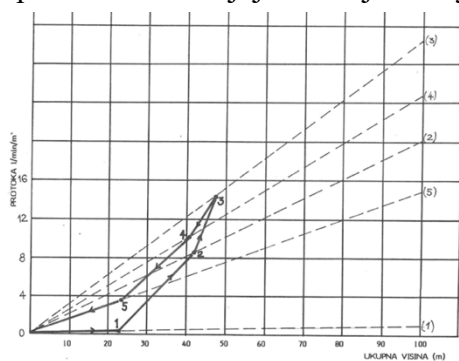
a)



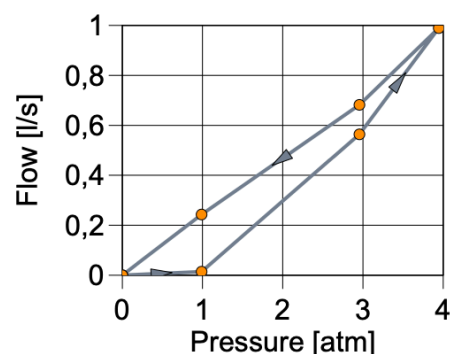
b)

Slika 6.14. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 7

Izgled dijagrama na slici 6.15. dobiven na temelju vrijednosti iz elaborata prilikom usporedbe sa slikom 5.7. ukazuje da se radi o dilataciji. Rezultati reinterpretacije na slici 6.6. potvrđuju dilataciju. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 13 u 5 ispitivanja (tablica 6-4) iznosi 18,68, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest* -a (slika 6.6) iznosi 17,54. Razlika može biti posljedica sljedećih činjenica: u elaboratu za test br. 13 prikazane mjerne jedinice korištene za izražavanje vrijednosti tlaka tijekom ispitivanja su standardne atmosfere (atm), dok su korištene jedinice u izračunima bari, što je vidljivo u tablici 6-4, a same vrijednosti tlaka prenesene su bez obzira na naznačenu promjenu mjerne jedinice. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 13 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. Do razlike u rezultatima u testu 13 tijekom izrade elaborata moglo je doći zbog kraćih prekida praćenja između 1. i 2. koraka, nedostatka vode između 3. i 4. koraka i zbog zanemarivanja količine vode koja se probila pokraj pakera (Ortolan i dr., 1989). Graf (slika 6.15.) je ekstrapoliran na osnovu mjerenja u piezometrima. U stupcu (slika 6.6.) koji prikazuje hidrauličke vodljivosti sve vrijednosti izražene u m/s ili m/d prikazane su kao beskonačne. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpretacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.15. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine, raste i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.



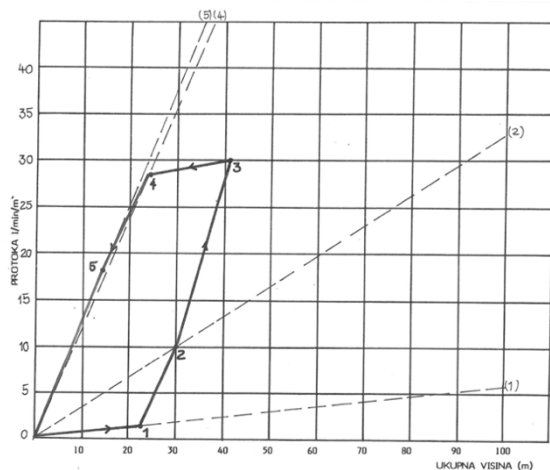
a)



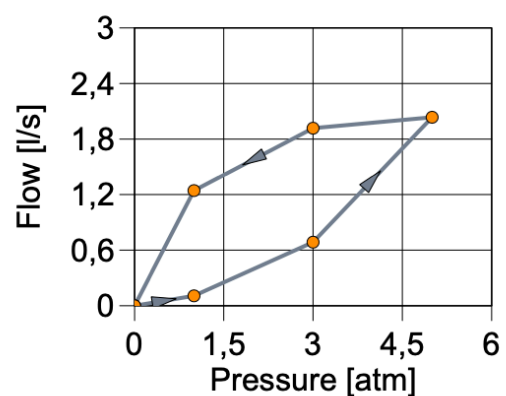
b)

Slika 6.15. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 13

Usporedbom izgleda dijagrama testa 15 (slika 6.16.) s onim na slici 5.7. može se tvrditi da se radi o procesu ispiranja. Rezultati reinterpretacije prikazani na slici 6.7. također potvrđuju da se radi o ispiranju. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 15 u 5 ispitivanja (tablica 6-5) iznosi 72,18, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest* -a (slika 6.7.) iznosi 44,70. Razlika je posljedica sljedećih činjenica: u elaboratu za test br. 15 prikazane mjerne jedinice korištene za izražavanje vrijednosti tlaka tijekom ispitivanja su standardne atmosfere (atm), dok su korištene jedinice u izračunima u elaboratu bari što je vidljivo u tablici 6-5, a same vrijednosti tlaka prenesene su bez obzira na naznačenu promjenu mjerne jedinice. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 15 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. Do razlike u rezultatima u testu 15. tijekom izrade elaborata moglo je doći zbog ponovljenog ispitivanja dionice testa 1 (Ortolan i dr., 1989). U stupcu (slika 6.7.) koji prikazuje hidrauličke vodljivosti sve vrijednosti izražene u m/s ili m/d prikazane su kao beskonačne. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpretacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.16. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine, raste i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.



a)

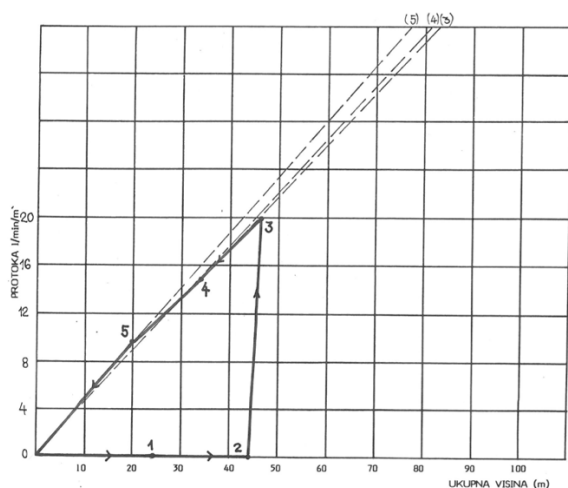


b)

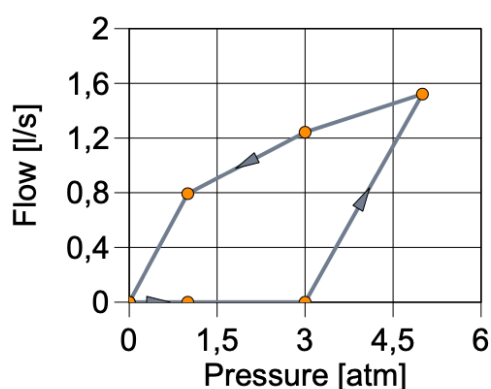
Slika 6.16. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 15



Prilikom usporedbe dijagrama (slika 6.17.) s izgledom dijagrama na slici 5.7. zaključuje se da je riječ o ispiranju. Rezultati reinterpretacije dobiveni programom *AquiferTest* prikazani na dijagramu slike 6.8. potvrđuju ispiranje. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 19 u 3 ispitivanja (tablica 6-6) iznosi 44,30, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest* -a (slika 6.8) iznosi 33,47. Zbog nemogućnosti određivanja protoka prva dva ispitivanja testa 19 nisu uzeta u obzir. Razlika je posljedica sljedećih činjenica: u elaboratu za test br. 19 prikazane mjerne jedinice korištene za izražavanje vrijednosti tlaka tijekom ispitivanja su standardne atmosfere (atm), dok su korištene jedinice u izračunima u elaboratu bari, što je vidljivo u tablici 6-6, a same vrijednosti tlaka prenesene su bez obzira na naznačenu promjenu mjerne jedinice. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 19 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. U stupcu (slika 6.8.) koji prikazuje hidrauličke vodljivosti sve vrijednosti izražene u m/s ili m/d prikazane su kao beskonačne. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpretacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.17. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine, raste i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.



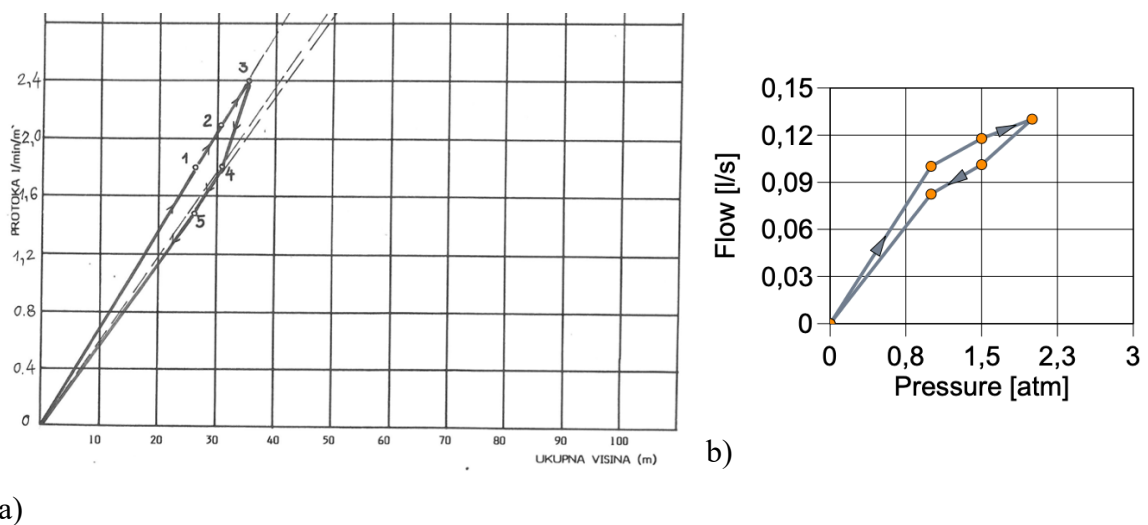
a)



b)

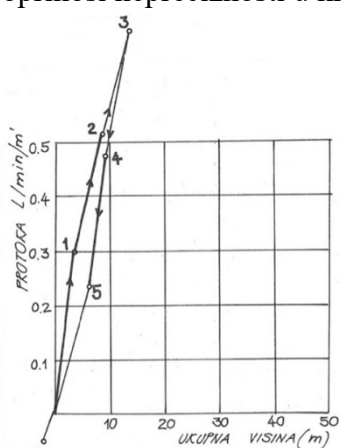
Slika 6.17. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 19

Prilikom usporedbe izgleda dijagrama na slici 6.18 dobivenog iz rezultata elaborata sa dijagramom na slici 5.7. zaključuje se da se radi o laminarnom tečenju. Reinterpretacijom podataka iz elaborata u okružju programa *AquiferTest* dobiva se dijagram (slika 6.9.) koji potvrđuje laminarno tečenje, ali i upućuje na moguće zapunjavanje pukotina. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 22 u 5 ispitivanja (tablica 6-7) iznosi 6,52, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest* -a (slika 6.9.) iznosi 6,58. Razlika je posljedica sljedećih činjenica: u elaboratu za test br. 22 prikazane mjerne jedinice korištene za izražavanje vrijednosti tlaka tijekom ispitivanja su standardne atmosfere (atm), dok su korištene jedinice u izračunima u elaboratu bari, što je vidljivo u tablici 6-7, a same vrijednosti tlaka prenesene su bez obzira na naznačenu promjenu mjerne jedinice. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 22 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. U stupcu (slika 6.9.) koji prikazuje hidrauličke vodljivosti sve vrijednosti izražene u m/s ili m/d prikazane su kao beskonačne. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpretacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.18. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine, raste i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.

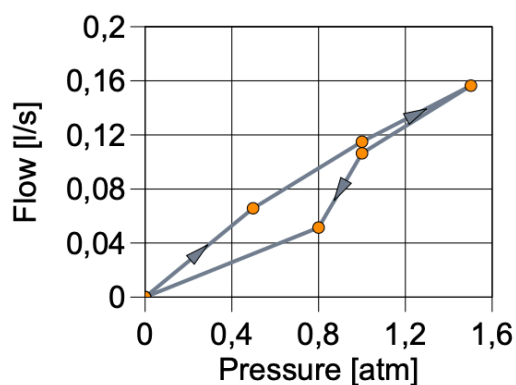


Slika 6.18. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 22

Izgled dijagrama na slici 6.19. dobivenom na temelju vrijednosti iz elaborata prilikom usporedbe sa slikom 5.7. ukazuje da se radi o zapunjavanju pukotina. Rezultati reinterpretacije na slici 6.8. potvrđuju zapunjavanje. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 45 u 5 ispitivanja (tablica 6-8) iznosi 5,65, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest*-a (slika 6.10.) iznosi 5,52. Zbog nedostatka podatka za vrijednost Lugeonovih jedinica za šesto ispitivanje testa 45 ono nije uzeto u obzir. Razlika je posljedica sljedećih činjenica: u elaboratu za test br. 45 nisu bile prikazane mjerne jedinice koje će se koristiti za izražavanje vrijednosti tlaka, pa u usporedbi s ostalim testovima u kojima su standardne atmosfere (atm) jedinice upotrebljavanje tijekom mjerenja pretpostavljeno je da vrijede i za test br. 45. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 45 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. U stupcu (slika 6.10.) koji prikazuje hidrauličke vodljivosti sve vrijednosti izražene u m/s ili m/d prikazane su kao beskonačne. Za razliku od ostalih testova u testu 45 promijenjen je predznak za vrijednost početne razine podzemne vode jer se radi o arteškom tipu vodonosnika. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpretacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.19. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine raste, i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.



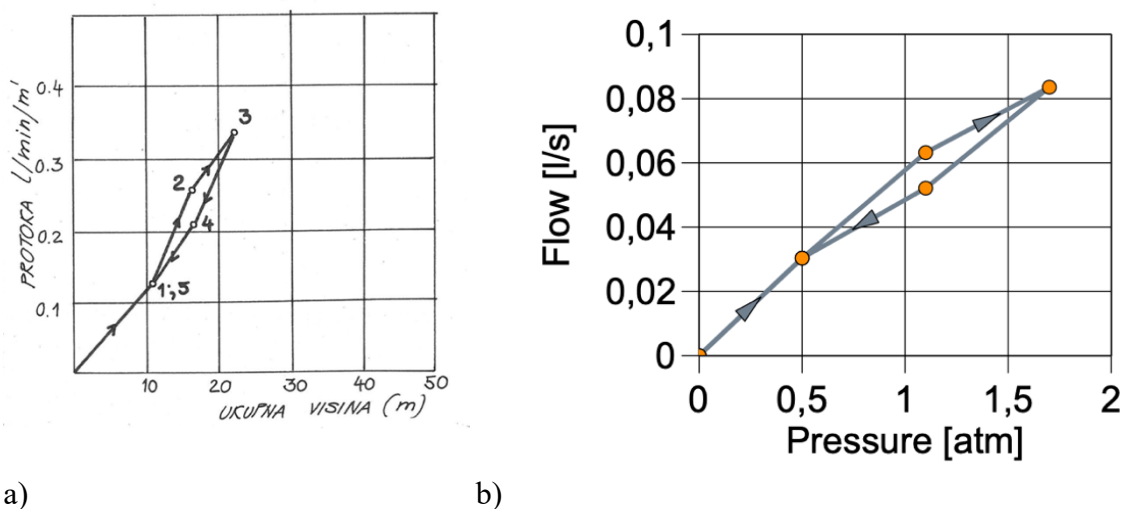
a)



b)

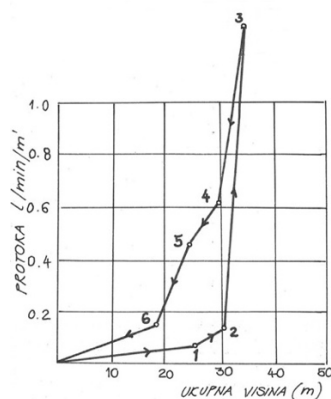
Slika 6.19. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 45

Prilikom usporedbe dijagrama dobivenog iz rezultata elaborata (slika 6.20.) s izgledom dijagrama na slici 5.7. zaključuje se da je riječ o dilataciji. Rezultati reinterpretacije koji su rađeni u okruženju programa *AquiferTest* prikazani na dijagramu slike 6.11. potvrđuju dilataciju. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 47 u 5 ispitivanja (tablica 6-9) iznosi 1,32, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest* -a (slika 6.11.) iznosi 1,34. Razlika je zanemariva. Bez obzira na malu razliku u elaboratu za test 47 nisu bile prikazane mjerne jedinice koje će se koristiti za izražavanje vrijednosti tlaka, pa u usporedbi s ostalim testovima u kojima su standardne atmosfere (atm) jedinice upotrebljavane tijekom mjerenja pretpostavljeno je da vrijede i za test 47. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 47 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. Tijekom izrade u elaboratu navedeno je da se tlakovi nakon pojedinih ispitivanja vraćaju na 0 te da je jedan od uzroka oscilacije protoka ovdje bio i teško održavanje tlaka konstantnim zbog duljine i krutosti crijeva (Ortolan i dr., 1989). U stupcu (slika 6.11.) koji prikazuje hidrauličke vodljivosti sve vrijednosti izražene u m/s ili m/d prikazane su kao beskonačne. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpretacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.20. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine raste, i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.

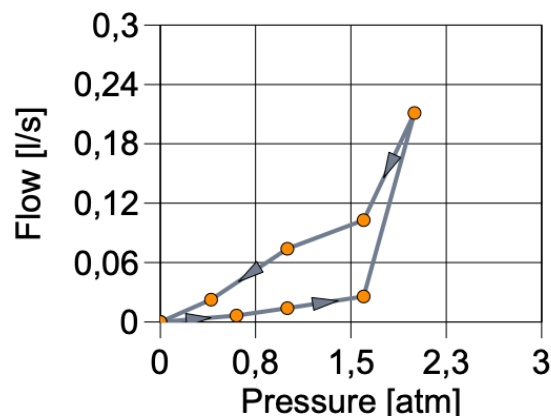


Slika 6.20. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 47

Usporedbom izgleda dijagrama testa 51 (slika 6.21.) s onim na slici 5.7. može se tvrditi da se radi o dilataciji. Rezultati reinterpretacije prikazani na slici 6.10. također potvrđuju da se radi o dilataciji. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 51 u 6 ispitivanja (tablica 6-10) iznosi 1,36, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest* -a u 7 ispitivanja (slika 6.12.) iznosi 1,36. U elaboratu u izračun nije uzeto prvo ispitivanje s tlakom od 0,6 bara. U elaboratu za test 51 nisu bile prikazane mjerne jedinice koje će se koristiti za izražavanje vrijednosti tlaka, pa u usporedbi s ostalim testovima u kojima su standardne atmosfere (atm) jedinice upotrebljavane tijekom mjerenja pretpostavljeno je da vrijede i za test 51. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 51 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. Tijekom izrade u elaboratu navedeno je da se slobodno nalijevanje nije moglo pratiti zbog premalih količina, a da je iz istog razloga prekinuto ispitivanje na 0,6 bara (Ortolan i dr., 1989). Tijekom prekida ispitivanja došlo je do promjene razine podzemne vode, što je vidljivo u tablici 6-1, s 12,96 metara na 13,96 metara. U stupcu (slika 6.12.) koji prikazuje hidrauličke vodljivosti sve vrijednosti izražene u m/s ili m/d prikazane su kao beskonačne. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpretacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.21. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine, raste i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.



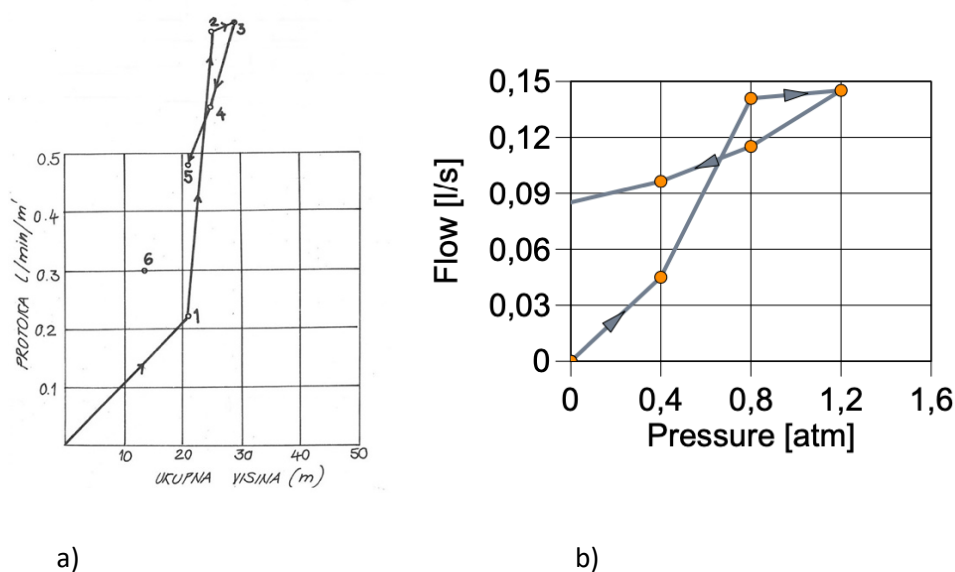
a)



b)

Slika 6.21. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 51

Usporedbom dijagrama sa slike 6.22. s dijagramima na slici 5.7. ne može se na prvu zaključiti reprezentativna Lugeonova vrijednost, no usporedbom grafova tlak-korak i Lugeon-korak na slici 6.13. s Lugeonovim dijagramima na slici 5.7. može se zaključiti da se radi o kombinaciji laminarnog tečenja i dilatacije. Prosječna Lugeonova vrijednost dobivena u testu 54 u 6 ispitivanja (tablica 6-11) iznosi 2,2, dok ona dobivena korištenjem *AquiferTest*-a u 5 ispitivanja (slika 6.13.) iznosi 2,2. U programu u izračun nije uzeto šesto ispitivanje, jer u elaboratu nije dana vrijednost tlaka pod kojim je ispitivanje provedeno. U elaboratu za test 54 nisu bile prikazane mjerne jedinice koje će se koristiti za izražavanje vrijednosti tlaka, pa u usporedbi s ostalim testovima u kojima su standardne atmosfere (atm) jedinice upotrebljavane tijekom mjerenja pretpostavljeno je da vrijede i za test 54. Također, vrijednosti protoka u izračunu srednje vrijednosti protoka za svako pojedino ispitivanje unutar testa 54 u elaboratu nisu dobro korelirane s vremenskom crtom naznačenom iznad. U stupcu (slika 6.13.) koji prikazuje hidrauličke vodljivosti sve vrijednosti izražene u m/s ili m/d prikazane su kao beskonačne. Grafovi u drugom stupcu slike 5.7. i grafovi dobiveni reinterpretacijom u programu *AquiferTest* prikazuju različite promjene protoka s tlakom. Grafovi koji se nalaze u elaboratu, a s kojima se vršila usporedba prilikom određivanja prirode ponašanja fluida (turbulentni, laminarni, dilatacija, ispiranje...) prikazuju promjenu protoka s visinom. Međusobnom usporedbom grafova na slici 6.22. vidljivo je da s porastom visine, odnosno dubine, raste i vrijednost tlaka. Zbog heterogenosti i anizotropije vrijednosti tlaka i visine ne mijenjaju se proporcionalno pa stoga dolazi do manjih razlika u rezultatima što doprinosi nepreciznosti u krajnjem zaključivanju.



Slika 6.22. Usporedba stare i nove interpretacije testa broj 54

## 7. ZAKLJUČAK

Rad se sastoji od kratkog pregleda „*In situ*“ metoda testiranja pukotinskih vodonosnika te reinterpretacije podataka dobivenih provedenim ispitivanjima propusnosti utiskivanjem na području klizišta Kostanjek kod bivše tvornice cementa "Sloboda" u Podsusedu. Postoje dvije osnovne metode *in-situ* testiranja vodonosnika, u jednoj se voda crpi iz vodonosnika, a u drugoj se dodaje u vodonosnika. Kod drugog tipa testiranja, postoje još dvije podgrupe koje se razlikuju po tome ulazi li voda u podzemlje pod tlakom ili ne. Ako ulazi pod tlakom, to se naziva test utiskivanja (engl. packer test), a ako ne ulazi pod tlakom onda se naziva test ulijevanja (engl. slug test). Odabir metode koja će se koristiti za dobivanje potrebnih parametara ispitivane stijenske mase ovisi o namjeni istraživanja, ograničenjima i uvjetima. Prilikom reinterpretacije provedenih testiranja utiskivanjem u okviru ovog rada koristio se program *AquiferTest* američke kompanije Waterloo Hydrogeologic, specijalizirani program za analiziranje, interpretiranje i vizualiziranje podataka metoda crpljenja, ulijevanja i utiskivanja. Iako je bilo moguće analizu provesti u Excel-u, samo okružje *AquiferTest* -a izuzetno je pregledno i jednostavno za korištenje te posjeduje alate namijenjene primarno hidrogeološkoj uporabi, poput unošenja karata u podloge, korelacije i interpolacije podataka. Usporedbom rezultata ranije interpretacije s rezultatima reinterpretacije može se zaključiti da je ponašanje toka pravilno određeno, te su vrijednosti Lugeonovih jedinica u većini slučajeva bliske ili jednake. Do odstupanja je vrlo vjerojatno dolazilo zbog nepotpunih podataka, neprecizno određenih vremenskih intervala mjerenja te nejasno naznačenih mjernih jedinica u originalnim terenskim zapisnicima.

## 8. LITERATURA

Heath, Ralph C., 1984. Ground-water regions of the United States, dokument geološke izmjere-vodenih zaliha, USGS WSP 2242, str. 47.

Lugeon, M., 1933. Barrages et Geologie. Dunod, Paris.

Milanović, T. P., 1979. Hidrogeologija karsta i metode istraživanja, str 166-180.

Ortolan, Ž., Stanić, B., Mihalinec, Z., Mavar, R., 1989. Ispitivanje vodopropusnosti, klizište T.C. "Sloboda"-Podsused, Zagreb, Zavod za geotehniku, OOUR Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb.

Parlov, J., 2019a. Dinamika podzemnih voda 2, Interna skripta za akademsku godinu 2019./2020.

Parlov, J., 2019b. Hidrogeologija krša, Interna skripta za akademsku godinu 2019./2020.

Pleslić, S., 2014. Pripreme za predavanja iz Fizike 1. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, URL: <https://www.fer.unizg.hr/download/repository/predavanja12-2014.pdf> (5.2.2021.)

Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 2010. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. 2. izd. London: Springer, p. 378.

Tunbridge, L., 2017. Hydraulic conductivity determination by Lugeon test – testing in practice-prezentacija, Radionica – Drainage of large rockslides Oslo 30. – 31st January 2017., str. 13

Waterloo Hydrogeologic, 2020. *AquiferTest* Pro 10.0, Priručnik za korištenje programa, Canada, p. 505.



Quiñones-Rozo, C., 2010. Lugeon test interpretation, revisited, in: Collaborative Management of Integrated Watersheds, US Society of Dams, 30-a godišnja konferencija, str. 405-414.

Štimac, I., 2016. Uloga minerala glina u aktiviranju klizišta Kostanjek, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, p. 78.

## Literatura preuzeta sa interneta:

Američko meteorološko društvo:

[https://glossary.ametsoc.org/wiki/Quasi\\_steady\\_state](https://glossary.ametsoc.org/wiki/Quasi_steady_state) (10.1.2021.)

Hrvatska enciklopedija:

<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=22306> (11.1.2021.)

<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=62351> (11.1.2021.)



KLASA: 602-04/20-01/230  
URBROJ: 251-70-03-21-2  
U Zagrebu, 03.02.2021.

**Goran Čorak, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/230, UR. BROJ: 251-70-14-20-1 od 29.10.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

### HIDRAULIČKO TESTIRANJE PUKOTINSKIH VODONOSNIKA ULIJEVANJEM I UTISKIVANJEM

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 Kuninek  
(titula, ime i prezime)