Primjena Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti

Bedovec, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

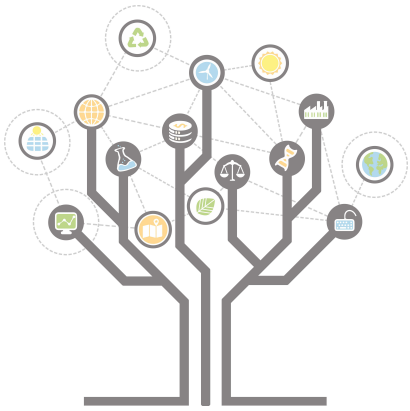
2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:347582

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 3.0

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



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Primjena Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti

Bedovec, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:347582

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-19**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Matija Bedovec

PRIMJENA SLUG TESTA U FORMACIJAMA VISOKE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

PRIMJENA SLUG TESTA U FORMACIJAMA VISOKE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

KANDIDAT:

Matija Bedovec

MENTOR:

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec

VARAŽDIN, 2016.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

PRIMJENA SLUG TESTA U FORMACIJAMA VISOKE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

(naslov diplomskog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **Izv. prof. dr. sc. Stjepana Streleca.**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 28.6.2016.

MATIJA BEDOVEC
(Ime i prezime)

Matija Bedovec
(Vlastoručni potpis)

Sažetak:

Ime autora: Matija Bedovec

Naslov rada: Primjena Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti

U radu je dan teorijski i praktični prikaz metode slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti. Uvodni dio naglašava važnost vode kao jednog od glavnih resursa kako za sam život ljudi tako i za gospodarstvo koje je u stalnom porastu. Zatim se opisuje voda u tlu koja može zauzimati prostor svih pora u elementu tla (tlo je zasićeno vodom), i djelomičan prostor pora u elementu tla (djelomično zasićeno ili nezasićeno tlo). Objašnjava se pojam vodonosnog sloja i prikazuje se podjela vodonosnih slojeva na otvoreni, poluotvoreni, poluzatvoreni i zatvoreni vodonosni sloj. U poglavlju 3. napravljen je teorijski osvrt o karakterističnim hidrauličkim parametrima vodonosnog sloja (hidraulička vodljivost (K), koeficijent transmisivnosti (T), te koeficijent uskladištenja (S)). Analizira se Darcy-ev zakon i naglašava se razlika između koeficijenta propusnosti (k) i hidrauličke vodljivosti (K). Nakon toga opisuje se pojam slug testa, te su prikazane prednosti slug testa u odnosu na druge terenske metode. U poglavlju 4.3 dan je općeniti pregled postupka analize slug testa, i objašnjeni su koraci od kojih se analiza sastoji. Objašnjenje koraka postupka analize potkrijepljeno je slikama iz MS Excela koje su izrađene na temelju podataka dobivenih na terenu. U nastavku se detaljno opisuje primjer terenske primjene slug testa na lokaciji crpilišta „Varaždin“, gdje je navedena oprema i sam postupak izvođenja slug testa na terenu. Opisana je i izvedba eksploatacijskog zdenca Z-1 i pijezometra PDS-1 u kojem je izvedeno ispitivanje slug testom. Nakon opisivanja terenske primjene slug testa navode se postupci obrade dobivenih podataka na terenu. Obrada podataka izvršena je u programu MS Excel i u programskom paketu AQTESOLV kako bi se mogla vidjeti usporedba podataka tih dvaju softvera. Na kraju je prikazana usporedba rezultata slug testa i probnog crpljenja (probno crpljenje je izvodio Građevinski fakultet, Zagreb), te je utvrđeno kako se odstupanja rezultata nalaze u dozvoljenim granicama od 30-ak %.

Ključne riječi: Slug test, hidraulička vodljivost, vodonosni sloj, crpilište „Varaždin“, AQTESOLV.

SADRŽAJ

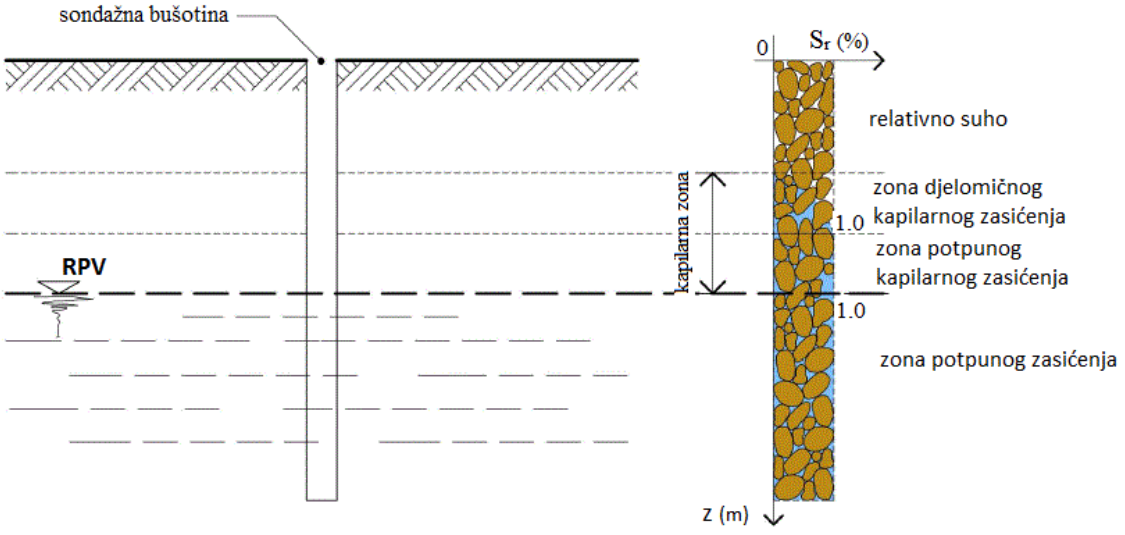
1. Uvod 1
2. Voda u tlu 2
2.1 Tipovi vodonosnih slojeva 3
2.1.1 Otvoreni vodonosni sloj 4
2.1.2 Poluotvoreni vodonosni sloj 4
2.1.3 Poluzatvoreni vodonosni sloj 4
2.1.4 Zatvoreni vodonosni sloj 6
3. Karakteristike vodonosnih slojeva 7
3.1 Darcy-jev zakon i hidraulička vodljivost (K) 7
3.2 Koeficijent transmisivnosti (*T*) 10
3.3 Koeficijent uskladištenja- storage (*S*) 11
4. Slug test 13
4.1 Što je zapravo slug test 14
4.2 Prednosti slug testa 15
5. Primjer terenske primjene slug testa na lokaciji crpilišta „Varaždin“ 24
5.1 Izvedba pijezometra PDS-1 25
5.2 Izvedba eksploatacijskog zdenca Z-1 27
5.3 Oprema potrebna za izvođenje Slug testa 29
5.4 Izvođenje slug testa na terenu 32
5.5 Aplikacija proračuna u MS Excelu 33
5.5.1 Primjena proračunskih tablica 36
5.6 Aplikacija proračuna u AQTESOLV programskom paketu 41
5.6.1 Unos podataka u AQTESOLV 42
6. Rezultati mjerenja 46
7. Zaključak 47
Literatura 48
Popis slika 49
Popis tablica 51
Grafički prilozi 52

1. Uvod

Kvalitetni podaci o hidrauličkim karakteristikama vodonosnih slojeva dobiju se isključivo preko terenskih radova. Laboratorijska mjerenja nude raspon očekivanih podatak koji traže in situ potvrdu. Često podaci dobiveni u laboratoriju nemaju nikakvu osnovu s podacima dobivenim na terenu. Probno crpljenje kao klasični postupak daje pouzdane rezultate, ali nije prikladan kao izvor okvirnih podataka kod planiranja ili manjih zahvata i to uglavnom zbog dugog trajanja pokusa i cijene izvođenja radova. Slug test može ponuditi mnogo točnije podatke od onih dobivenih u laboratoriju, a kasnije će biti pokazano da su ti rezultati vrlo blizu podacima dobivenim probnim crpljenjem. Slug test može se provesti i u priručno izrađenoj bušotini, što pridonosi niskoj cijeni koštanja takvog pokusa. Mnogi autori nudili su teorijska rješenja i uglavnom, svi traže rješenja u izgledu odziva (kolebanja) razine vode u bušotini na unesenu promjenu, da li naglim dodavanjem ili oduzimanjem dijela vode iz pijezometra. Terenska ekipa sa prikladnom opremom za slug test može za 30-tak minuta imati rezultate o hidrauličkoj provodljivosti (K) i transmisivnosti (T) ispitivanog vodonosnog sloja. Zbog ovih činjenica slug test je u svijetu vrlo dominantna metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti vodonosnih slojeva, dok se s druge strane u Hrvatskoj vrlo rijetko koristi. Stoga je korisno pisati o ovoj metodi i približiti je za širu upotrebu u praksi.

2. Voda u tlu

Sva tla su vodopropusna, jer voda se može kretati kroz prostor međusobno povezanih pora između čvrstih čestica. Količina, raspored vode u tlu i raspored tlakova u vodi imaju veoma veliki utjecaj na svojstva tla i na njegovo ponašanje u uvjetima djelovanja vlastite težine i drugih opterećenja. Veliki broj praktičnih problema pri građenju u tlu ili pri korištenju tla kao materijala za građenje, ne potječe samo od zrnaste prirode tla već i od prisutstva vode u porama tla. Voda može zauzimati prostor svih pora u elementu tla, kada je tlo zasićeno vodom. Ukoliko nisu sve pore ispunjene vodom, tlo je djelomično zasićeno ili nezasićeno. U slučaju nezasićenog tla, moguća su dva karakteristična slučaja. Prvi, pri relativno malim sadržajima vode, molekule vode se sakupljaju na površini zrna i po kontaktima između njih, ostavljajući preostalu zapreminu pora ispunjenu zrakom, tako da je zrak u porama u potpunoj komunikaciji sa svim porama u razmatranom elementu tla. Drugi, pri većim sadržajima vode, zrak se pojavljuje u obliku izoliranih mjehurića, diskontinuirano, ali je voda u komunikaciji sa svim porama. U graničnom slučaju, kada su sve pore ispunjene vodom i nema mjehurića zraka, voda je u potpunoj komunikaciji sa vodom u svim okolnim porama što omogućava direktno prenošenje pritisaka i kretanje vode kroz prostor pora.



Slika 1. Pojavljivanje vode u tlu, [1]

Neposredno iznad nivoa podzemne vode, pore mogu biti potpuno ili djelomično zasićene vodom, pri čemu se stupanj zasićenja kreće u granicama od 0 % ≤ *Sr* ≤ 100 %. Ova zona naziva se i kapilarna zona. Uzrok pojavi vode u ovoj zoni su kapilarni efekti

koji su mogući uglavnom u sitnozrnatom tlu, mada se u određenim slučajevima mogu pojaviti i kod krupnozrnatog tla koje ima značajnije primjese sitnozrne frakcije. Ova zona može se podijeliti na tri zone, (Slika 1.). Prva zona je zona potpunog kapilarnog zasićenja koja se nalazi neposredno iznad razine podzemne vode gdje je voda u potpunoj međusobnoj komunikaciji. Zatim slijedi zona djelomičnog kapilarnog zasićenja gdje su najsitnije pore ispunjene vodom a najkrupnije zrakom. I na kraju je zona kontaktne vode, gdje voda obavija površinu najsitnijih čestica tla, a može se nalaziti i na kontaktu između čestica tla.

Vrlo je često važno u tlu prepoznati razinu podzemne vode. To nije razina na kojoj se pojavljuje voda već razina na kojoj su porni tlakovi jednaki atmosferskima. Prava razina podzemne vode nije, dakle, gdje počinju potpuno vodom zasićene pore (S_r = 1.0), već gdje je porni tlak, u = 0.0 kPa (tj. tlak je jednak atmosferskom). Iznad te razine porni su tlakovi manji od nule kao što bi bili, primjerice, u kapilari uronjenoj na razini podzemne vode, [2].

2.1 Tipovi vodonosnih slojeva

Vodonosni sloj ili vodonosnik je porozni medij koji vodu prima, transimitira, a u nekim vodonosnim slojevima vodu i otpušta, odnosno daje. Jednostavnije rečeno, vodonosni sloj je podzemni sloj vodonosnih propusnih stijena ili nekonsolidiranog materijala (šljunak, pijesak) koji se nalaze na nepropusnoj podlozi. Vodonepropusni slojevi su formacije koje nemaju sposobnost provođenja vode zbog slabe hidrauličke vodljivosti, bez obzira da li u sebi sadrže vodu u prostoru pora.

Prema hidrogeološkim značajkama krovine i podine i odnosu krovinskih i podinskih naslaga i vodonosnog horizonta mogu se razlikovati četiri osnovna tipa modela:

- Otvoreni vodonosni sloj
- Poluotvoreni vodonosni sloj
- Poluzatvoreni vodonosni sloj
- Zatvoreni vodonosni sloj

2.1.1 Otvoreni vodonosni sloj

Otvorenim vodonosnim slojem smatra se propustan sloj koji leži na nepropusnoj podlozi, a samo je djelomično saturiran vodom, (Slika 2./a). U sitnozrnim otvorenim vodonosnim slojevima dreniranje vode pod gravitacijom iz pora nije trenutačno; voda je otpuštena poslije određenog vremena nakon snižavanja razine podzemne vode. To stanje obično se naziva otvoreni vodonosni sloj sa zakašnjelim otpuštanjem. Zbog toga što je jedan dio vode zadržan bilo bi pogrešno reći da je vodonosni sloj odvodnjen, već je bolje rabiti izraz desaturiran, [3]. Kako otvoreni vodonosni slojevi obično imaju visoku vrijednost koeficijenta uskladištenja, može proći veoma dugi period prije nego se sniženje stabilizira.

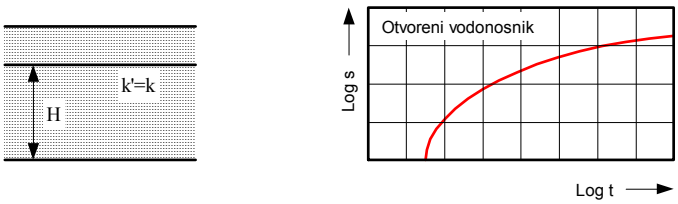
2.1.2 Poluotvoreni vodonosni sloj

U slučaju da je propustan sloj pokriven sa sitnozrnim djelomično saturiranim slojem, a koji je relativno slabije propustan u odnosu na ispitivani vodonosni sloj, onda se takav vodonosni sloj naziva poluotvorenim. Zakašnjelo otpuštanje krovine vodonosnog sloja rezultirat će dvofaznom krivuljom odnosa vrijeme-sniženje, (Slika 2./b).

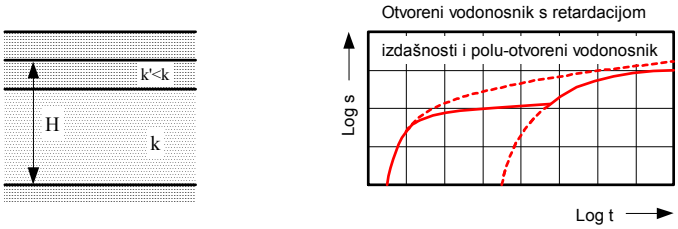
2.1.3 Poluzatvoreni vodonosni sloj

Poluzatvoreni vodonosni sloj znači da je dobro propustan sloj potpuno saturiran, a u njegovoj se krovini nalazi djelomično saturiran polupropusni sloj. Pod nejasnim terminom polupropusnim smatra se sloj koji ima slabu, ali ipak praktično mjerljivu propusnost. Snižavanje pijezometarske visine u poluzatvorenom vodonosnom sloju, kao rezultat crpljenja, uzrokovat će vertikalno procjeđivanje iz polupropusnog medija u glavni vodonosni sloj. To će uvjetovati bržu stabilizaciju depresivnog konusa. Poluzatvoreni sloj može pokazati razinu pod tlakom kao i slobodnu razinu podzemne vode. Kada se provodi pokusno crpljenje, u takvim vodonosnim slojevima preporuča se ugraditi opažačke bušotine u sve naslage ispitivane sredine. Uglavnom, sniženje slobodne razine polupropusnog sloja znatno je manje nego snižavanje razine vodonosnog sloja pod tlakom, što uzrokuje da se dreniranje polupropusnog sloja odvija značajno dulje, (Slika 2./c).

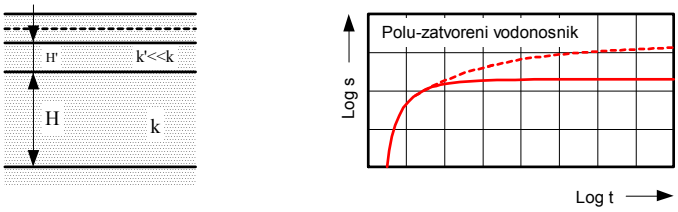
a) Otvoreni vodonosni sloj



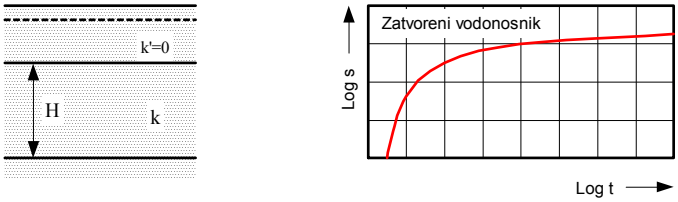
b) Polu-otvoreni vodonosni sloj



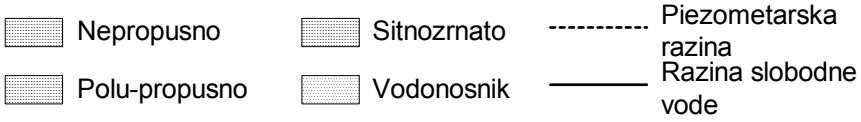
c) Polu-zatvoreni vodonosni sloj



d) Zatvoreni vodonosni sloj



LEGENDA:



Slika 2. Odnos sniženja u vremenu crpljenja zdenca u različitim tipovima vodonosnih slojeva, [6]

2.1.4 Zatvoreni vodonosni sloj

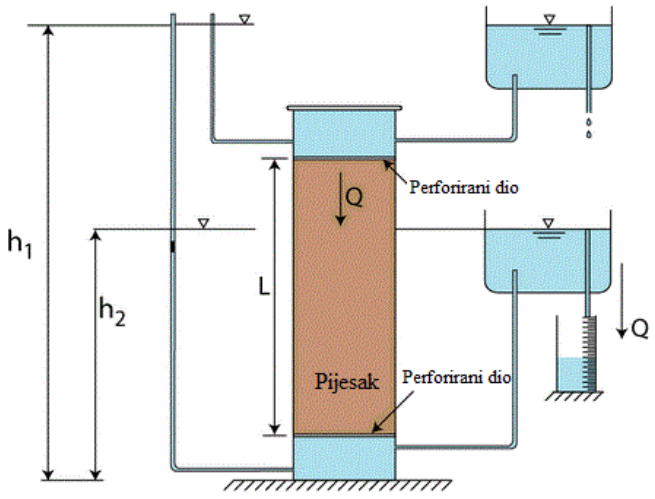
Zatvoreni vodonosni sloj je potpuno saturirana dobro propusna sredina u čijoj se krovini i podini nalaze nepropusne naslage, (Slika 2./d). Podzemna voda u zatvorenom sloju obično je pod tlakom, tako da se pijezometarska razina nalazi iznad gornje kote vodonosnog sloja. Ako se pijezometarska razina nalazi u krovini vodonosnog sloja, onda se radi o subarteškoj razini, a ako se pijezometarska razina nalazi iznad kote terena, onda se podzemna voda arteški izlijeva na samu površinu terena. Snižavanje pijezometarske razine predstavlja smanjenje tlaka u vodonosnom sloju. Zbog toga, što se promjene tlaka mogu transmitirati prilično brzo, te zbog toga što ograničeni vodonosni sloj ima relativno mali koeficijent uskladištenja, promjene razine zbog crpljenja su relativno brze, [4].

3. Karakteristike vodonosnih slojeva

Osnovni cilj testova (proba) za određivanje karakteristika vodonosnih slojeva jest da se dobiju podaci o karakterističnim hidrauličkim parametrima vodonosnog sloja, npr. hidraulička vodljivost (*K*), koeficijent transmisivnosti (*T*), te koeficijent uskladištenja (*S*). Probe za određivanje karakteristika vodonosnih slojeva izvode se na terenu i to u vidu oskultacije, odnosno zapisa fluktuacije pijezometarskih razina zbog dodavanja odnosno crpljenja vode iz vodonosnog sloja. Na unesene promjene voda u vodonosnom sloju reagira promjenom razine vodnog lica, a ta opažanja moguće je izvesti na samom probnom zdencu odnosno na obližnjim pijezometrima. Određeni zaključci o karakteristikama vodonosnog sloja mogu se izvesti i na temelju granulometrijskih krivulja, odnosno poroznosti stijena. No, to ne znači obavezno i količinu vode koja se može iz njega dobiti, iako je količina vode u tlu i stijeni u ovisnosti o poroznosti.

3.1 Darcy-jev zakon i hidraulička vodljivost (K)

Francuski hidrauličar H.P.G Darcy izveo je sredinom 19. stoljeća osnovni zakon filtracije, koji se naziva Darcy-jev zakon. U svrhu provedbe ispitivanja konstruirao je uređaj koji je imao oblik cilindrične posude ispunjene ispitivanim poroznim materijalom, kako prikazuje Slika 3. Darcy je nalijevao vodu na površinu poroznog materijala kojoj je održavao stalnu razinu, a na donjoj je razini bila rešetka kroz koju je procijeđena voda otjecala u menzuru, [5].



Slika 3. Shematski prikaz Darcy-jevog uređaja

Kako je prikazano na slici, L označava duljinu vertikalnog uzorka pijesak, visina stupca vode na vrhu i dnu cilindra je označena sa h_1 i h_2. Neki put je potrebno odrediti brzinu kojom voda protječe kroz tlo. Brzina tečenja je volumen vode koji proteče kroz površinu uzorka (A) u promatranom vremenu, dakle, brzina tečenja (v), je:

$$v = \frac{V}{t \cdot A} \; m/s \tag{1}$$

Gdje je V volumen vode, t je vrijeme, A je površina uzorka.

Tečenje kroz uzorak (tlo) je to brže, što je razlika potencijala (ΔH), veća, a duljina uzorka (l), manja, pa se definira fizikalna veličina koja se naziva hidraulički gradijent (i):

$$i = \frac{\Delta H}{l} \tag{2}$$

Kako bi se izjednačila mjerenja pri različitim duljinama uzoraka i različitim padovima potencijala (ΔH), potrebno je izmjerenu brzinu podijeliti s hidrauličkim gradijentom. Rezultat je brzina po jediničnom gradijentu što nazivamo koeficijentom propusnosti (k):

$$k = \frac{v}{i} = \frac{\frac{V}{t \cdot A}}{\frac{\Delta H}{l}} = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot \Delta H} \tag{3}$$

Konstanta proporcionalnosti naziva se koeficijent propusnosti. Voda protječe različitom brzinom kroz razne materijale, što znači da su vrijednosti koeficijenta propusnosti različitih materijala različite, (Prilog br. 1) [5]. Izraz (3) može se napisati i ovako:

$$v = k \cdot i \tag{4}$$

Izraz (4) predstavlja Darcy-jev zakon ili Darcy-jev obrazac, a koeficijent k je koeficijent propusnosti, ili koeficijent procjeđivanja ili koeficijent filtracije.

Koeficijent propusnosti (k), kao što se vidi iz izraza (4), predstavlja brzinu procjeđivanja pri nagibu $i = 1$. Brzina tečenja u poroznom je materijalu vrlo mala, pa je kretanje podzemnih voda najčešće laminarno. Samo pri kretanju vode s velikim

brzinama kroz šljunak i kamenje, tečenje podzemne vode je turbulentno, a za takve slučajeve ne vrijedi Darcy-jev zakon. Koeficijent propusnosti može se odrediti terenskim i laboratorijskim ispitivanjima, izravnim i neizravnim metodama. Terenska ispitivanja koeficijenta propusnosti zahvaćaju znatno veći volumen ispitivanog područja i trajanje ispitivanja je relativno kratko. Dobivanje ispitivanih rezultata ograničeno je nedovoljnim poznavanjem geometrije i hidrauličkih granica medija, te cijena radova može biti visoka. S druge strane, laboratorijska ispitivanja zahvaćaju mali volumen promatranog područja tako da postoji problem dobivanja reprezentativnih uzoraka. Od iznimne važnosti je način vađenja i čuvanja uzoraka i period trajanja pokusa je vrlo često dug. Prednost je niska cijena pokusa i dobiveni rezultati mogu dobro opisati svojstva medija. Određivanje vodopropusnosti slojeva tla i stijena važno je kako bi se dovelo u vezu površinsko i podzemno prodiranje vode kroz tijelo zemljane brane, za određivanje količine podzemne vode koja se infiltrira u građevinski iskop, za procjeđivanje otpadne vode iz odlagališta opasnog otpada i drugih problema koji uključuju vodopropusnost.

Važno je razlikovati koeficijent propusnosti (k) i koeficijent hidrauličke vodljivosti (K). Dok koeficijent propusnosti ovisi samo o određenom tipu tla, hidraulička vodljivost ovisi i o svojstvima fluida. Općenito, za pojam vodopropusnosti važni su gustoća i viskoznost vode. Gustoća vrlo malo varira s promjenom temperature iznad određenog raspona (0 - 40˚C), ali viskoznost raste do 3 puta iznad tog raspona. Iako postoji razlika, naziv koeficijenta vodopropusnosti u smislu hidrauličke vodljivosti ipak se ponegdje može susresti, čak i u novijoj literaturi, naročito onoj koja je više okrenuta pitanjima mehanike tla. Hidraulička vodljivost određena je veličinom i oblikom pora, djelotvornošću međusobnih spojeva pora i fizičkim svojstvima fluida (gustoća, temperatura i viskoznost). Koeficijent hidrauličke vodljivosti matematički se može izraziti kao:

$$K = k \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \tag{5}$$

gdje je:

- K- koeficijent hidrauličke vodljivosti
- k-koeficijent vodopropusnosti
- μ- dinamička viskoznost
- ρ- gustoća fluida

- *g*- gravitacijsko ubrzanje

Hidraulička vodljivost može se opisati i kao količina vode (*Q*) koja prolazi kroz jedinicu poprečnog presjeka (*A*), poroznog medija u jedinici vremena (*t*) pri hidrauličkom gradijentu *i*=1 (100%) i pri zadanoj temperaturi. Hidraulički gradijent znači da potencijal pada za 1 stopu (0,9 m) na svaku jednu stopu (0,9 m) toka.
Iako je koeficijent hidrauličke vodljivosti promjenjiv hidrogeološki parametar, on se u praksi smatra konstantom materijala i fluida, uz pretpostavku da se u istraživanom prostoru radi o jednom fluidu (vodi) i o plićim vodonosnim slojevima gdje razlike temperature vode nisu velike.
Kako je već navedeno hidraulička vodljivost određena je veličinom i oblikom pora, djelotvornošću međusobnih spojeva pora i fizičkim svojstvima fluida. Ako su spojne cjevčice male, obujam vode koja prolazi iz jedne pore u drugu je ograničen, pa je i rezultirajuća hidraulička vodljivost niska. Ako se pak radi o krupnijem nanosnom materijalu, spojne su cjevčice dosta velike u odnosu na pore, pa je i hidraulička vodljivost visoka. Svojstva tečenja vode ovisna su i o temperaturi vode, pa je hidraulička vodljivost definirana na bazi viskoznosti i gustoće fluida pri određenoj temperaturi.
Radi jednostavnosti, *K* se može izraziti i u kubičnim metrima po danu kroz poprečni presjek od 1 kvadratnog metra, pri hidrauličkom gradijentu 1 i temperaturi od 15,6˚C. Vrijednost *K* obično varira u rasponu od 0,4 do 204 m^3/dan za prirodni vodonosni materijal, [6].

3.2 Koeficijent transmisivnosti (*T*)

Koeficijent transmisivnosti je hidrogeološki parametar koji opisuje propusnu moć vodonosne stijene. Ponekad je umjesto koeficijenta hidrauličke vodljivosti pogodnije značajke vodonosnog sloja izraziti preko koeficijenta transmisivnosti. Iako je koeficijent hidrauličke vodljivosti važna značajka vodonosnih stijena, ona ne opisuje relativne odnose propusnih moći vodonosnih horizonta. Ukoliko se istražuju dvije stijene različite propusnosti, a jednake debljine, kroz stijenu manje propusnosti protječe manje vode. Ukoliko je debljina stijene manje propusnosti znatno veća od debljine stijene veće propusnosti, kroz stijenu manje propusnosti može protjecati više vode.

Transmisivost znači tok vode u m^3/s kroz sekciju vodonosnika debljine 1 m pod jediničnim hidrauličkim gradijentom, a označava se simbolom *T*. Hidraulička vodljivost i transmisivnost imaju sljedeći međusobni odnos:

$$T = K \cdot m\left[m^2 / s, m^2 / dan, cm^2 / s \right] \tag{6}$$

gdje je:

- *K*- koeficijent hidrauličke vodljivosti
- *T*- koeficijent transmisivnosti
- *m*-debljina saturiranog dijela vodonosnika

Koncept transmisivnosti uveden je u hidrauliku poroznih sredina prvenstveno za potrebe hidraulike zdenaca u vodonosnicima pod tlakom. Kod dvodimenzionalnih problema i vodonosnicima pod tlakom transmisivnost ima svoj puni smisao, dok se u drugim aplikacijama u podzemlju njezin smisao gubi i potrebno je vratiti se osnovnim definicijama hidrauličke vodljivosti (*K*).

3.3 Koeficijent uskladištenja- storage (*S*)

Koeficijent uskladištenja definira se kao volumen vode koji može biti otpušten ili uskladišten po jediničnoj površini vodonosnika pri jediničnoj promjeni razine podzemne vode, a posljedica je kompresibilnost tekućine i deformacije porozne sredine uslijed promjene efektivnih naprezanja. To je bezdimenzijska veličina. Elastične karakteristike vodonosnika određene su koeficijentom uskladištenja (*S*).

Pojavu elastičnosti vodonosnog sloja uočio je Meinzer proučavajući Dakota pješčenjak. Volumen crpljene vode iz te formacije nije bio u skladu s volumenom vode koja se u tom pješčenjaku prirodno obnavljala. Objašnjenje se temelji na sljedećem: ukoliko postoji vodom saturirani porozni sloj omeđen nepropusnom krovinom i podinom, opterećen višeležećim naslagama, onda se ukupno vertikalno opterećenje (σ) može podijeliti na efektivno naprezanje (σ') i porno ili neutralno naprezanje (*P*). Efektivno naprezanje preuzimaju zrnca sloja, a neutralno naprezanje voda koja ispunjava stijene. Koeficijent uskladištenja odnosi se na ukupnu debljinu saturiranog vodonosnog

horizonta pa je on jednak umnošku specifične vrijednosti koeficijenta uskladištenja (S_s) i debljine horizonta (m):

$$S = S_s \cdot m \tag{7}$$

Specifični koeficijent uskladištenja definiran je kao količina vode koju će otpustiti jedinični volumen stijene kada se ukupna visina stupca vode (h) spusti za jedinicu.

$$S_s = \alpha \cdot \rho \cdot g + n \cdot \beta \cdot \rho \cdot g \tag{8}$$

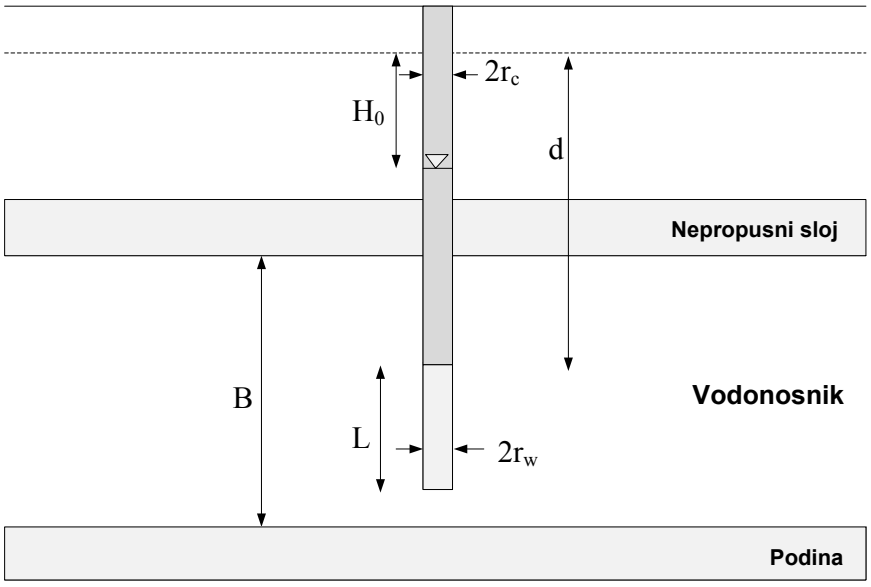
gdje je:

- α-stlačivost porozne sredine
- ρ-gustoća fluida (vode)
- g- ubrzanje sile teže
- n- poroznost
- β- stlačivost fluida

Koeficijent uskladištenja je u vodonosnom horizontu sa slobodnom razinom vode približno jednak specifičnom otpuštanju ili efektivnoj poroznosti (n_e).

4. Slug test

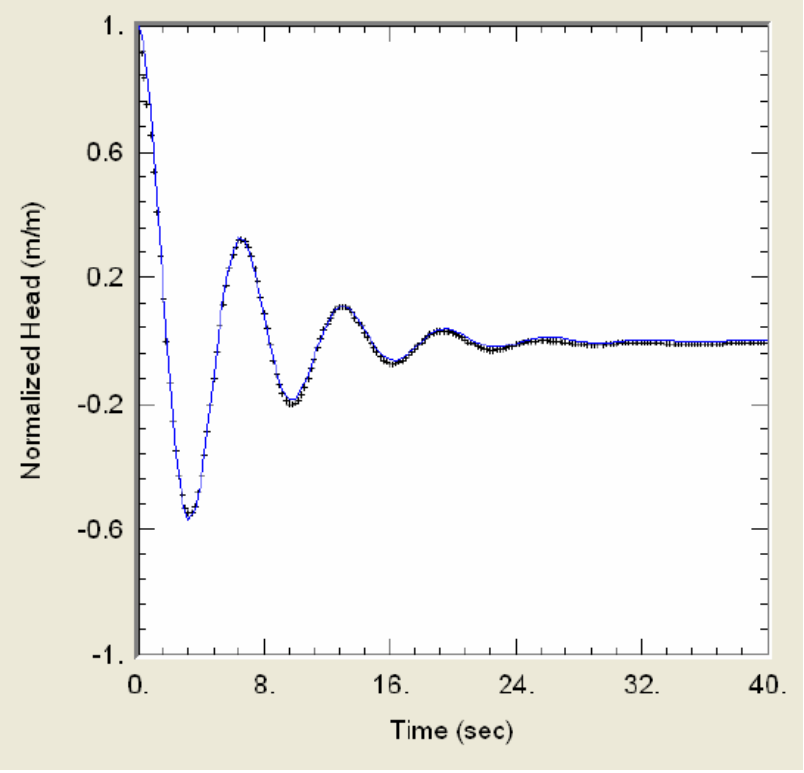
Sva istraživanja podzemnih voda, trebaju imati procjenu propusnosti podzemnih slojeva tla, što je i fokus istraživanja. U hidrogeologiji, propusnost medija tla karakterizirana je parametrom koji se naziva hidraulička vodljivost. Tijekom godina razvijen je velik broj eksperimentalnih tehnika za dobivanje procjene hidrauličke vodljivosti podzemnih slojeva tla. Te tehnike obuhvaćaju područje od parametara dobivenih laboratorijskim ispitivanjima (analiza veličine zrna tla), do parametara dobivenih testovima crpljenja koji mogu biti velikih razmjera. U posljednja dva desetljeća, terenska istraživanja za ocjenu hidrauličke vodljivosti tla na mjestu istraživanja („in situ“) poznata kao slug test su postala sve više popularna, osobito među znanstvenicima i inženjerima koji rade na područjima gdje je došlo do zagađenja vode koja je podvrgnuta ispitivanjima. Bez pretjerivanja može se reći da se doslovno svake godine u Sjedinjenim Američkim Državama izvodi deset tisuća slug testova. Unatoč velikoj upotrebi ovih tehnika u zaštiti okoliša, relativno malo se piše o praktičnim aspektima metodologije slug testa. U tehničkoj literaturi mogu se pronaći mnogi članci o teorijskim modelima za analizu podataka dobivenih slug testom, ali bez obzira na to relativno malo se objavljuje kako u praksi primijeniti tehnike slug testa. S obzirom na ekonomičnost i učestalost tehnike postoji jasna potreba za pisanjem teksta koji će inženjerima dati odgovore na pitanja o primjeni slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti.



Slika 4. Parametri potrebni za izračun hidrauličke vodljivosti kod slug testa, [7]

4.1 Što je zapravo slug test

Slug test je naoko jednostavan postupak u praksi. Ovaj test u suštini se sastoji od mjerenja oporavka visine stupca vode u pijezometru (bunaru) nakon gotovo trenutne promjene visine vode (u pojedinim situacijama je moguće primijeniti i promatranje približnih vrijednosti u obližnjem bunaru). Kod standardne konfiguracije tla, slug test započinje iznenadnom promjenom razine vode u bunaru. Navedeno je moguće obaviti, na primjer, brzim uranjanjem čvrstog objekta (otuda i termin 'slug', čvrsti objekt) ili dodavanjem ili uklanjanjem ekvivalentnog volumena vode iz bunara, pri čemu uvjetujemo brzu promjenu povećanja (ili smanjenja) razine vode u bunaru. Nakon nagle promjene, razina vode se u bunaru vrati na statičku poziciju. Primjer zabilježbe promjene razine vode tijekom slug testa prikazuje Slika 5. Ove promjene u visini vode, zabilježene tijekom vremenskog perioda, nazvani su povratni podaci i mogu se koristiti za procjenu hidrauličke vodljivosti formacije putem usporedbe sa teoretskim modelima na temelju dobivenih (povratnih) rezultata. U određenim uvjetima, slug test također je moguće primijeniti za procjenu mogućnosti ispitivane formacije da oslobodi ili uskladišti vodu. Ova sposobnost medija za pohranu vode u hidrogeologiji je karakterizirana putem parametra koji se naziva koeficijent uskladištenja, [8].



Slika 5. Promjena razine vode tijekom slug testa

Parametri dobiveni slug testom mogu se koristiti za različite svrhe. Na pojedinim lokacijama gdje se sumnja na onečišćenost podzemnih voda, moguće je koristiti testne procjene da bi se moglo predvidjeti potpovršinsko kretanje kontaminanta, i pomoću tih informacija omogućilo planiranje testova crpljenja na više lokacija bušotina (bunara). Na taj način dobiva se više informacija u svezi hidrauličkog ponašanja u tlu na velikim površinama, odnosno potpovršinskih jedinica od interesa. Prilikom istraživanja u svrhu vodoopskrbe, procjene dobivene putem slug testova se primarno koriste za oblikovanje testova crpljenja na velikim površinama, kao i za procjenu učinkovitosti kod planiranja bušotina i aktivnosti u promatranim bunarima (bušotinama). Kod primjene ove metode u potpovršinskim slojevima tla, koja su namijenjeni za poljoprivrednu proizvodnju, procijenjene parametre dobivene putem slug testa; moguće je koristiti za oblikovanje sustava drenaže na niskim tablama koje znaju biti pod vodom. Kod naftnih nalazišta kao i nalazišta ugljena i metana, parametri procijenjeni od provedenih slug testova su u bliskoj svezi sa provođenjem testova sa bušaćom udarnom šipkom (drillstem), a koji se primarno koriste za procjenu ekonomskog potencijala za potrebu eksploatacije određenih naftnih ili metanskih ležišta.

4.2 Prednosti slug testa

Slug test je postao vrlo učestalo primijenjena terenska tehnika, zbog znatnih logističkih i ekonomskih prednosti pred alternativnim pristupima. Prema sljedećem, najvažnije prednosti ove metode su:

1. Niska cijena – u smislu djelatne snage i korištene opreme, slug test je znatno jeftiniji nego alternativni pristupi. Program slug testova moguće je primijeniti putem jedne ili dvije osobe, korištenjem tlačne sonde, uređaja za prikupljanje podataka kao i manjeg broja pomoćne opreme. Kada se trošak opreme proširi na veliki broj testiranja, trošak po jednom provedenom testiranju je izuzetno nizak.
2. Jednostavnost rukovanja – kao što je i opisano u prethodnoj sekciji, provođenje slug testa vrlo je jednostavno. Ovaj test je moguće inicirati na različite načine, i zatim je potrebno izmjeriti promjene visine stupca vode tijekom zadanog vremenskog perioda. Osim mogućnosti za održavanje

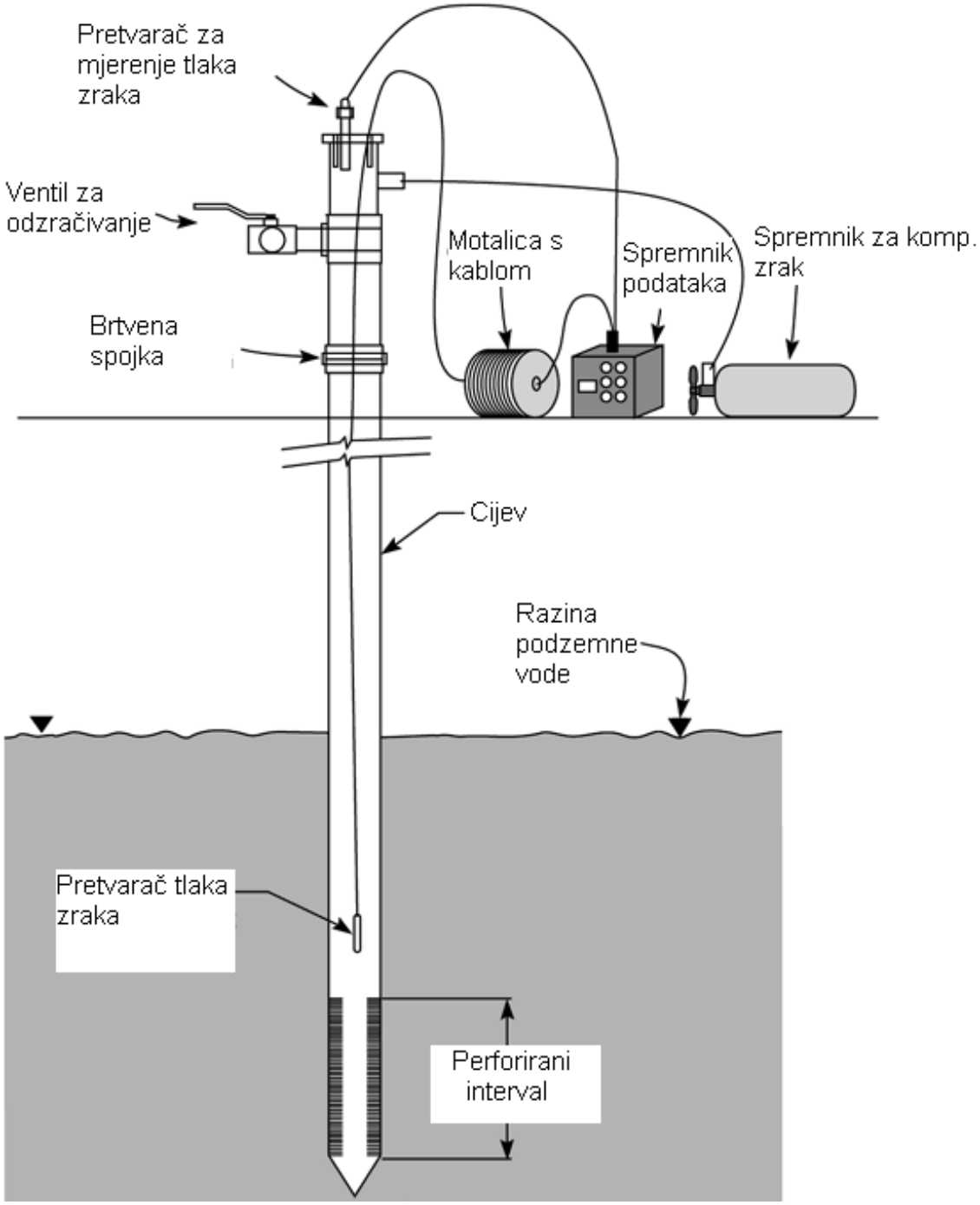
opreme čistom prije ispitivanja drugog bunara, zahtijevan je mali broj dodatne opreme tijekom provođenja terenskih ispitivanja.

3. Ova metoda je relativno brza – trajanje provođenja slug testa je prilično kratko u formacijama koje se mogu klasificirati kao vodonosnici. U manje vodljivim (permeabilnim) formacijama, moguće je trajanje testiranja relativno skratiti korištenjem prikladnog oblikovanja testa (npr. smanjivanjem učinka radijusa zaštitne kolone bunara /bušotine)
4. Ova metoda vrlo je korisna u vrlo zbijenim formacijama – slug test može biti jedna od najboljih opcija za dobivanje in situ karakteristika medija u formacijama sa niskom hidrauličkom vodljivošću. U zbijenim formacijama, možda neće biti praktično provesti test probnog crpljenja, zbog poteškoća prilikom održavanja vrlo niske razine stope pražnjenja. Iako se često provode testovi injektiranja u geotehničkoj industriji, logistika pristupa kao i potreba za uvođenjem vode u formaciju čini ovu tehniku manje privlačnom za potrebu njezine primjene u širem okolišu. Povijesno promatrano, laboratorijsko testiranje uzoraka jezgre je široko korištena metoda za dobivanje informacija o karakteristikama medija (formacije) slabe provodljivosti. Ipak, ova tehnika je postala manje uobičajenom tijekom posljednjih godina, zbog zabrinutosti što uzorci jezgre možda neće pružiti dovoljno informacija većeg opsega ispitivane formacije, kako bi utvrdili postojanje preferencijalnih putova tečenja, što može biti od velike važnosti za kretanje tekućine u takvom okruženju. Poteškoće prilikom dobivanja 'neporemećenog' (sastava) uzorka, kao i briga zbog mogućih razlika između vertikalnih i horizontalnih komponenti hidrauličke vodljivosti i dalje ograničavaju korištenje pristupa ispitivanjem sastava jezgre.
5. Nije potrebno naknadno rukovati vodom – vrlo važna prednost slug testiranja je upravo na lokacijama gdje se sumnja na postojanje zagađenja podzemnih voda; ovu tehniku je moguće konfigurirati, i praktički vodu nije potrebno niti ukloniti niti naknadno dodati u bunar tijekom testiranja. Navedeno je moguće postići iniciranjem testa dodatkom ili uklanjanjem čvrstog elementa iz stupca vode.
6. Ovim postupkom se pružaju informacije o prostornim odstupanjima hidrauličkih karakteristika – program slug testova moguće je organizirati tako da se dobiju informacije o odstupanjima vodopropusnosti i koeficijenta

uskladištenja u onom opsegu koji je relevantan za istraživanje transporta kontaminanta u tlu. Konvencionalni test crpljenja će omogućiti veliki opsega hidrauličkih karakteristika, koje će možda biti od ograničene primjene prilikom istraživanja tečenja vode u tlu. Provođenjem serije slug testova pri pažljivim vertikalnim intervalima unutar pojedinačnih bunara i/ili pojedinačnih testova u relativno blizu pozicioniranim bunarima, moguće je dobiti vrijedne informacije u svezi vertikalnih i horizontalnih odstupanja hidrauličkih karakteristika na lokaciji, [8].

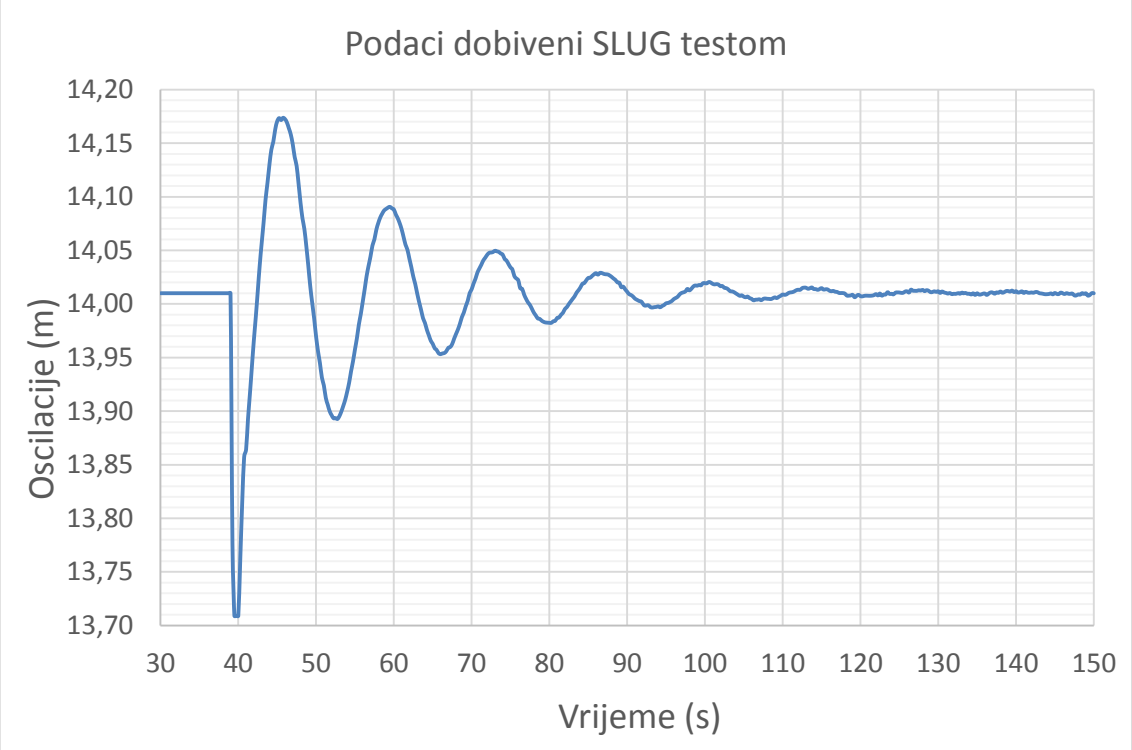
4.3 Općeniti pregled postupka analize

Bez obzira da li je ovaj slug test bio proveden u otvorenom ili zatvorenom vodonosniku, općeniti pristup prilikom obrade i analize podataka dobivenih testiranjem u visoko propusnoj geološkoj formaciji je bio jednak. Ovaj pristup sastoji se od četiri koraka koji su objašnjeni u nastavku teksta.



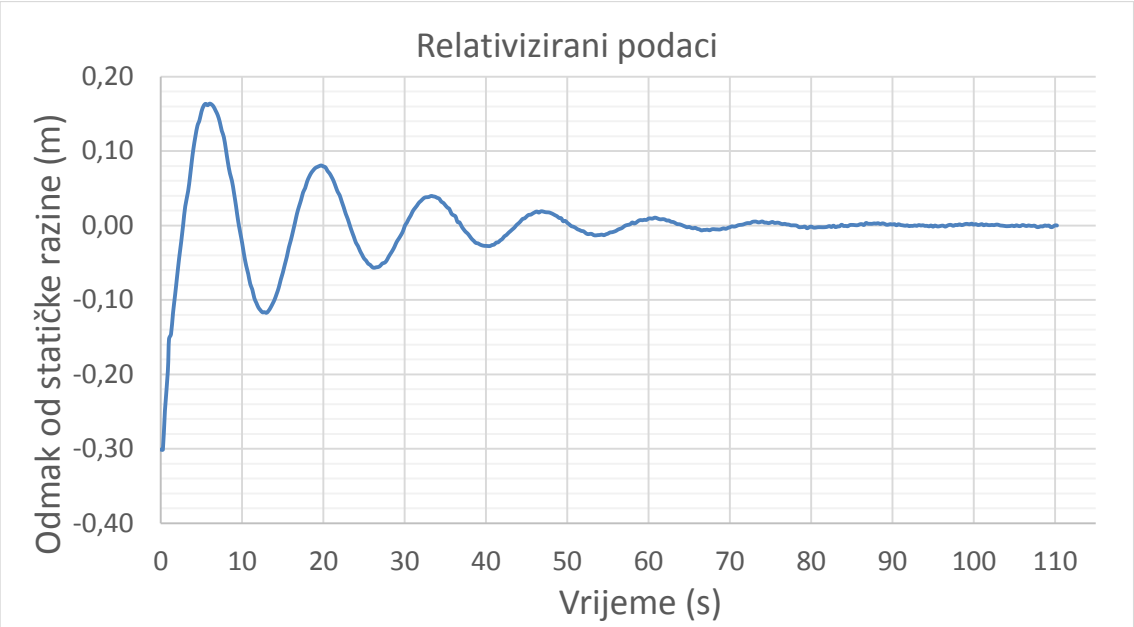
Slika 6. Shematski prikaz bunara pri čemu je primijenjena pneumatska metoda za inicijaciju slug testa, [6]

1. Podaci dobiveni ispitivanjem prevode se u oblik prikladan za analizu. Obrada podataka započinjem crtanjem očitanih podataka tlačnog transdjusera (tlačne sonde) nasuprot, početnog vremena od neke slobodno izabrane točke, (Slika 7.).



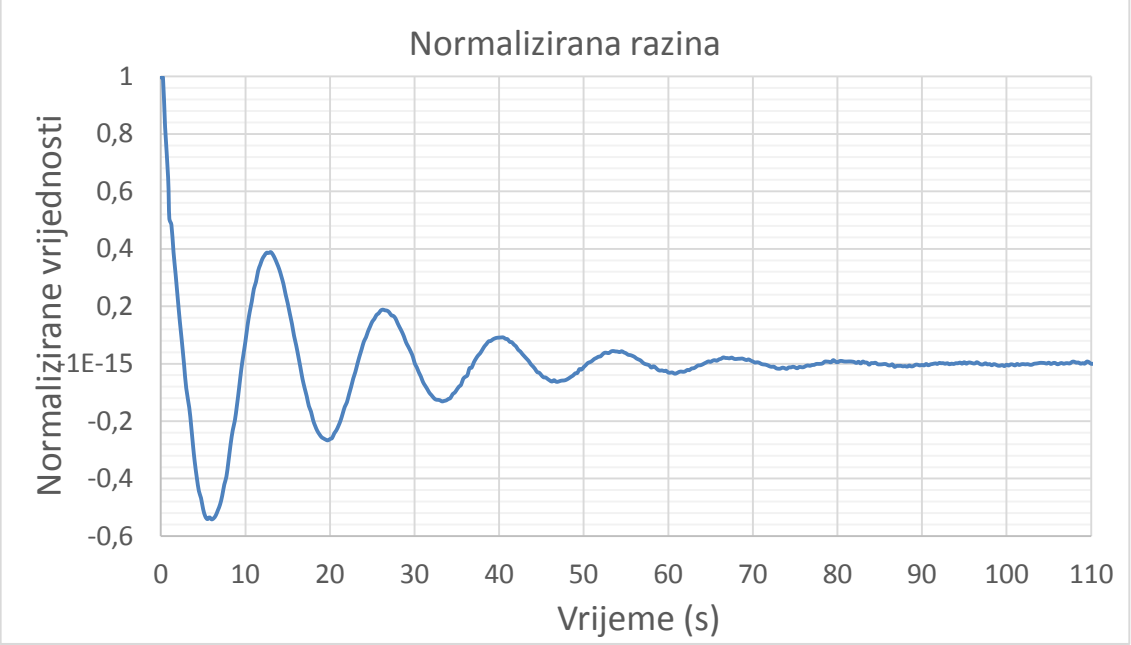
Slika 7. Primjer crteža oscilacije razine vode u pijezometru nasuprot vremena od slobodno određene vremenske točke

Vrijeme pri kojem testiranje započinje prilikom čega pijezometriski potencijal odgovara statičkim uvjetima se procjenjuje iz navedenog crteža. Statički pijezometriski potencijal i vrijeme početka testa se zatim oduzimaju od potencijala i vremenskih zapisa, kako bi se dobio dijagram devijacije pijezometriskog potencijala od statičkih uvjeta (H(t)) nasuprot proteklog vremena od početka testiranja, (Slika 8.).



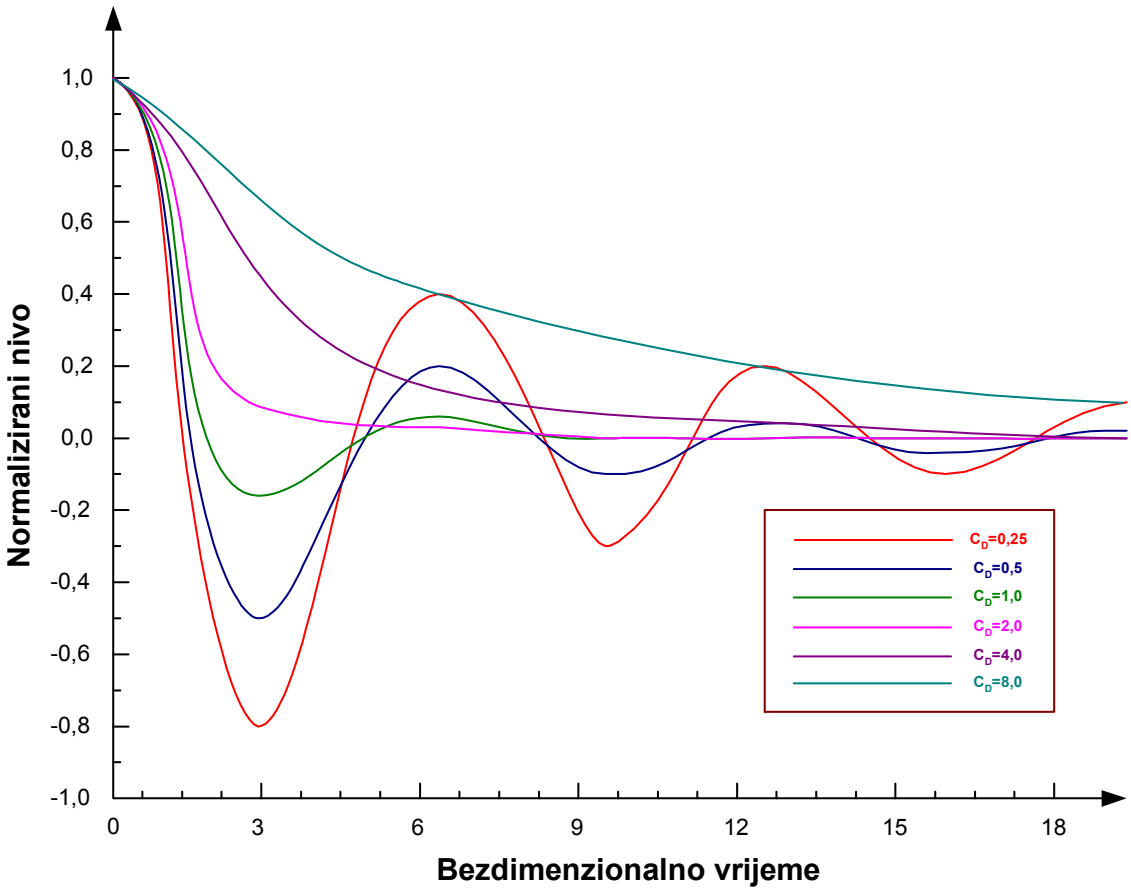
Slika 8. Primjer crteža devijacije (odmaka) od statičke razine nasuprot vremena od početka provođenja testa

Dobiveni podaci devijacije dijele se sa promjenom razine vode putem koje se iniciralo (započelo) testiranje, kako bi se dobio normalizirani potencijal koji je zahtijevan za analizu.



Slika 9. Primjer crteža krivulje normalizirane vrijednosti nasuprot vremena od početka provođenja testa

2. Priprema grafikona teoretskog tipa krivulja. Ovi tipovi krivulja su formirani kao crteži dobiveni od vrijednosti normalizirane devijacije razine vode pri statičkim uvjetima nasuprot nemjerljivog perioda vremena, (Slika 10.)



Slika 10. Tipske krivulje

Isti skup krivulja koristi se za analizu rezultata testiranja u otvorenim i zatvorenim vodonosnicima. Ovdje primijenjeni tipovi krivulja su izvedeni iz metode prigušenja, područja klasične fizike:

$$w_d(t_d) = e^{-\frac{C_D}{2}\cdot t_d} \cdot \left[\cos(\omega_d \cdot t_d) + \frac{C_D}{2\omega_d} \sin(\omega_d \cdot t_d) \right], \ldots\ldots C_D < 2 \qquad (9)$$

$$w_d(t_d) = e^{-t_d}(1 + t_d), \ldots\ldots C_D = 2 \qquad (10)$$

$$w_d(t_d) = -\left(\frac{1}{\omega_d^+ - \omega_d^-}\right)\cdot\left[\omega_d^- \cdot e^{\omega_d^+ \cdot t_d} - \omega_d^+ \cdot e^{\omega_d^- \cdot t_d}\right], ...C_D > 2 \qquad (11)$$

gdje je:

- C_D = bezdimenzijski parametar prigušenja.
- g = ubrzanje izazvano gravitacijskom silom
- H_0 = promjena razine vode koju je inicirao slug test (inicijalni pomak);
- L_c = efektivna dužina vodnog stupca u pijezometru;
- t_d = bezdimenzijski vremenski parametar; $\sqrt{\frac{g}{L_e}\cdot t}$;
- t = vrijeme.
- w = devijacija razine vode od statičke razine u bunaru/pijezometru
- w_d = normalizirana devijacija razine vode $\left(w/H_0\right)$;
- ω_d = bezdimenzijski frekvencijski parametar $\sqrt{\left|1-\left(\frac{C_D}{2}\right)^2\right|}$

$$\omega_d^{\pm} = -\frac{C_D}{2} \pm \omega_d \qquad (12)$$

3. C_D tip krivulja koji se preklapa na crtežu dobivenih testnih podataka. Bezdimenzijsko vrijeme na osi širi se ili sužuje, sve dok se ne ostvari razumno preklapanje između krivulje za određeni C_D i krivulje testnih podataka. Zatim se određuju vremenski usklađene točke očitavanjem korespondirajuće vrijednosti od stvarnog vremena (t*) i bezdimenzijskog vremena (t_d*) na osi. Treba obratiti pažnju na to da je gotovo moguće ostvariti cjelovito preklapanje, iz razloga jer se putem C_D vrijednosti kontrolira oblik krivulje odziva (stupanj oscilacijskog ponašanja krivulje), dok se putem t_d vrijednosti kontrolira trajanje perioda (mjerenja). Različiti korisnici mogu dobiti različite ručno izrađene, preklapajuće krivulje, međutim i ovdje razlike mogu biti vrlo male zbog usklađenosti sa varijacijama u t_d i C_D, [9].

4. Hidraulička vodljivost procjenjuje se putem usklađivanja tipova krivulja. Radijalna hidraulička vodljivost (K_r) procjenjuje se supstitucijom vrijednosti za dobro ugođene parametre, C_D i omjera vremenske usklađenosti (t_d^* / t^*), unesenim u jednadžbu koja je prikladna za testne uvjete:

Za otvorene vodonosne slojeve – visoka K_r vrijednost u skladu je sa modelom prema Bouweru i Riceu:

$$K_r = \frac{t_d^*}{t^*} \cdot \frac{r_c^2 \cdot \ln\left[\frac{R_c}{r_w}\right]}{2 \cdot b \cdot C_D} \tag{13}$$

Za zatvorene vodonosne slojeve vrijednost je u skladu s modelom prema Hvorslevu:

$$K_r = \frac{t_d^*}{t^*} \cdot \frac{r_c^2 \cdot \ln\left[\frac{b}{2 \cdot r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2 \cdot r_w}\right)^2}\right]}{2 \cdot b \cdot C_D} - \tag{14}$$

gdje je:

- b = dužina perforiranog dijela (filtra);
- r_c = efektivni radijus pijezometra (ispravljen za radijus kabla sonde);
- r_w = radijus perforiranog dijela pijezometra ili bušotine kod izotropnih vodonosnika; za anizotropne vodonosnike, r_w je potrebno zamijeniti sa $r_w \sqrt{K_Z / K_r}$, gdje je K_Z vertikalna hidraulička vodljivost, [10]

5. Primjer terenske primjene slug testa na lokaciji crpilišta „Varaždin“

Crpilište "Varaždin" prvo je od izvorišta vodoopskrbnoga sustava Varaždin. Do sada je na crpilištu "Varaždin" izvedeno ukupno 10 zdenaca dubine oko 20 do 40 m. Prvi zdenac na crpilištu Varaždin izveden je kao kopani zdenac, a njegova izvedba povezana je s izgradnjom gradskog vodovoda tijekom 1955. godine. Projektom su definirane prosječne potrebe vodoopskrbe od 117 l/s, te je očekivano da bi se one osigurale izvedenim kopanim zdencem. Izdašnost načinjenog kopanog zdenca je već početkom pogona bila znatno manja od planiranoga iznosa, a nakon 2-3 godine pogona izdašnost zdenca opala je na oko 20-30 l/s. Zbog toga su tijekom 1965. godine izvedena dva bušena zdenca (B-1 i B-2) dubine 21 m. Promjer bušenja iznosio je 1000 mm, a zacjevljenje 600 mm. Ovi zdenci spojeni su sustavom teglica s kopanim zdencem, pa je kopani zdenac poprimio ulogu eksploatacijsko-sabirnog objekta. Ovakvim zahvatom izdašnost crpilišta povećana je na oko 80 l/s, što je zadovoljavalo potrebe za idućih 4-5 godina uz neke rekonstrukcije zahvata. Zdenci B-3, B-4 i B-5 izvedeni su tijekom 1970. godine. Dubina zdenaca iznosi 37 do 38 m, promjer bušenja 1200 do 1500 mm, a promjer zacjevljenja 600 do 800 mm. Pojedinačna izdašnost zdenaca iznosila je oko 100 l/s, a kod paralelnog rada svih instaliranih crpki izdašnost crpilišta povećana je na 400 l/s.

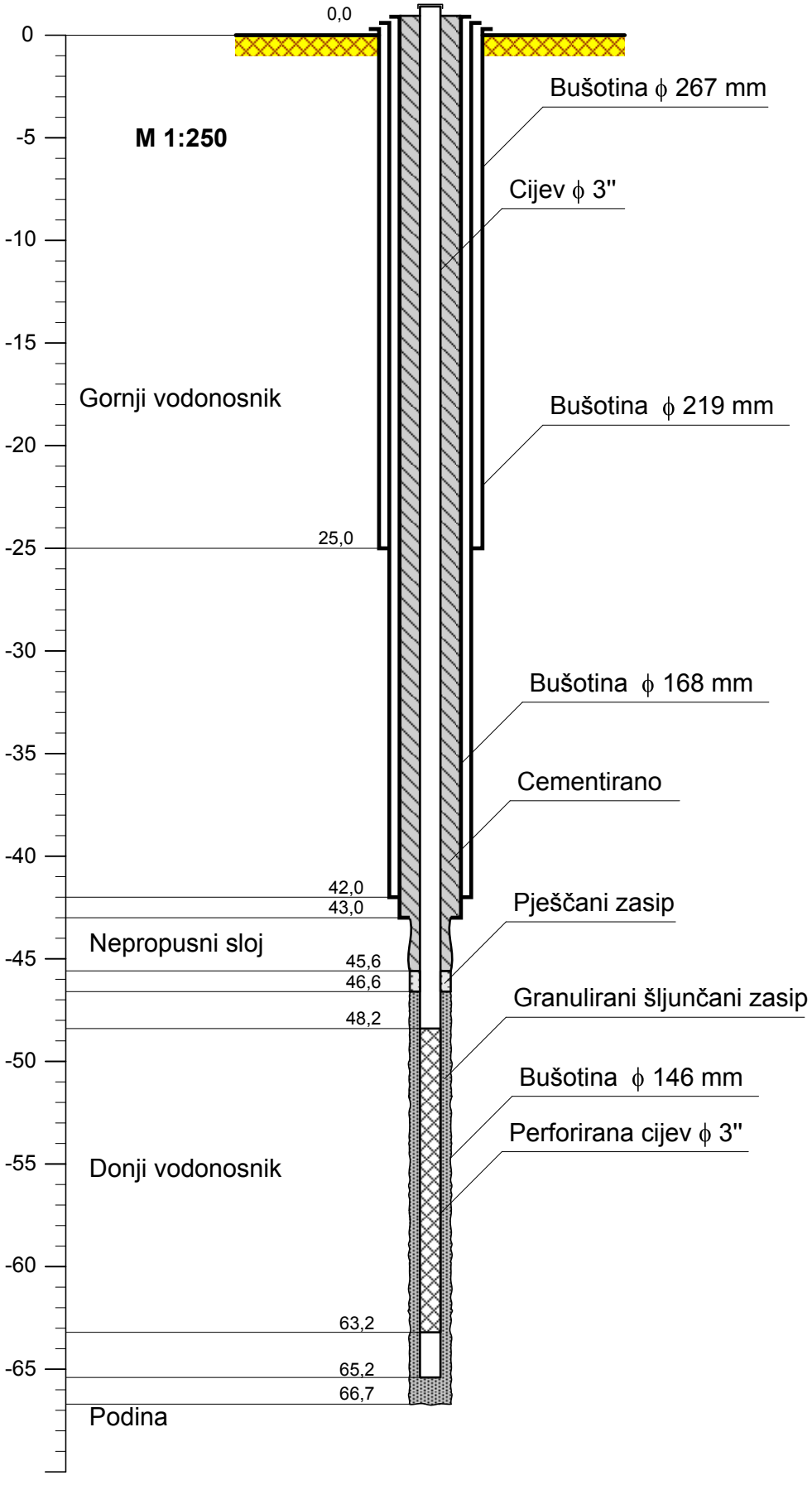
Zadnje proširenje crpilišta Varaždin provedeno je 1977. i 1978. godine kada je izvedeno 5 novih zdenaca (B-6, B-7, B-8, B-9 i B-10). Svi ovi zdenci su dubine oko 38 m, bušeni su promjera 1500 mm (do 20 m dubine) i 1300 mm (do dna bušotine), a zacjevljeni su čeličnim cijevima i mostičavim sitima promjera 800 mm. Procijenjeno je da je izvedbom ovih zdenaca moguća eksploatacijska izdašnost crpilišta povećana na 1000 l/s.

Zdenac Z-1 na crpilištu "Varaždin", koji je zahvatio podzemne vode iz donjega vodonosnog sloja, načinjen je s ciljem izvedbe pokusno-eksploatacijskoga zdenca kojim bi se osigurale određene količine podzemne vode koje bi zadovoljavale kriterije pitke vode i time bi se poboljšala situacija u vodoopskrbnom sustavu, [11].

5.1 Izvedba pijezometra PDS-1

Radovi na izvedbi pijezometarske bušotine započeli su 05. 04. 2001. godine. Proces izrade pijezometra može se podijeliti u nekoliko faza. Prva faza izvedena je do dubine 25 m i to suhom – rotacijskom metodom sa direktnim oblaganjem zaštitne kolone (laviranjem) kako bi se spriječilo urušavanje naslaga koje su pretežno šljunkovito – pjeskovite. Druga faza počinje na dubini 25 m i traje do nailaska na podinu prvog vodonosnog sloja, odnosno 42,20 m. Učinjena je cementacija kako bi se osigurala nepropusnost između slojeva. Naredna faza uključuje bušenje do podine drugog vodonosnog sloja koji je na dubini 66 m. Pijezometar je podijeljen u tri dijela. Donji dio je taložnik ukupne visine 2 m, iznad njega se nalazi filtarski dio u duljini 15 m, a ostali dio je puna pocinčana cijev unutarnjeg promjera 3" (ϕ=3 cola).

Filtarski dio je perforirana pocinčana cijev promjera 3" sa rupama 4 mm, propusnosti oko 8%. Kako postoji mogućnost ulaska čestica kroz perforacije potrebno je dodatno osigurati propusnost samo za vodu stoga je filtarski dio dva puta omotan plastičnom milimetarskom mrežicom. Filtarski dio cijelom dužinom je u drugom vodonosnom sloju. Filtarski šljunčani zasip veličine zrna granulacije od 1 do 4 mm. Pijezometar PDS-1 nalazi se 30,83 m udaljen od zdenca Z-1. Naime, hidraulički utjecaj rada okolnih zdenaca, koji zahvaćaju gornji sloj, zanemariv je na pijezometar PDS-1 i zdenac Z-1 koji zahvaćaju donji sloj. Konačno položaj pijezometra PDS-1 omogućuje povoljne uvjete za identifikaciju parametara vodonosnog sloja, a položaj zdenca prikladan je za olakšano uključivanje u vodoopskrbni sustav, (Slika 11.), [12].



Slika 11. Tehnički profil pijezometra PDS-1

5.2 Izvedba eksploatacijskog zdenca Z-1

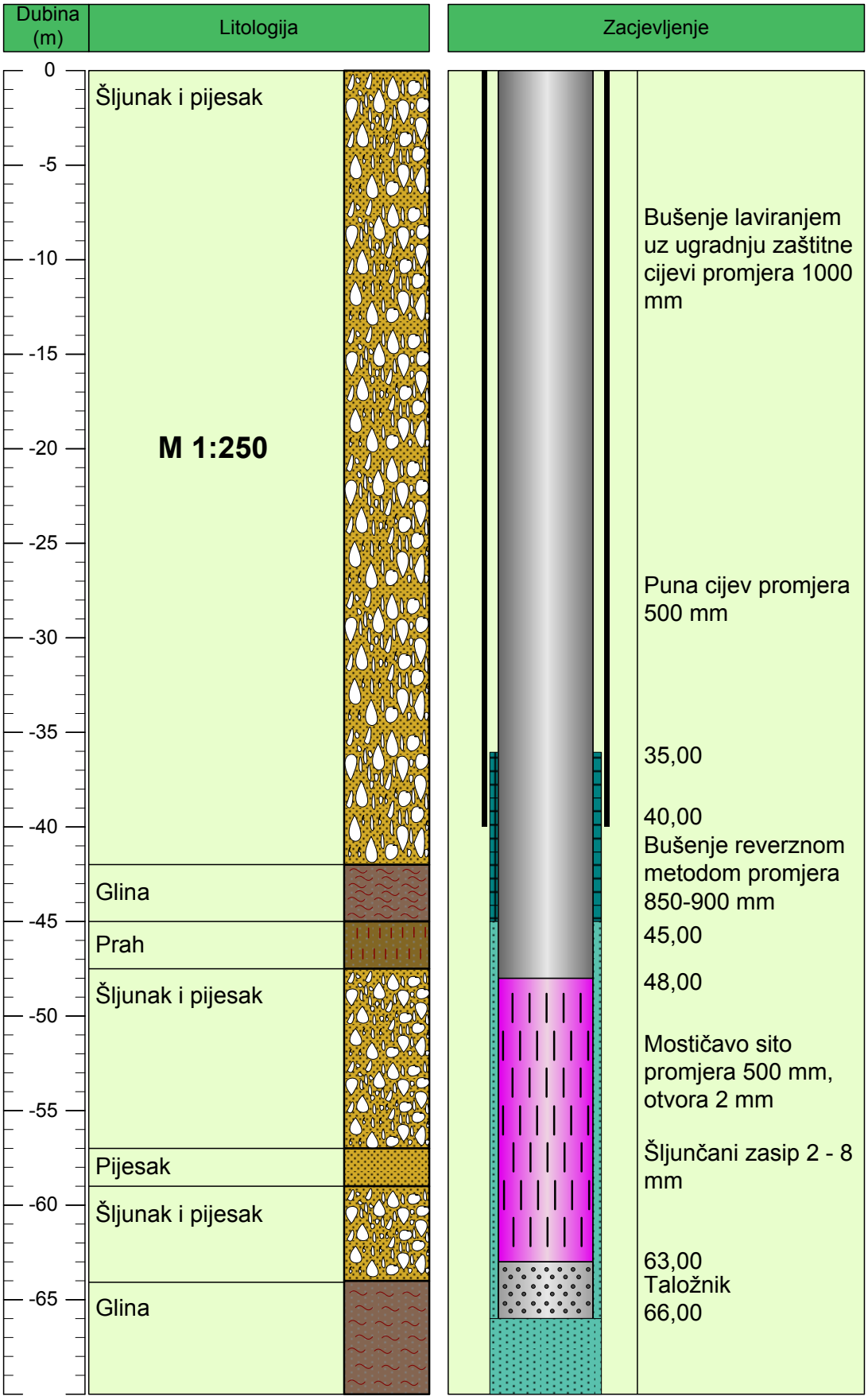
Radovi na izvedbi, osvajanju i pokusnom crpljenju zdenca započeti su 21. ožujka 2002., a završeni su 8. travnja 2002.

Ugrađena je slijedeća konstrukcija po dubinskim intervalima:

- +0,5 - 48,0 m pune čelične cijevi promjera 500 mm
- 48,0 - 63,0 m sito mostičavo Paparelli otvora 2 mm promjera 500 mm
- 63,0 - 67,0 m taložnik, pune čelične cijevi promjera 500 mm.

Ugrađena su mostičava sita tipa Paparelli, promjera 500 mm s otvorima širine 2 mm, propusnosti oko 15%.
Odmah nakon polaganja zacjevljenja započelo je zasipanje šljunkom. Nakon završetka šljunčenja, provedena je izolacija donjega sloja polaganjem tampona u prstenasti prostor zdenačke bušotine u pojasu polupropusnoga međusloja. Tampon je formiran ubacivanjem loptica priručne gline umiješane s bentonitom, [13].

Konstrukcija zdenca omogućava zahvaćanje vode iz donjeg vodonosnog sloja, a glineno-bentonitni čep sprječava međusobnu interakciju dvaju vodonosnih slojeva. Na slici 12. prikazan je profil zdenca "Z-1", te litološki profil po dubini.



Slika 12. Profil zdenca Z-1 i litološki profil zdenca

5.3 Oprema potrebna za izvođenje Slug testa

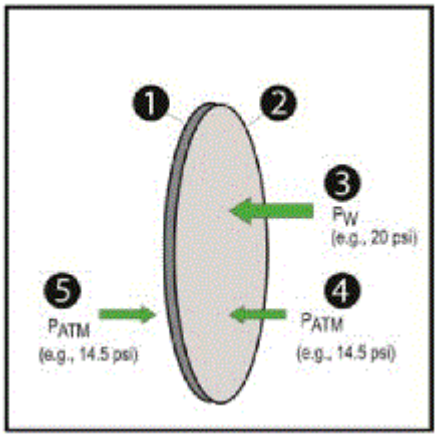
Oprema za mjerenje sastojala se od:

1. Sonde modela „Level TROLL 700“ – daje podatke o podzemnoj vodi visoke rezolucije, proširene memorije i naprednog zapisivanja načinjena je za posebne aplikacije. Dizajnirana je posebno za karakterizaciju vodonosnika, te omogućuje kontinuirano praćenje razine vode, tlaka i temperature vode. Titanska građa omogućuje dugotrajna radna svojstva u svježoj, slanoj pa čak i onečišćenoj podzemnoj vodi, s baterijom niske potrošnje koja traje 10 i više godina.



Slika 13. Sonda modela „Level TROLL 700“

2. Poliuretanskog Vented Twist-Lock kabela za brzu i pouzdanu vezu s instrumentom (sondom) - vented senzor tlaka eliminira učinke atmosferskog tlaka jer otvor cijevi u kablu omogućava primjenu atmosferskog tlaka na stražnjoj strani senzora, (Slika 14.)



Slika 14. Atmosferski tlak na prednjoj i stražnjoj strani senzora (vented)

Kod „vented“ kabla, (Slika 15.), treba paziti na polumjer savijanja kako se ne bi ometala unutarnja prohodnost poliuretanske cjevčice. Preporučeni polumjer savijanja kabla je 13,5 mm što je dvostruko više od promjera kabla.



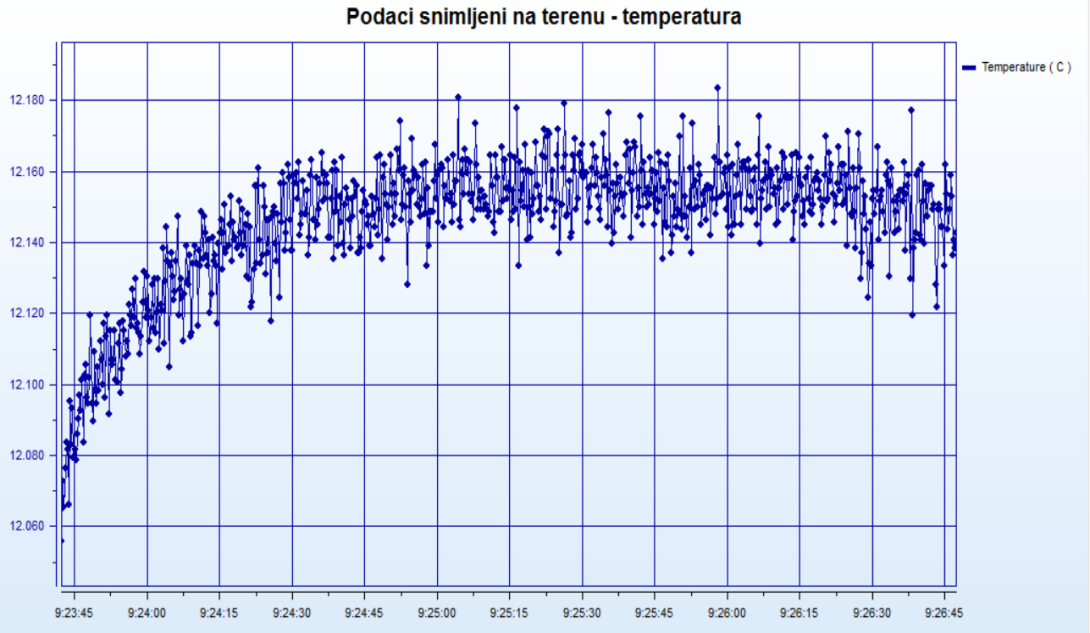
Slika 15. Poliuretanski Twist-Lock kabela

3. Komunikacijski kablovi – pružaju vezu između instrumenta i računala/laptopa za kalibraciju i programiranje instrumenta, te za profiliranje i preuzimanje podataka. Kabel je vodootporan i podnosi privremeno uranjanje u vodu, (Slika 16.).



Slika 16. Komunikacijski kablovi

4. Računalo sa instaliranim Win-Situ 5 softverom - softver omogućuje izravno čitanje i profiliranje podataka, dugotrajno bilježenje podataka, preuzimanje podataka, pregledavanje podataka, izvoz podataka u proračunske tablice programa te služi za odabir jedinica, prikaz opcija i praćenje korištenja baterije / memorije. Win-situ 5 Plus omogućuje konfiguraciju mreže i telemetrije.



Slika 17. Win-Situ 5 softver (podatci o temperaturi vode dobiveni terenskim ispitivanjem na lokaciji crpilišta „Varaždin“ 31.5.2016.)

5. Slug promjera 45 mm, dužine 852 mm, zapremine *Vs*=1,36 l. Izgled i dimenzije slaga vidljive su sa slike 18.



Slika 18. Slug

5.4 Izvođenje slug testa na terenu

Mjerna sonda (Level TROLL 700) spuštena je u pijezometar PDS-1 do dubine od 14,01 m ispod razine vode u pijezometru.



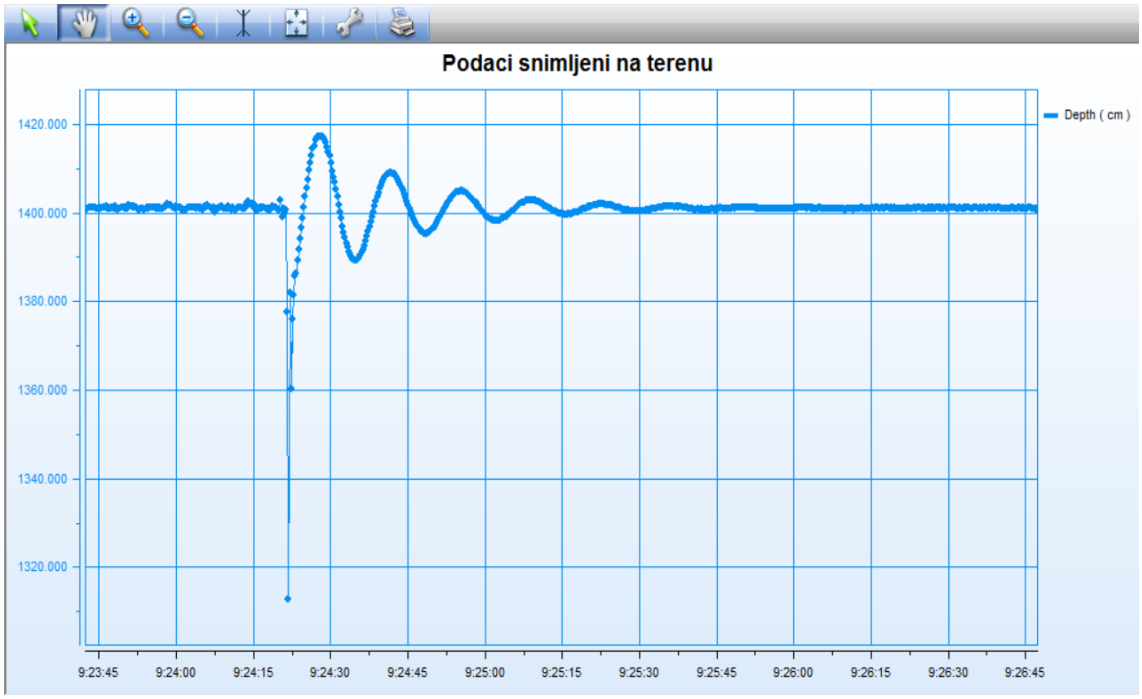
Slika 19. Spuštanje sonde u pijezometar

Slug test proveden je naglim izvlačenjem slug objekta, (Slika 20.), te je zabilježeno osciliranje nivoa vode u pijezometru.



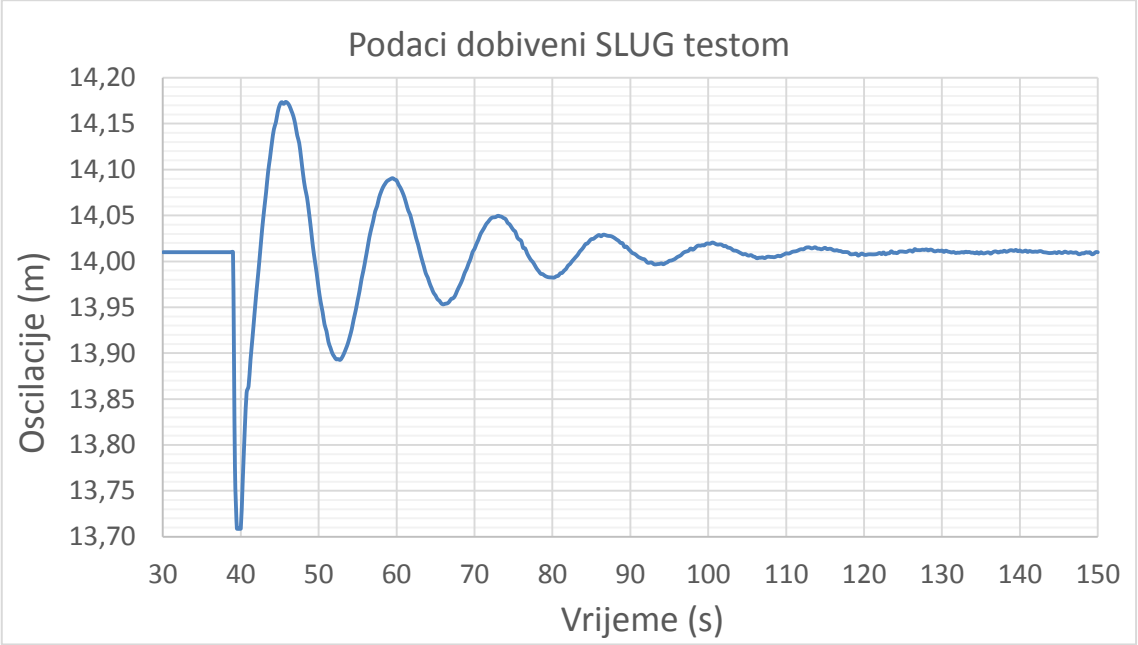
Slika 20. Izvlačenje slug šipke

Sonda je bilježila izmjerene vrijednosti svakih 250 ms (milisekundi) u određenom vremenskom periodu; dok se razina vode nije vratila u inicijalno stanje (što je vidljivo sa slike 21.).



Slika 21. Zapis mjernih vrijednosti u softveru Win-Situ 5 na lokaciji crpilišta „Varaždin“ (ispitivanje je izvedeno 31.5.2016.)

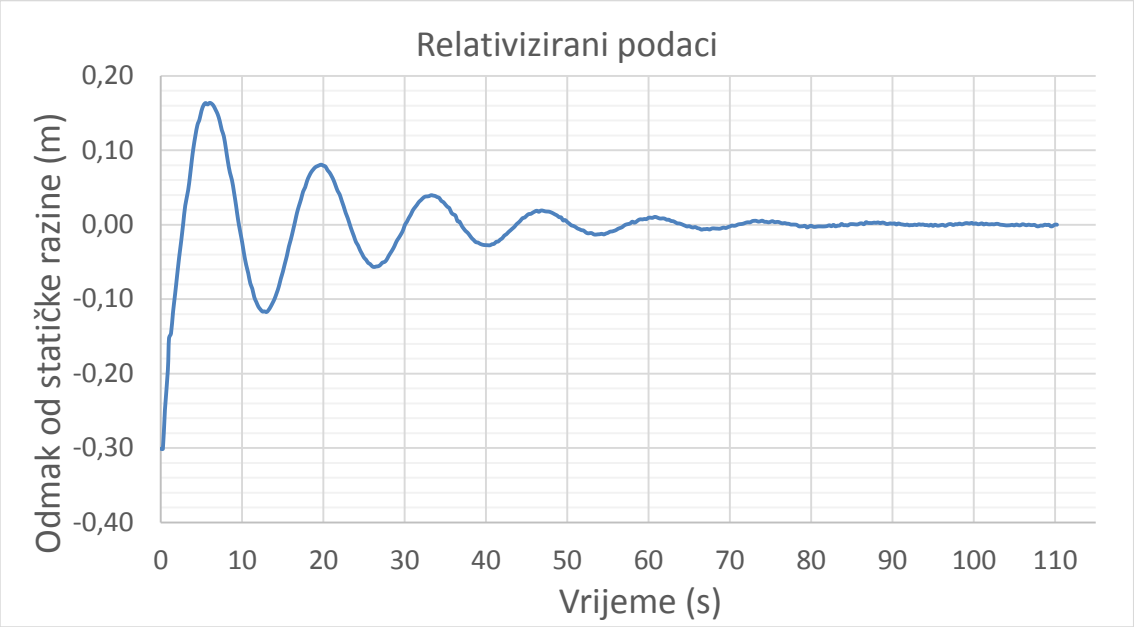
5.5 Aplikacija proračuna u MS Excelu



Slika 22. Podaci zabilježeni sondom Level TROLL 700

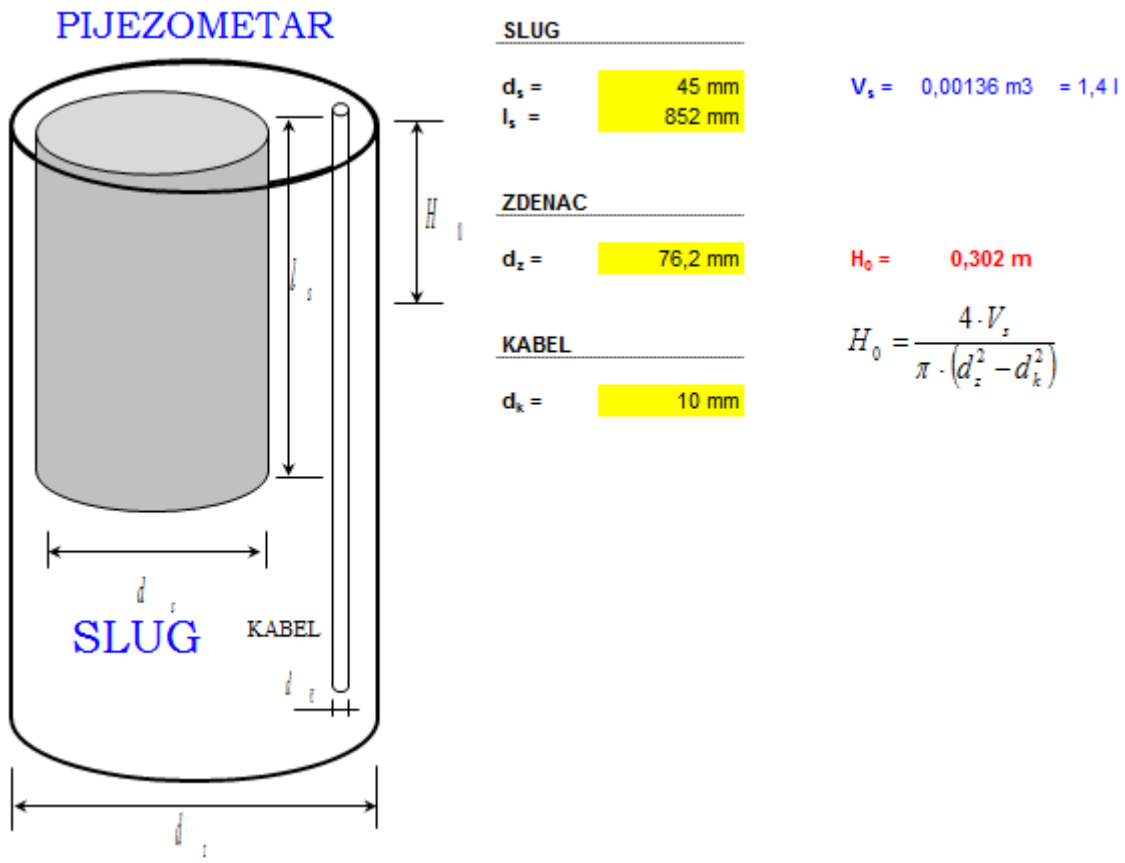
Očitane vrijednosti sa senzora koji mjeri hidrostatski tlak vodnog stupca u pijezometru, ucrtaju se u vremenski dijagram počevši od nekog dogovorenog vremena. Iz tog dijagrama odredi se vrijeme početka testa i statička razina vode u pijezometru. Dijagram sa mjerenim vrijednostima prikazan je na slici 22.

Sljedeće je potrebno iz dijagrama na slici 22. kolebanje razine vode prikazati kao odstupanje od nultog položaja (statičke razine), odnosno početak testa označiti kao nulto vrijeme, t=0, (Slika 23.). To se postiže oduzimanjem statičkog vremenskog potencijala od ostalih izmjerenih vrijednosti potencijala.



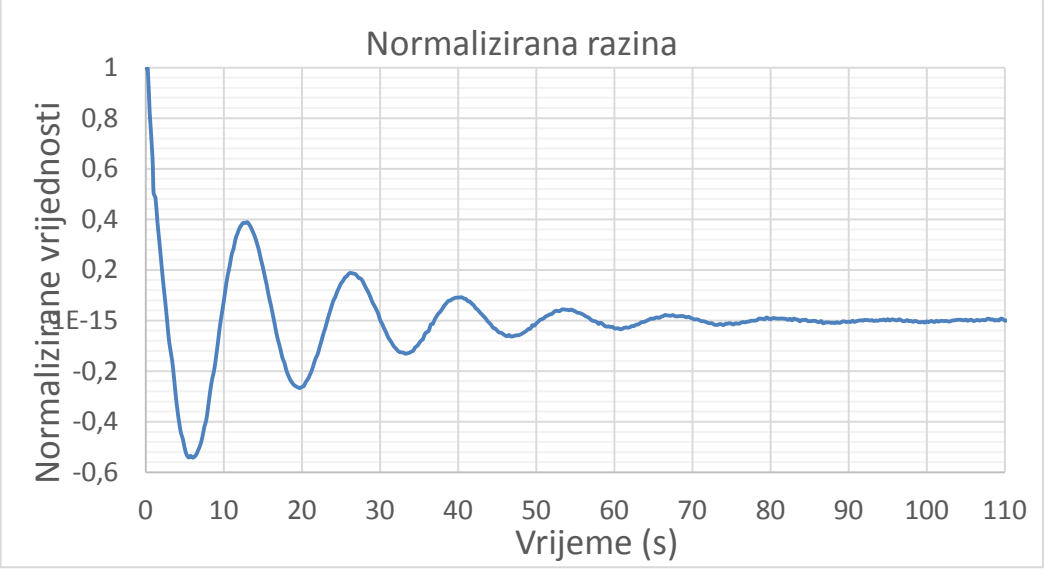
Slika 23. Relativizirani podaci

Kako je to čest slučaj u slug analizama i ovdje je potrebno pomak od nultog položaja normalizirati za vrijednost inicijalnog pomaka prouzročenog izvlačenjem sluga iz pijezometra. Prema proračunu sa slike 24. inicijalni pomak je H_0=0,302 m.



Slika 24. Proračun inicijalnog pomaka razine vode H_0 u pijezometru uzrokovanog izvlačenjem sluga (Excel)

Dobiveni relativizirani podaci dijele se sa inicijalnim pomakom (H_0) koji je uzrokovan izvlačenjem sluga, kako bi se dobio normalizirani potencijal koji je zahtijevan za analizu.



Slika 25. Normalizirane vrijednosti za iznos inicijalnog odmaka H_0=0,302 m

5.5.1 Primjena proračunskih tablica

Radi automatizacije proračuna i brzine izvođenja izrađen je obrazac u programu Microsoft Excel koji zadovoljava potrebe proračuna. Procedura nije u potpunost automatizirana jer je potrebno ručno mijenjanje parametara C_D i faktora modulacije tipskih krivulja dok se vizualno ne poklopi sa krivuljom mjerenih podataka. Na slici 26. prikazan je dio proračunske tablice „Slug test u formacijama visokih K vrijednosti“. Vrijednost C_D, za koju se crta tipizirana krivulja, unosi se u polje B12. Zatim se računaju teoretski, normalizirani odgovori u stupcu H korištenjem prikladne jednadžbe (jednadžbe od broja 1 do 3., u ovisnosti o C_D vrijednostima).

Spreadsheets and Charts
prepared by
E. Garnett and J. Butler for
Butler, J.J., Jr., and E.J. Garnett, 2000, Simple procedures for analysis of slug tests in formations of high hydrau ic conductivity using spreadsheet and scientific graphics software, Kansas Geological Survey Open-File Rept. 2000-40, Lawrence, Ks.

Type Curve Generator Spreadsheet

C_D	omega	omega+	omega-
0,27	0,9908	0,8558	-1,1258

Označava parametar s kojim se može podešavati usklađenost krivulja

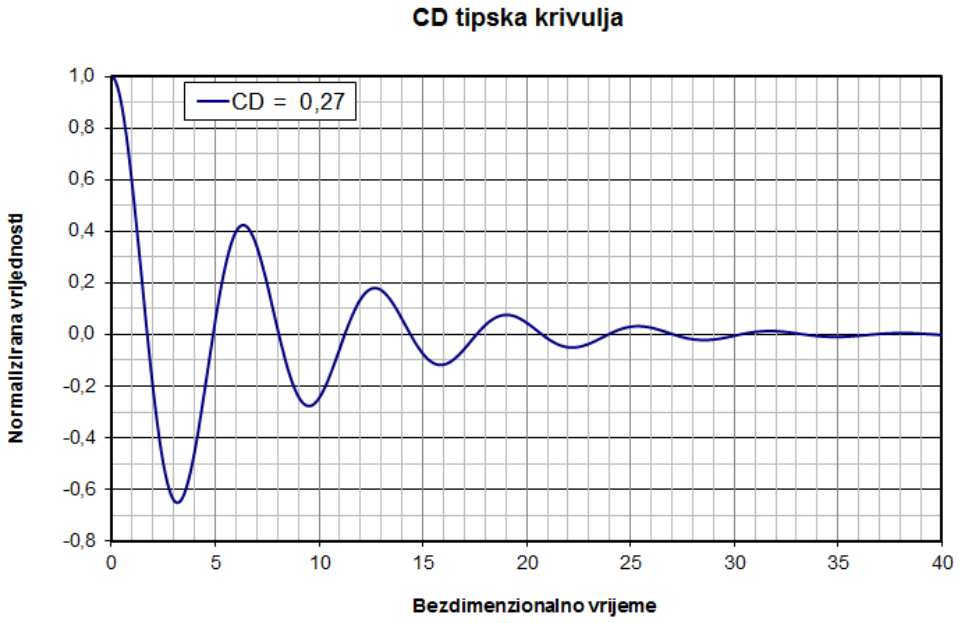
Označava unesene podatke slug testa i pijezometra

Označava izračunatu procjenu hidrauličke vodljivosti

Dimensionless Time	C_D = 0,27
0	1,0000
0,1	0,9950
0,2	0,9804
0,3	0,9565
0,4	0,9238
0,5	0,8829
0,6	0,8343
0,7	0,7789
0,8	0,7172
0,9	0,6501
1	0,5784
1,1	0,5028
1,2	0,4244
1,3	0,3438
1,4	0,2620
1,5	0,1798

Slika 26. Generator tipske krivulje

Automatski se izrađuje nacrt dimenzionirane C_D tipske krivulje nasuprot teoretskog bezdimenzionalnog vremena, kao grafikon br. 1., (Slika 27.).

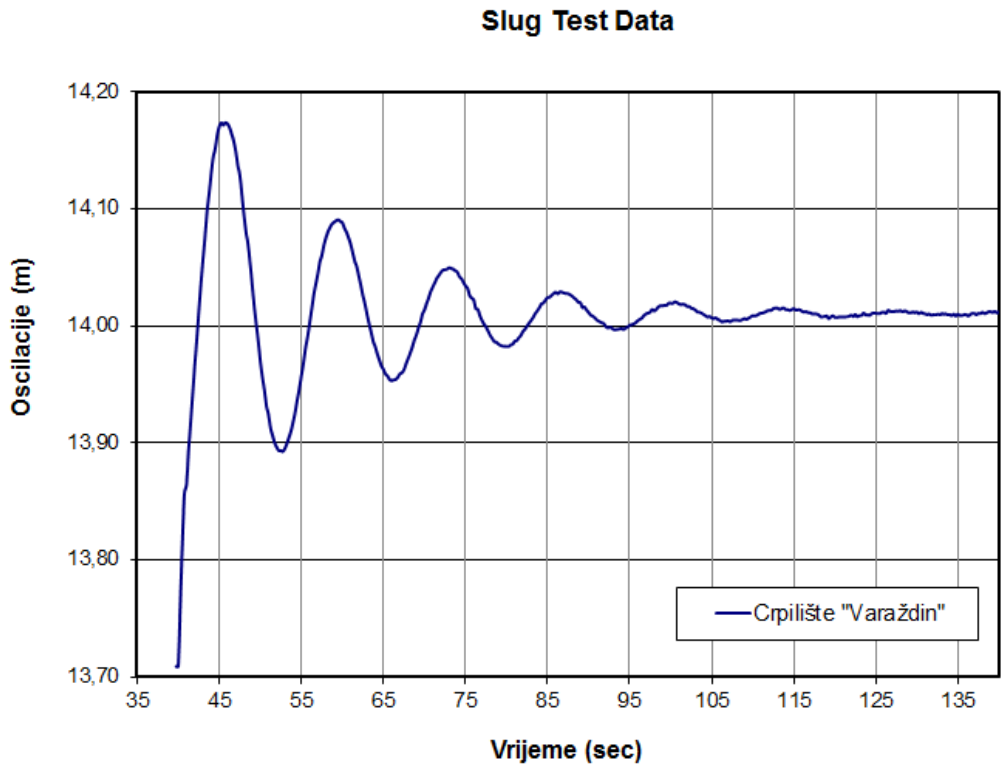


Slika 27. C_D tipska krivulja (grafikon br. 1)

Slika 28. pregledni je prikaz proračunskih tablica „Slug test u formacijama visokih K vrijednosti“. Podaci o vremenu i kolebanju razine zatim se unose u stupce C i D te se automatski crta grafikon br. 2., (Slika 29.)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	**DIPLOMSKI RAD**				**Podaci o pijezometru - "d" se ne koristi u zatvorenom vodonosniku**						
2					Dubina do dna filtra (od vrha pijezometra)				63,2	m	
3					Duljina filtra (b)				15,000	m	
4	**Osnovni podaci o pokusu**				Dubina do statičke razine (od vrha pijezometra)				8,01	m	
5	**Testni pijezometar:**		PDS-1		Udaljenost vrha filtra do statičkog nivoa (d)				40,19	m	
6	**Datum:**		31.5.2016		Unutrašnji polumjer filtra (r_w):				0,038	m	
7	**Vrijeme:**		9:45:00		Vanjski polumjer pjezometarske cijevi (r_{nc}):				0,041	m	
8	**Lokacija:**		Crpilište "Varaždin"		Polumjer kabla sonde (r_{tc}):				0,005	m	
9	**Dubina sonde:**		14,01	m	efektivni polumjer pijezometra (r_c =(r_{nc}^2-r_{tc}^2)^0.5):				0,041	m	
10	**Statička razina vode**		7,95	m	Modificirani polumjer filtra (r_w*):				0,038	m	
11	**Inicijalni pomak (H_0)**		-0,302	m	odnos (b/r_w*):				394,737		
12	**Početak testa:**		39,5	sec	debljina formacije vodonosnog sloja (B):				18,6	m	
13											
14											
15			**Vrijeme u sekundama**	**Kolebanje razine**			**Odstupanje od statičke razine**			**Normalizirani nivo**	
16											
17						**Vrijeme**			**Vrijeme**		
18			39,75	13,71		0,25	-0,301		0,25	0,997	
19			40	13,71		0,5	-0,301		0,5	0,997	
20			40,25	13,76		0,75	-0,249		0,75	0,825	
21			40,5	13,81		1	-0,196		1	0,648	
22			40,75	13,86		1,25	-0,153		1,25	0,506	
23			41	13,86		1,5	-0,146		1,5	0,483	
24			41,25	13,89		1,75	-0,117		1,75	0,388	
25			41,5	13,92		2	-0,094		2	0,310	

Slika 28. Pregledni prikaz proračunskih tablica



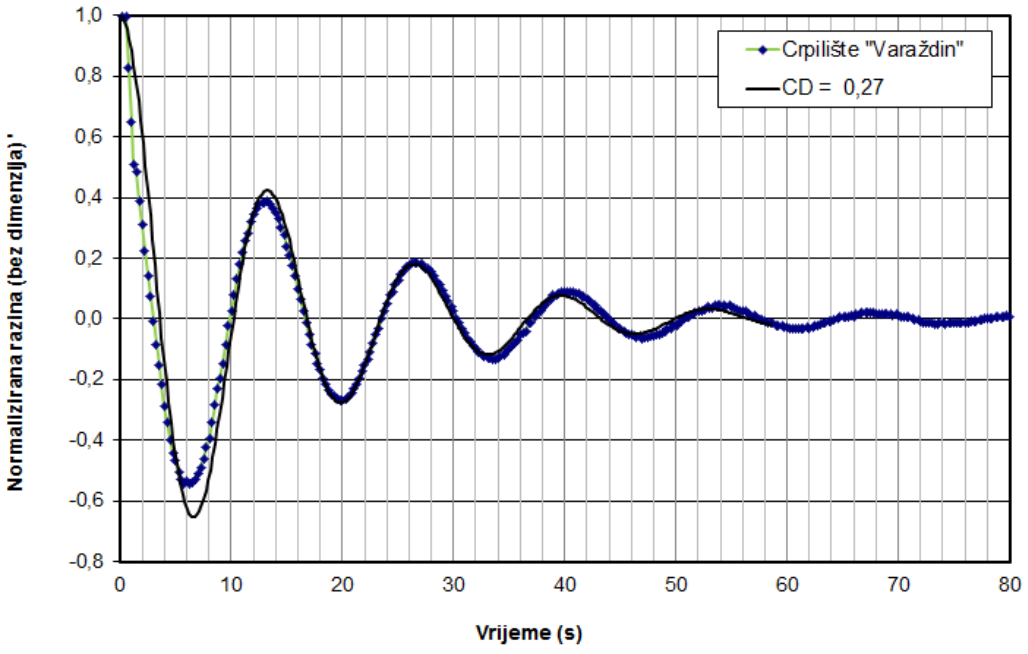
Slika 29. Podaci slug testa (grafikon br. 2)

Početno vrijeme testiranja i statička razina određuju se iz ovako dobivenih zapisa i unose se u polja C12, odnosno C9. Zatim se računa vrijeme od početka testiranja kao i dobivene vrijednosti devijacija (odstupanja) od statičkih vrijednosti u stupcima F i G. Inicijalni pomak razine vode se unosi u polje C11, dok se normalizacija devijacije od statičke razine (normalizirana visina/nivo) unosi u stupac J. Vrijeme od početka testiranja do vremena normalizacije automatski se izvodi kao krivulje u Grafikonu br. 3, zajedno sa tipom krivulje dobivenom u proračunskoj tablici 'Oblikovanje tipa krivulje'. Slijedi određivanje prikladnog tipa krivulje (C_D) koji se određuje putem iterativnog (ponovljenog) crtanja krivulje kao i prilikom usporedbe teoretskih i aktualnih (stvarnih) normaliziranih crteža visina. Fokus usporedbe je na svojem vrhuncu putem vrijednosti za $C_D < 2$, prilikom čega je naglasak stavljen na kurvaturu krivulje za $C_D > 2$. Čak i kada vršne vrijednosti korespondiraju, tip krivulje i dobiveni podaci kao odgovor u obliku krivulje su obično pomaknuti. Kako bi se ostvarilo usklađivanje vrijednosti, bezdimenzijsko vrijeme podešava se korištenjem faktora modulacije. Ovaj faktor unosi se u polje N13 dok se bezdimenzijsko vrijeme ugađa računanjem u stupcu 0. Zatim se graf 3. automatski iznova crta, korištenjem novih, ugođenih vrijednosti dimenzijskog vremena.

L	M	N	O
		Best Fit	
vrijeme		**Type Curve**	
točka preklapanja		**C_D**	
t_d^*/t^*		0,27	
0,480			
izračunat iz odnosa	Le =	42,646	m
nominalno	Le =	48,918	m
% razlika		13%	
Faktor modulacije=		2,085	
Bezdimenzionalno	**C_D =**		**Adjusted**
vrijeme	**0,27**		**Time**
0	1		0
0,1	0,995049		0,2085
0,2	0,98042		0,4170
0,3	0,956517		0,6255
0,4	0,92382		0,8340
0,5	0,882888		1,0425
0,6	0,834342		1,2510
0,7	0,778865		1,4595

Slika 30. Pregledni prikaz dijela proračunskih tablica

Vremensko podešavanje iterativno se nastavlja sve dok se ne dobije prikladna sukladnost krivulja, (Slika 31.). Omjer vremena pri točkama ugađanja (t_d^*/t^*) automatski se računa u polju L6, dok se vrijednost K_r procjenjuje računanjem vrijednosti za ovaj omjer, C_D kao i drugih, dobro ugođenih parametara.



Slika 31. Prilagodba tipske krivulje na mjerene podatke

R	S	T	U	V
Confined - High-K Hvorslev Model				
K_r =	$t_d^* r_c^2 \ln[b/(2r_w^*)+(1+(b/(2r_w^*))^2)^{0.5}]$			
	t^*	$2bC_D$		
Bracketted quantity				394,739
K_r =	**0,000589 m/sec**			
	50,898279 m/day		**1,67E+02 ft/day**	
	0,058910 cm/sec			

Slika 32. Rezultat radijalne hidrauličke vodljivosti vodonosnog sloja K_r

Uvažavajući sve napomene i upute u poglavlju može se izračunati vrijednost K_r za proveden slug test, (Slika 32.).

Rezultat ovog slug testa:

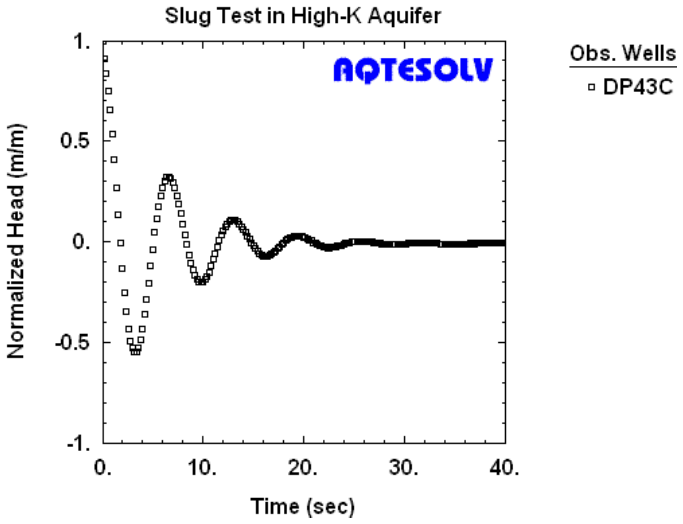
K_r = 0,000589 m/s

= 50,90 m/dan

= 0,058910 cm/s

5.6 Aplikacija proračuna u AQTESOLV programskom paketu

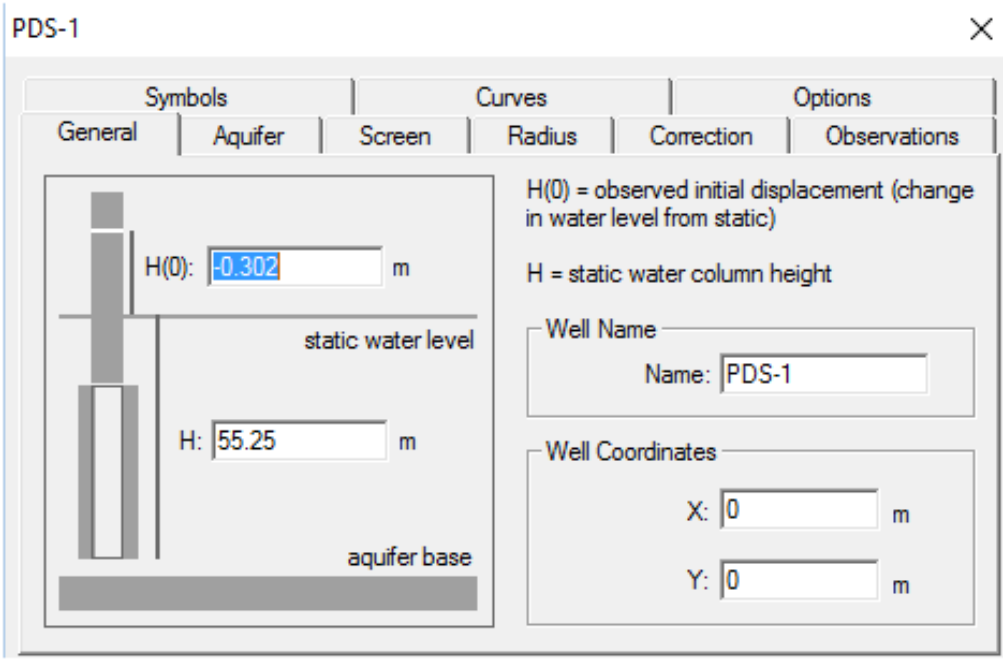
AQTESOLV softver dizajniran je za izračunavanje hidrauličke vodljivosti, koeficijenta uskladištenja i drugih svojstava vodonosnika na temelju podataka dobivenih tijekom izvođenja slug testova i testova crpljenja. Ovaj softver također se koristi u akademskom okruženju za nastavu i istraživanje, što potvrđuje Geotehnički fakultet u Varaždinu koji posjeduje taj softver u svrhu poboljšanja nastave i kvalitetnijeg obrazovanja svojih studenata. Softver je jednostavan za korištenje. Korištenje softvera može se savladati kroz vodič za podučavanje (tutorial) i datoteku "Help" gdje su opisani koraci i nalaze se sve potrebne informacije i softveru. Korisna opcija je osnovna slika na svakom ulaznom zaslonu koji pokazuje što svaka varijabla predstavlja, što je i prikazano na slikama u nastavku teksta. U AQTESOLV mogu se unijeti tekstualni podatci dobiveni uobičajenim transdjuserom (sondom) koji mjeri tlak. Također, podaci se mogu ručno upisati ili zalijepiti iz proračunskih tablica. Lako je mijenjati ulazne vrijednosti nakon što su jednom unesene u program, kao i birati između Engleskog i SI sustava mjernih jedinica. Nakon unosa, neobrađeni podaci mogu se mijenjati primjenom matematičkih funkcija. Na primjer, podaci promjene razine vode u pijezometru mogu se prikazati pomoću grafikona radi lakšeg razumijevanja procesa. Nakon što su podaci uneseni, softver nudi niz rješenja. U ovom trenutku je bitno znanje korisnika softvera koji mora znati odabrati najprikladnije rješenje problema. AQTESOLV daje smjernice u odabiru odgovarajućeg rješenja za dobivene podatke i hidrogeološke parametre (hidraulička vodljivost), a korisnik se upućuje na odgovarajuću literaturu za detalje o svakom pojedinom rješenju.



Slika 33. Prikaz podataka, dobivenih Slug testom, u softveru AQTESOLV

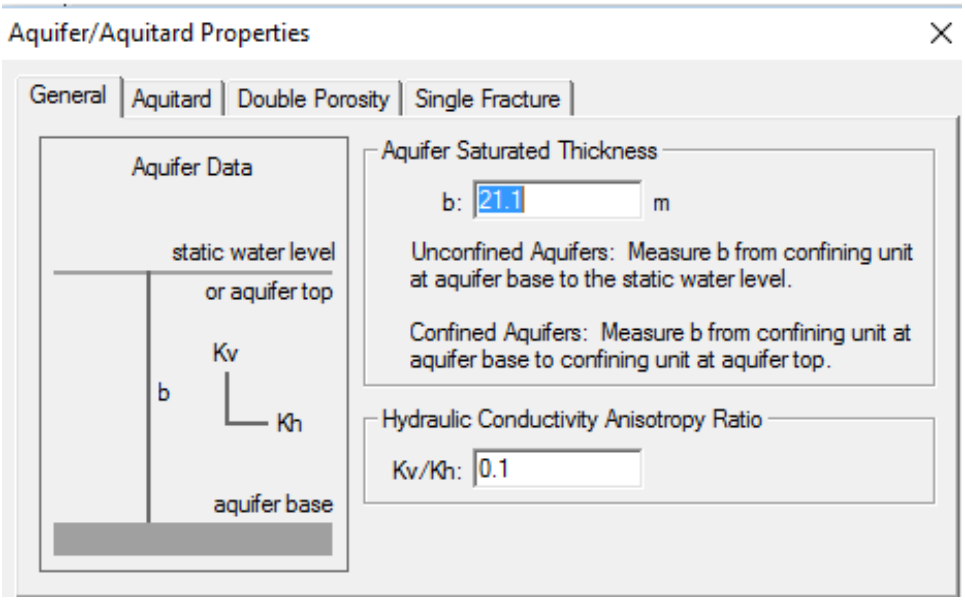
5.6.1 Unos podataka u AQTESOLV

Da bi se unijeli podaci, najprije je potrebno otvoriti softver i odabrati File > New. Zatim slijedi odabir „Slug Test Wizard“ koji se nalazi na popisu za kreiranje novih skupova podataka za Slug test i pritisne se OK. Slijedi odabiranje mjernih jedinica za Slug test i unašanje podataka o projektu kao što su naziv lokacije, oznaka pijezometra i dr. Nakon toga unosi se inicijalni pomak razine vode (H_0) u pijezometru koji je uzrokovan izvlačenjem sluga i statička razinu stupca vode (dubina do dna pijezometra od statičke razine vode), te se još može unesti i naziv pijezometra te koordinate pozicije (uobičajeno X=0, Y=0). Prikaz zaslona za unos podataka o inicijalnom pomaku (H_0) i statičkoj razini vode (H) nalazi se na slici 34.



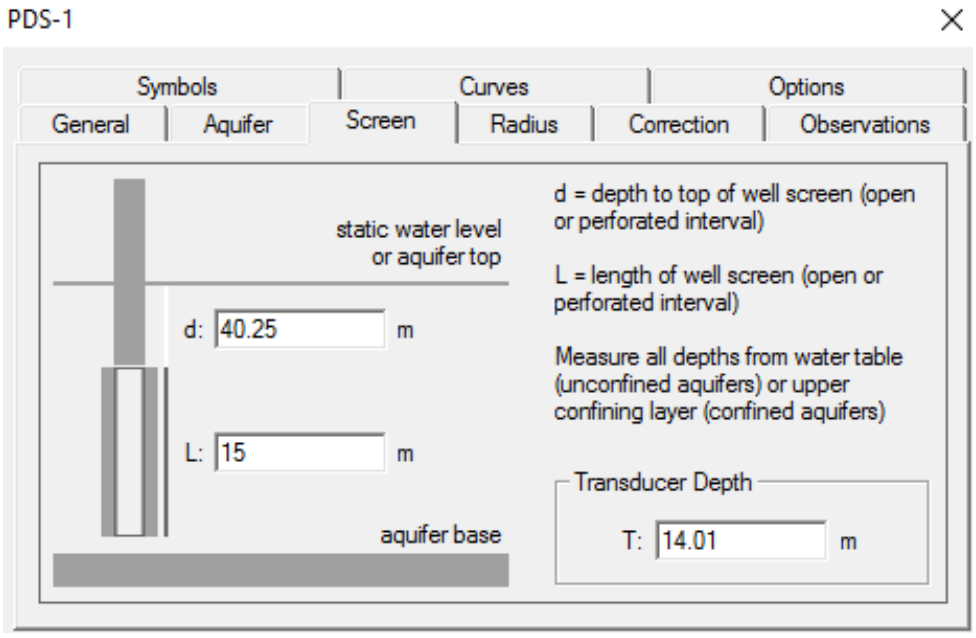
Slika 34. Prikaz zaslona za unos podataka o inicijalnom pomaku H_0 i statičkoj razini vode H

Slijedi unašanje debljine (b) saturiranog dijela vodonosnika (Slika 35.). Za otvorene vodonosnike, to je mjerena dubina od statičke razine vode do dna vodonosnika. Za zatvorene vodonosnike, to je mjera od gornjeg nepropusnog sloja do donjeg nepropusnog sloja. Na ovaj ulazni zaslon još se unosi omjer između horizontalne (K_h) i vertikalne (K_v) hidrauličke vodljivosti.



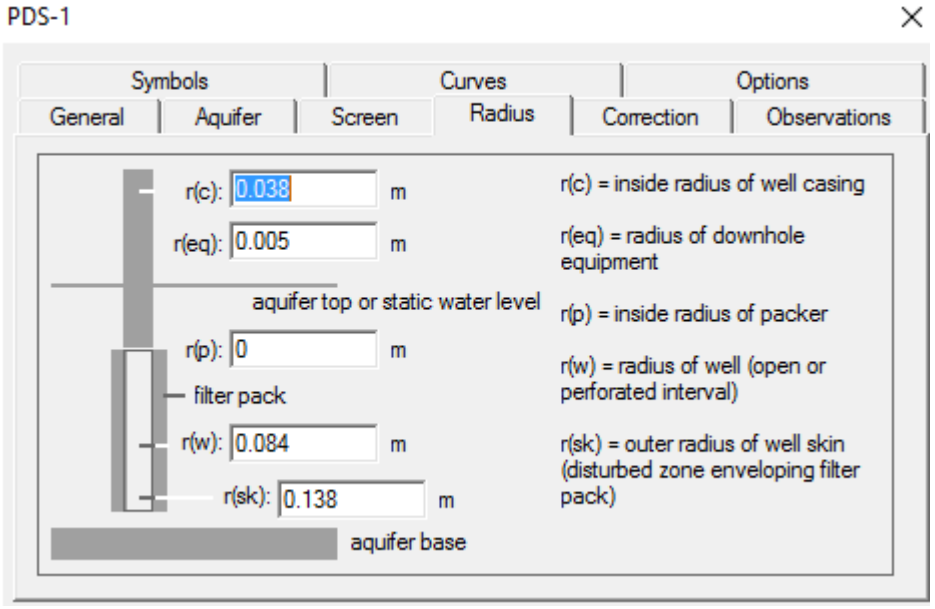
Slika 35. Unos debljine saturiranog dijela vodonosnika *b* i omjera vertikalne i horizontalne hidraulične vodljivosti

Nakon toga unosi se udaljenost od vrha perforiranog dijela pijezometra do statičke razine vode *d*, i još se unosi duljina perforiranog dijela pijezometra (*L*). Dubina na kojoj se nalazi sonda iznosi *T*=14.01 m. Sve to prikazano je na slici 36.



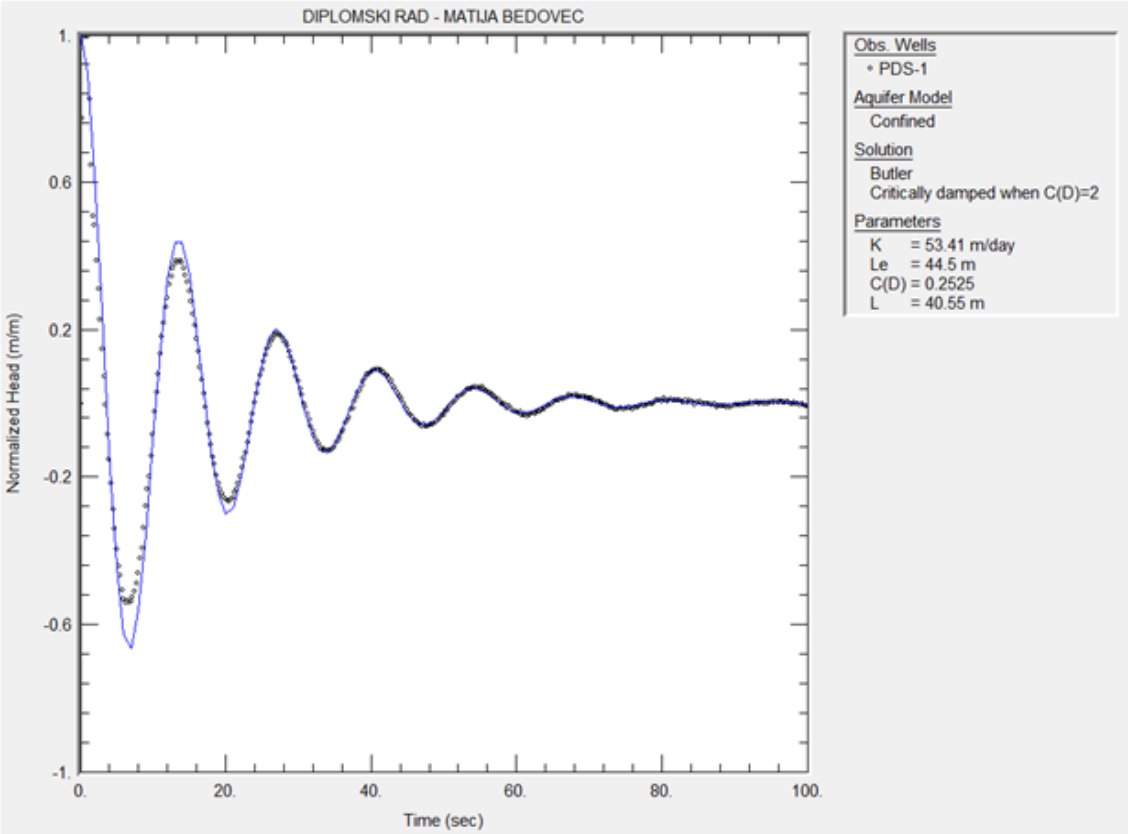
Slika 36. Ulazni zaslon sa pridruženim parametrima pijezometra

Na kraju, unose se podaci o pijezometru kao što su: unutrašnji polumjer filtra, polumjer kabla sonde, polumjer bušotine, vanjski polumjer bušotine.



Slika 37. Podatci o pijezometru

Uvažavajući sve upute i nakon unošenja svih potrebnih podataka, softver iscrtava krivulju koja predstavlja podatke dobivene izvođenjem slug testa (Prilog br. 2). Za računanje hidrauličke vodljivosti potrebno je odabrati odgovarajuće rješenje koje nudi program AQTESOLV. U ovom slučaju, odabrano je rješenje prema Buttler-u. Kao i kod proračuna u Excel-u, provodilo se usklađivanje krivulje koja predstavlja podatke dobivene izvođenjem Slug testa i teoretske krivulje. Vremensko podešavanje iterativno se nastavlja sve dok se ne dobije prikladna sukladnost krivulja, (Slika 38.). Kada se postigne prikladna sukladnost krivulja program izračuna vrijednost hidrauličke vodljivosti (K) koja u ovom slučaju iznosi K=53,41 m/dan.



Slika 38. Prikladna sukladnost teoretske krivulje na podatke

U definicijama jednadžbi tipskih krivulja pojavljuje se parametar označen sa L_e, koji predstavlja efektivnu dužinu vodnog stupca. Zurbuchen i ostali smatrali su da se ova veličina može izračunati iz dimenzija pijezometra i smatrati kao poznanica kod proračuna. Takav pristup uglavnom ne daje dobre rezultate kod superponiranja krivulja ukazujući na relevantan fizički proces koji nije dovoljno dobro opisan sa definicijom veličine L_e kod prijašnjih autora. Uzimajući u obzir složenost slugom induciranih gibanja vode u filtru pijezometra koji je ugrađen u visoko vodljivom vodonosnom sloju, teško je predvidjeti sve utjecaje koji utječu na dužinu L_e. U ovdje opisanoj proceduri, L_e je proračunat kao dio procesa analize, [7]:

$$L_e = \left(\frac{t^*}{t_d^*} \right)^2 \cdot g \tag{15}$$

U većini slučajeva, analizom dobivena vrijednost L_e bit će nešto veća od nominalne vrijednosti izračunate iz podataka dimenzija pijezometra.

6. Rezultati mjerenja

Probno crpljenje zdenca Z-1 izvršio je 2002. godine po izvedbi zdenca Građevinski Fakultet – Zavod za hidrotehniku prema Hantushovoj metoda [11]. Provedeno je dugoročno probno crpljenje zdenca sa sljedećim rezultatima:

Tablica 1. Rezultati mjerenja

Podatci dobiveni Slug testom		**Podatci dobiveni probnim crpljenjem**
Excel tablice	AQTESOLV	Građevinski Fakultet – Zavod za hidrotehniku (Hantushova metoda)
***K* = 50,90 m/dan**	***K* = 53,41 m/dan.**	***K* = 74 m/dan**

Razlika dobivenih vrijednosti hidrauličke provodljivosti (*K)* klasičnim postupcima i slug testom, u granicama je od nekih 30%, što predstavlja sasvim zadovoljavajuću točnost za test kojim je moguće provedbu i analizu izvršiti u 30-tak minuta, za razliku od višednevnih (mjesečnih) pokusnih crpljenja. Slug test u ovom obliku zaslužuje više pažnje i praktične upotrebe na terenu.

7. Zaključak

Razina podzemne vode je vrlo važan čimbenik kod gotovo svih geotehničkih analiza i studija. Sukladno tome, procjena uvjeta u kojima se nalazi podzemna voda je osnovni element većine geotehničkih istražnih radova. Tijekom godina razvijen je velik broj eksperimentalnih tehnika za procjenu hidrauličke vodljivosti podzemnih slojeva tla. U posljednje vrijeme, sve se više primjenjuju terenska istraživanja za ocjenu hidrauličke vodljivosti tla poznata pod nazivom slug test, osobito za rješavanje problema u inženjerstvu okoliša gdje je došlo do zagađenja vode koja je podvrgnuta ispitivanjima. Ispitivanje hidrauličke vodljivosti slug testom je relativno brzo, metoda je jednostavna za izvođenje a cijena ispitivanja je prihvatljiva za sve vrste korisnika. Obrada podataka u programskim paketima kao što su MS Excel i AQTESOLV je također brza i jednostavna i daje nam pouzdane podatke koje koristimo za određivanje hidrauličkih parametara vodonosnih slojeva. Ove činjenice potkrijepljene su terenskim ispitivanjem koje je izvedeno na lokaciji crpilišta „Varaždin“, a usporedba podataka s probnim crpljenjem koje je izvodio Građevinski fakultet iz Zagreba, dokazuje pouzdanost podataka dobivenih slug testom. Ovaj rad ima namjeru demistificirati slug test i pokazati njegovu primjenu kao preliminarnog testa koji za manje zahtjeve može zadovoljiti i kao konačni podatak. Kod provedbe slug testa bitno je uvažiti kako je to Butler (1997) istaknuo, „Slug test u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti treba biti iniciran malom i rapidnom promjenom“, što je i provedeno na terenskom primjeru slug testa na crpilištu „Varaždin“. S obzirom na ekonomičnost i učestalost izvođenja ove tehnike u svijetu postoji jasna potreba za pisanjem teksta koji će inženjerima u Hrvatskoj dati odgovore na pitanja o primjeni slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti.

Literatura

[1] *Mehanika tla: Voda u tlu.* Dostupno na: http://www.gf.uns.ac.rs/predmeti/mehanikatla/4.%20Voda%20u%20tlu.pdf Datum pristupa: 4.5.2016.

[2] Kvasički P. *Mehanika tla.* (2007.). Interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko geološko naftni fakultet

[3] Hamill L., Bell F. G. (1986.). *Groundwater resource development*. Cambridge: Great Britain University Press, Cambridge

[4] Pollak, Z. (1995.). *Hidrogeologija za građevinare*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. Zagreb: Poslovna knjiga d.o.o.

[5] Žugaj R. (2009.). *Hidrologija za agroekologe*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet

[6] Strelec S. (2012.). *Podpovršinski istražni radovi*. Interna skripta. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet

[7] AQTESOLV for Windows, developed by Glenn M. Duffield, HydroSOLVE Inc.

[8] Butler, J. J. Jr (1997.). The *Design, Performance and Analysis of Slug Tests*. Kansas Geological Survey, University of Kansas

[9] Butler, J. J. Jr., Garnett, E. J. (2000.). *Simple Procedure for Analysis of Slug Test in Formations of high hydraulic conductivity*. Kansas Geological Survey, University of Kansas

[10] Zlotnik V. (1994). *Interpretation of Slug and Packer Tests in Anisotropic Aquifers.* National Ground Water Association

[11] Urumović, K., Hlevnjak, B., Andročec, V., Duić, Ž. (2002.). *Elaborat, ZDENAC Z-1, crpilište "Varaždin" – zahvat podzemne vode iz donjeg vodonosnika*. Zagreb

[12] Vitez, T. (2001.). *Izrada strukturno – pijezometarske bušotine PDS-1 na vodocrpilištu "Varaždin".* Diplomski rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.

[13] Urumović, K., Hlevnjak, B. Andročec, V. (2002.) *Projekt zdenca Z-1, crpilište "Varaždin", zahvat podzemne vode iz donjeg vodonosnika*. Zagreb

Popis slika

Slika 1. Pojavljivanje vode u tlu, [1] 2
Slika 2. Odnos sniženja u vremenu crpljenja zdenca u različitim tipovima vodonosnih slojeva, [6] 5
Slika 3. Shematski prikaz Darcy-jevog uređaja 7
Slika 4. Parametri potrebni za izračun hidrauličke vodljivosti kod slug testa, [7] 13
Slika 5. Promjena razine vode tijekom slug testa 14
Slika 6. Shematski prikaz bunara pri čemu je primijenjena pneumatska metoda za inicijaciju slug testa, [6] 18
Slika 7. Primjer crteža oscilacije razine vode u pijezometru nasuprot vremena od slobodno određene vremenske točke 19
Slika 8. Primjer crteža devijacije (odmaka) od statičke razine nasuprot vremena od početka provođenja testa 20
Slika 9. Primjer crteža krivulje normalizirane vrijednosti nasuprot vremena od početka provođenja testa 20
Slika 10. Tipske krivulje 21
Slika 11. Tehnički profil pijezometra PDS-1 26
Slika 12. Profil zdenca Z-1 i litološki profil zdenca 28
Slika 13. Sonda modela „Level TROLL 700“ 29
Slika 14. Atmosferski tlak na prednjoj i stražnjoj strani senzora (vented) 29
Slika 15. Poliuretanski Twist-Lock kabela 30
Slika 16. Komunikacijski kablovi 30
Slika 17. Win-Situ 5 softver (podatci o temperaturi vode dobiveni terenskim ispitivanjem na lokaciji crpilišta „Varaždin“ 31.5.2016.) 31
Slika 18. Slug 31
Slika 19. Spuštanje sonde u pijezometar 32
Slika 20. Izvlačenje slug šipke 32
Slika 21. Zapis mjernih vrijednosti u softveru Win-Situ 5 na lokaciji crpilišta „Varaždin“ (ispitivanje je izvedeno 31.5.2016.) 33
Slika 22. Podaci zabilježeni sondom Level TROLL 700 33
Slika 23. Relativizirani podaci 34
Slika 24. Proračun inicijalnog pomaka razine vode H_0 u pijezometru uzrokovanog izvlačenjem sluga (Excel) 35
Slika 25. Normalizirane vrijednosti za iznos inicijalnog odmaka H_0=0,302 m 35
Slika 26. Generator tipske krivulje 36
Slika 27. C_D tipska krivulja (grafikon br. 1) 37
Slika 28. Pregledni prikaz proračunskih tablica 37
Slika 29. Podaci slug testa (grafikon br. 2) 38
Slika 30. Pregledni prikaz dijela proračunskih tablica 39
Slika 31. Prilagodba tipske krivulje na mjerene podatke 39
Slika 32. Rezultat radijalne hidrauličke vodljivosti vodonosnog sloja K_r 40

Slika 33. Prikaz podataka, dobivenih Slug testom, u softveru AQTESOLV 41
Slika 34. Prikaz zaslona za unos podataka o inicijalnom pomaku H_0 i statičkoj razini vode H 42
Slika 35. Unos debljine saturiranog dijela vodonosnika b i omjera vertikalne i horizontalne hidraulične vodljivosti 43
Slika 36. Ulazni zaslon sa pridruženim parametrima pijezometra 43
Slika 37. Podatci o pijezometru 44
Slika 38. Prikladna sukladnost teoretske krivulje na podatke 45

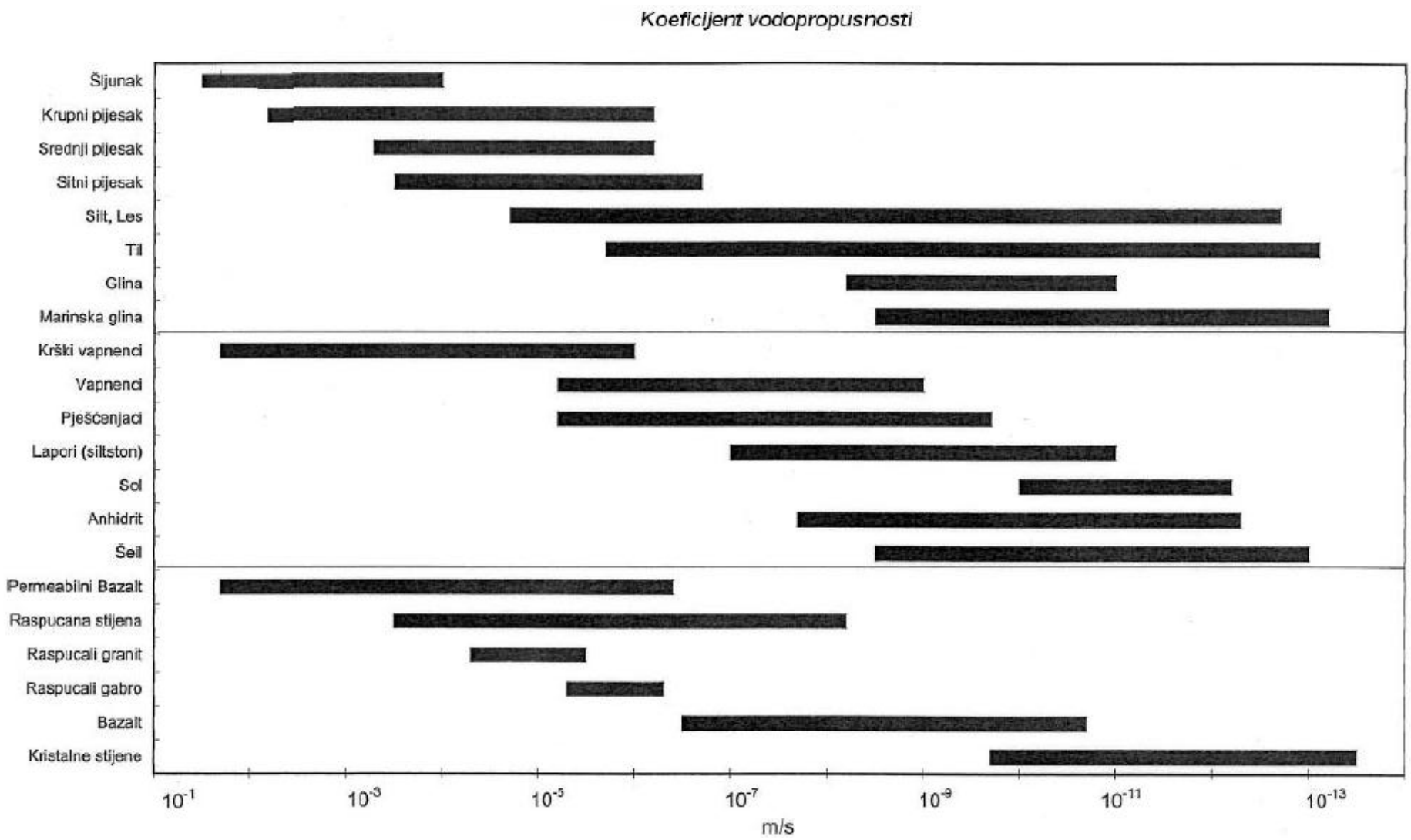
Popis tablica

Tablica 1. Rezultati mjerenja.....46

Grafički prilozi

PRILOG br. 1

Grafički prikaz vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti u ovisnosti o vrsti materijala


Koeficijent vodopropusnosti
Šljunak
Krupni pijesak
Srednji pijesak
Sitni pijesak
Silt, Les
Til
Glina
Marinska glina
Krški vapnenci
Vapnenci
Pješćenjaci
Lapori (siltston)
Sol
Anhidrit
Šeil
Permeabilni Bazalt
Raspucana stijena
Raspucali granit
Raspucali gabro
Bazalt
Kristalne stijene
10-1
10-3
10-5
10-7
10-9
10-11
10-13
m/s

PRILOG br. 2

Ispis rezultata iz programskog paketa AQTESOLV