

PRIMJENA SLUG TESTA U FORMACIJAMA VISOKE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

ANALYSIS OF SLUG TESTS IN FORMATIONS OF HIGH HYDRAULIC CONDUCTIVITY

Matija Bedovec¹, Kristijan Grabar², Stjepan Strelec^{1*}

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42 000 Varaždin, Hrvatska

² SPP d.o.o. Varaždin, Trstenjakova 3, 42 000 Varaždin, Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: stjepan.strelec@gfv.hr

Sažetak: U radu je dan teorijski i praktični prikaz metode Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti. Opisuje se pojam Slug testa, te su prikazane njegove prednosti u odnosu na druge terenske metode. Prikazan je općeniti pregled postupka analize slug testa na terenu te su objašnjeni koraci od kojih se analiza sastoji. Objašnjenje postupka analize potkrijepljeno je grafovima koji su dobiveni na temelju podataka in situ mjerenjem. U nastavku se detaljno opisuje primjer terenske primjene Slug testa na lokaciji crpilišta "Varaždin", postupak izvođenja te korištena terenska oprema. Nakon opisivanja terenske primjene Slug testa navode se postupci obrade dobivenih podataka na terenu. Obrada podataka i njihova usporedba izvedena je u programu MS Excel i u programskom paketu AQTESOLV.

Ključne riječi: Slug test, formacije visoke hidraulička vodljivost, vodonosni sloj, pretvornik tlaka, parametar prigušenja C_D

Abstract: The purpose of this report is to describe a theoretical and practical presentation for two simple approaches for analysis of slug tests in formations of high hydraulic conductivity. It describes the concept of slug test, and shows the benefits of slug test compared to other field methods. Both approaches involve the graphical matching of theoretical type curves to plots of slug-test response data. The first approach is a spreadsheet-based procedure using the Excel software package and their comparison with software package AQTESOLV. Explanation of slug test analysis procedure is supported by graphs which are obtained in situ measurements at the site of the pumping station "Varazdin".

Keywords: Slug test, formations of high hydraulic conductivity, aquifer, pressure transducer, damping parameter C_D

Received: 23.11.2016 / Accepted: 10.12.2016

Published online: 14.12.2016

Prethodno priopćenje / Preliminary communication

1. UVOD

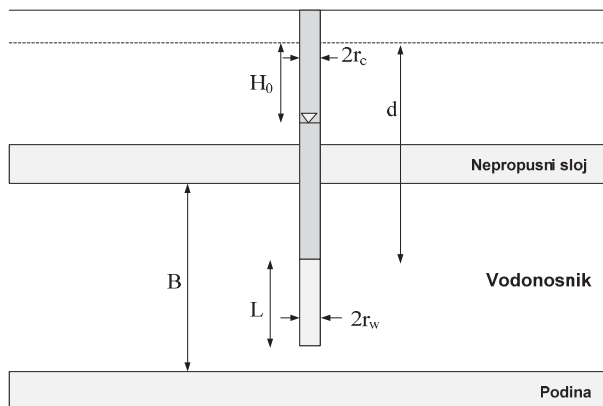
Kvalitetni podaci o hidrauličkim karakteristikama vodonosnih slojeva dobivaju se isključivo preko terenskih radova. Laboratorijska mjerenja nude raspon očekivanih podataka koji traže potvrdu dobiveni In-situ ispitivanjima. Često podaci dobiveni u laboratoriju nemaju poveznicu s podacima dobivenim na 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, tako dobiveni rezultati vrlo blizu su podacima dobivenim probnim crpljenjem. Test se izvodi u piježometarskoj bušotini, što pridonosi niskoj cijeni koštanja takvog pokusa, budući nije potrebno pokusno crpljenje ni dodatni opažački piježometar. Mnogi autori nudili su teorijska rješenja i uglavnom tražili rješenja u izgledu odziva (kolebanja) razine vode u piježometarskoj bušotini na unesenu promjenu naglim dodavanjem ili oduzimanjem dijela vode iz piježometra. Terenska ekipa sa prikladnom opremom za slug test, prijenosnim računalom i kvalitetnom aplikacijom, koja može biti izrađena i u MS Excelu, može za manje od

60-tak minuta imati rezultate o hidrauličkoj provodljivosti (K) i transmitivnosti (T) ispitivanog vodonosnog sloja zatvorenog ili otvorenog tipa. Zbog ovih činjenica Slug test je u svijetu, naročito u SAD-u vrlo često korištena metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti. Koliko je poznato autorima ovog članka ova metoda u Hrvatskoj još nije korištena. Svrha ovog rada je predstaviti stručnoj javnosti Slug test radi veće mogućnosti korištenja istog u nekoherentnim tlima visoke hidrauličke vodljivosti.

2. SLUG TEST

Sva istraživanja podzemnih voda, trebaju imati procjenu propusnosti podzemnih slojeva tla, što je i fokus ovog istraživanja. 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 onečišćenja podzemne vode koja je podvrgnuta ispitivanjima.

U tehničkoj literaturi mogu se pronaći mnogi članci o teorijskim modelima za analizu podataka dobivenih Slug testom, međutim relativno malo se objavljuje kako u praksi primijeniti tehnike Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti.



Slika 1. Parametri potrebni za izračun hidrauličke vodljivosti kod slug testa (AQTESOLV for Windows)

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 kako bi se moglo predvidjeti potpovršinsko kretanje onečišćivala. Pomoću tih informacija moguće je planiranje testova crpljenja na više lokacija pijezometarskih bušotina. Na taj način dobivamo pouzdane informacija u svezi hidrauličkog ponašanja vode u tlu na velikim podpovršinskim jedinicama od interesa.

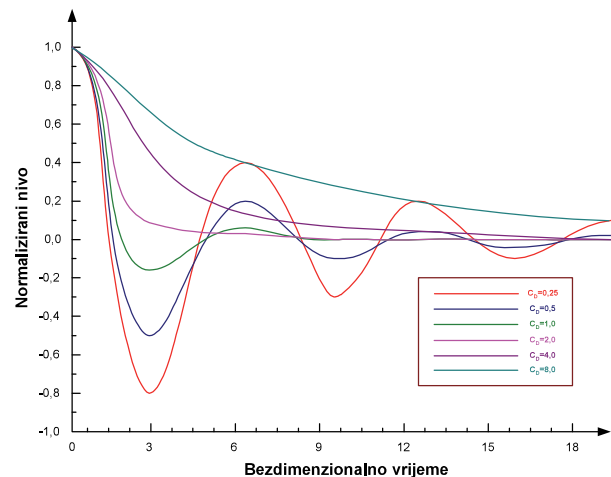
Prilikom istraživanja u svrhu vodoopskrbe, procjene dobivene putem Slug testova primarno se koriste za oblikovanje testova crpljenja na velikim površinama, kao i za procjenu učinkovitosti kod planiranja bušotina i aktivnosti u promatranim bunarima. Kod primjene ove metode u slojevima koji su ispod razine podzemne vode moguće je kvalitetno putem slug testa odrediti parametre vodonosnika.

2.1. Općeniti pregled postupka analize

Općeniti pristup prilikom obrade i analize podataka dobivenih testiranjem u visoko propusnoj geološkoj formaciji je sličan, bez obzira da li će test bio proveden u otvorenom ili zatvorenom vodonosniku. Ovaj pristup sastoji se od četiri koraka:

- Očitane vrijednosti sa senzora koji mjeri hidrostatski tlak vodnog stupca u pijezometru ucrtaju se u vremenski dijagram počevši od nekog dogovornog vremena. Iz tog dijagrama odredimo vrijeme početka testa i statičku razinu vode u pijezometru. Dijagram sa mjerenim vrijednostima prikazan je na **slici 8 i 9**. Zatim je potrebno iz dijagrama kolebanje razine vode prikazati kao odstupanje od nultog položaja (statičke razine vode $RPV=0$), odnosno početak testa označiti kao nulto vrijeme, $t = 0$, **slika 10**.

- Korištenje dijagram teoretskih krivulja. Krivulje su u obliku grafova normaliziranih odnosa razine vode od statičkog nivoa sa vremenom koji je bez dimenzije, **slika 2**. Ista grupa krivulja koristi se za analize otvorenih i zatvorenih vodonosnih formacija. Tipске krivulje generirane su prema **jednadžbama 1, 2 i 3**. (Butler 1997; Butler & Garnett 2000; Zlotnik 1994).



Slika 2. Tipске krivulje (Butler 1997)

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

$$w_d(t_d) = e^{-\frac{C_D}{2}t_d} \cdot \left[\cos(\omega_d \cdot t_d) + \frac{C_D}{2\omega_d} \sin(\omega_d \cdot t_d) \right], \dots C_D < 2 \quad (1)$$

$$w_d(t_d) = e^{-t_d} (1 + t_d), \dots C_D = 2 \quad (2)$$

$$w_d(t_d) = -\left(\frac{1}{\omega_d^+ - \omega_d^-} \right) \cdot \left[\omega_d^- \cdot e^{\omega_d^+ t_d} - \omega_d^+ \cdot e^{\omega_d^- t_d} \right], \dots C_D > 2 \quad (3)$$

gdje je:

C_D = parametar prigušenja,

g = ubrzanje izazvano gravitacijskom silom [m/s²],

H_0 = promjena razine vode koju je inicirao Slug test (inicijalni pomak) [m],

L_c = efekt. dužina vodnog stupca u pijezometru [m],

t_d = bezdimenzionalni vremenski parametar =

$$\sqrt{\frac{g}{L_c}} \cdot t$$

t = vrijeme [s],

w = odmak razine vode od statičke razine [m],

w_d = normalizirana devijacija razine vode [-] =

$$\left(\frac{w}{H_0} \right)$$

ω_d = bezdimenzionalni frekvencijski parametar =

$$\sqrt{\left| 1 - \left(\frac{C_D}{2} \right)^2 \right|}$$

$$\omega_d^\pm = -\frac{C_D}{2} \pm \omega_d \quad (4)$$

- c) Nakon toga se tipske krivulje superponiraju na dijagram dobiven mjerenjem Slug testa. Bezdimenzionalno vrijeme tipskih krivulja tada se isteže ili skuplja kako bi se postiglo preklapanje između odabrane C_D krivulje i mjerenih podataka. Izgled krivulja za različite parametre C_D vidljiv je sa **slike 2**. Istezanje odnosno kontrakcija odabrane C_D krivulje postiže se pomoću faktora modulacije koji je u osnovi broj s kojim se množi bezdimenzionalno vrijeme u C_D krivulji. Pomoću ova dva parametra (C_D i faktora modulacije) moguće je postići preklapanje matematičkih krivulja i mjerenih podataka koji su prikazani u normaliziranom obliku (w/H_0). Kada postignemo usklađenost krivulja, podatak koji je potrebno odrediti jeste vrijeme preklapanja (Butler & Garnett 2000). Ono se određuje na način da se očitaju vrijednosti realnog vremena t^* i bezdimenzionalnog vremena t_d^* za istu koordinatu na superponiranim krivuljama. Točka preklapanja tada je odnos (t_d^*/t^*).
- d) 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 vodonošne slojeve - visoka K_r vrijednost u skladu je sa modelom prema:

$$K_r = \frac{t_d^*}{t^*} \cdot \frac{r_c^2 \cdot \ln \left[\frac{R_c}{r_w} \right]}{2 \cdot b \cdot C_D} \quad (5)$$

Za zatvorene vodonošne slojeve vrijednost je u skladu s modelom prema:

$$K_r = \frac{t_d^*}{t^*} \cdot \frac{r_c^2 \cdot \ln \left[\frac{b}{2 \cdot r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2 \cdot r_w} \right)^2} \right]}{2 \cdot b \cdot C_D} \quad (6)$$

gdje je:

- b = dužina perforiranog dijela (filtra) [m],
 R_c = efektivni polumjer [m],
 r_c = efektivni polumjer pijezometra (ispravljen za polumjer kabla sonde) [m],
 r_w = radijus perforiranog dijela pijezometra [m]

3. PRIMJER TERENSKE PRIMJENE SLUG TESTA NA LOKACIJI VODOCRPILIŠTA „VARAŽDIN“

3.1. Izvedba pijezometra PDS-1

Pijezometra PDS-1 nalazi se u poluzatvorenom vodonošnom sloju. To znači kako je taj sloj dobro propustan sloj potpuno saturiran, a u njegovoj se krovini nalazi djelomično saturiran polupropusni sloj. Taj sloj ima slabu, ali ipak praktično mjerljivu propusnost. Snižavanje pijezometrijske visine u poluzatvorenom vodonošnom sloju, uslijed crpljenja uzrokovat će vertikalno procjeđivanje iz polupropusnog medija gornji vodonošni sloj. Poluzatvoreni vodonošni sloj može pokazati razinu pod tlakom kao i slobodnu razinu podzemne vode.

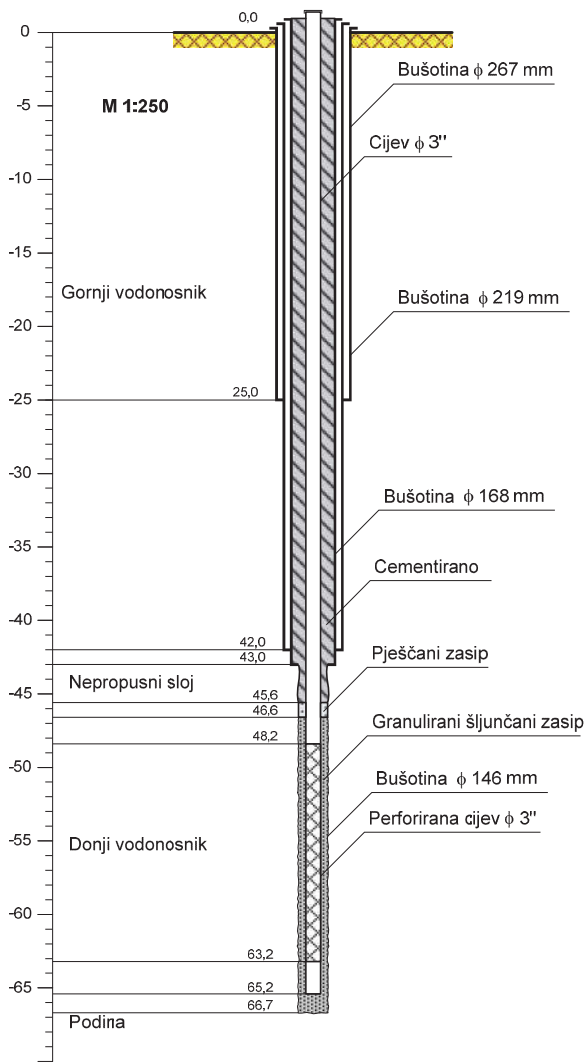
Pijezometar PDS-1 je podijeljen u tri dijela. Donji dio je taložnik ukupne visine 2 m, iznad njega se nalazi filtarski dio u duljini 15 m, a ostali dio je puna pocinčana cijev unutarnjeg promjera 3", **slika 3**.

Filtarski dio je perforirana pocinčana cijev promjera 3", perforacijom 4 mm i 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 vodonošnom sloju. Filtarski šljunčani zasip je veličine zrna 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 u odnosu na pijezometar PDS-1 i zdenac Z-1 koji zahvaćaju donji sloj. Konačno položaj pijezometra PDS-1 omogućuje povoljne uvjete za identifikaciju parametara vodonošnog sloja, a položaj zdenca prikladan je za olakšano uključivanje u vodoopskrbni sustav (Urumović et al. 2002).

3.2. Oprema potrebna za izvođenje Slug testa

Oprema za mjerenje sastojala se od:

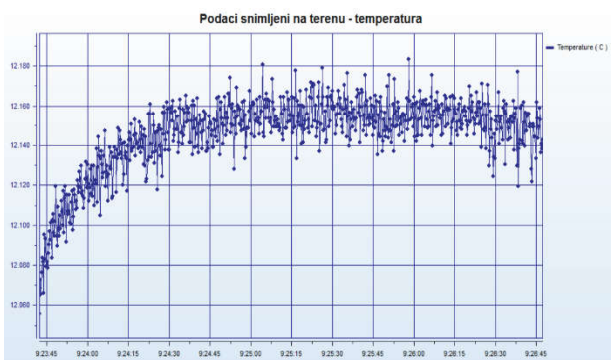
1. Sonde modela "Level TROLL 700" (**slika 4**) koja daje kvalitetne podatke Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti (uzorkovanje svakih 250 ms), omogućuje kontinuirano praćenje razine vode, tlaka i temperature vode. Titanska građa sonde omogućuje dugotrajna radna svojstva u svježoj, slanoj pa čak i onečišćenoj podzemnoj vodi, s baterijom niske potrošnje koja traje 10 i više godina.
2. Računalo sa instaliranim Win-Situ 5 aplikacijom, koja omogućuje izravno čitanje i profiliranje podataka, dugotrajno bilježenje i preuzimanje te online pregledavanje. Zatim izvoz podataka u proračunske tablice Microsoft Excel programa. Poznati volumen cilindra koji se koristio za Slug test zapremine je $V_s = 1,36$ l, promjera 45 mm i dužine 852 mm. Izgled i dimenzije cilindra za Slug test dan je su na **slici 6**.



Slika 3. Tehnički profil pijezometra PDS-1



Slika 4. Sonda modela "Level TROLL 700"



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



Slika 6. Cilindar za potrebe Slug testa

3.3. Izvođenje slug testa na terenu

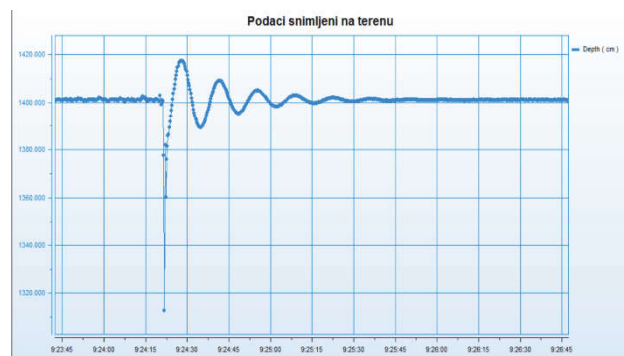
Mjerna sonda (Level TROLL 700) spuštena je u pijezometar PDS-1 do dubine od 14,01 m ispod razine vode u pijezometru.

Slug test proveden je naglim izvlačenjem slug objekta, slika 7, pri čemu je zabilježeno osciliranje nivoa vode u pijezometru.

Sonda je bilježila izmjerene vrijednosti svakih 250 ms u određenom vremenskom periodu, dok se razina vode nije vratila u inicijalno stanje, što je vidljivo sa slike 8.



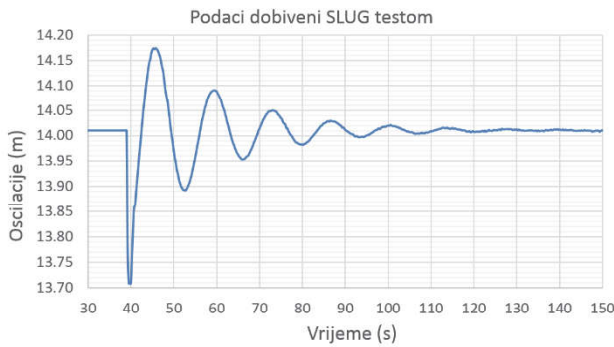
Slika 7. Spuštanje sonde u pijezometar i izvlačenje slug šipke



Slika 8. Zapis mjernih vrijednosti u softveru Win-Situ 5 na lokaciji crpilišta „Varaždin“ (ispitivanje je izvedeno 31.5.2016.)

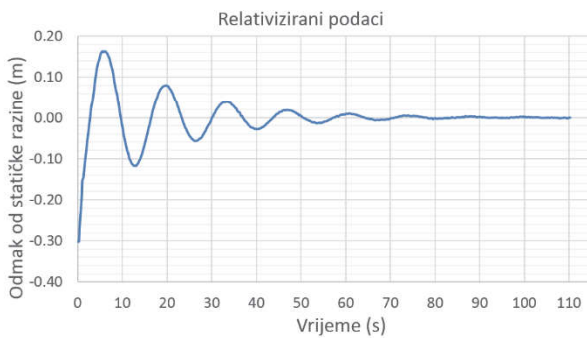
3.4. Aplikacija proračuna u MS Excelu

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 9.



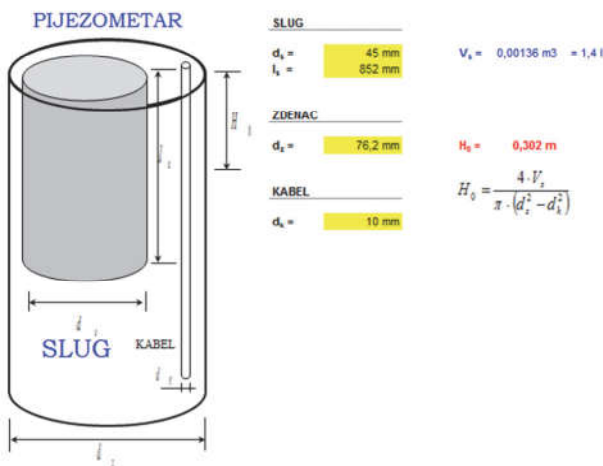
Slika 9. Podaci zabilježeni sondom Level TROLL

Sljedeći korak je kolebanje razine vode iz dijagrama na slici 9. prikazati kao odstupanje od nultog položaja (statičke razine), odnosno početak testa označiti kao nulto vrijeme, $t = 0$, (Slika 10). To se postiže oduzimanjem statičkog vremenskog potencijala od ostalih izmjerenih vrijednosti potencijala.



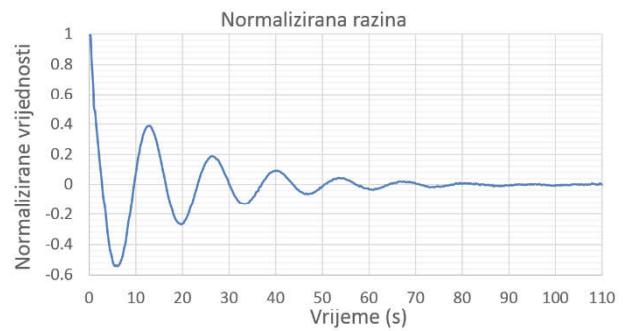
Slika 10. Relativizirani podaci

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 po izrazima sa slike 11 inicijalni pomak je $H_0=0,302$ m, slika 10.



Slika 11. Proračun inicijalnog pomaka razine vode H_0

Dobiveni relativizirani podaci dijele se sa inicijalnim pomakom (H_0) koji je uzrokovan izvlačenjem sluga, kako bi se dobile normalizirane vrijednosti za iznos inicijalnog odmaka $H_0 = 0,302$ m, slika 12.



Slika 12. Normalizirane vrijednosti za iznos inicijalnog odmaka $H_0=0,302$ m

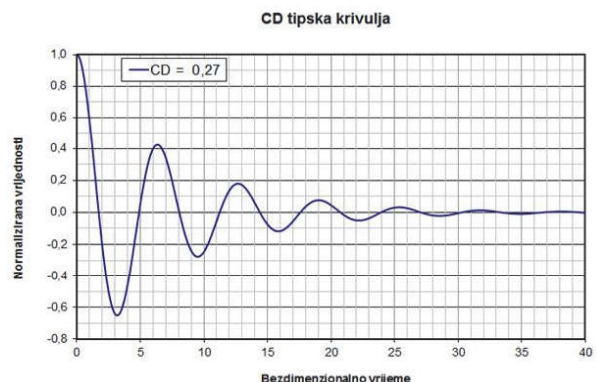
3.4.1. Primjena proračunskih tablica

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 13 prikazan je dio Excel tablice "Slug test u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti". Vrijednost C_D , za koju se crta tipizirana krivulja, unosi se u C_D polje. Zatim se računaju teoretske normalizirane vrijednosti u stupcu H, u ovisnosti o C_D vrijednostima koriste se izrazi (jednadžbe) 1 ($C_D < 2$), 2 ($C_D = 2$) ili 3 ($C_D > 2$).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		C_D	omega	omega+	omega-		bezdimezionalno vrijeme	$C_D =$	
2		0.27	0.9908	0.8558	-1.1258			0.27	
3							0	1.0000	
4							0.1	0.9950	
5							0.2	0.9804	
6							0.3	0.9565	
7							0.4	0.9238	
8							0.5	0.8829	
9							0.6	0.8343	
10							0.7	0.7789	
11							0.8	0.7172	
12							0.9	0.6501	
13							1	0.5784	
14							1.1	0.5028	
15							1.2	0.4244	
16							1.3	0.3436	
17							1.4	0.2620	
18							1.5	0.1798	
19							1.6	0.0980	
20							1.7	0.0175	

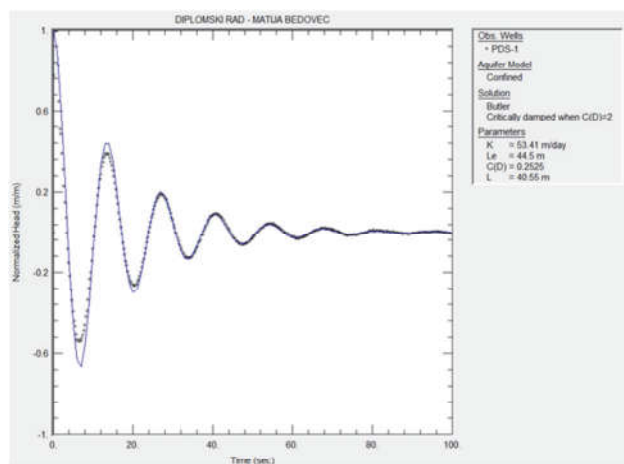
Slika 13. Generator tipске krivulje

Za $C_D=0.27$ tipске krivulje, prema izrazu 3 izračunavaju se normalizirane vrijednosti u funkciji bezdimezionalnog vremena (slika 14.).



Slika 14. Normalizirane vrijednosti za $C_D = 0.27$

Uvažavajući sve upute i nakon unošenja svih potrebnih podataka, softver iscertava krivulju koja predstavlja podatke dobivene izvođenjem Slug testa i njenu pripadajuću normaliziranu vrijednost, za iznos inicijalnog odmaka, u našem slučaju $H_0=0,302$ m, **slika 19**. Za računanje hidrauličke vodljivosti potrebno je odabrati odgovarajuće rješenje koje nudi program AQTESOLV. U ovom slučaju, odabrano je rješenje prema Buttleru. Kao i kod proračuna u Excelu, 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 19**. Kada se krivulje preklope, program izračuna vrijednost hidrauličke vodljivosti (K), koja u ovom slučaju iznosi $K=53,41$ m/dan. Prednost ovog programa je što se iteracije izvode automatski.



Slika 19. Prilagodba teoretske krivulje na podatke

4. REZULTATI MJERENJA

Probno crpljenje zdenca Z-1 na vodocrpilištu "Varaždin", izveo je 2002. godine Građevinski Fakultet - Zavod za hidrotehniku prema Hantushovoj metodi (Urumović et al. 2002). Podaci dobiveni probnim crpljenjem zdenca hidrauličke vodljivosti te vrijednosti dobivene Excel proračunskom tablicom i aplikacijom AQTESOLV dani su u **tablici 1**.

Tablica 1. Rezultati mjerenja

Podaci dobiveni Slug testom		Podaci dobiveni probnim crpljenjem
Excel tablice	AQTESOLV	Građevinski Fakultet
$K=50,90$ m/dan $= 5,9 \times 10^{-4}$ m/s	$K=53,41$ m/dan $= 6,1 \times 10^{-4}$ m/s	$K=74$ m/dan $= 8,5 \times 10^{-4}$ m/s

Kod probnih crpljenja i opažanja sniženja u bunaru i promatranom pijezometru prema raznim autorima te vrijednosti često variraju i u većim granicama.

Za razliku od višednevnih pokusnih crpljenja provedbu i analizu Slug testom moguće je izvesti u 60-tak minuta te

on u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti zaslužuje više pozornosti i praktične upotrebe na terenu.

5. ZAKLJUČAK

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. Ispitivanje hidrauličke vodljivosti Slug testom je relativno brzo, metoda je jednostavna za izvođenje a cijena ispitivanja je prihvatljiva za sve vrste korisnika. Kod Slug testa nisu moguće greške kod mjerenja budući izazvanu oscilaciju mjere sofisticirani pretvornici s uzorkovanjem manjim od sekunde (u našem slučaju 250 ms, sonda od titana). Testovi su ponovljivi te izvođenje Slug testa u istom pijezometru daje uvijek iste rezultate vremena trajanje poremećaja te iste krivulje prigušenja oscilacija podzemne vode. Na pijezometru PDS-1 izvedena su više mjerenja i sva su bila identična. Metoda je verificirana i potvrđena te implementirana u aplikaciji AQTESOLV prije par godina, kao ravnopravna metoda za određivanje parametra za različite vrste vodonosnika u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti. Također treba naglasiti kako za odabrani tip vodonosnika različite aplikacije prema raznim autorima nude više opcija rješenja. Često se tako dobivene vrijednosti hidrauličke vodljivosti razlikuju i više od 50 %, no ako vrijednosti za K izrazimo u m/s (SI sustav) i dobijemo izračune s istim eksponentom, možemo ih smatrati prihvatljivim za inženjersku praksu. U našem slučaju iz tablice 1 svi eksponenti imaju vrijednost $\times 10^{-4}$.

Pijezometar PDS-1 nije čišćen air-liftom više od 10 godina. Kvalitetnim čišćenjem vjerojatnije bi se povećale vrijednosti hidrauličke vodljivosti dobivene Slug testom te samim time i smanjile razlike između vrijednosti K dobivene probnim crpljenjem.

Ovaj rad ima namjeru približiti i prikazati razumljivijim Slug test te pokazati njegovu primjenu kao In-situ test koji za manje zahtjeve može zadovoljiti i kao konačni podatak. Koristeći formule iz ovog članka izrađena je aplikacija i u MS Excelu koja daje rezultate kao i AQTESOLV, ali i kvalitetniji grafički prikaz.

6. LITERATURA

AQTESOLV for Windows, developed by Glenn M. Duffield, HydroSOLVE Inc (2016).

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

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

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

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