

# Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika te međusobnog utjecaja zdenaca na području Studentskog kampusa u Varaždinu

---

Lakušić, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:889325>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MARTIN LAKUŠIĆ

ODREĐIVANJE HIDROGEOLOŠKIH PARAMETARA VODONOSNIKA TE  
MEĐUSOBNOG UTJECAJA ZDENACA NA PODRUČJU STUDENTSKOG  
KAMPUSA U VARAŽDINU

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 15.07.2021. u 9 sati  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 01.07.2021.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

*izr. prof. dr. sc. Sanja Kovač*

#### Članovi povjerenstva

- 1) Prof. dr. sc. Stjepan Strelac
- 2) Dr. sc. Jasmina Jug
- 3) Prof. dr. sc. Ranko Biondić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

ODREĐIVANJE HIDROGEOLOŠKIH PARAMETARA VODONOSNIKA TE  
MEĐUSOBNOG UTJECAJA ZDENACA NA PODRUČJU STUDENTSKOG  
KAMPUSA U VARAŽDINU

KANDIDAT:  
MARTIN LAKUŠIĆ

*Martin Lakušić*

MENTOR:  
PROF.DR.SC. STJEPAN STRELEC

KOMENTOR:  
DR.SC. JASMIN JUG

VARAŽDIN, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: MARTIN LAKUŠIĆ  
Matični broj: 269 - 2019./2020.  
Smjer: UPRAVLJANJE VODAMA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

ODREĐIVANJE HIDROGEOLOŠKIH PARAMETARA VODONOSNIKA TE  
MEĐUSOBNOG UTJECAJA ZDENACA NA PODRUČJU STUDENTSKOG  
KAMPUSA U VARAŽDINU

Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Svojstva tekućine i značajke poroznog medija
3. Gibanje podzemne vode
4. Vodonosnik
5. Zdenac
6. Pokusno crpljenje
7. Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika
8. Primjer projektiranja i izvedbe zdenaca SC-1, SC-2, U-1 i U-2
9. Primjer određivanja hidrogeoloških parametara na temelju pokusnog crpljenja na zdencu SC-2
10. Radijus utjecaja zdenaca na području kampusa u Varaždinu
11. Zaključak

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 08.03.2021.

Rok predaje: 01.07.2021.

Mentor:

Prof.dr.sc. Stjepan Strelec

Drugi mentor/komentor:

Dr.sc. Jasmin Kovač

Predsjednik Odbora za nastavu:

Izvršna prof.dr.sc. Sanja Kovač



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

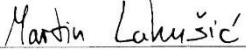
Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika te međusobnog utjecaja zdenaca na području studentskog kampusa u Varaždinu

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

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, 23.06.2021.

Martin Lakušić  
(Ime i prezime)

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

**IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ  
OBJAVLJENIM RADOVIMA**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

**Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika te međusobnog utjecaja zdenaca  
na području studentskog kampusa u Varaždinu**

pregledan anti-plagijatom programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 24.06.2021.

prof.dr.sc. Stjepan Strelec  
(Mentor)

  
(Vlastoručni potpis)

## **Zahvala**

*Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Stjepanu Strelecu na iskazanom povjerenju kod odobrenja teme za diplomski rad, mentorstvu i korisnim savjetima koji su mi učinili pisanje ovog rada lakšim. Posebna zahvala tvrtki SPP d.o.o. na pruženim materijalima i novim iskustvima koji su pridonijeli izradi ovog rada. Zahvala komentoru dr.sc Jasminu Jugu i članu povjerenstva prof.dr.sc. Ranku Biondiću na sugestijama vezanim uz oblikovanje i formiranje rada. Na kraju bih se također zahvalio svojoj obitelji, djevojci i cimerima na razumijevanju, strpljenju i podršci tijekom studiranja.*



## Sažetak

U ovom radu opisan je presjek radova koji su izvedeni na području studentskog kampusa u Varaždinu. Poznavanje teorijske osnove o svojstvima tekućine i značajkama poroznog medija kao što su struktura, tekstura i poroznost te poznavanje općih zakona gibanja podzemnih vode ključne su za razumijevanje hidrogeoloških parametara vodonosnika. Vodonosnik se definira kao porozni medij koji prima, pronosi i daje vodu. Iako se voda nalazi svugdje oko nas, ne možemo do nje doći lako, osim ako se ne radi o površinskim vodama. Radi dobivanja vode iz vodonosnika grade se zdenci, hidrotehničke građevine pomoću kojih crpimo podzemnu vodu. Zdenci na području studentskog kampusa izrađeni su rotacijskom metodom bušenja uz jezgrovanje. Nakon bušenja slijedi proces šljunčanja, tamponiranja, osiguravanja i ugradnje crpke. Ključan proces u dovođenju zdenca u završnu fazu jest osvajanje zdenca koje za cilj ima čišćenje filtra, omotača uključujući šljunčani zasip i samu okolinu zdenca. Pokusno crpljenje se obavlja radi određivanja parametara vodonosnika i zdenca, a same metode pokusnog crpljenja ovise o tipu vodonosnika. Rad daje postupak i rješenja u određivanju hidrogeoloških parametara vodonosnika i parametara zdenca te opisuje utjecaj zdenaca na okoliš tijekom crpljenja podzemne vode stalnom količinom za potrebe studentskog kampusa.

Ključne riječi: vodonosnik, zdenac, pokusno crpljenje, hidrogeološki parametri, utjecaj zdenaca

## **Abstract**

This paper describes a cross-section of works performed in the student campus in Varaždin. Knowledge of the theoretical basis of fluid properties and porous medium characteristics such as structure, texture and porosity and also knowledge of the general laws of groundwater movement are key to understanding the hydrogeological parameters of aquifers. An aquifer is defined as a porous medium that receives, transports, and delivers water. Although water is all around us, it cannot be reached easily except in the case of surface water. In order to obtain water from aquifers, wells are built, hydrotechnical structures with which we pump groundwater. Wells in the student campus area were made by the use of rotary core drilling technology. Drilling is followed by the process of graveling, tamponing, securing and installing the pump. A key process in bringing the well to the final stage is the process of cleaning the well which aims to clean the filter, casing as well as the gravel backfill and the area surrounding the well. Test pumping is performed to determine the parameters of the aquifer and the well, and the methods of testing depend on the type of aquifer. The paper provides procedures and solutions in determining the hydrogeological parameters of aquifers and well parameters and describes the impact of wells on the surrounding environment during the pumping of groundwater in a constant amount for the needs of the student campus.

Key words: aquifer, well, pumping test, hydrogeological parameters, well influence.

## SADRŽAJ

1. Uvod .....	1
2. Svojstva tekućina i značajke poroznog medija .....	2
2.1. Svojstva tekućina.....	2
2.2. Značajke poroznog medija .....	5
3. Gibanje podzemne vode .....	11
3.1. Darcyjev zakon .....	12
4. Vodonosnik.....	15
4.1. Klasifikacija vodonosnika .....	15
4.2. Varaždinski vodonosnik.....	17
4.3. Hidrogeološke značajke Varaždinskog vodonosnika.....	19
4.4. Parametri vodonosnika .....	21
4.5. Metode hidrogeoloških istraživanja vodonosnika .....	22
5. Zdenac .....	25
5.1. Tehnologija izrade zdenca.....	27
5.2. Šljunčanje, tamponiranje, osiguravanje zdenca i ugradnja crpke.....	28
5.3. Osvajanje zdenca.....	28
5.4. Tehnička konstrukcija zdenca .....	31
6. Pokusno crpljenje .....	32
6.1. Projektiranje ulaznog kapaciteta zdenca .....	34
6.2. Specifični kapacitet .....	34
6.3. Jednadžba zdenca .....	35
7. Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika .....	36
7.1. Koeficijent vodopropusnosti (transmisivnosti).....	37
7.2. Hidraulička vodljivost .....	37
7.3. Koeficijent uskladištenja .....	38
8. Primjer projektiranja i izvedbe zdenca SC–1, SC–2, U–1 i U–2 .....	39
8.1. Izrada zdenca .....	39
8.2. Tamponiranje i osiguravanje zdenca .....	44
8.3. Osvajanje zdenca.....	44
8.4. Tehnička konstrukcija zdenca .....	45
8.5. Projektiranje ulaznog kapaciteta zdenca .....	46
8.6. Specifični kapacitet .....	47

8.7. Jednadžba zdenca .....	48
9. Primjer određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika na temelju pokusnog crpljenja zdenca SC-2 .....	52
9.1. Koeficijent vodopropusnosti .....	54
9.2. Hidraulička vodljivost .....	55
9.3. Koeficijent uskladištenja .....	56
10. Radijus utjecaja zdenaca na području studentskog kampusa u Varaždinu .....	57
11. Zaključak.....	59
12. Popis literature.....	60
13. Popis slika .....	62
14. Popis tablica .....	63

## 1. Uvod

Hidrogeološka istraživanja nužna su u vodoopskrbi prilikom projektiranja zdenaca ili cijelih crpilišta. Ova istraživanja rade se u geotehnici kao osnova za sanaciju klizišta, u građevinarstvu i rudarstvu kod odvodnjavanja suvišne vode s gradilišta ili rudnih ležišta u zaštiti okoliša tijekom procjene različitih utjecaja potencijalnih onečišćivača u podzemlju kao i u brojnim drugima granama koje se susreću u svojem radu s vodama. U svrhu hidrogeoloških istraživanja često se koriste već izgrađeni zdenci i piezometri ili se po potrebi buše novi.

Varaždinski vodonosnik ima relativno stabilnu temperaturu podzemne vode tijekom cijele godine, a ona se kreće od 12°C do 15 °C neovisno o godišnjem dobu. Nalazi se na relativno plitkim dubinama u području aluvijalne dravske terase. Istražnim radovima u prvom metru tla identificirani su prašinasto glinasti šljunci, a nakon njih slijede šljunkoviti i šljunkovito-pješčani vodonosni sedimenti. Na lokacijama studentskog kampusa u Varaždinu izvedeni su istražno-eksploatacijski zdenci SC-1 i SC-2 te istražno-upojni zdenci U-1 i U-2 pojedinačne dubine od 18 metara. Navedeni zdenci su izvedeni u otvorenom tipu vodonosnika s brzim otpuštanjem i s velikim koeficijentom propusnosti. Zahvati na ovoj dubini u potpunosti zadovoljavaju godišnje potrebe vode za energetske svrhe (dizalice topline) neovisno o klimatskim prilikama zgrade i okoliša. Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika te parametara zdenca i utjecaj zdenca na sniženje razine podzemne vode provedeno je pokusnim crpljenjem na jednom od istražno-eksploatacijskih zdenaca. Probno crpljenje izvedeno je centrifugalnom motornom pumpom maksimalnog crpnog kapaciteta  $q=25$  l/s. Ostvareni rezultati ovog hidrogeološkog istraživanja prikazani su u nastavku rada.

## 2. Svojstva tekućina i značajke poroznog medija

Za razumijevanje hidrološkog ciklusa kruženja vode u prirodi i njen transport u vodonosnik potrebno je poznavati uvjete i osnovna svojstva tekućine (vode) i poroznog medija. Osnovna svojstva tekućine su gustoća koja ovisi o temperaturi, sile u tekućini (masene i površinske), stlačivost, viskoznost i površinska napetost. Uz specifičnu površinu, efektivno naprezanje i koeficijent stlačivosti, osnovne značajke poroznog medija koje su obrađene u ovom radu su struktura i tekstura poroznog medija te ukupna i efektivna poroznost.

### 2.1. Svojstva tekućina

Tekućina ili fluid je tvar koja se zbog djelovanja posmičnog naprezanja neprekidno deformira, a ta neprekidna deformacija je fenomen koji se naziva strujanje tekućine. Tekućine neznatno mijenjaju svoj obujam i s toga ih nazivamo nestlačivim. Kohezija u tekućinama odnosno sila između čestica iste tvari je slaba, ali dovoljna da ih održi grupiranima [1].

Relativna gustoća tekućine je bezdimenzionalno svojstvo svake tekućine definirano kao omjer gustoće  $\rho$  i gustoće  $\rho_0$  standardne tekućine. Pod standardnim fluidom se najčešće koristi destilirana voda temperature 4°C, a pri tome gustoća  $\rho_0$  iznosi 1000 kg/m<sup>3</sup>.

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_0}$$

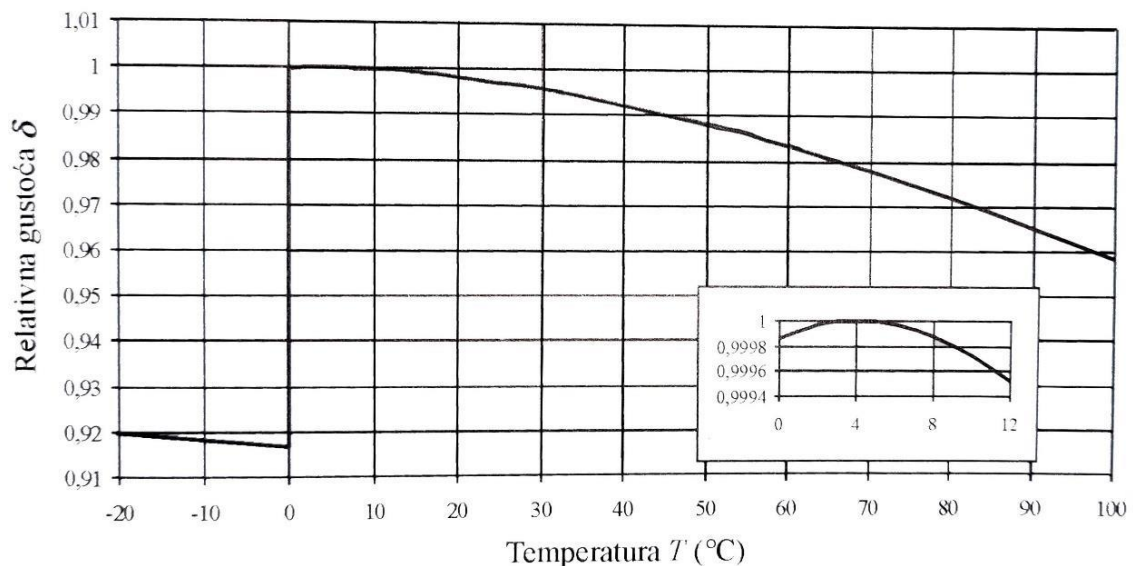
Gustoća tekućine ovisi o tlaku  $p$  i temperaturi  $T$  prema jednadžbama stanja:

$$\rho = (p, T) \text{ ili } f(\rho, p, T)$$

Tablica 1. Relativna gustoća nekih tekućina [1].

Tekućina	Slatka voda	Morska voda	Rasoli i teška nafta	Laka nafta	Zemni plin	Benzin	Glicerin
Relativna gustoća $\delta$	1.00	1.027	1.14	0.79-0.90	0.40	0.68-0.72	1.26

Poznato je da gustoća kapljevine neznatno opada s padom tlaka i porastom temperature. Izuzetak je anomalija vode koja svoju najveću gustoću postiže pri temperaturi od 4°C što prikazuje Slika 1. Daljnjim hlađenjem voda povećava svoj volumen, a time joj se i smanjuje gustoća u prosjeku za 8.3%.



Slika 1. Relativna gustoća vode u funkciji temperature (pri atmosferskom tlaku) [1].

Prema načinu djelovanja, sile koje djeluju na tekućinu mogu se svrstati u dvije kategorije: masene i površinske sile. Masene ili volumenske sile su one sile koje djeluju na masu svake pojedinačne čestice fluida. One su posljedica položaja mase u određenom polju sila i pojavljuju se bez ikakvih fizičkih uznemiravanja pa su zbog toga dobila naziv vanjske sile. U masene odnosno vanjske sile spadaju sila teža i

inerzijska sila. Površinske sile su sile dodira između susjednih čestica fluida ili između čestica fluida i krute stijene koju dodiruje [1].

Stlačivost ili kompresibilnost je sljedeće svojstvo tekućina a odnosi se na promjenu volumena zbog promjene tlaka. Kompresibilnost se izražava koeficijentom stlačivosti (koeficijent volumne dilatacija)  $\beta$ . U uvjetima stalne temperature vrijedi izraz za koeficijent stlačivosti:

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \left[ \frac{ms^2}{kg} \right].$$

Gustoća vode ovisi o temperaturi i tlaku. Postoje dva oblika stlačivosti fluida: jedna kao posljedica promjene temperature (pri stalnom tlaku) i druga kao posljedica promjene tlaka u izotermnim uvjetima. Stlačivost u izobarskim (uvjeti pri stalnom tlaku (p)) uvjetima glasi:  $\beta_t = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$  i naziva se koeficijent termalne ekspanzije [1].

Još jedno bitno svojstvo tekućina jest viskoznost koja se definira kao svojstvo opiranja tekućine posmičnoj deformaciji. Posmično naprezanje u tekućinama izaziva njihovu kontinuiranu deformaciju koja se izražava u obliku strujanja. Kada ne bi postojao otpor tekućine, male veličine posmičnog naprezanja bi izazvale velike brzine. Kako su brzine toka konačne tako i postoji otpor u tekućini. Sila trenja u tekućinama uzrokuje povlačenje slojeva tekućine jedan za drugim, a međusobno povlačenje i kočenje obližnjih slojeva tekućine u toku održava stalan raspored brzina toka te izaziva trenje između susjednih slojeva koji imaju različite brzine [1].

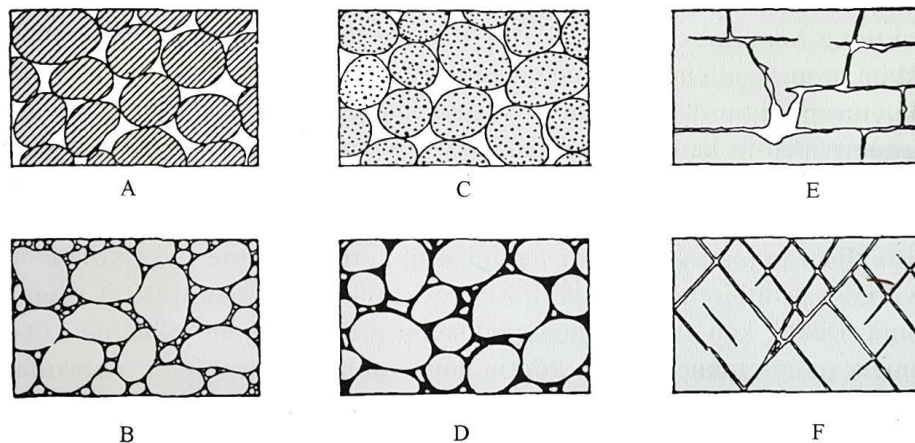
Pojava koja je karakteristična za dodirnu plohu tekućina i plinova jest površinska napetost. Na dodirnoj plohi kapljevina se ponaša kao da je prekrivena elastičnom membranom koja je u stalnoj napetosti s potrebom smanjenja dodirne površine. Djelovanjem međumolekularnih sila na dodirnoj površini nastaje površinska napetost. U unutrašnjosti nekog fluida svaka molekula je okružena istovrsnim molekulama, a posljedica toga je ravnoteža međumolekularnih sila. S druge strane, na razdjelnoj plohi između dvije tekućine molekule su samo na jednoj strani okružene istovrsnim molekulama, dok su s druge strane okružene



molekulama onog fluida s kojim su u dodiru preko te plohe. Rezultat toga je razlika u energiji molekula na dodirnoj plohi i u unutrašnjosti fluida [1].

## 2.2. Značajke poroznog medija

Jedna od najbitnijih hidrogeoloških značajki stijena je poroznost. Postojanje šupljina je osnovni uvjet za formiranje podzemnih voda dok je onaj drugi uvjet dostupnost vode i obujam sadržane vode ili neke druge tekućine dok veličina, oblik i međusobna povezanost šupljina omogućavaju cirkulaciju podzemne vode. Prema podrijetlu, šupljine ili pore dijele se na primarne i sekundarne. Primarne pore su nastale istovremeno sa stijenom u obliku zaostale šupljine između istaloženih zrna pa se zbog toga zovu međuzrnske ili intergranularne pore. Sekundarne pore nastaju nakon što se formira stijena. Neke sekundarne pore nastaju pucanjem stijene i nazivaju se još pukotinske pore, a druge otapanjem stijena i nazivaju se disolucijske pore. Velika raznolikost stijena koje tvore Zemljinu koru rezultira i velikom raznolikosti šupljina koje grade otvoreni međuzrnski prostor u stijenama (Slika 2.). Šupljine u stijenama nazivaju se porni ili šuplji prostor [1].

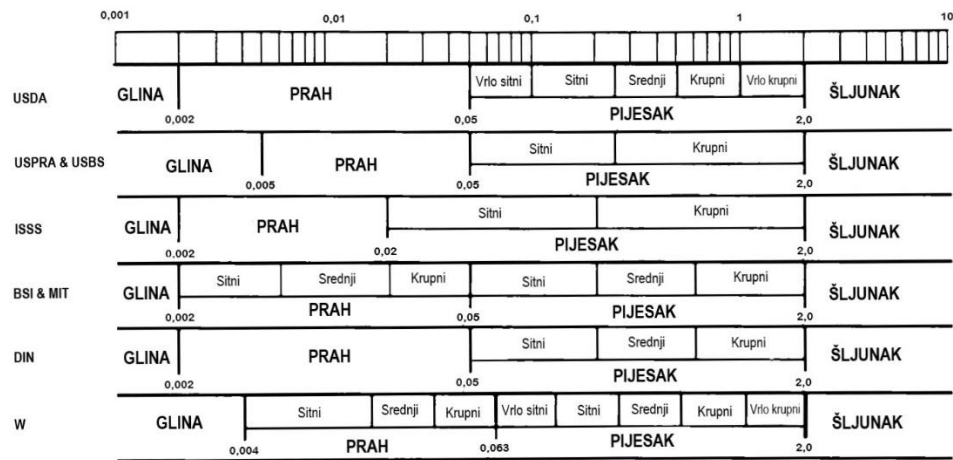


Slika 2. Shematski prikaz osnovnih tipova pora u stijenama [1].

Na Slici 2. dobro sortirani sedimentni nanos visoke poroznosti je prikazan s A dok dio slike označen slovom B prikazuje slabo sortirani sedimentni nanos male

poroznosti, prikaz C je dobro sortirani sedimentni nanos kojem porozne valutacije bitno povećavaju poroznost. D predstavlja dobro sortirani sedimentni nanos kojemu je poroznost umanjena ulaskom mineralnih materijala u međuprostore. Poroznost stijene nastala otapanjem prikazana je na dijelu slike označenim sa slovom D, a prikaz F predstavlja poroznost nastala lomljenjem.

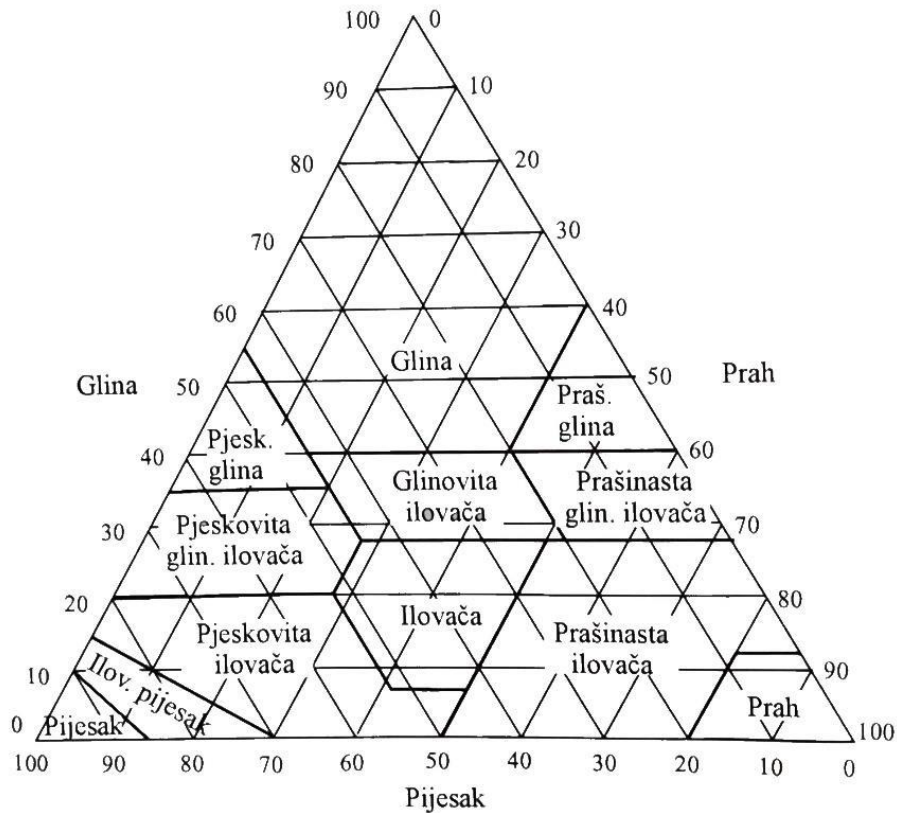
Pod teksturom poroznog medija podrazumijevaju se njegove geometrijske značajke. U slučaju pukotinskih stijena to se odnosi na raspodjelu i veličinu pukotina, a kod zrnatih stijena ili nekonsolidiranih stijena se promatra veličina i raspodjela pojedinih zrna o kojima ovisi veličina, njihov udjel u ukupnom obujmu stijena te ostala obilježja pora. U vezanim stijenama pore prvenstveno ovise o veličini i raspodjelu pojedinačnih frakcija stijene. Prema osnovnim klasifikacijama nekonsolidiranih sedimentnih stijena, polazeći od najsitnijih prema krupnijima, razlikujemo glinu, prah, pijesak i šljunak (Slika 3.).



Slika 3. Klasifikacija nekonsolidiranih sedimenata prema promjeru zrna [1].

Za šljunak i pijesak, prihvaćena je granica od 2.0 mm dok je za gline i prah u većini klasifikacija granična vrijednost jednaka 0.002 mm. U hidrogeologiji, kao i u brojnim znanostima o tlu, najraširenija je upotreba klasifikacije prema International Society of Soil Science (ISSS) i prema U.S. Department of Agriculture (USDA), dok se u sedimentologiji i petrologiji rabi Wentworthova skala (Slika 3.). Klasifikacija tla i

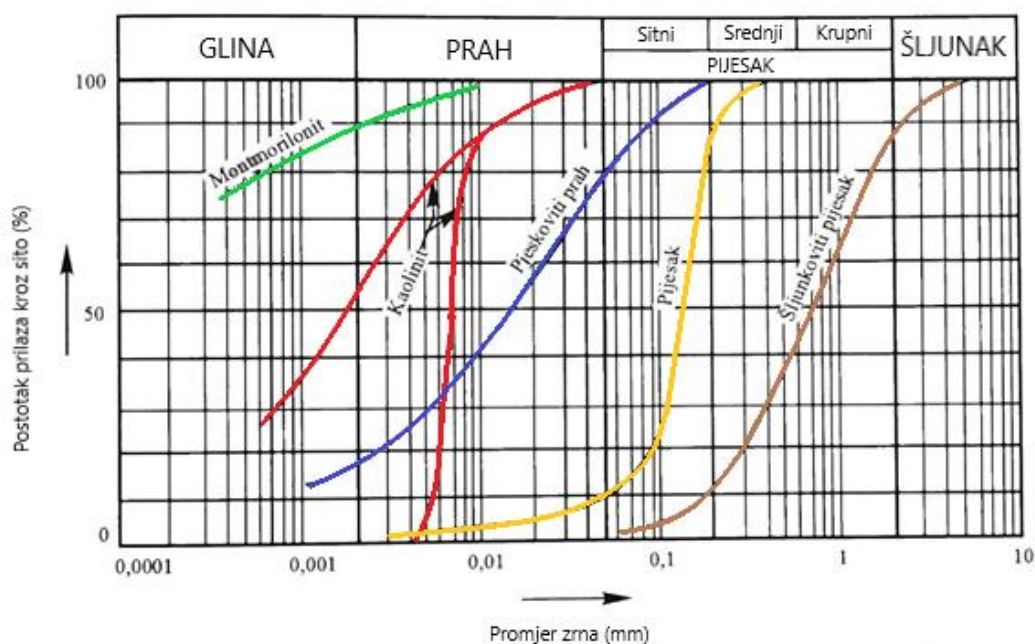
njegova strukturna grafička predodžba posebno je 7 izražena kod mješavine sitnozrnatih tvari jer se njihova svojstva mijenjaju ovisno o sadržaju čestica različite veličine, oblika i sastava. Tada se za klasifikaciju koristi trokutasti dijagram (Slika 4.) s prikazom udjela sadržaja pijeska, praha i gline [1].



Slika 4. Klasifikacija i nomenklatura sitnozrnatih sedimenata s obzirom na postotak gline, praha i pijeska [1].

Za probleme, pojave i ponašanja fluida u sitnoklastičnim naslagama najprimjereniji je dijagram prema U.S. Soil Conservation Service-u. On je prikladan za jednostavan prikaz osnovnih karakteristika sitnoklastičnih materijala, a u istraživanju tla na temelju takvog prikaza dobivaju se osnovne informacije za kvalitativnu i kvantitativnu procjenu fizikalnih svojstava tla.

Kumulativnom granulometrijskom krivuljom (Slika 5.) prikazuje se raspored zasebnih zrna u širokom intervalu veličina. Takav dijagram konstruira se unošenjem veličine otvora na situ za prosijavanje u logaritamskom mjerilu (na apscisu) i težinskog postotka uzorka koji je prošao kroz sito određenog promjera (na ordinatu). Dobiveni oblik krivulje jasno prikazuje sastav analiziranih naslaga i ovakva krivulja je prikladna za određivanje mnogih granulometrijskih parametara pogotovo u nekoherentnim tlima. U slučaju kada je tlo sastavljeno od zrna gotovo istog promjera - krivulja će biti strma, tada je njegov sastav jednoličan ili dobro saturiran. Kada su zrna različite veličine podjednako prisutna u uzorku, tada je krivulja blaže nagnuta, materijal je dobro graduiran.



Slika 5. Granulometrijske krivulje za određene tipove tla [1].

Poroznost medija povezuje se s nazočnosti vode u porama, gibanjem vode i sadržanih spojeva, dreniranjem vode kroz pore i drugo. Sve pore ne sudjeluju u navedenim događajima, a pogotovo ne na isti način. Zbog toga postoji ukupna

poroznost, efektivna poroznost i specifično davanje stijene. Ukupna ili apsolutna poroznost definira se odnosom obujma prostora svih pora mjerenog uzorka i ukupnog obujma  $V$  mjerenog uzorka:

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_k}{V},$$

gdje  $V_k$  predstavlja obujam krutih čestica tla unutar cjelokupnog obujma stijene ( $V$ ). Efektivna poroznost ( $n_e$ ) odnosi se samo na onaj dio obujma ( $V_p$ ) $_e$  u kojemu su pore međusobno vezane, a voda koja se nalazi u njima može sudjelovati u toku i stoga vrijedi:

$$n_e = \frac{(V_p)_e}{V}, (V_p)_e + (V_p)_{ne} = V_p,$$

gdje  $(V_p)_{ne}$  predstavlja neefektivni šuplji prostor odnosno volumen s nepovezanim porama. Izraz efektivna poroznost često se poistovjećuje s pojmom specifičnog davanja stijene (eng. specific yield) koja izražava drenažna svojstva stijene [2].

U stručnoj literaturi česta je definicija efektivne poroznosti  $n_e$  u smislu ocjeditih pora, odnosno iznos količine vode koja se dobije iz uzorka stijene određenog volumena nakon dugotrajnog gravitacijskog isušivanja. Porozna svojstva stijene često se iskazuju i kao porni odnos, porni indeks ili koeficijent pora koji predstavlja omjer volumena pora i volumena krutih čestica u uzorku:

$$e = \frac{V_p}{V_k} = \frac{n}{1-n}; n = \frac{e}{1+e}; V_p = \frac{e}{1+e} \cdot V; V_k = \frac{1}{1+e} \cdot V.$$

Općenito je veća poroznost nekog krupnozrnatog materijala nego krupnozrnatih klastičnih materijala. Stoga je ukupna poroznost gline daleko veća od poroznosti šljunka (Tablica 2.), ali pore u glini su toliko uske da je voda u njima vezana intermolekularnim silama [2].

Propusnost stijene prvenstveno ovisi o veličini pora i površini krutih čestica, a obujam tekućine u njoj ovisi o poroznosti. Također, važan učinak na poroznost ima zbijenost, konsolidiranost i cementiranost naslaga. Mnogi primjeri nam ukazuju na opadanje poroznosti naslaga s dubinom zalijeganja, prvenstveno zbog konsolidacije

a potom i porasta naprezanja. Utjecaj konsolidacije posebno je izražen u šejlu i glini [1].

Tablica 2. Vrijednost poroznosti za pojedine vrste stijena [1].

Poluvezane i nevezane stijene	Poroznost $n$ (%)	Čvrste stijene	Poroznost $n$ (%)
Tresetno tlo	60-80	Pješčenjak	5-30
Humus	50-60	Šejl	0-10
Glina	35-70	Vapnenac	1-10
Prah	34-61	Vapnenac i dolomit	0-20
Pijesak jednolični	26-50	Okršeni vapnenac	5-50
Pijesak miješani	25-53	Izlomljeni bazalt	0-50
Šljunak	24-40	Izlomljene metamorfne stijene	0-10
Šljunak i pijesak	16-35	Guste metamorfne stijene	0-5

### 3. Gibanje podzemne vode

Gledajući način gibanja čestica tekućine tok može biti laminaran ili turbulentan s obzirom na pravilnost staze gibanja pojedinačnih čestica, jednolik ili nejednolik s obzirom na promjenu hidrauličkog gradijenta duž staze čestica, te ustaljen ili stacionaran ili neustaljen ili nestacionaran s obzirom na kolebanje brzine u vremenu. Pri laminarnom toku svaka čestica fluida putuje duž točno određene staze čestica koja se nikad ne siječe sa stazom neke druge čestice. Kod laminarnog strujanja srednja brzina proporcionalna je hidrauličkom gradijentu. U vrtložnom ili turbulentnom toku staze su nepravilne, međusobno se presijecaju i mijenjaju u vremenu pa imaju kaotičan i nejasan izgled.

Ove dvije vrste toka prvi je otkrio britanski fizičar i izumitelj Osborne Reynolds 1883. godine. Izvodio je pokus u kojemu je ubrizgavao boju i oblikovao vlaknaste struje obojene tekućine u širokoj staklenoj cijevi kroz koju je protjecala voda. Pri malim brzinama toka, niti obojenih staza čestica bile su paralelne, a brzina toka linearno se mijenjala s gubitkom piezometarske razine duž toka vode kroz staklenu cijev. Kada je brzina strujanja porasla iznad nekog iznosa tok se promijenio. Staze su postajale sve vrtložastije, a zatim su se lomile i međusobno presijecale u brojnim vrtlozima. Točka u kojoj strujanje prelazi iz laminarnog u turbulentno zove se gornja kritična točka i odgovara kritičnoj brzini  $v_c$  nakon koje strujanje prestaje biti laminarno. Gibanje podzemnih voda u pravilu se odvija pri malim brzinama pa je strujanja u pravilu laminarno. Primjeri izuzetaka u ovom slučaju su kretanje podzemnih voda u pukotinama i kavernama krških vodonosnika. Pri jednolikom strujanju, brzina čestice koja je u gibanje ne mijenja se duž puta, a pri nejednolikom strujanju brzina strujanja se kontinuirano mijenja. Ako u nekoj točki područja toka brzina gibanja čestica tekućine ostaje stalna kroz cijelo vrijeme promatranja, tada se kaže da je tok ustaljen. Kod stacionarnog toka, razina podzemne vode se ne mijenja, no ta ravnoteža može biti narušena prirodnim ili umjetnim čimbenicima (gubitci vode uslijed evapotranspiracije, crpljenje na vodoopskrbnom zdencu i drugi čimbenici). Takve okolnosti koje dovode do narušavanja ravnoteže uzrokuju neustaljen ili

nestacionaran tok. Pri takvom toku, brzine u nekoj točki vremenski se mijenjaju, kako po veličini tako i po pravcu [1].

### 3.1. Darcyjev zakon

Francuski inženjer Henry Darcy je izveo prvi znanstveni eksperiment strujanja vode kroz porozni medij 1856. godine [1]. U ovom zakonu se podrazumijevaju dvije stavke:

- Zamišljena brzina koju nazivamo Darcyevom brzinom odnosno prividnom brzinom toka kroz presjek poroznog materijala, a ne realna brzina strujanja čestica fluida između zrna.
- Za promatrani uzorak uzima se srednja hidraulička vodljivost, a ne lokalna hidraulička vodljivost i brzine.

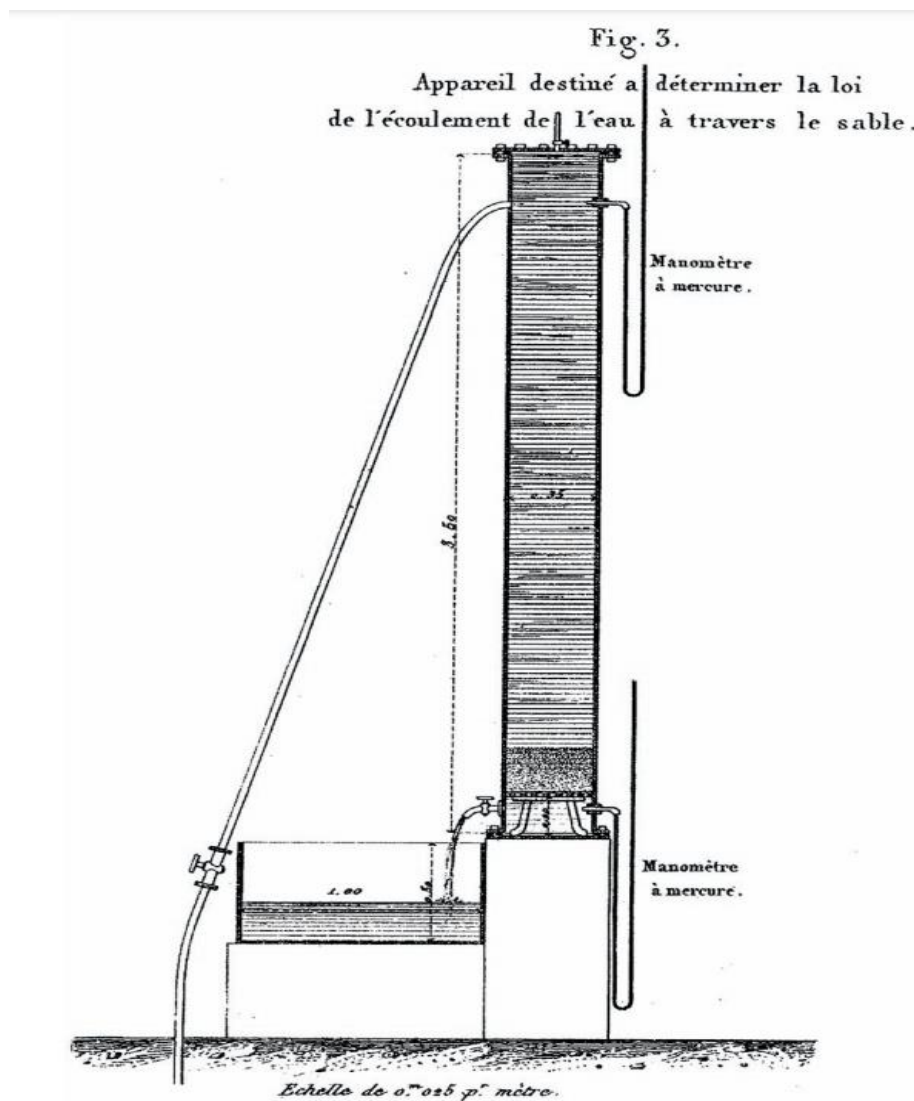
Darcy je u svojem eksperimentu upotrijebio cilindričnu cijev ispunjenu pijeskom, ona je dopuštala jedino mjerenje rezultirajućih hidrauličkih vrijednosti na ulazu i izlazu iz posude ispunjene medijem. Točnije, aparat (Slika 6.) se sastojao od željezne cijevi koja je imala unutarnji promjer 350 mm i dužinu 3.5 m. Cijev je ispunjena pijeskom do visina I kojeg je na donjoj strani držalo sito postavljeno na 0.2 m iznad dna cijevi. Darcy je vodu dovodio kroz cijev priključenu na vrh vertikalne kolone pijeska, a istjecala je kroz slavinu ugrađenu ispod horizontalnoga sita odnosno kroz donji dio cijevi ispunjene samo vodom. Tlak je mjerio živinim tlakomjerom. Gornji tlakomjer je bio ugrađen u visini dotjecanja vode u aparat, a donji u visini slavine. Svaka serija mjerenja imala je drugačiju vrstu pijeska, a količina vode regulirala se ulaznim i izlaznim ventilom. Pri svakoj količini protjecanja mjerilo se pad piezometarske razine prema opažanjima na manometrima. Rezultati Darcyevog pokusa s vertikalnim strujanjem izražavaju se odnosom:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{h_1 - h_2}{l} = -K \cdot A \cdot \frac{h_2 - h_1}{l},$$



odnosno izražavanjem obujma vode koje protječe jediničnom površinom tj. brzinom filtracije:

$$\frac{Q}{A} = q = K \cdot \frac{h_1 - h_2}{l} = -K \cdot \frac{h_2 - h_1}{l}.$$



Slika 6. Shematski prikaz Darcyevog eksperimentalnog aparata [3].

U gore navedenom izrazu K je faktor proporcionalnosti koji ovisi o propusnosti sloja, A je površina presjeka, l duljina kolone pijeska ili duljina toka kroz pijesak, a  $h_1$  i  $h_2$

razine vode. Ako gore navedeni izraz napišemo u diferencijalnom obliku dobit ćemo sljedeće:

$$q = -K \cdot \frac{dh}{dl} = K \cdot J.$$

Posljednje dvije jednadžbe predstavljaju Darcyev zakon. Prividna ili Darcyeva brzina u poroznom mediju označena je s  $q$ . Ona se odnosi na ukupni jedinični obujam poroznog medija s toga je u literaturi raširen i pojam efektivne brzine:

$$v_e = \frac{q}{n_e},$$

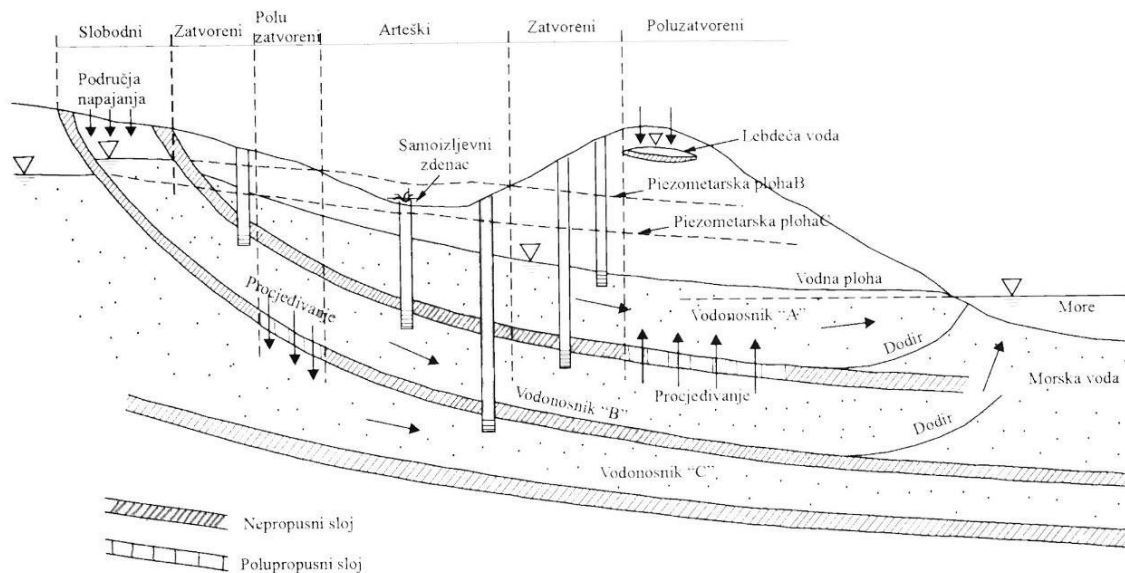
ona se još naziva i stvarnom brzinom. Darcyev eksperiment imao je iznimno empirijski smisao, sama činjenica da su odnosi u Darcyevom zakonu ostvareni eksperimentalnim načinom, uz višestruka ponavljanja, dokazuje se stvarna fizikalna pojava pri strujanju u uvjetima u kojima su izvedeni pokusi. Kasnijim analizama brojni znanstvenici i inženjeri su na više načina potvrdili smisao Darcyevog zakona te doveli do spoznaje da je Darcyev zakon u teoriji hidrauličkog strujanja kroz porozni medij sličan Ohmovom zakonu o vodljivosti elektriciteta i Fourierovom zakonu o prenošenju topline [3].

## **4. Vodonosnik**

Pod pojmom vodonosnika smatra se porozni medij koji prima, pronosi i daje vodu. Neki materijali poput gline mogu povećati ili smanjiti svoj obujam s obzirom na prisutnost vode. Medij, odnosno stijene zemljine kore koje sačinjavaju vodonosnik, mogu se prema litološkoj građi podijeliti na: čvrste stijene, koje obuhvaćaju eruptivne, metamorfne, organske i sedimentne (kemijski sedimenti i vezani klastični sedimenti), poluvezane u koje se ubrajaju gline, prapor i les te na nevezane stijene poput pijeska i šljunka koje čine konsolidirane vodonosnike. Jedna od važnijih značajki stijena je da mogu sadržavati i propuštati podzemnu vodu (poroznost i propusnost). Vrijednosti poroznosti i propusnosti se mijenjaju s obzirom na njihov tip i geološki razvoj tijekom prošlosti. Zbog toga nije neobično da se njihove vrijednost mijenjaju s dubinom [4].

### **4.1. Klasifikacija vodonosnika**

Vodonosnici se dijele prema svojim karakteristikama u vertikalnom presjeku, neovisno što se te karakteristike mogu mijenjati u prostoru. Promatrajući pojavu prisutnosti ili neprisutnosti vodne plohe, vodonosnici se dijele na otvorene i zatvorene vodonosnike (Slika 7.). Vodonosnici čiju krovinu čini vodna ploha nazivaju se vodonosnicima otvorenog tipa. Njihova krovina se proteže od nepropusnog sloja do vodene plohe. Propusni slojevi koji su u krovini omeđeni relativno nepropusnim stijenama i potpuno ispunjeni vodom od podine do krovine predstavljaju zatvorene vodonosnike. Činjenica da relativna nepropusnost omeđujućih naslaga nije apsolutna i potreba da se u klasifikaciju uključi i manifestacija procjeđivanja kroz polupropusne slojeve dovodi do nastanka nove vrste vodonosnika koja se naziva poluzatvoreni vodonosnik [1].



Slika 7. Shematski prikaz klasifikacije vodonosnika [1].

Otvoreni ili nezatvoreni vodonosnik na svojoj krovini je omeđen vodnom plohom koja predstavlja slobodnu plohu vode u porama. S obzirom da je tlak vode na slobodnoj plohi jednak atmosferskom tlaku, taj se vodonosnik još naziva i slobodnim vodonosnikom. Takav je vodonosnik izložen atmosferi i infiltraciji vode s površine terena. Ako je sloj u podini otvorenog vodonosnika otvorenog tipa polupropusan, onda se on naziva procjedni otvoreni vodonosnik ili otvoreni vodonosnik s polupropusnom podinom. Zasebna vrsta otvorenog vodonosnika je lebdeći vodonosnik, koji nastaje kada se u ozračenom pojasu iznad otvorenog vodonosnika pojavi polupropusni ili nepropusni sloj u obliku leće. Iznad takve leće se povremeno formiraju otvoreni vodonosnik iz kojega se višak vode prelijeva u vodonosnik ispod njega i na taj način ga povremeno prihranjuje. Obično se to radi o povremenom natopljenom dijelu poroznog medija npr. tijekom vlažne sezone ili tijekom samog procesa infiltracije padalina, no on može biti i trajna pojava. Zatvoreni vodonosnik je potpuno zasićen propusni sloj smješten između nepropusnih stijena. Voda koja se nalazi u takvom vodonosniku je pod stalnim tlakom, koji je veći od atmosferskog. Ako voda ima dovoljno velik tlak, tada će ona izvirati iz bušotine, a takvu bušotinu u zatvorenom vodonosniku nazivamo izljevnost ili arteški zdenac.

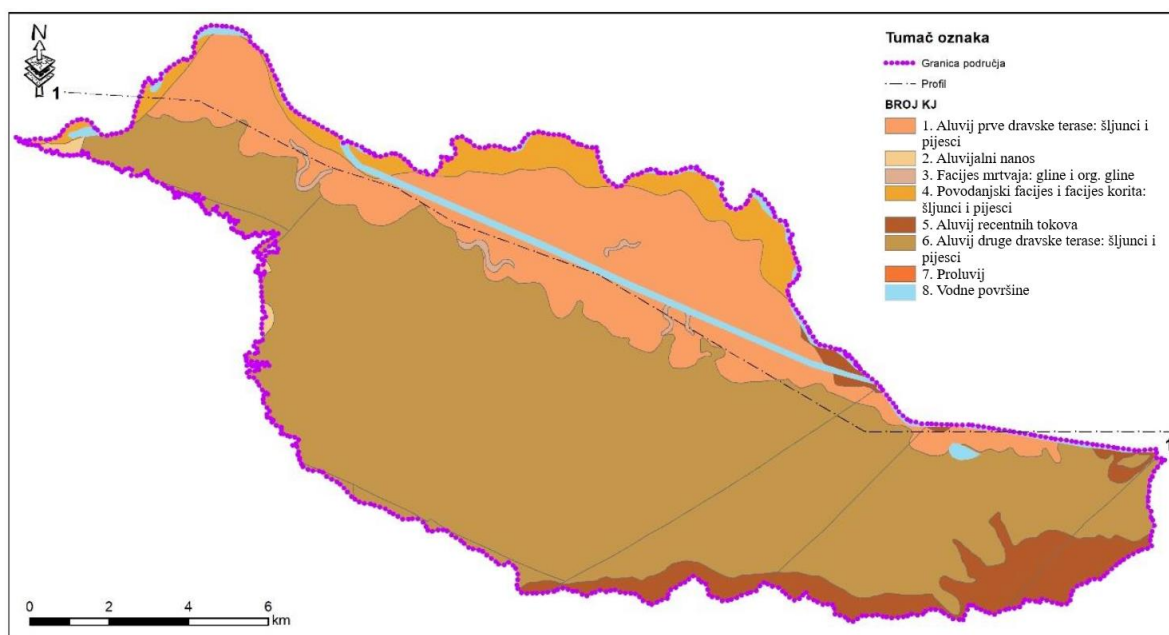
Opažačka bušotina u koju je ugrađena cijev sa sitom na dnu naziva se piezometar, a visina vode u njemu pokazuje piezometarsku razinu u vodonosniku. Ako je krovinski sloj nepropusan, a istovremeno se izdiže iznad piezometarske razine takav vodonosnik postaje otvoren. Ako uz to i još i propusni sloj izlazi na površinu terena tada je to područje napajanja zatvorenog vodonosnika. Poluzatvoreni vodonosnik je podvrsta zatvorenog vodonosnika. U pravilu je to zatvoreni vodonosnik s polupropusnim slojem u krovini ili podini ili u oba sloja [4].

## **4.2. Varaždinski vodonosnik**

Vodonosnik na kojemu leži grad Varaždin nalazi se na rubnom zapadnom dijelu heterogenih kvartarnih naslaga dravske doline te je on rubni dio u kojemu je prirodni režim podzemnih voda narušen izgradnjom protočnih hidroenergetskih objekata i eksploatacijom vode za vodoopskrbu [6]. Ovaj aluvijalni vodonosnik se prostire u nizinskom području koje je omeđeno na sjeveru brežuljcima gornjeg Međimurja, na zapadu Viničkim vinogorjem, a južno je omeđen Varaždinskotopličkim gorjem. Za vodoopskrbu Varaždinske županije koriste se podzemne vode dravske doline i dijelom izvorišta vodonosnika Ivančice i Ravne gore. Promatrajući količinu i kakvoću vode ovog vodonosnika, može se reći da zalihe vode pokrivaju trenutne i buduće potreba, no kvaliteta nije svugdje jednaka [7]. Stanje kakvoće podzemne vode određeno je načinom sedimentacije naslaga i debljinom slabo propusnih pokrovnih naslaga iznad vodonosnika. Na zapadnom dijelu vodonosnik je prekriven relativno tankim prašinasto-glinovitim naslagama debljine manje od 5 metara (na nekim mjestima je to samo humus) što rezultira velikom prirodnom ranjivosti varaždinskog vodonosnika. Zbog tankog sloja prašinasto-glinovitih naslaga u prvom sloju vodonosnika, na ponekim lokacijama je povećana koncentracija nitrata kao posljedica intenzivne poljoprivrede koja je učestala na području ove županije [8].

Varaždinski vodonosnik je većinom izgrađen od šljunka i pijeska srednje i gornjopleistocenske, te holocenske starosti. Na području između Križovljana i

Ormoža njegova debljina je najmanja. Uz sjeverni rubni rasjed (kod Ormoškog mosta) debljina mu je oko 5 m, a prema jugu raste do preko 15 m uz južni rub. Prema istoku debljina se postupno povećava te se kod Svibovca (hidroelektrana Varaždin) kreće oko 30 m, kod Nedelišća prosječna debljina je 40 m, sjeverozapadno od Varaždina je ona oko 60 m, jugoistočno od hidroelektrane Čakovec premašuje 112 m, a južno od Preloga 150 m. Zatim se debljina nizvodno od Svete Marije (hidroelektrana Dubrava) smanjuje na 60 m, kod Legradskog praga ona iznosi 50 m, a uz sjeverni rub kod današnjeg korita Legrada iznosi 14 m dok je kod Đelekovca 12 m [9].



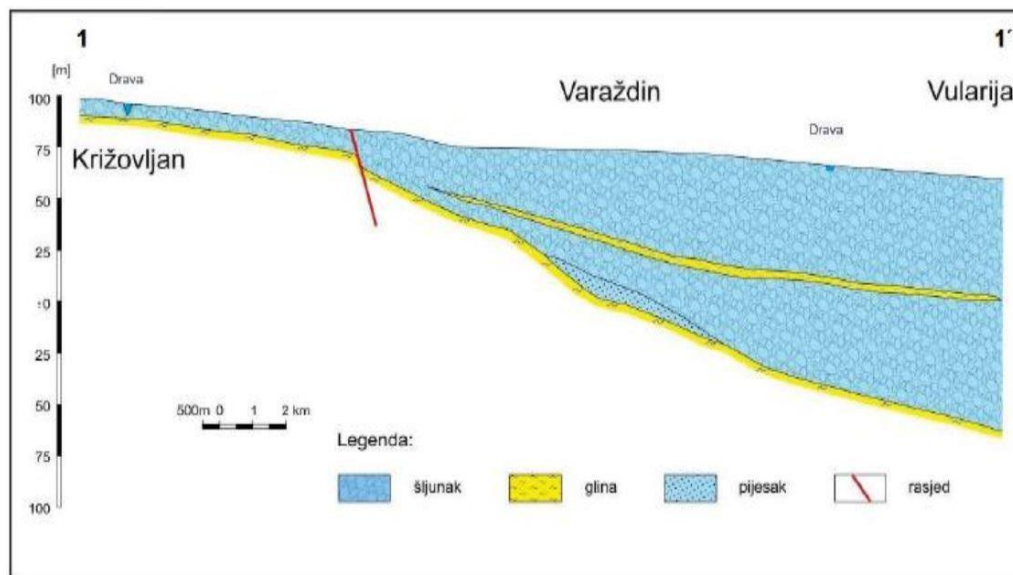
Slika 8. Geološka karta Varaždinskog vodonosnika [10].

Prema oznakama na legendi slike 8. kartografska oznaka 1 predstavlja aluvij prve dravske terase (pijesci i šljunci) koji su debljine od 0,5-4,0 m, većinom sastavljeni od metamorfni i eruptivni stijena. Broj dva predstavlja aluvijalni nanos koju se uglavnom sastoji od glinovito-siltnih i pješčanih materijala koji se miješaju sa šljunkom. Treća oznaka po redu predstavlja gline i organske gline debljine u prosjeku 1-2 metra. Broj 4 označava povodanjski facijes i facijes korita izgrađen od šljunka i pijeska, a broj 5 na legendi predstavlja aluvij recentnih tokova kojem je glavna vrsta stijena silt u kojemu su primjese pijeska između 14- 42% i gline 5-20%.

Aluvij druge dravske terase kojeg sačinjavaju pijesci i šljunci prikazan je brojem 6 dok broj 7 predstavlja proluvij debljine između 10-120 metara sačinjen od stijena kvarca, muskovita i feldspata [12,13].

### 4.3. Hidrogeološke značajke Varaždinskog vodonosnika

Visoka propusnost šljunka i povećanje debljine naslaga sa zapada prema istoku su osnovne karakteristike Varaždinskog vodonosnika. Varaždinski vodonosnik (Slika 9.) sačinjavaju dva vodonosna sloja međusobno odvojena slabopropusnim slojem.



Slika 9. Uzdužni litološki profil varaždinskog vodonosnika od Križovljana preko Varaždina do Vularija [6].

Šljunkovito - pjeskovite naslage dominiraju u prvom vodonosnom sloju koje se prostire do dubine od 27 metara na području Vinokovščaka. Krećući se zapadno taj se sloj istanjuje do dubine od 20 metara, a gledajući prema jugoistoku doseže debljinu od 32 metra. Prvi vodonosni sloj na području Varaždinskog crpilišta proteže se do dubine od 42 metra. Prema zapadu se sloj istanjuje, kod Nove Vesi Petrijanečke on je oko 18 metara, a kod Šijanca oko 19 metara. Na prostoru

Bartolovca zabilježene su dubine od 52 metra prvog vodonosnog sloja. Na istom području vrijednosti hidrauličke vodljivosti iznose 300 m/dan [9].

Slabopropusni sloj sastavljen od prašinastog pijeska, praha i gline na dubini od oko 20 metara počinje kod Svibovca te prema istoku tone do dubine od 42-55 metara na području grada Varaždina. Debljina ovog graničnog slabopropusnog sloja je oko 5 metara, a na području Petrijanca ovaj sloj uklinjuje. Riječ je o značajnom diskontinuitetu uvjeta taloženja, polupropusnom sloju koji dijeli vodonosnik na dva vodonosna sloja [6]. Za potrebe Hidroelektrane Čakovec i Dubrava izmjerena je vrijednost hidrauličke vodljivosti koja iznosi od  $10^{-4}$  do  $10^{-4}$  m/dan [9].

Drugi vodonosni sloj sastoji se od sličnog materijala kao prvi no razlikuju se po udjelu sitnozrnatog materijala koji prevladava u ovom sloju. Dubina ovog sloja na Varaždinskom vodocrpilištu je između 46 - 64 metara. Na području Varaždina prosječna vrijednost hidrauličke vodljivosti u drugom vodonosnom sloju određena je pokusnim crpljenjem i iznosi 90 m/dan, veličina transmisivnosti je 1440 m<sup>2</sup>/dan, a koeficijent uskladištenja oko  $1,9 \times 10^{-5}$  [9].

Krovinu Varaždinskog vodonosnika čini humus s pjeskovito-prašinasto-glinovitim naslagama čija je debljina u rasponu od 0,3 – 2,0 metra. Podina ovog vodonosnika se sastoji od gline, praha i lapora. Hidraulična vodljivost podine ovog vodonosnika na lokaciji hidroelektrane Dubrava određena je edometarskim pokusom te isnosi  $10^{-6}$  do  $10^{-7}$  m/dan [9].

Na samoj lokaciji izvođenja radova, istražnim bušenjem su u prvom metru identificirani prašinasto-glinoviti šljunci, dublje kojih zaliježu šljunkoviti i šljunkovito-pjeskoviti vodonosni sedimenti. Tehnička konstrukcija zdenaca, dubine 18 m, većim svojim dijelom nalazi se u šljunkovitim sedimentima, u kojima se zahvaćaju značajnije količine podzemne vode.



#### 4.4. Parametri vodonosnika

Ako govorimo o saturiranom poroznom mediju u hidrauličkom smislu, njegova fizikalna svojstva se mogu opisati preko šest osnovnih fizikalnih svojstava odnosno tri svojstva za vodu i tri svojstva za čvrstu tvar. U tablici 3 su prikazana fizikalna svojstva i njihove formule za izračun te mjerne jedinice.

Tablica 3. Fizikalni parametri vodonosnika [1].

Parametar	Oznaka	Formula	Mjerna jedinica
Voda			
Gustoća	$\rho$	$\rho_i = \lim_{\Delta V_i \rightarrow \Delta V_0} \left( \frac{\Delta m_i}{\Delta V_i} \right)$	kg/m <sup>3</sup>
Koeficijent viskoznosti	$\mu$	$\mu = \frac{\tau_{yx} b}{v}$	Ns/m <sup>2</sup> =Pa s=kg/ms
Koeficijent stlačivosti	$\beta$	$\beta = - \frac{1}{V} \frac{dv}{dp}$	m <sup>2</sup> /N=Pa <sup>-1</sup> =ms <sup>2</sup> /kg
Čvrsta tvar			
Poroznost	$n$	$n = \frac{V_p}{V}$	/
Propusnost	$k$	$k = - \frac{q}{A} \frac{L}{(\phi_1 - \phi_2)} \mu$	m <sup>2</sup>
Koeficijent stlačivosti	$\alpha$	$\alpha = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$	ms <sup>2</sup> /kg

Važno je napomenuti kako su sva tri parametra vode definirana na mikroskopskom mjerilu i mogu se pripisivati čestici tekućine te u tome slučaju vrijede za sve slučajeve mikroskopskog toka. Parametri čvrste tvari određuju se pomoću reprezentativnog elementarnog volumena (REV) te kroz neko elementarno reprezentativno vrijeme, te su zbog toga definirani na razini mikroskopskog odnosno laboratorijskog mjerila. Svi ostali hidrogeološki parametri vodonosnika i vodonosnog sustava se mogu izvesti iz osnovnih 6 parametara, no pri njihovom izvođenju treba voditi računa o razlikama u mjerilima svojstava tekućine i porozne sredine [1].

#### **4.5. Metode hidrogeoloških istraživanja vodonosnika**

Kod hidrogeoloških radova, najčešće metode istraživanja su: istražno bušenje, horizontalni istražni objekti u vidu potkopa, galerija i drenažnih rovova, hidrogeološko kartiranje, monitoring razine podzemnih voda, predviđanje i proučavanje podzemnih voda, hidrogeokemijska istraživanja, trasiranje podzemnih voda i drugi radovi koji se baziraju na ispitivanju karakteristika vodonosnika. Prilikom takvih istraživanja valja se poslužiti i rezultatima iz drugih disciplina kao što su geologija, geobotanika, geomorfologija i drugih, ali i drugih znanstvenih disciplina koje doprinose istraživanju za potrebe gradnje (geofizika, daljinska istraživanja, klimatologija, hidrologija, speleologija i slično [5]).

Hidrogeološko kartiranje je postupak u hidrogeološkom istraživanju koji na najbolji način pruža pregled hidrogeoloških uvjeta terena. Specijalne ili namjenske hidrogeološke karte izrađuju se na temelju hidrogeološkog kartiranja te terenskih i laboratorijskih ispitivanja. Hidrogeološke karte izrađuju se na osnovi geoloških podataka, a interpretacija i grafički prikaz usmjereni su na odnos podzemnih voda i stijena odnosno terena. Na takvim kartama osim hidrogeoloških karakteristika stijena, prikazani su smjerovi kretanja podzemnih voda i vrulje, izvori, zdenci i druge pojave vezane uz podzemnu vodu i njenu pojavu u okolišu [5].

Istražno bušenje i raskopi s ugradnjom piezometarskih konstrukcija obično se primjenjuju kod istraživanja s ciljem različitih namjena kao što su istraživanja u vezi vodoopskrbe, izgradnje vodnih i infrastrukturnih objekata, izgradnje građevinskih objekata i slično. One imaju višenamjensku funkciju jer uz definiranje litološkog sastava i prostornog rasporeda vodonosnika, njegovih pokrovnih slojeva i podinskih naslaga, predstavljaju objekte koji se mogu koristiti u druge svrhe poput mjerenja oscilacije razina podzemne vode, uzimanje uzoraka za kvalitativnu analizu, trasiranje tokova podzemnih voda, geofizička mjerenja i ispitivanja i slično [5].

Nalijevanje u bušotinu ima svrhu određivanja propusnosti stijena (u zoni aeracije i saturiranoj zoni). Tijekom ovog postupka održava se stalna razina vode koja se nalijeva u bušotinu. Voda se dolijeva dok se ne izvrši stabilizacija.

U hidrogeološkim istraživanjima, metoda utiskivanja vode u bušotinu služi za određivanje ispuhalosti i propusnosti kod stijena s pukotinskom poroznosti te za određivanje koeficijenta filtracije i provjeru izvedenih radova s cementiranjem. Bit ove metode je utiskivanje vode pod tlakom koji se mijenja tijekom ispitivanja, pri tome se određuje specifično upijanje vode odnosno količina vode koje se u bušotinu ili njezin dio infiltrira na jedan dužni metar ispitivanog intervala pri tlaku od jedne atmosfere.

Motrenje razine podzemne vode izvodi se pomoću piezometarske mreže. Piezometarska mreža se izvodi tako da razine podzemne vode u istraženim objektima i u vodonosnom sloju budu jednake. Za određivanje režima podzemnih voda potreban je duži vremenski period i niz podataka o razinama podzemne vode u različitim sezonskim i hidrološkim uvjetima. Na osnovi piezometarske mreže i rasporeda razina podzemnih voda kreiraju se karte hidroizohipsi koje se upotrebljavaju za definiranje smjera toka podzemne vode.

Pod hidrogeokemijskim istraživanjima podrazumijeva se fizikalno, fizikalno-kemijska mjerenja na terenu, prikupljanje uzoraka za kemijske i izotopne analize, analiza prikupljenih uzoraka i u konačnici obrada dobivenih rezultata te njihova interpretacija. Prikupljanja i mjerenja na terenu odvijaju se u različitim sezonskim i hidrološkim vegetacijskim uvjetima, a frekventnost i trajanje opažanja prije svega ovise o hidrogeološkim obilježjima sustava te namjeni hidrogeoloških istraživanja.

Modelska istraživanja se primjenjuju kod svestranog proučavanja hidrogeoloških sustava. Takvi sustavi su vrlo složeni i zbog toga analiza treba biti pojednostavljena i stoga je potrebno načiniti model sustava koji u sebi sadrži sve bitne karakteristike tog sustava. Pouzdanost izrađenih modela ovisi o tome koliko dobro model prikazuje okolnosti na terenu tj. hidrogeološkom sustavu. Postoje tri osnovne vrste hidrogeoloških modela: analogni model (pojave u takvom modelu se opisuju pomoću njoj istovrsne pojave), fizički model (prikaz sustava u malom, kreiranje modela koji fizički sličje proučavanom sustavu) i matematički model (matematičkom simbolikom se prikazuju događaji u sustavu i na njegovim granicama skupa s njegovim ograničenjima) [5].

Metode daljinskih istraživanja dolaze do izražaja kod hidrogeološkog kartiranja, proučavanja zakonitosti pojave podzemnih voda, formiranja površinskog i podzemnog otjecanja i međusobnog odnosa površinske i podzemne vode. Takva vrsta istraživanja obuhvaća analizu i interpretaciju aerosnimki, odnosno predstavljaju postupke koji omogućuju slikovito prikazivanje i mjerenje geoloških procesa i pojava u tlu te prikaz objekata na zemlji na osnovi informacija prikupljenih uz pomoć uređaja koji nisu u izravnom doticaju s objektima i površinom terena.

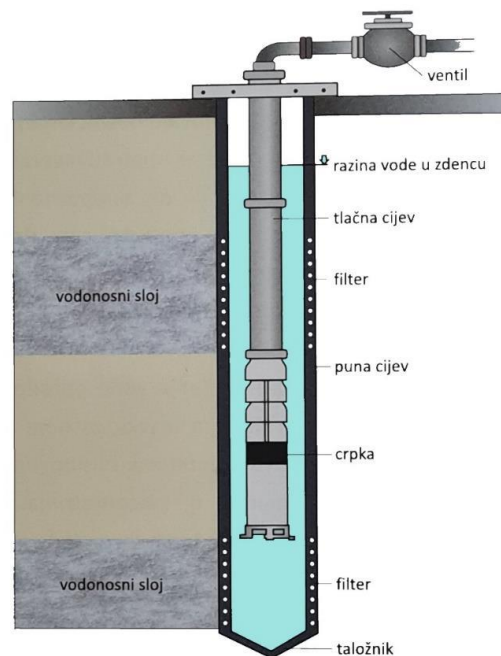
U sklopu istraživanja podzemnih vode, geofizičke metode imaju važnu ulogu posebno ako se radi o velikoj površini istraživanja. Ovakva vrsta istraživanja hidrogeoloških parametara vodonosnika najčešće se izvodi u tri koraka: mjerenje fizikalnih parametara uključujući i mjerenja umjetno proizvedenih poremećaja, a zatim obrade i interpretacije podataka. U sklopu hidrogeoloških istraživanja ovom metodom se mogu zahvaćati stijene do nekoliko stotina metara ispod površine terena. Najčešće korištene metode u hidrogeološkim istraživanjima su seizmičke metode (seizmička refrakcija i refleksija), električne metode (električna tomografija, električno profiliranje i sondiranje i inducirana polarizacija) i geofizička istraživanja (metoda pomičnog odašiljača), te metode prirodnog potencijala (magnetometrijska i gravimetrijska metoda) [5].

Određivanje hidrauličkih parametara zdenca, hidrogeoloških parametara vodonosnika te radijus utjecaja zdenca provedeno je probnim crpljenjem na istražno-eksploatacijskom zdencu oznake SC-2. Navedeni radovi provedeni su u listopadu 2017. godine. Obzirom na to da su istražno-eksploatacijski zdenci SC-1 i SC-2 iste konstrukcije i u istom vodonosniku, dobiveni rezultati mjerenja vrijede za oba zdenca. Istražno-eksploatacijski zdenac SC-2 crpljen je pomoću centrifugalne motorne pumpe maksimalnog kapaciteta crpljenja  $q = 25$  l/s. Probno crpljenje istražno-eksploatacijskog zdenaca organizirano je na način opažanja sniženja na crpnom zdencu s povećanjem kapaciteta u koracima (step test), te konstant testom na maksimalnom crpnom kapacitetu pumpe. Ostvareni rezultati prezentirani su u ovom elaboratu. Zdenac je izveden u otvorenom tipu vodonosnika s brzim

otpuštanjem, te s parcijalnom penetracijom vodonosnog sloja, a u formacijama s velikim koeficijentom propusnosti.

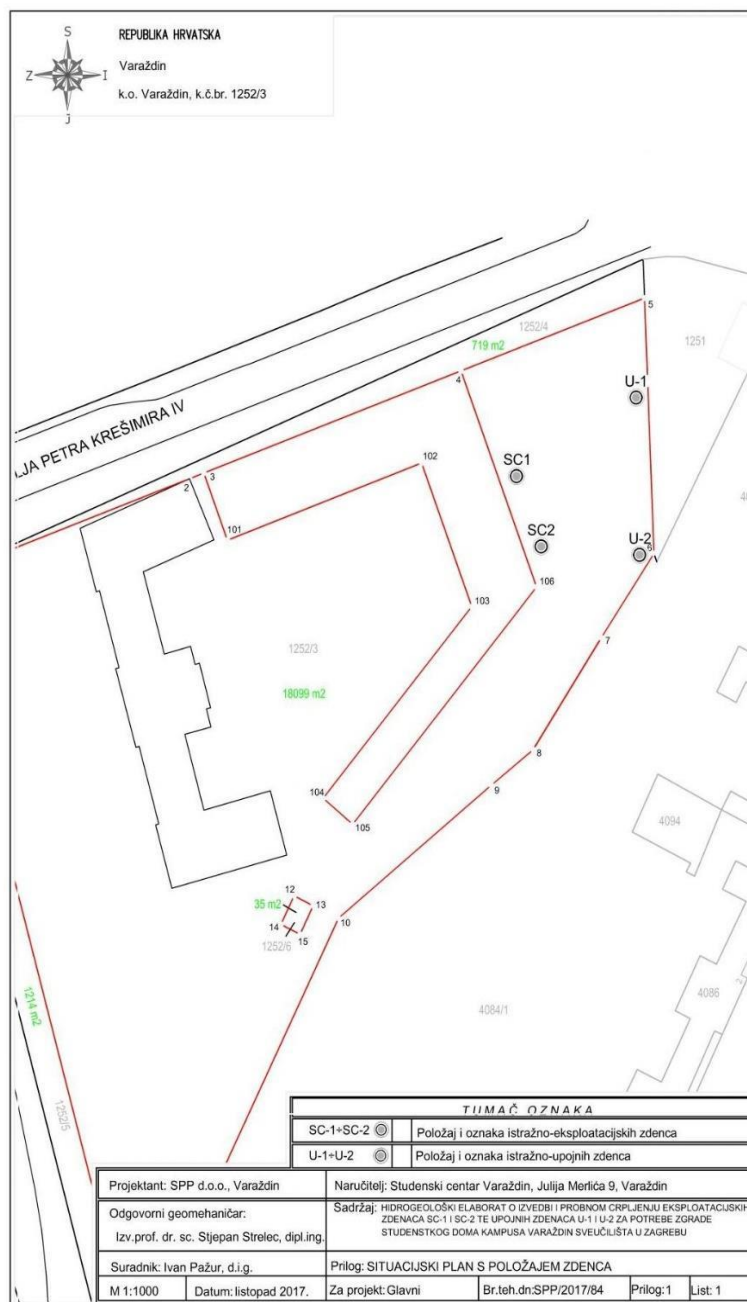
## 5. Zdenac

Eksploatacijski zdenci su hidrotehničke građevine uz čiju pomoć crpimo vodu iz vodonosnog sloja (Slika 10). Zdence pomoću kojih vraćamo iscrpljenu ili korištenu vodu u vodonosnik nazivaju se utisni zdenci. Prilikom izgradnje zdenca potrebno je voditi računa o promjeru i dubini zdenca, filtru, šljunčanom zasipu ili tamponu, izboru crpke, osvajanju zdenca i odvođenju crpne količine. Promjer zdenca mora biti zadovoljavajući kako bi omogućio nesmetanu ugradnju cijevi, filtra i crpke. Međutim, sam promjer zdenca relativno malo utječe na samu njegovu izdašnost. Dubina zdenca određuje se prema litološkom sastavu bušotine koja je prethodno izbušena ili se određuje za vrijeme bušenja samog zdenca.



Slika 10. Shematski prikaz osnovnih komponenta zdenca [5].

Filtar mora imati otvore koji omogućuju male ulazne brzine vode u zdenac. Ulazna brzina bi u pravilu morala biti manja od 3 cm/s, jer su kod te brzine otpori koji su uzrokovani trenjem na otvorima filtra beznačajni. Veličina otvora filtra definira se prema veličini zrna materijala od kojega je izgrađen vodonosnik [5].



Slika 11. Lokacija istražno-eksploatacijskih zdenaca SC-1 i SC-2 te istražno-upojnih zdenaca U-1 i U-2 na području Varaždinskog studentskog kampusa.

Zdenac treba svojom dubinom doprijeti do podine vodonosnog sloja, tada je tok podzemne vode pod tlakom i prema crpljenom zdencu horizontalan, a to je pretpostavka za primjenu svih jednostavnih metoda izračuna hidrogeoloških parametara vodonosnika. Takav zdenac se još naziva i završeni zdenac. U slučaju kada zdenac svojom dubinom ne dođe do podine, onda se on naziva nedovršeni zdenac i kod njega se vertikalna komponenta toka ne može zanemariti, a to rezultira složenijim proračunskim metodama hidrogeoloških parametara.

Na lokaciji studentskog kampusa u Varaždinu (Slika 11.) izvedeni su istražno-eksploatacijski zdenci SC–1 i SC–2 te istražno-upojni zdenci U–1 i U–2 čija je pojedinačna dubinama 18 metara.

### **5.1. Tehnologija izrade zdenca**

Razrušavanje stijena na dnu bušotine, čišćenje dna i iznošenje čestica razrušenog materijala te stabilnosti stijenske bušotine osigurava se korištenjem različitih metoda, postupaka, strojne opreme i alata. Osnovne metode izrade bušotina su ručno, udarno i rotacijsko bušenje.

Ručni pribor za bušenje koristi se kod istraživanja manjih klizišta, za potrebe temeljenja manjih objekata, te u uvjetima ograničene radne visine. Bušenje se vrši rotiranjem i pritiskom preko T ručice, s vađenjem uzoraka tla u kratkim intervalima. Dubina bušenja u sitnozrnatim tlima ograničena je na oko 6 m, a u nevezanom tlu kao što su pijesak i šljunak ispod razine podzemne vode, bušenje je veoma ograničeno ili gotovo nemoguće. Samo ručno bušenje može se podijeliti na nekoliko metoda: Udarno ručno bušenje, Sludger postupak i Ručno rotacijsko bušenje [11].

Osnovni princip rada kod udarne metode bušenja jest dizanje bušačeg alata i spuštanje istog uz pomoć slobodnog pada. Dlijeto, padajući na dno bušotine razrušava stijenu drobeći je. Ova metoda bušenja često se primjenjuje u srednje tvrdim i stabilnim stijenama, uz minimalnu upotrebu zaštitne kolone odnosno u stijenama gdje se ne očekuje značajnije obrušavanje stijenske mase u bušotinu.

Čišćenje dna bušotine koja se buši ovakvom metodom provodi se nakon razrušavanja stijenske mase u bušotinu specijalnim alatima zvanim „žlice za čišćenje“ [11].

Rotacijsko bušenje temelji se na nanošenju okretnog momenta na bušači pribor. Pošto je do danas razvijen velik broj bušačih garnitura koje se koriste pri rotacijskom bušenju, neke od najjednostavnijih su garniture sa spiralnim svrdlima, garniture koje koriste metodu bušenja s jezgrovanjem i bušaće garniture pri čijem korištenju nema jezgrovanja. Rotacijsko bušenje sa spiralnim svrdlima ili svrdlanje je postupak bušenja u kojem se koristi plosnata čelična spirala učvršćena na bušaču šipku koja se sa spiralom strojno uvrće tlo. Korištenjem ove metoda pri izradi bušotine nema jezgre jer je ona pregnječena tijekom rada i takva izlazi na površinu terena.

## **5.2. Šljunčanje, tamponiranje, osiguravanje zdenca i ugradnja crpke**

Ulazak vode u filter odnosno njegove otvore je olakšan ako se ukloni materijal vodonosnog sloja oko filtra i nadomjesti grublje granuliranim materijalom. Takav materijal naziva se „šljunčani zasip“ a postupak šljunčanje ili tamponiranje. Cilj ovog postupka je sprječavanje prodora zagađenja u zdenac i dublje dijelove vodonosnika i sprječavanje procjeđivanja vode s površine terena uz konstrukciju zdenca. Materijal od kojega je izrađen šljunčani zasip mora biti čist, zaobljen, gladak, jednoličan i ne topljiv u vodi, a debljina takvog zasipa ne bi trebala biti između 7-20 cm [5].

## **5.3. Osvajanje zdenca**

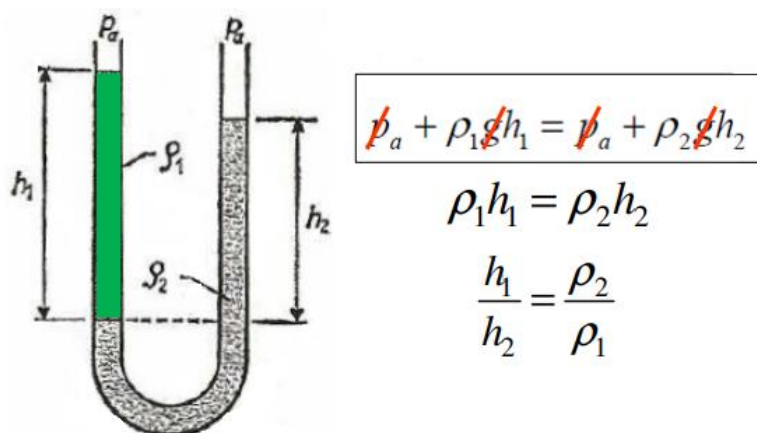
Osvajanjem zdenca uklanja se sitnozrnati material iz pornog prostora i smanjuje zbijenost okolnog materijala koja je posljedica bušenja zdenca, povećava se prirodna poroznost i propusnost vodonosnika odstranjivanjem sitnozrnatog



materijala iz zone utjecaja zdenca. Ovom metodom se uklanja isplačna obloga sa stijenke bušotine i ostaci isplake koji su prodrli u vodonosnik , stvara se graduirana zona oko filtra, a naručito kod zdenaca bez zasipa. Na izbor metode odnosno načina (mehaničko ili kemijsko osvajanje) utječe otvorenost i oblik otvora filtra, njegova veličina otvora, vrsta isplake koja se rabila tijekom bušenja zdenca, debljina zasipa oko zdenca te sastav vodonosnika. U nevezanim vodonosnicima u koje se ubraja i Varaždinski vodonosnik najčešće metode vršenja osvajanja zdenca su:

- “Klipovanje” - osvajanje pomoću klipa ili klipne žlice
- Osvajanje komprimiranim zrakom (*eng. Airlift*)
- Osvajanje prekomjerenim crpljenjem zdenca tj. Povećanjem crpnih količina (*eng. Overpumping*)
- Osvajanje hidrauličkim mlazom (*eng. Jetting*)
- Osvajanje dodavanjem kemijskih sredstava
- Kombinacija navedenih metoda

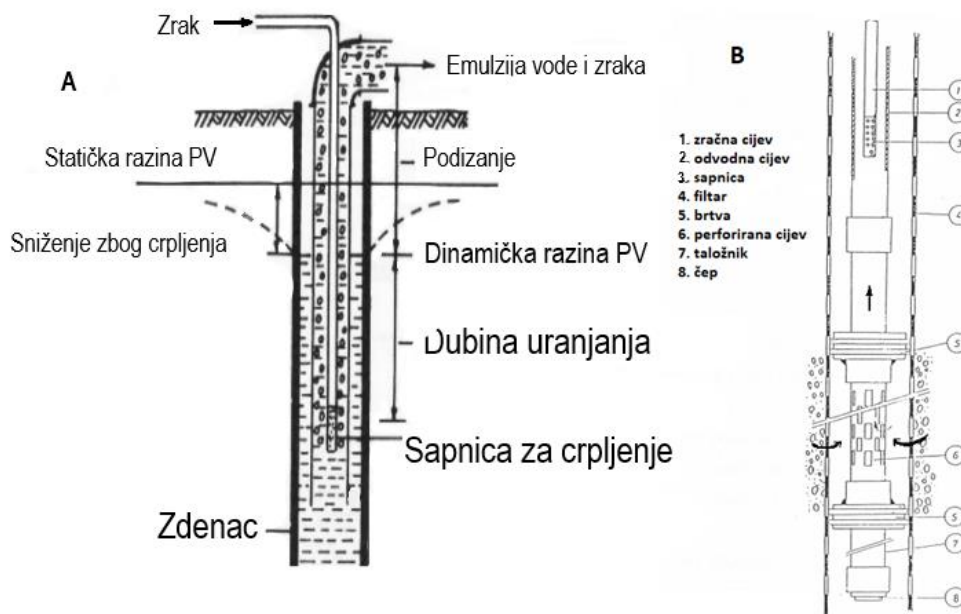
Osvajanje komprimiranim zrakom ili raširenije metoda airlift temelji se na crpljenju vode pomoću komprimiranog zraka na osnovi zakona spojenih posuda. Prema tome zakonu visina stupca tekućine koje se u njima nalaze obrnuto je proporcionalna njihovoj gustoći te će zbog toga stupac emulzije (smjesa zraka i vode) zauzeti viši položaj nego stupac vode (Slika 12).



Slika 12. Skica zakona o spojenim posudama i razlici visina stupca emulzije i vode

[15].

Postoje dvije metode osvajanje zdenca airliftom: osvajanje metodom otvorene bušotine (Slika 13.a) (metoda otvorenog airlifta – eng. *Open well method*) i osvajanje po sekcijama zdenca (Slika 14.b) (metoda sektorskog airlifta – eng. *Airlift swabbing*). Kod metode otvorene bušotine dubina uranjanja treba biti veća od 60 % bušotine. Odvodna cijev i zračna cijev trebaju biti ovješena svaka na posebnom užetu. Prvo se čisti taložnik, a nakon toga se pristupa osvajanju odnosno čišćenju filtra, zasipa i vodonosnika. Na završetku potrebno je ponovo spustiti odvodnu cijev u područje taložnika i ponovo ga očistiti. Kod metoda osvajanja po sekcijama koristi se sektorska brtva – paker koji se spušta u bušotinu na odvodnim cijevima. Sektorska brtva se sastoji od perforirane cijevi koja na krajevima ima brtve. Ova metoda primjenjuje se kada se filtrira na većim dubinama i kod zdenaca s većim kapacitetom. Također može se kombinirati sektorski airlift s četkom za čišćenje postojećeg zdenca.



Slika 13. Vrste airlifta. a) metoda otvorenog airlifta I b) metoda sektorskog airlifta [15].

Nakon ugradnje crpke slijedi osvajanje zdenca koje podrazumijeva crpljenja podzemne vode malim kapacitetom crpke. Kada voda postane potpuno bistra,

povećava se crpna količina, a to dovodi do ponovnog zamućivanja vode u zdencu i tako dok se vode ne izbistri odnosno dok se ne postigne željeni crpni kapacitet za testiranje [5].

#### **5.4. Tehnička konstrukcija zdenca**

Nakon završetka procesa bušenja potrebno je ugraditi zaštitne cijevi u perforirani dio zdenca. Zaštitne cijevi i filter najčešće su izrađene od čelika (srednje i nisko-ugljični te nehrđajući čelik), plastike (PVC, ASB i poliolefin) i fiberglasa. Čelik se najčešće koristi zbog svoje čvrstoće (otpornost na gnječenje i puknuće) te je zbog toga pogodan za ugradnju u dublje bušotine gdje prevladavaju veliki tlakovi. Nedostatak čelika jest korozija, na koju lako možemo zaboraviti ako koristimo plastiku. Osim što je otporna na koroziju, plastične cijevi su cijenom prihvatljivije. One se uglavnom koriste kod plićih zdenaca zbog svoje slabije čvrstoće i promjene temperature tla koja se povećava s dubinom [12].

## 6. Pokusno crpljenje

Određivanje hidrogeoloških parametara iz podataka pokusnog crpljenja može se smatrati inverznim postupkom. Poznati podaci su razine podzemne vode odnosno sniženje razina podzemne vode, a nepoznanice su hidrogeološki parametri. Pokusno crpljenje može imati dva cilja: prvi je testiranje vodonosnog sloja odnosno određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnog sloja, a drugi je samo testiranje zdenca pri čemu se određuje kapacitet zdenca, dopušteno sniženje, izbor odgovarajuće crpke i slično. Ova metoda zasniva se na principu crpljenja vode definiranim kapacitetom u određenom vremenu iz zdenca s filtarskim dijelom u vodonosnom dijelu kojeg istražujemo. Hidrogeološki parametri pri pokusnom crpljenju izračunavaju se uz pomoć formula (analitička rješenja jednadžbi toka) u koje se uvrštavaju izmjerene vrijednosti sniženja u piezometrima, udaljenost piezometra od zdenca i crpna količina [5]. Prethodna priprema i organizacija probnog crpljenja su nužni kako bi se dobili što pouzdaniji rezultati. Da bi dobili što pouzdanije rezultate pokusno crpljenje se probodi kroz četiri koraka: određivanje načina ispitivanja u skladu sa zahtjevima, određivanje optimalne lokacije za probni i eksploatacijski zdenac, provesti pokusna crpljenja na pokusnom zdencau i odrediti lokaciju opažачke bušotine kao i njegovu konstrukciju.

Pokusnim crpljenjem mogu se odrediti hidrogeološki parametri vodonosnika crpljenjem zdenca s približnim količinama koje će se crpiti u budućnosti. Treba ispitati utjecaj projektirane količine crpljenja na razinu podzemne vode, eventualne površinske tokove i predvidjeti utjecaj crpljenja na šire područje oko zdenca. To je važno ako se u blizini nalazi aktivni zdenac iz kojega se voda stalno eksploatira, pa predviđenom eksploatacijom može doći do međusobnog utjecaja zdenaca što može rezultirati smanjenjem pojedinačne ili ukupne izdašnosti. Crpljenje se provodi s tri različite crpne količine s vremenom trajanja svake faze od minimalno 24 sata [4].

Odabir lokacije pokusnog crpljenja provodi se na temelju prethodnih istražnih radova. Odabir lokacije je većinom određen kompromisom, a ne pogodnosti

hidrogeoloških uvjeta u vodonosniku [4]. Kod odabira lokacija za izvođenje pokusnog crpljenja treba obratiti pozornost na sljedeće:

- Hidrogeološki uvjeti mjesta ne smiju se mijenjati na malim udaljenostima odnosno hidrogeološki uvjeti moraju biti što reprezentativniji za cijelo područje.
- Lokacija pokusnog crpljenja ne bi smjela biti u neposrednoj blizini željezničkih pruga, auto-putova i aerodroma zbog vibracija koje mogu utjecati na promjene piezometarske razine, osobito u zatvorenim vodonosnicima.
- Iscrpljenu vodu se treba odvesti tako da se ne može transportirati natrag u vodonosni sloj.
- Potenciometrijska ploha bi trebala biti približno horizontalna tj. hidraulički gradijent mora imati malu vrijednost.
- Područje izvođenja pokusnog crpljenja treba biti pristupačno zbog lakšeg dopremanja opreme

Za vrijeme pokusnog crpljenja mjeri se vrijeme, količina crpljene vode, razina podzemne vode i udaljenost piezometara ili bušotina u kojima se vršim mjerenje razine podzemne vode. U slučaju novog zdenca, pokusno crpljenje se obavlja kao sastavni dio radova na izradi zdenca i tada je potrebno ugraditi crpku u zdenac ili pokraj njega (Slika 14).



Slika 14. Primjer postavljanje crpke za pokusno crpljenje.

Tijekom pokusnog crpljenja novog zdenca obično se kontrolira sadržaj pijeska u iscrpljenoj vodi pomoći Imhoffovog lijevka i uzimaju se uzorci podzemne vode za bakteriološki i fizikalno-kemijsku analizu.

### 6.1. Projektiranje ulaznog kapaciteta zdenca

Za projektiranje ulaznog kapaciteta zdenca potrebno je poznavati promjer ugrađenog filtra ( $d$ ), maksimalnu brzinu ulaza vode u filter pri laminarnim uvjetima tečenja ( $v$ ), širinu trakastog otvora filtra ( $s$ ), ukupni perforirani dio filtera u postotcima ( $s$ ) i ukupnu duljinu ugrađenog filtra ( $L$ ). Maksimalni kapacitet prihrane vode u zdenac za laminaran tok ulaza vode  $Q_{ukupno}$  dobije se umnoškom gore navedenih parametara prema izrazu:

$$Q_{ukupno} = d \cdot \pi \cdot L \cdot f \cdot v = L \cdot q/m^{\cdot} [l/s]$$

Umnožak promjera ugrađenog filtra, maksimalne brzine ulaska, ukupne perforiranog dijela filtra u postotcima te matematičke konstante pi dan daje maksimalni kapacitet po dužnom metro za zadani laminari uvjet tečenja vode  $q/m^{\cdot}$ .

### 6.2. Specifični kapacitet

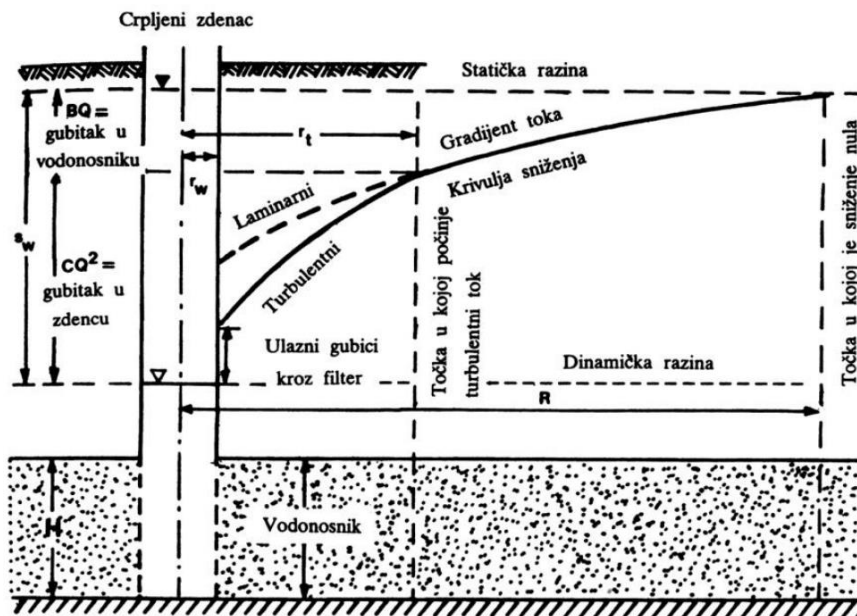
Specifični kapacitet zdenca je omjer crpljene količine i ukupnog sniženja u zdencu. Ovaj parametar opisuje Koliko vode zdenac daje po jednom metro sniženja. Sniženje u zdencu se sastoji od dvije komponente sniženja: sniženje uzrokovano laminarnim tokom vode kroz vodonosnik u smjeru zdenca i ono se naziva gubitak u sloju ( $s$ ) i sniženja uzrokovano turbulentnim tokom koje se pojavljuje u neposrednoj blizini filtra odnosno zdenca i naziva se gubitak u zdencu ( $s_z$ ) [5].

### 6.3. Jednadžba zdenca

Tijekom pokusnog crpljenja dobivamo podatke o vodonosnom sloju i zdencu. Dio podataka o vodonosnom sloju dobivamo analizom podataka iz opažačkih bušotina, a drugi dio podataka se dobiva iz podataka o samom zdencu. Kako se tijekom crpljenja prati snižavanje razine podzemne vode u opažačkim zdencima (Slika 15), ukupno sniženje u crpljenom zdencu (SC-2) sastoji se od dvije komponente:

$$S_w = BQ + CQ^2.$$

U ovom izrazu  $s_w$  predstavlja sniženje u zdencu izraženo u metrima,  $Q$  je količina vode kojom se crpi zdenac ( $m^3/s$ ),  $B$  je parametar otpora sloja u vodonosniku mjeren u  $s/m^2$  i  $C$  je parametar otpora zdenca ( $s^2/m^5$ ). Prvi dio ovog izraza za sniženje u zdencu  $BQ$  predstavlja gubitak u vodonosnom sloju u kojemu je sniženje uzrokovano otporom laminarnog toka u samom vodonosnom sloju. Druga komponenta u istom izrazu  $CQ^2$  definira gubitak u zdencu koji je posljedica turbulentnog toka vode u filtarskom djelu konstrukcije zdenca i djelu vodonosnog sloja.



Slika 15. Shematski prikaz sniženja u crpljenom zdencu.

Poznavanjem parametara otpora sloja ( $B$ ) i otpora zdenca ( $C$ ) može se izračunati sniženje u zdencu za proizvoljno odabranu crpnu količinu. S obzirom da parametar otpora zdenca ne ovisi o vremenu trajanja crpljenja, komponenta sniženja uslijed otpora u zdencu koristi se kod definiranja ukupnog sniženja u zdencu, ako prethodno odredimo teorijsko sniženje za određeni kapacitet crpljenja.

## 7. Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika

Nakon završetka pokusnog crpljenja pristupa se analizi podataka i proračuna. Prvi je korak svođenje parametara na iste mjerne jedinice npr. vrijeme na početku se prvo mjeri u sekundama pa u minutama, satima itd. Isto vrijedi i za sniženje i crpnu količinu ako ima potrebe za tim. Nakon toga slijedi izrada grafičkih prikaza podataka sniženja u vremenu koji nam pomažu u definiranju hidrogeološkog modela, odnosno odabira metode koju ćemo koristiti za izračun hidrogeoloških parametara. Većina grafoanalitičkih metoda svodi se na analitičkom rješavanju jednadžbe toka. S obzirom da se radi o analitičkom rješavanju, konceptualni – hidrogeološki model mora bit krajnje jednostavan i razumljiv [5].

Neke od pretpostavki s kojima ulazimo u određivanje hidrogeoloških parametara su:

- vodonosnik je neograničenog prostiranja odnosno njegove granice su izvan utjecaja crpljenja,
- vodonosnik je homogen, izotropan i jednake debljine na području pod utjecajem crpljenja,
- prije početka crpljenja potencimetrijska ploha je približno horizontalna tj. nema značajnijeg tečenja podzemne vode u prirodnim uvjetima
- tok podzemne vode prema zdencu je radijalan u horizontalnoj ravnini
- količina kojom se crpi zdenac je konstantna
- radovi na zdencu su završeni i crpljenjem se zahvaća cijela debljina vodonosnog sloja do podine



Hidrološki parametri određeni su iz provedenog pokusnog crpljenja tijekom kojeg se vršilo mjerenje sniženja razine podzemne vode na samom crpnom zdencu primjenom metode superpozicije za rješavanje Theis – korekcija Jacoba. Princip superpozicije glasi: sniženje u nekoj točki odnosno piezometru uzrokovano crpljenjem jednako je zbroju sniženja koje uzrokuje svaki pojedini zdenac. U otvorenom vodonosnom sloju sniženje u piezometru  $X$  će biti jednako:  $s_x = s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n$ . U ovom izrazu  $s_1, s_2, \dots, s_n$  predstavljaju korigirano sniženje u piezometru  $x$  izazvano crpljenjem zdenca [5].

### 7.1. Koeficijent vodopropusnosti (transmisivnosti)

Prilikom geotehničkih istraživanja kao tekući medij pojavljuje se podzemna voda pa se s toga mora definirati i izračunati koeficijent transmisivnosti. Koeficijent transmisivnosti prikazuje propusnu moć vodonosne stijene/vodonosnika, a definiran je umnoškom koeficijenta hidrauličke provodljivosti  $k$  i debljine propusne stijene [16]. Označava se simbolom  $T$  i izražava jedinicom  $m^2/s$  odnosno za potrebe određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika na području studentskog kampusa u Varaždinu, u jedinici  $m^2/dan$ :  $T = K \cdot m$  [ $m^2/dan, cm^2/s, m^2/s$ ], gdje  $K$  predstavlja koeficijent hidrauličke provodljivosti u jedinici  $m/dan$ , a  $m$  debljinu medija [5].

### 7.2. Hidraulička vodljivost

Pojam hidrauličke vodljivosti potječe još iz Darcyevog zakona:  $Q = K \cdot A \cdot i$ , u kojem  $K$  predstavlja faktor proporcionalnosti za kojega je Darcy rekao da ovisi o propusnosti stijene [14]. To je parametar koji izražava lakoću kojom se voda giba kroz vodonosni sloj  $i$  naziva se hidraulička vodljivost:  $K = Q / (A \cdot i)$  ili zapisano u diferencijalnom obliku  $K = -Q / (A \cdot (dh/ds))$ . Tako prema Darcyevom zakonu hidrauličku vodljivost možemo definirati kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne sredine koja ima jediničnu površinu ( $A$ ) od  $1m^2$  uz jedinični hidraulični

gradijent pad potencijala za 1 m na udaljenosti od jednog metra u smjeru tečenja podzemne vode [5]. Prema izrazu iz Darcyevog zakona hidraulička vodljivost  $K$  ima dimenziju duljine po vremenu ili brzine, međutim ne smije se poistovjećivati s brzinom. Tablica 4 prikazuje red veličina vrijednosti hidrauličke vodljivosti za različite vrste nevezanih stijena [17].

Tablica 4. Veličine hidrauličke vodljivosti za različite tipove nevezanih stijena [17].

Vrsta stijene	Hidraulička vodljivost $K$ [m/dan]
Glina	$10^{-8}$ - $10^{-2}$
Sitnozrnati pijesak	1-5
Srednjezrnati pijesak	5-20
Krupnozrnati pijesak	20-100
Šljunak	100-1000
Mješoviti pijesak i šljunak	5-100
Mješavina pijeska, šljunka i gline	0,001-0,1

U praksi, hidraulička vodljivost može se odrediti na nekoliko načina ili metoda ovisno o tome kakav je cilj istraživanja i s kakvim sredstvima prilikom istraživanja raspolažemo. Najtočnija, a i time najskuplja metoda je pokusno crpljenje. Ako hidrauličku vodljivost određujemo pomoću permeametra tada ćemo dobiti kao rezultat točkaste podatke, koji ne mogu biti reprezentativni za heterogeni prirodni sustav u kojem se uvijek radi. Hidraulička vodljivost se još može dobiti korištenjem empirijskih formula [5].

### 7.3. Koeficijent uskladištenja

Koeficijent uskladištenja  $S$  definira se kao volumen vode koji može biti otpušten ili uskladišten po jediničnoj površini vodonosnika, pri jediničnoj promjeni razine podzemne vode. On se definira kao umnožak specifičnog uskladištenja ( $S_s$ ) i debljine vodonosnika ( $b$ ):  $S=S_s \cdot b$ . Specifično uskladištenje  $S_s$  odnosi se na jedinični

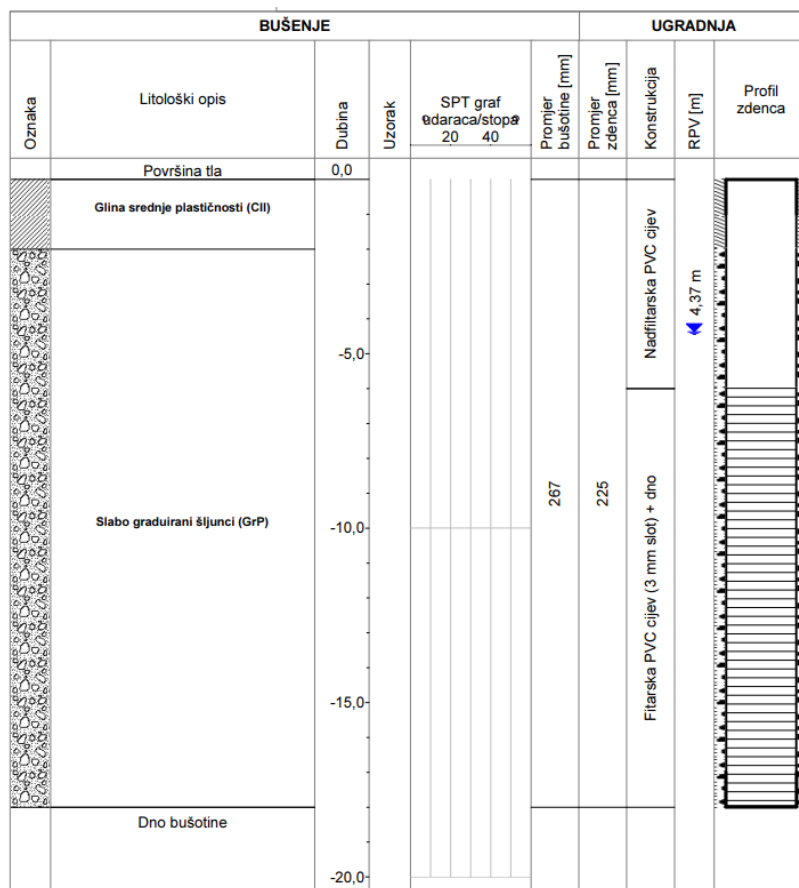
volumen, dok se koeficijent uskladištenja  $S$  odnosi na volumen čija je visina jednaka debljini vodonosnika. Koeficijent uskladištenja predstavlja volumen vode koji se može dobiti iz prizme zatvorenog vodonosnika površine baze  $A=1$  i visine  $b$  pri jediničnom padu piezometarske razine. Za razliku od specifičnog uskladištenja koji ima dimenziju  $L^{-1}$ , koeficijent uskladištenja je bezdimenzionalno veličina [1].

## **8. Primjer projektiranja i izvedbe zdenca SC–1, SC–2, U–1 i U–2**

Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika i hidrauličkih parametara zdenaca provedeno je probnim crpljenjem na istražno eksploatacijskom zdencu SC-2. Navedeni istražno-eksploatacijski zdenac crpljen je pomoću centrifugalne motorne pumpe maksimalnog kapaciteta  $q = 25$  l/s. Probno crpljenje istražno-eksploatacijskog zdenca SC-2 organizirano je na način opažanja sniženja na crpnom zdencu s povećanjem crpne količine u koracima, te konstant testom na maksimalnom crpnom kapacitetu pumpe.

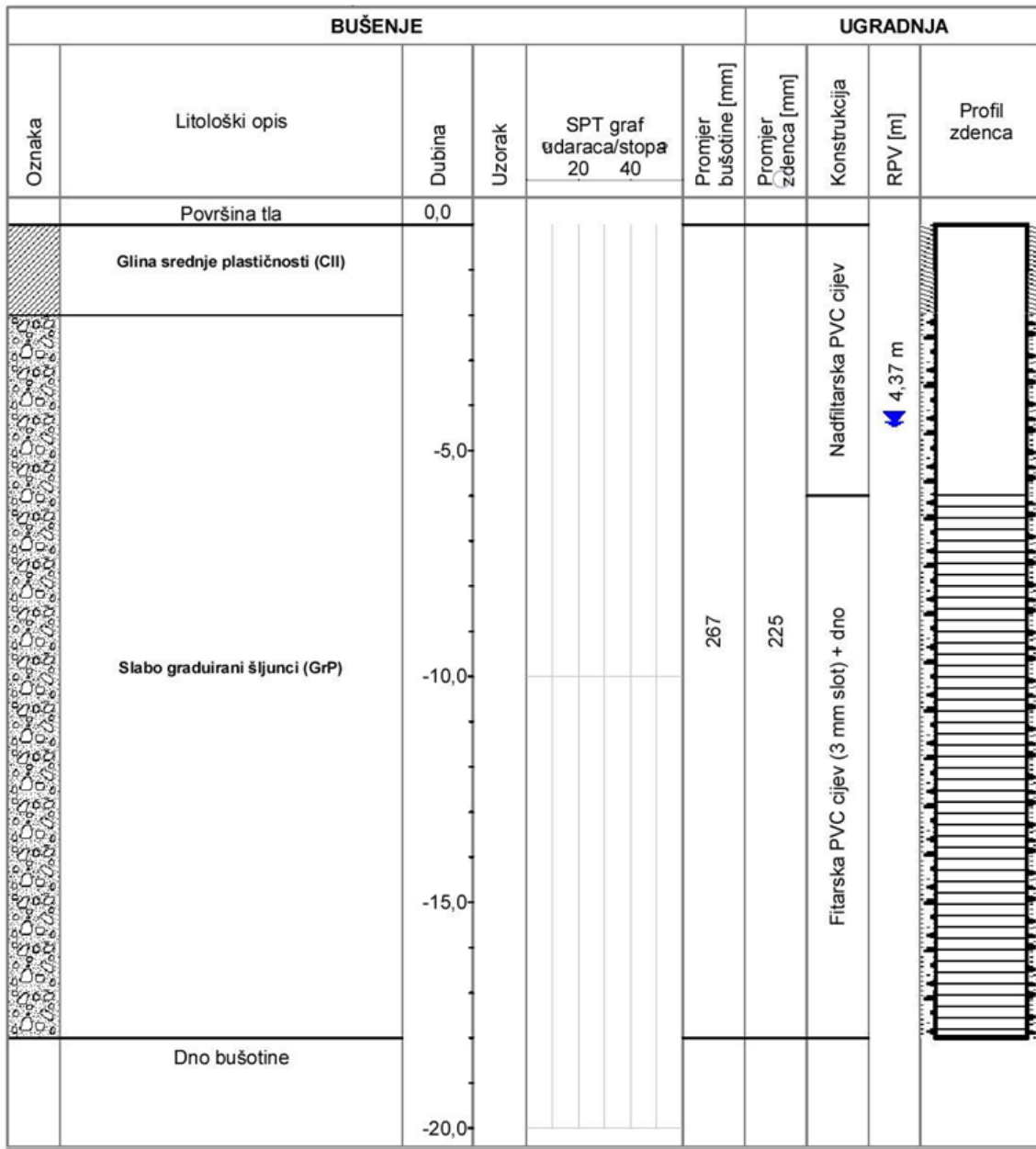
### **8.1. Izrada zdenca**

Bušenje zdenaca SC–1, SC–2, U–1 i U–2 izvedeno je rotacijskom metodom kroz obložne kolone uz stalno jezgrovanje. Promjer bušenih zdenaca je 267 mm. U ovoj metodi bušaći alat je pričvršćen na šupljinu bušaćih šipki, strojno se rotira i hidraulički utiskuje s površine terena. Na kraju šipki, u dubini bušotine, pričvršćena je posebna sržna cijev na čijem je dnu šuplja bušaća glava s krunom. Jezgre iz jezgrene cijevi odlažu se u posebne sanduke gdje se redaju po dubini kako bi se dobio realan prikaz materijala. Cilj ovakvog spremanja uzoraka je daljnja analiza u laboratoriju i izrada fotodokumentacije. Na temelju određivanja nabušenog materijala određuje se točan raspored i dubina ugradnje pojedinih intervala pojedinih tehničkih konstrukcija zdenca. Iz vodonosnog sloja uzeta su dva uzorka za potrebe granulometrijske analize, a radi utvrđivanja efektivnog otvora filtra ( $d_{30}$ - $d_{50}$ ).

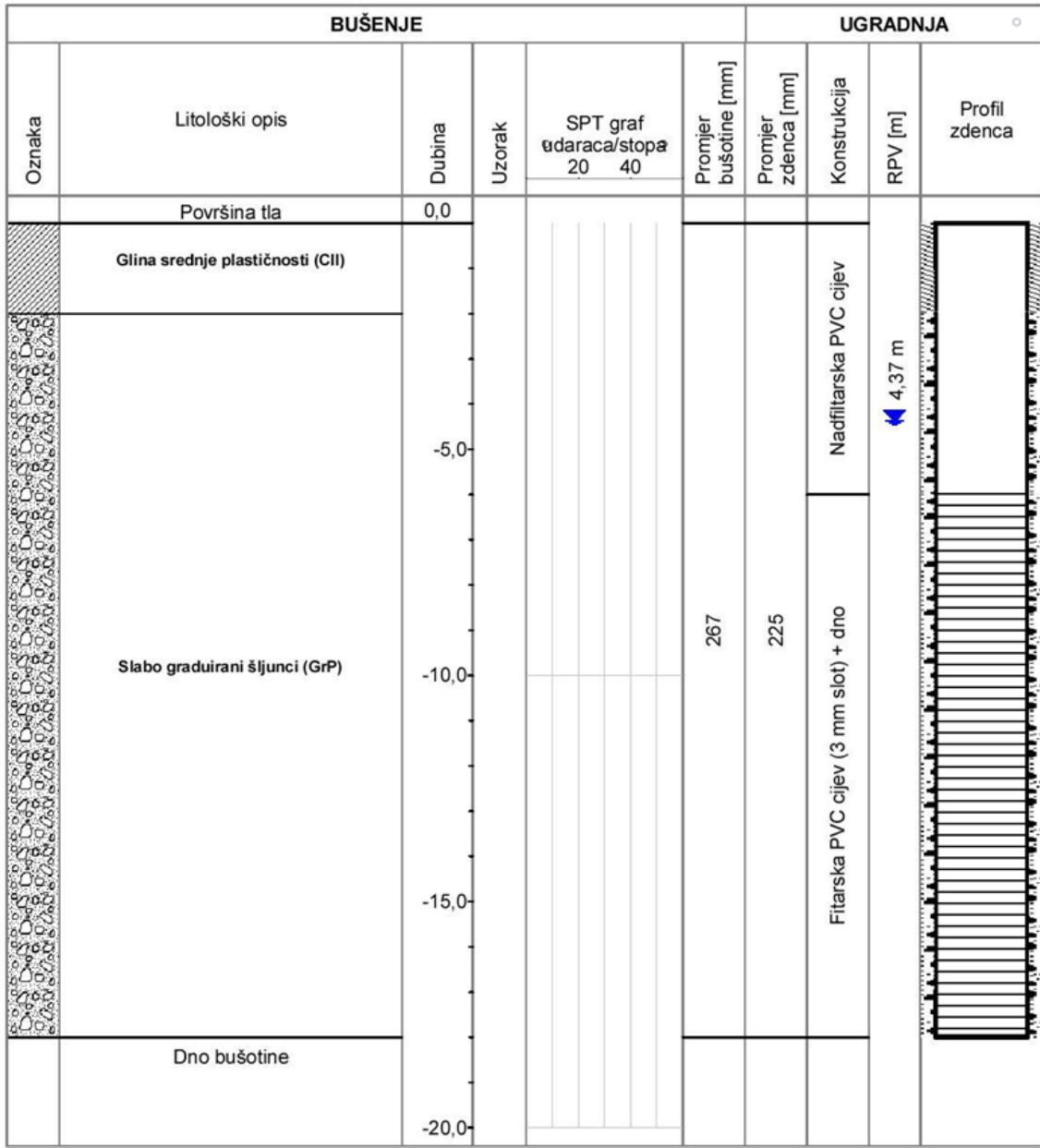


Slika 16. Litološko-tehnički profil zdenca SC-1.

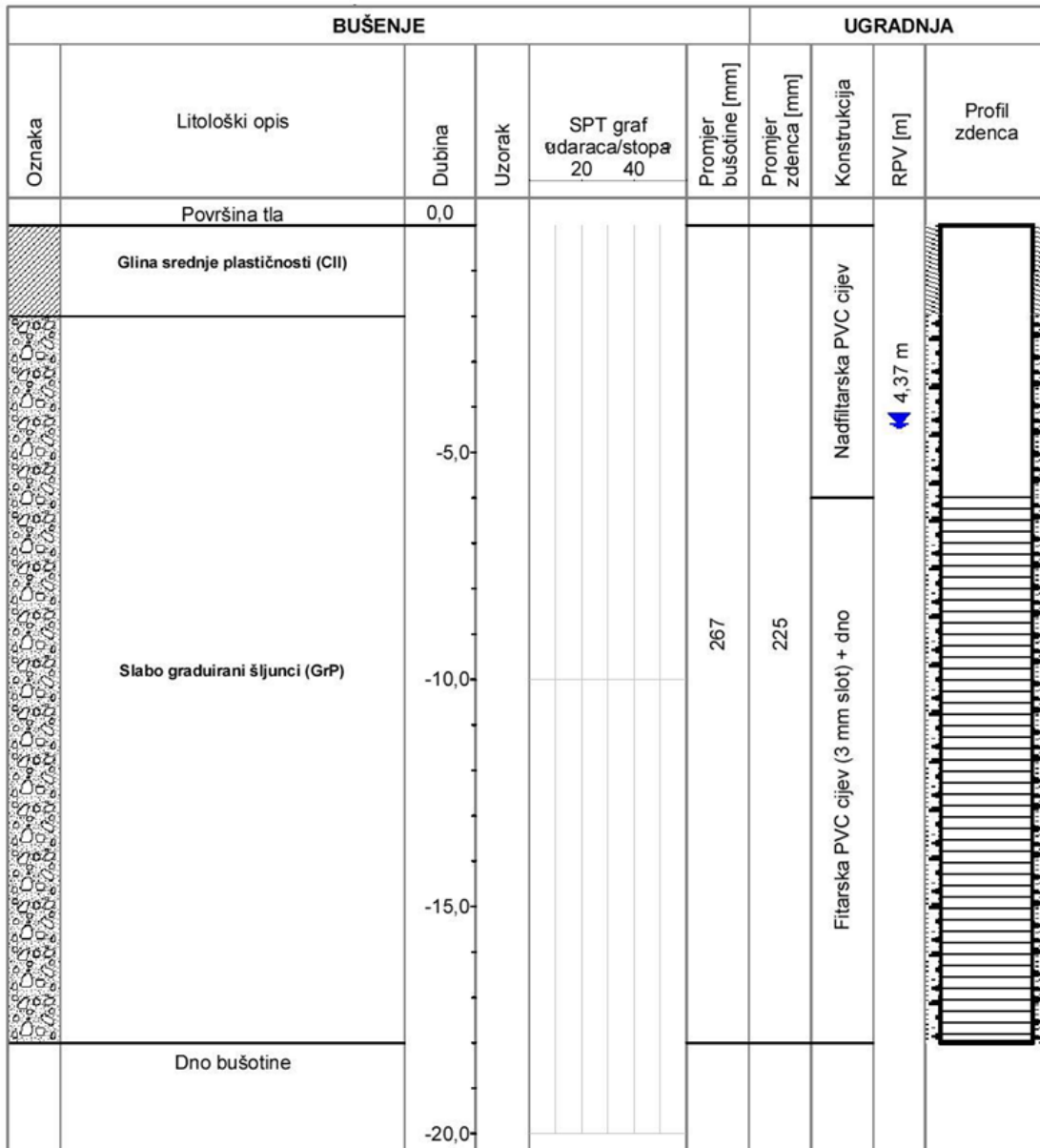
Podaci iz dnevnika bušenja i oni dobiveni jezgrovanjem te in-situ istraživanjima obrađuju se pomoću računalnog programa i dobiva se sondažni profil koji ima digitalan zapis. Na taj način omogućena je bolja interpretacija i manipulacija rezultatima koja može biti u sve tri dimenzije, ovisno o potrebama. Rezultati dobivenih analizama u laboratoriju i ostalim metodama daju nam litološko-tehnički profil zdenca (Slika 16, 17, 18 i 19). Na takvom profilu grafički i numerički prikazan je litološki opis, dubina, uzorak, SPT graf udarca/stopa, promjer bušotine i zdenca, konstrukcija zdenca, razina podzemne vode te na kraju profil zdenca.



Slika 17. Litološko-tehnički profil zdenca SC-2.



Slika 18. Litološko-tehnički profil zdenca U-1.



Slika 19. Litološko-tehnički profil zdenca U-2.

## **8.2. Tamponiranje i osiguravanje zdenca**

Šljunčenje prstenastog prostora od dna bušotine, vodoprijemnog dijela zdenca, do glinenog čepa izvršen je separiranim šljunkom, veličine zrna od 4 – 8 mm. Iznad šljunka ugrađena je glinena brtva, a u svrhu izolacije vodonosnih slojeva od mogućih površinskih zagađenja. Po završetku bušenja u zdenac se ugrađuje crpka. Pogonski agregat i crpka moraju raditi kontinuirano odnosno moraju crpiti podzemnu vodu stalnim kapacitetom tijekom izvođenja pokusnog crpljenja. Kapacitet crpke i njena crpna količina moraju biti dovoljno veliki kako bi proizveli mjerljivo sniženje u piezometru.

## **8.3. Osvajanje zdenca**

Osvajanje zdenca SC-2 izvršeno je kompresorom, metodom "air lifta" do pojave čiste vode, odnosno do zadovoljenja kriterija udjela pijeska od 100 g/m<sup>3</sup> u uzorku vode (Slika 20.). Vrijeme za osvajanje metodom air-lifta je 24 sata [11]. Crpljenu vodu moramo odvesti s mjesta crpljenja tako da se ona ne procjeđuje nazad u vodonosnik. To se ostvaruje odvođenjem vode kroz cijevi i daljnjim ispuštanjem u kanal ili vodotok koji nije ni u kakvoj hidrauličkoj vezi s istraživanim vodonosnikom. Također, crpljenu vodu možemo odvesti kroz iskopane jarke koji prethodno moraju biti izgrađeni od slabopropusnog materijala ili prekrivenog dna plastičnom folijom koja je nepropusna [5].

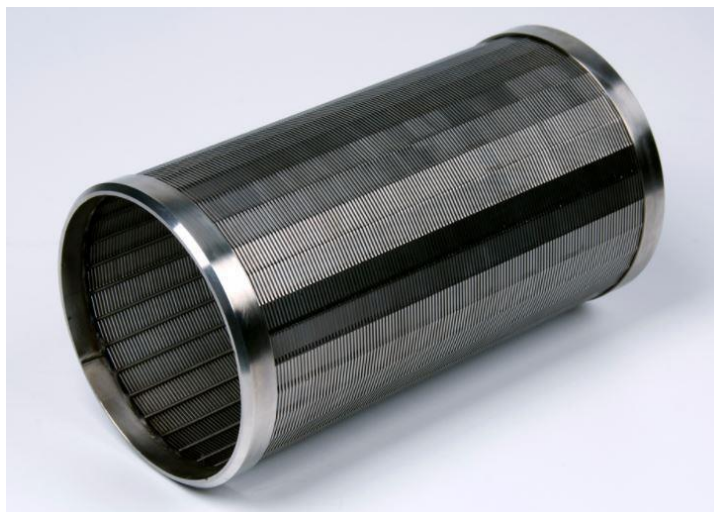




Slika 20. Voda nakon osvajanja zdenca.

#### **8.4. Tehnička konstrukcija zdenca**

Za konstrukciju istražno-eksploatacijskih (SC-1 i SC-2) i istražno-upojnih zdenaca (U-1 i U-2) korištene su PVC bunarske cijevi  $\text{Ø}225/203,4$  PN12.5 i atestirane na 9 bara. Ugrađene PVC cijevi sastoje se od pune cijevi, filtarskog dijela i taložnika. Što se tiče filtarskog dijela, obzirom na litološke karakteristike vodonosnog sloja (rezultati granulometrijske analize) ugrađen je trakasti ili slotirani filtar (Slika 21.) širine otvora 3,00 mm. U intervalu od 0,00 m do 6,00 m korištena je puna nadfiltracijska PVC cijev  $\text{Ø}225/203,4$ . Drugi interval predstavlja dubinu od 6,00m do 18,00 m i na tome intervalu dubine korištena je filtarska PVC cijev  $\text{Ø}225/203,4$  mm s otvorom filtra od 3,00 mm i dnom zdenca.



Slika 21. Trakasti ili slotirani filtar [13].

### 8.5. Projektiranje ulaznog kapaciteta zdenca

Poglavlje 6.1. teoretski objašnjava osnovu i razlog projektiranja ulaznog kapaciteta zdenca. Parametri za računanje ulaznog kapaciteta zdenca prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Parametri za projektiranje ulaznog kapaciteta zdenca.

Parameter	Oznaka	Veličina	Mjerna jedinica
Promjer ugrađenog filtra	d	0,225	m
Maksimalna brzina ulaza vode u filtar za laminarne uvjete tečenja	v	0,030	m/s
Širina trakastog otvora filtra	s	3,0	mm
ukupni perforirani dio filtra u postotcima	f	12,1	%
Ukupna duljina ugrađenog filtra	L	12,0	m

Uvrštavanjem parametara u izraz za maksimalan kapacitet po dužnom metru dobivamo njegovu veličinu:

$$q/m^{\text{`}} = d \cdot v \cdot f \cdot \pi = 0,225m \cdot \frac{0,030m}{s} \cdot 3,14 \cdot 0,121m = 0,002566m^3/s = 2,57l/s$$

Za potrebe daljnjeg računanja usvojena je veličina maksimalnog kapaciteta po dužnom metru od 2,50 l/s.

Kada su nam poznate sve veličine za izračun maksimalnog projektiranog kapaciteta prihrane vode u zdencu njena veličina iznosi:

$$Q_{ukupno} = d \cdot \pi \cdot L \cdot f \cdot v = L \cdot q/m^{\text{`}} = 30,00 l/s$$

## 8.6. Specifični kapacitet

Izvođenjem probnog crpljenja odnosno konstant testom utvrđene su veličine potrebne za izračun specifičnog kapaciteta zdenca i nalaze se u tablici 6.

Tablica 6. Parametri potrebni za izračun specifičnog kapaciteta zdenca.

Oznaka zdenca	Statička razina podzemne vode	Dinamička razina podzemne vode	Stalna crpna količina	Sniženje
SC-2	4,37 m	4,72 m	24,0 l/s	0,35 m

Crpljenje konstantnom količinom vode od 24,0 l/s vršeno je otprilike 8 sati na zdencu SC-2 i dovelo je statičku razinu podzemne vode od 4,37 m na dinamičku razinu 4,72 m što rezultira ukupnim sniženjem u zdencu od 35 cm. Kada su nam poznati parametri možemo izračunati specifični kapacitet:

$$q = \frac{Q}{s} = \frac{0,024 m^3/s}{0,35m} = 0,0686 [m^3/s/m]$$

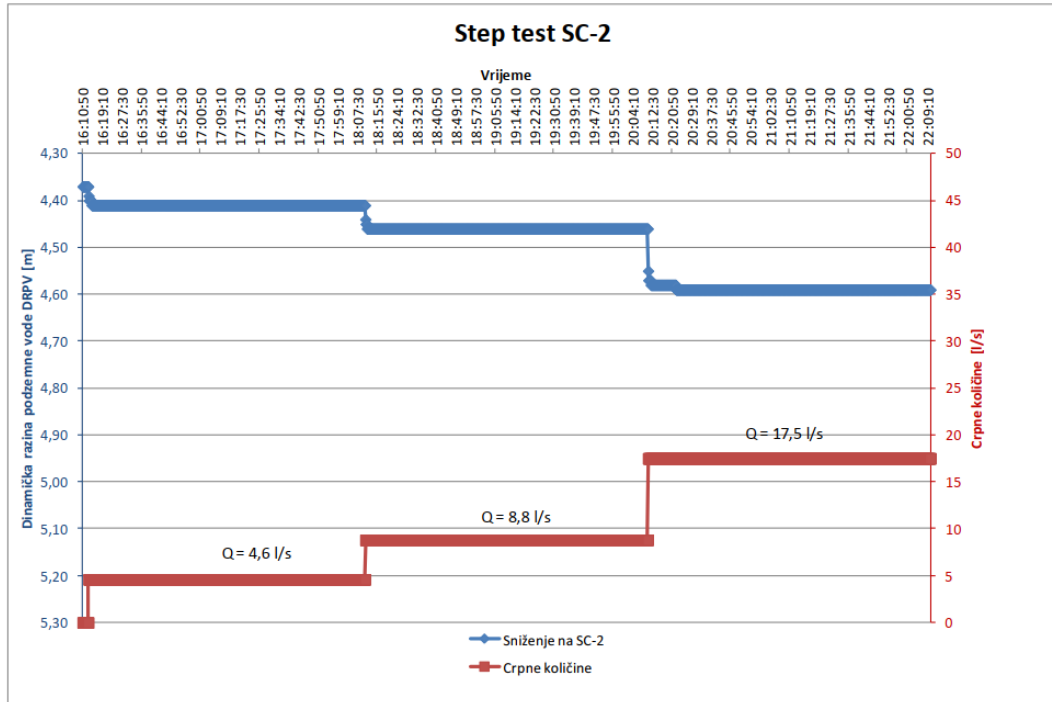
## 8.7. Jednadžba zdenca

Rješenje jednadžbe sniženja dobiveno je grafičkim putem preko Jacobove metode. Vrijednosti dinamičke razine vode za različite kapacitete crpljenja na istražno-eksploatacijskom zdencu SC-2 prikazane su tabelarno u tablici 7. U ovoj tablici su izračunate vrijednosti specifičnog sniženja za različite crpne količine. Vrijednosti specifičnog sniženja su neophodne za Jakobovu metodu računanja parametara otpora sloja ( $B$ ) i otpora zdenca ( $C$ ) što je vidljivo na slici 20.

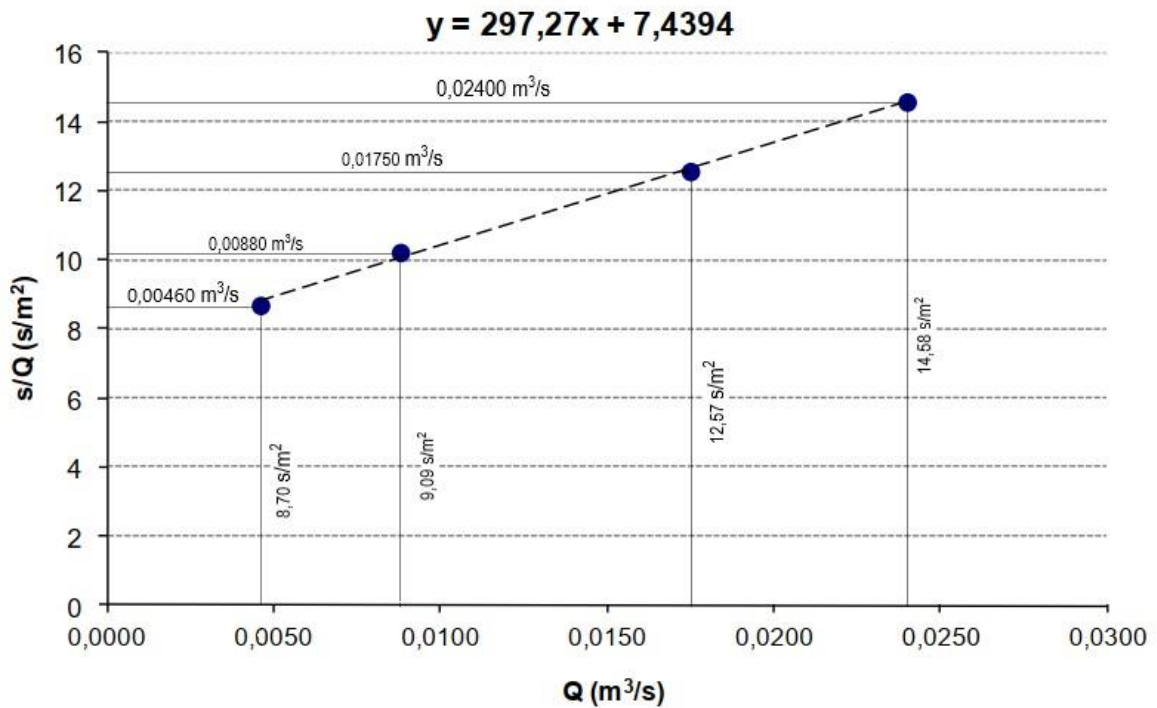
Tablica 7. Mjerenje dinamičke razine podzemne vode na istražno-eksploatacijskom zdencu SC-2.

Korak "i"	Crpna količina $Q_i$ [m <sup>3</sup> /s]	Sniženje $s_i$ [m]	Prirast crpne količine $\delta Q_i$ [m <sup>3</sup> /s]	Prirast sniženja $\delta s_i$ [m]	Specifično sniženje $s/Q$ [s/m <sup>2</sup> ]
1.	0,0000	0,0000	/	/	/
2.	0,0046	0,0400	0,0046	0,0400	8,70
3.	0,0088	0,0800	0,0042	0,0400	9,09
4.	0,0175	0,2200	0,0087	0,1400	12,57
5.	0,0240	0,3500	0,0065	0,1300	14,58

Grafički prikaz step testa (slika 22) pokusnog crpljenja bolje predočavaju odnos crpne količine i sniženja odnosno dinamičke razine podzemne vode u zdencu SC-2. Iz grafa je vidljivo kako su veličine crpne količine i dinamičke razine podzemne vode proporcionalne što nam potvrđuju rezultati iz tablice 6.



Slika 22. Grafički prikaz sniženja i crpne količine u intražno-eksploatacijskom zdencu SC-2 za test crpljenja u koracima.



Slika 23. Izračun parametra gubitka prema Jacobovoj metodi za zdenac SC-2.

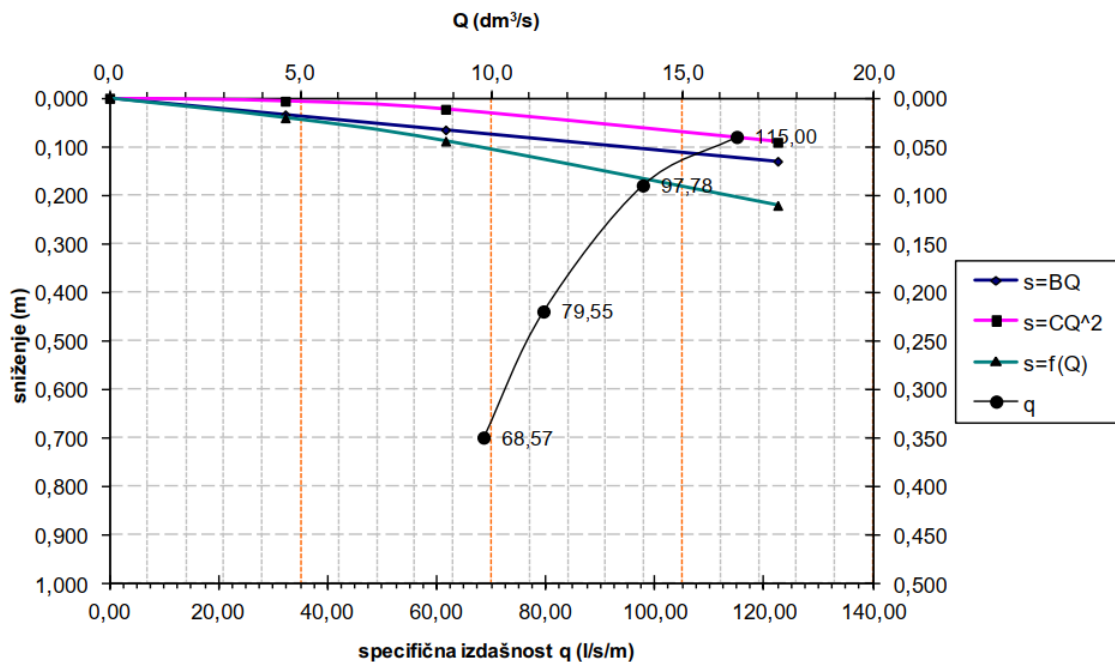
Vrijednost parametra B dobivena je u obliku odsječka na osi ordinate i iznosi  $B=7,4$   $s/m^2$  (Slika 23) dok je vrijednost parametra C dobivena na sljedeći način preko izraza:

$$C = \frac{\Delta(s/Q)}{\Delta Q} = 297,3 \text{ s}^2/m^5.$$

Nakon što smo odredili parametar otpora sloja i otpora zdenca, jednačba zdenca glasi:

$$s = 7,4 \cdot Q + 297,3 \cdot Q^2$$

Svi gubitci mogu se prikazati na jednom grafu koji na svojim osima ima sniženje (m), Specifičnu izdašnost  $q$  ( $l/s/m$ ) i crpnu količinu  $Q$  ( $dm^3/s$ ). Veličine sniženja, specifične izdašnosti i crpne količine počinju od 0 jer njihove vrijednosti nisu poznate prije početka crpljenja, dok je veličina specifične izdašnosti poznata (Slika 24).

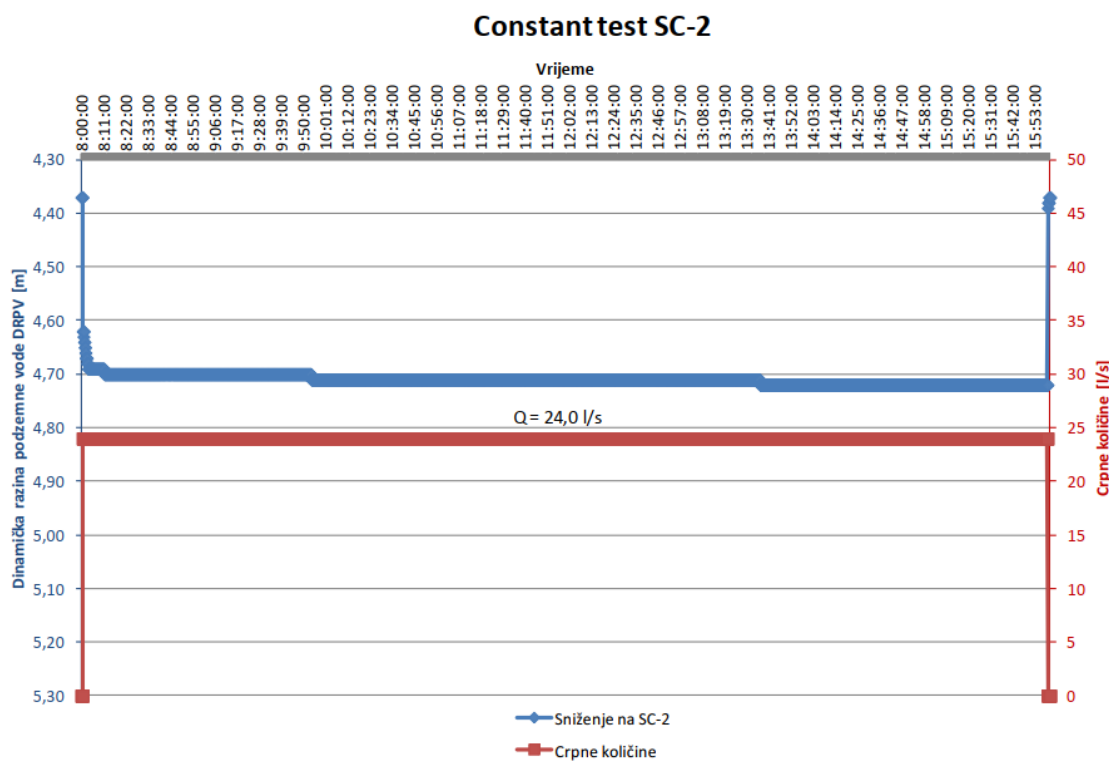


Slika 24. Grafički prikaz specifične izdašnosti, crpne količine i sniženja na zdencu SC-2.

S obzirom na koeficijent gubitka u zdencu, postoji podjela zdenaca prema Walton. Zdenac koji ima koeficijent gubitka na zdencu manji od  $0,5 \text{ min}^2/m^5$  smatra

se dobro projektiran i osvojen zdenac, ako je vrijednost istog parametra u intervalu  $0,5-1,0 \text{ min}^2/\text{m}^5$  tada će se takav zdenac okarakterizirati kao blago pogoršan zbog kolmatacije (začepljenje pora filtra). Ozbiljno pogoršan zbog kolmatacije će biti onaj zdenac koji ima koeficijent gubitka na zdencu u intervalu  $1,0-4,0 \text{ min}^2/\text{m}^5$ , a zdenci koji se teško regeneriraju i vraćaju u stanje prije crpljenja imaju koeficijent gubitka na zdencu veći od  $4,0 \text{ min}^2/\text{m}^5$ . Iz izvedenog pokusnog crpljenja dobivena je vrijednost parametra otpora zdenca  $C=0,083 \text{ min}^2/\text{m}^5$  što je prema Waltonovoj podjeli svrstava zdenac SC-2 u dobro projektiran i osvojen zdenac.

Prilikom crpljenja zdenca konstantnom količinom odnosno izvođenjem konstant testa, ujednačenom količinom od  $Q=24,0 \text{ l/s}$  u trajanju od 8 sati, sniženje u istražno-eksploatacijskom zdencu SC-2 pokazuje minimalno kolebanje dinamičke razine vode, odnosno ubrzo nakon početka crpljenja postiže se ravnotežno stanje crpne količine i prihrane iz vodonosnika (Slika 25).

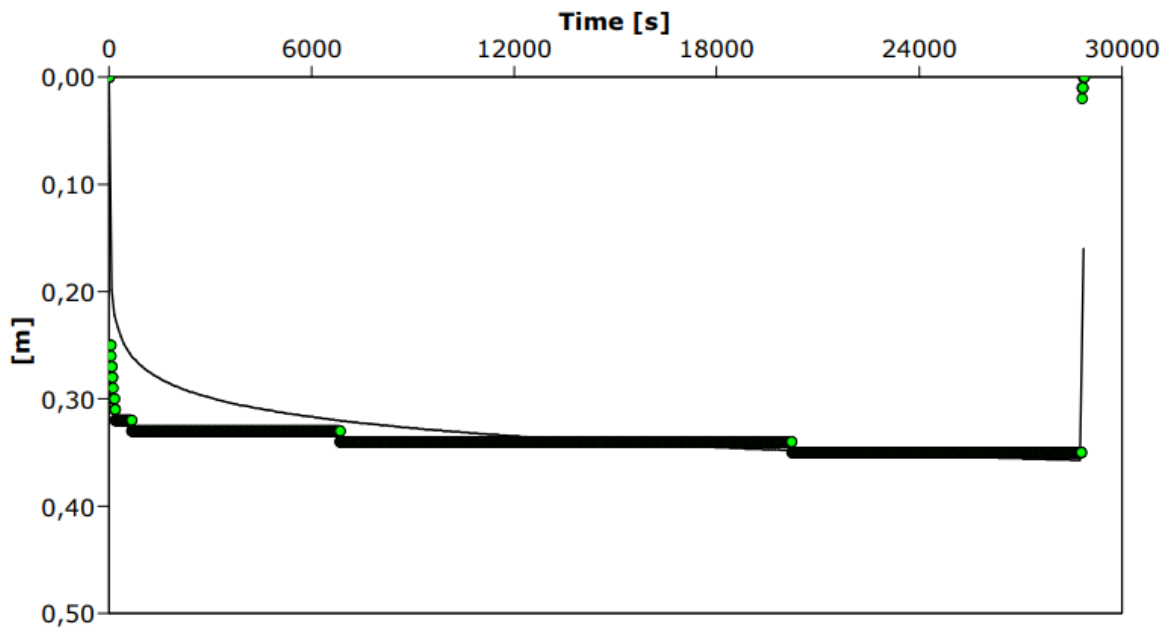


Slika 25. Sniženje u zdencu pri konstantnoj količini crpljenja.

## 9. Primjer određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika na temelju pokusnog crpljenja zdenca SC-2

Analiza je provedena korištenjem računalnog programa "AquiferTest 4.0" kojeg je razvila kanadska firma Waterloo Hydrogeologic 2004 godine. Rezultati i grafičke prezentacije rezultata prikazane su na slici 23, 24 i 25.

Slika 26. prikazuje rezultate "konstant test" metode pokusnog crpljenja odnosno sniženje u vremenu pri stalnoj crpnoj količini od 23,909 l/s na zdencu SC-2. Sa slike je vidljivo da sniženje od početka do kraja crpljenja nije drastično osciliralo tj. da se radi o sniženju od nekoliko centimetara tijekom cca 8 sati što je gotovo zanemarivo.



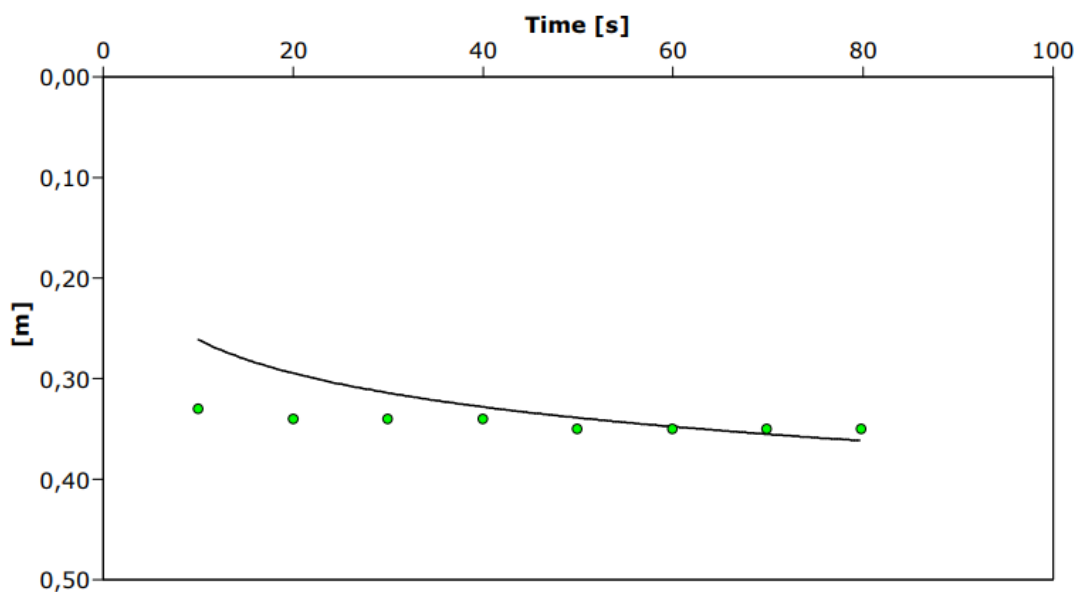
Slika 26. Rezultati "Konstant test" metode pokusnog crpljenja na zdencu SC-2.

Test oporavka zdenca prikazan je na slici 27. Nakon osmosatnog crpljenja konstantnom količinom od 23,909 l/s crpka prestaje raditi i tada počinje test oporavka na zdencu SC-2. Test traje 80 sekundi i na slici 24 je vidljivo da nema jačih odskakanja odnosno većeg ulaska vode u zdenac odnosno promjene razine podzemne vode u vodonosniku što znači da vodonosnik ima dobru transmisivnost i da se javljaju mali otpori u zdencu i oko njega.

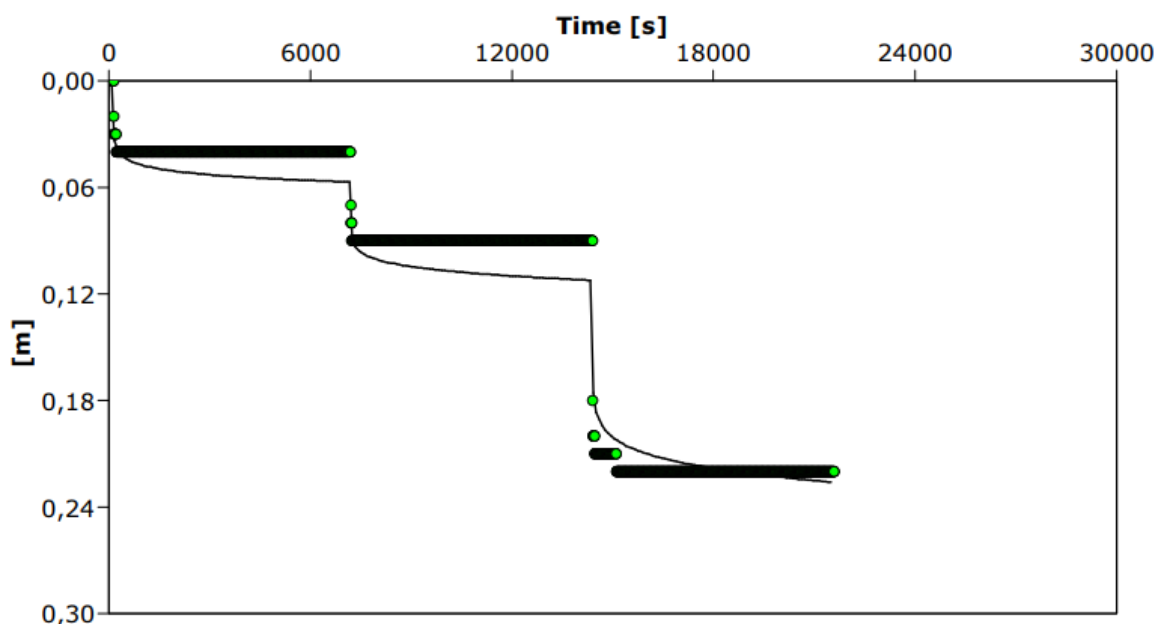


Posljednji test u nizu je eng. "step test" što znači da se zdenac crpi s nekoliko različitih crpnih količina od kojih je svaka sljedeća veća od prethodne. Prosječna crpna količina u ovom test na zdencu SC-2 je 10,273 l/s. Vidimo kako postoje jasne granice u koracima crpljenja (Slika 28.) odnosno u sniženju razine podzemne vode povećanjem crpne količine te da graf ima stepeničasti oblik što je normalno.

Za svaku metodu pokusnog crpljenja izračunati su u programu "AquiferTest 4.0" parametri vodonosnika: hidraulička vodljivost (K), koeficijent transmisivnosti (T) i koeficijent uskladištenja (S). Svaka metoda dala je drugačije vrijednosti parametara, a kao konačnu vrijednost istih uzeta je aritmetička sredina svakog parametra.



Slika 27. Rezultati metode oporavka zdenca zdencu SC-2.



Slika 28. Rezultati “step test” metode pokusnog crpljenja na zdencu SC-2.

### 9.1. Koeficijent vodopropusnosti

Za potrebe određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika na području studentskog kampusa u Varaždinu na zdencu SC-2, koeficijent vodopropusnosti određen je pokusnim crpljenjem s tri načina crpljenja, podatci su obrađeni u računalnom programu “AquiferTest 4.0”, a rezultati prikazani u Tablici 8.

Tablica 8. Veličine koeficijenta vodopropusnosti dobivene pokusnim crpljenjem te obrađene u programu “AquiferTest 4.0”.

Rezultati constant testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$6,60 \times 10^3$	$5,50 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	
Rezultati recovery testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$3,50 \times 10^3$	$2,92 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	
Rezultati step testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$7,10 \times 10^3$	$5,92 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	

Koeficijent transmisivnosti određen iz podataka crpljenja konstantnom crpnom količinom ( $T_c$ ) jest  $6,60 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{danu}$ . Crpljenjem uz promjenu crpne količine u koracima ( $T_s$ ) koeficijent transmisivnosti iznosi  $7,10 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{danu}$  i određen metodom povrata vode u crpni zdenac ( $T_r$ ) odnosno recovery testom iznosi  $3,50 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{danu}$  (tablica 7). Sva tri rezultata ne odskaču drastično jedan od drugoga odnosno istog su reda veličine od  $10^3 \text{ m}^2/\text{danu}$ . Konačna vrijednost koeficijenta vodopropusnosti (transmisivnosti) određena je aritmetičkom sredinom rezultata pokusnog crpljenja koja uključuje sva tri testa:

$$\bar{T} = \frac{T_c + T_r + T_s}{3} = \frac{6,60 \cdot 10^3 + 3,50 \cdot 10^3 + 7,10 \cdot 10^3}{3} = 5733,33 \text{ m}^2/\text{dan}$$

## 9.2. Hidraulička vodljivost

Za potrebe određivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika na području studentskog kampusa u Varaždinu na zdencu SC-2 hidraulička vodljivost određena je pokusnim crpljenjem s tri načina crpljenja, podaci su obrađeni u računalnom programu "AquiferTest 4.0", a rezultati prikazani u Tablici 9.

Tablica 9. Veličine koeficijenta vodljivosti dobivene pokusnim crpljenjem te obrađene u programu "AquiferTest 4.0"

Rezultati constant testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$6,60 \times 10^3$	$5,50 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	
Rezultati recovery testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$3,50 \times 10^3$	$2,92 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	
Rezultati step testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$7,10 \times 10^3$	$5,92 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	

Rezultati određivanja hidrauličke vodljivosti pokusnim crpljenjem ne ukazuju na velike razlike u redu veličina hidrauličke vodljivosti koja je za sva tri testa  $10^2$  što prema tablici 8 potvrđuje rezultate granulometrijske analize tla i poklapa se s

litološko-tehničkim profilom zdenca. Vrijednost parametra hidrauličke vodljivosti za test crpljenja konstantnom crpnom ( $K_c$ ) količinom iznosi  $5,50 \cdot 10^2$  m/danu. Test povratka vode u zdenac ili eng. "Recovery test" dao nam je nešto manju veličinu hidrauličke vodljivosti ( $K_r$ ) nego ostala dva testa  $2,92 \cdot 10^2$  m/danu. Izvođenjem crpljenja s promjenjivim količinama crpljenja ( $K_s$ ) dobivena je najveća vrijednost istog parametra  $5,92 \cdot 10^2$  m/danu. Konačna vrijednost parametra hidrauličke vodljivosti određena je aritmetičkom sredinom rezultata pokusnog crpljenja koja uključuje sva tri testa:

$$\bar{K} = \frac{K_c + K_r + L_s}{3} = \frac{5,50 \cdot 10^2 + 2,92 \cdot 10^2 + 5,92 \cdot 10^2}{3} = 487 \text{ m/danu}$$

### 9.3. Koeficijent uskladištenja

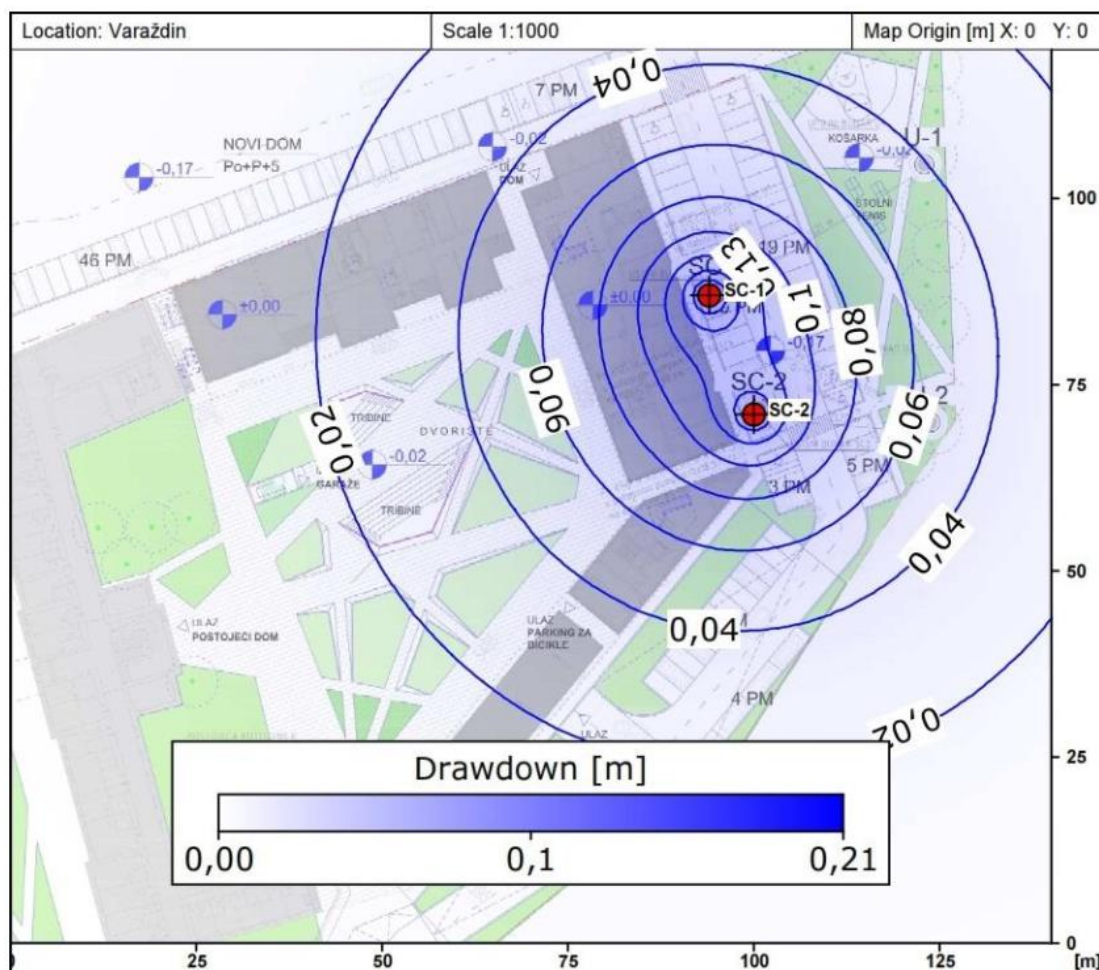
Koristeći računalni program "AquiferTest 4.0" dobivene su veličine koeficijenta uskladištenja i prikazane su u tablici 10. Sva tri testa su dala istu vrijednost parametra koeficijenta uskladištenja koja ima veličinu  $3,00 \cdot 10^{-1}$ .

Tablica 10. Veličine koeficijenta uskladištenja dobivene pokusnim crpljenjem te obrađene u programu "AquiferTest 4.0".

Rezultati constant testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$6,60 \times 10^3$	$5,50 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	
Rezultati recovery testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$3,50 \times 10^3$	$2,92 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	
Rezultati step testa					
Observation well	Transmissivity [m <sup>2</sup> /d]	K [m/d]	Storage coefficient	Radial distance to PW [m]	
SC-2	$7,10 \times 10^3$	$5,92 \times 10^2$	$3,00 \times 10^{-1}$	0,11	

## 10. Radijus utjecaja zdenaca na području studentskog kampusa u Varaždinu

Nakon utvrđivanja hidrogeoloških parametara vodonosnika na području studentskog kampusa u Varaždinu analizira se međusoban utjecaj zdenaca SC-1 i SC-2 u uvjetima stalne količine crpljenja. Analiza je provedena u računalnom programu "AquiferTest 4.0". Radijus utjecaja sniženja razine podzemne vode za projektirani maksimalni eksploatacijski režim crpljenja ( $q_{\max 1}$ ) zdenca SC-1 iznosi 18 l/s i za zdenac SC-2  $q_{\max 2}$  je 14 l/s. Vrijeme stalnog crpljenja pri ovakvim uvjetima traje 2 sata, a radijus utjecaja je prikazan na slici 29.



Slika 29. Utjecaj crpljenja istražno-eksploatacijskih zdenaca SC-1 i SC-2 maksimalnom projektiranom crpnom količinom na sniženje razine podzemne vode.

Zakrivljene linije na slici 26 predstavljaju radijus sniženja u okolici zdenaca prilikom crpljenja stalnim kapacitetom. Vidljivo je kako je to sniženje relativno malo, odnosno da se smanjuje s povećanjem udaljenosti, počevši od sniženja od 2 cm na rubu utjecaja zdenca odnosno 60 metara od njega do sniženja od 13 cm u neposrednoj blizini zdenca. Radijus utjecaja sniženja razine podzemne vode za projektiranu maksimalnu eksploatacijsku količinu i kapaciteta na zdencu SC-1 i SC-2 zadovoljavaju aspekt utjecaja na studentski kampus, okolne građevine, vodonosnik i varaždinska crpilišta . Tijekom stalnog crpljenja istom količinom zdenac od  $q_{\max 1}=18$  l/s za zdenac SC-1 i  $q_{\max 2}=14$  l/s za zdenac SC-2 koje je trajalo 2 sata bez prestanka, sniženje u navedenim zdencima na području studentskog kampusa u Varaždinu pokazuje minimalno kolebanje dinamičke razine podzemne vode tj. vrlo brzo postiže ravnotežno stanje crpljene količine i prihrane iz vodonosnika.

## 11. Zaključak

Na lokaciji studentskog doma odnosno kampusa u Varaždinu prilikom izgradnje novog krila studentskog doma i popratnih sadržaja izvedeni su istražno-eksploatacijski zdenci SC-1 i SC-2 te istražno-upojni zdenci U-1 i U-2. Određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika i hidrauličkih parametara zdenaca te radijus utjecaja zdenaca provedeno je probnim crpljenjem na istražno-eksploatacijskom zdencu SC-2. Rezultati probnog crpljenja istražno-eksploatacijskog zdenca SC-2 i utvrđivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika na užem području koristiti će se za daljnji razvitak i korištenje kampusa.

Analizom podataka pokusnog crpljenja zdenca dobivena je jednadžba zdenca SC-2:  $s = 7,3 \cdot Q + 297,3 \cdot Q^2$ . Također, iz podataka pokusnog crpljenja dobivena je vrijednost parametra otpora zdenca  $C=0,083 \text{ min}^2/\text{m}^5$ . Hidrogeološki parametri vodonosnika izračunati su na temelju pokusnog crpljenja prema rješenju Theis-a (korekcija Jacob-a) teorijom superpozicije u računalnom program „Aquifer Test Pro 4.0“. Rezultati ove analize daju nam veličine parametara vodonosnika: koeficijent hidrauličke vodljivosti (K) iznosi 478 m/dan, koeficijent vodopropusnosti (T) ima veličinu od 5733,33 m<sup>2</sup>/dan i koeficijent uskladištenja (S) je 0,3. Radijus utjecaja sniženja razine podzemne vode za projektiranu maksimalnu crpnu količinu pri kapacitetu zdenca SC-1  $q_1=18 \text{ l/s}$  i zdenac SC-2  $q_2=14 \text{ l/s}$  i trajanju crpljenja od 2 sata rezultira sniženjem od 4 cm na udaljenosti od 30 metara što zadovoljava aspekte utjecaja na studentski kampus, okolne građevine, vodonosnik i varaždinska crpilišta.

## 12. Popis literature

1. Urumović, K., (2003). Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
2. Miletić. P., Heinrich Miletić, M. (1981). Uvod u kvantitativnu hidrologiju. RGN – fakultet Sveučilišta u Zagrebu – OOUR studije geotehnike Varaždin i Nišro Varaždin
3. Urumović, K., (2005). Uz 150. obljetnicu Darcyeva zakona. Rudarskogeološko-naftni zbornik, vol 17. str. 15-18. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/5025> Datum pristupa: 11.05.2021.
4. Pollak. Z., (1995). Hidrogeologija za građevinare, Zagreb: Poslovna knjiga
5. Bačani. A., i Vlagović, T. (2012). Hidrogeologija - primjena u graditeljstvu. Sveučilište u Splitu, fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezija, Split
6. Hlevnjak. B., Strelec, S. i Jug, J., Hidrogeološki uvjeti pojave glinenih proslojaka unutar varaždinskog vodonosnika, 2015. Inženjerstvo okoliša, Vol.2/No.2
7. Vincek. D., Duški, I., Ježek Zenkel, N., (2014). Stanje okoliša Varaždinske Županije. UDK 504(497.523). Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/207351> Datum pristupa: 17.05.2021.
8. Strategija upravljanja vodama (NN BR. 91/2008) Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2008\\_08\\_91\\_2900.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2008_08_91_2900.html) Datum pristupa: 17.05.2021.
9. Bačani. A., (2013). Elaborat o zaštitnim zonama izvorišta Varaždin, Bartolovec i Vinokovščak. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
10. Lisičak. A., (2018). Primjena SINTACS metode procjene ranjivosti podzemnih voda na području varaždinskog vodonosnika. Diplomski rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.
11. Zelenika. M., (1995). Tehnologija izrade bušotina. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet Varaždin



12. Tomić. D., (2017). Opremanje zdenca za proizvodnju podzemnih voda te korištenje u energetske svrhe. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
13. Trakasti filter Dostupno na: <https://www.aqseptence.com/app/en/business-areas/waterwell-screens-johnson-screens/> Datum pristupa: 28.05.2021.
14. Grđan, D. (2002). Teorija filtracija podzemnih voda i primjena. Interna skripta. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.
15. Kovač. I., (2020). Eksploatacija podzemnih voda. Interna skripta. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.
16. Strelec, S., Filipović. A., Marcuiš. M., Grabar. K. (2017). Međusoban hidraulički utjecaj eksploatacijskog i upojnog zdenca u sustavu dizalica topline na temperature crpljene vode. Nafta i Plin. Vol. 37. No 152. 72-80. Dostupno na: [https://hrcak.srce.hr/index.php?show=toc&id\\_broj=15658](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=toc&id_broj=15658) Datum pristupa: 31.05.2021.
17. Kruseman. G.P., de Ridder. N.A., (1994). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Netherlands: International Institute for Land reclamation and Improvement.

### 13. Popis slika

Slika 1.	Relativna gustoća vode u funkciji temperature (pri atmosferskom tlaku)	3
Slika 2.	Shematski prikaz osnovnih tipova pora u stijenama	5
Slika 3.	Klasifikacija nekonsolidiranih sedimenata prema veličini zrna	6
Slika 4.	Klasifikacija i nomenklatura sitnozrnatih sedimenata s obzirom na postotak gline, praha i pijeska	7
Slika 5.	Granulometrijske krivulje za određene tipove tla	8
Slika 6.	Shematski prikaz Darcyevog eksperimentalnog aparata	13
Slika 7.	Shematski prikaz klasifikacije vodonosnika	16
Slika 8.	GIS geološka karta Varaždinskog vodonosnika	18
Slika 9.	Uzdužni litološki profil varaždinskog vodonosnika od Križovljana preko Varaždina do Vularija	19
Slika 10.	Shematski prikaz osnovnih komponenata zdenca	25
Slika 11.	Lokacija istražno-eksploatacijskih zdenaca SC-1 i SC-2 te istražno-upojnih zdenaca U-1 i U-2 na području Varaždinskog studentskog kampusa	26
Slika 12.	Skica zakona o spojenim posudama i razlici visina stupca emulzije i vode	29
Slika 13.	Vrste airlifta: a) metoda otvorenog airlifta i b) metoda sektorskog airlifta	30
Slika 14.	Primjer postavljanje crpke za pokusno crpljenje	33
Slika 15.	Shematski prikaz sniženja u crpljenom zdencu	35
Slika 16.	Litološko-tehnički profil zdenca SC-1	40
Slika 17.	Litološko-tehnički profil zdenca SC-2	41
Slika 18.	Litološko-tehnički profil zdenca U-1	42
Slika 19.	Litološko-tehnički profil zdenca U-2	43
Slika 20.	Voda nakon osvajanja zdenca	45
Slika 21.	Trakasti ili slotirani filter	46
Slika 22.	Grafički prikaz sniženja i crpne količine u intražno-eksploatacijskom zdencu SC-2 za test crpljenja u koracima	49
Slika 23.	Izračun parametra gubitka prema Jacobovoj metodi za zdenac SC-2.	49
Slika 24.	Grafički prikaz specifične izdašnosti, crpne količine i sniženja na zdencu SC-2.	50
Slika 25.	Sniženje u zdencu pri konstantnoj količini crpljenja.	51
Slika 26.	Rezultati "Konstant test" metode pokusnog crpljenja na zdencu SC-2.	49
Slika 27.	Rezultati metode oporavka zdenca zdencu SC-2.	53
Slika 28.	Rezultati "step test" metode pokusnog crpljenja na zdencu SC-2.	54
Slika 29.	Utjecaj crpljenja istražno-eksploatacijskih zdenaca SC-1 i SC-2 maksimalnom projektiranom crpnom količinom na sniženje razine podzemne vode	57

## 14. Popis tablica

Tablica 1.	Relativna gustoća nekih tekućina	3
Tablica 2.	Vrijednost poroznosti za pojedine vrste stijena	10
Tablica 3.	Fizikalni parametri vodonosnika	21
Tablica 4.	Veličine hidrauličke vodljivosti za različite tipove nevezanih stijena	38
Tablica 5.	Parametri za projektiranje ulaznog kapaciteta zdenca	46
Tablica 6.	Parametri potrebni za izračun specifičnog kapaciteta zdenca	47
Tablica 7.	Mjerenje dinamičke razine podzemne vode na istražno-eksploatacijskom zdencu SC-2	48
Tablica 8.	Veličine koeficijenta vodopropusnosti dobivene pokusnim crpljenjem te obrađene u programu "AquiferTest 4.0"	54
Tablica 9.	Veličine hidrauličke vodljivosti dobivene pokusnim crpljenjem te obrađene u programu "AquiferTest 4.0"	55
Tablica 10.	Veličine koeficijenta uskladištenja dobivene pokusnim crpljenjem te obrađene u programu "AquiferTest 4.0"	56