

# Mjerenje koeficijenta propusnosti tla izloženog naftnim derivatima

---

**Kun, Andrea**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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:130:042573>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANDREA KUN

MJERENJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI TLA IZLOŽENOG  
NAFTNIM DERIVATIMA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

MJERENJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI TLA IZLOŽENOG  
NAFTNIM DERIVATIMA

KANDIDAT:

ANDREA KUN

MENTOR:

Izv.prof.dr.sc. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2019.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

*Mjerenje koeficijenta propusnosti tla izloženog naftnim derivatima*

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

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, \_\_\_\_\_

Andrea Kun

---

(Ime i Prezime)

---

(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK

Andrea Kun, Mjerenje koeficijenta propusnosti tla izloženog naftnim derivatima

Voda je prisutna u porama tla te utječe na njegova fizikalna i mehanička svojstva. Propusnost tla predstavlja jedno od važnijih fizikalnih svojstava tla, a to svojstvo vezano je za mogućnost protjecanja fluida kroz tlo. Kako se najčešće radi o vodi, kao o prisutnom fluidu u tlu, tako se ovo svojstvo još naziva i vodopropusnošću. Određivanje koeficijenta propusnosti predstavlja jedno od najčešćih laboratorijskih ispitivanja u geotehnici, a kako bi se odredio koeficijent propusnosti potrebno je ispitati propusnost tla. Propusnost tla se u laboratoriju može ispitati u uvjetima stalne razlike potencijala (za nekoherentna tla) i promjenjive razlike potencijala (za koherentna tla).

Koeficijent propusnosti se, osim za vodu, može određivati i za druge tekućine kao što su npr. organska onečišćivala. Organska onečišćivala u tlu, kao što su naftni derivati, pojavljuju se u formi ne-vodene tekuće faze (NAPL), a odgovorni su za značajan udio onečišćenja tla i vode. NAPL tekućine se ne miješaju s vodom, ali se u njoj otapaju. Mogu biti gušće (DNAPL) ili rjeđe (LNAPL) od vode.

Edometar je uređaj koji prvenstveno služi za ispitivanje stišljivosti tla, ali se njime može utvrditi i koeficijent propusnosti ispitivanog uzorka. Prilikom ispitivanja tla u laboratoriju korišten je hidraulički edometar. U hidrauličkom edometru tlakom se upravlja preko pumpi kojima se može upravljati ili ručno ili pomoću specijaliziranih programskih paketa. Osim tlaka, pomoću pumpi moguće je mjeriti i volumen tekućine koja prolazi kroz uzorak. Iz volumena tekućine koja prođe kroz uzorak u određenom vremenskom periodu moguće je izračunati koeficijent propusnosti.

Cilj ovog rada trebala je biti usporedba koeficijenata propusnosti istog tla dobivenih za različite fulide – točnije vodu i naftni derivat (dizel gorivo) no prilikom ispitivanja propusnosti tla na naftni derivat došlo je do neočekivanog oštećenja gume za nanošenje opterećenja te je pokus prekinut. Pokazalo se da je za potrebe mjerenja koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru potrebno koristiti gumenu membranu znatno otporniju od one koja se nalazi u standardnoj upotrebi odnosno ponudi proizvođača korištene opreme.

**Ključne riječi:** propusnost, koeficijent propusnosti, voda, dizel, hidraulički edometar

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORETSKA OSNOVA.....	2
2.1. O tlu.....	2
2.1.1. Trokomponentni sustav tla.....	2
2.1.2. Klasifikacija tla.....	3
2.2. Edometar.....	6
2.3. Voda u tlu.....	7
2.3.1. Darcyjev zakon.....	8
2.3.2. Koeficijent propusnosti.....	9
2.4. Izloženost tla naftnim derivatima.....	12
2.4.1. Dielektrična konstanta.....	13
2.4.2. Dvostruki difuzni sloj.....	14
2.4.3. Veza između dvostrukog difuznog sloja i dielektrične konstante.....	15
2.4.4. Koeficijent propusnosti istog tla za fluide s različitom dielektričnom konstantom.....	16
3. HIDRAULIČKI EDMETAR.....	19
3.1. Dijelovi hidrauličkog edometra.....	20
3.1.1. Toksična ćelija.....	22
3.2. Ugrađivanje uzorka u hidraulički edometar.....	24
3.2.1. Uzorak zasićen vodom.....	24
3.2.2. Uzorak zasićen dizelom.....	28
4. REZULTATI EDMETARSKOG ISPITIVANJA.....	33
4.1. Uzorak zasićen vodom.....	33
4.2. Uzorak zasićen naftnim derivatima.....	34
5. ZAKLJUČAK.....	38
6. LITERATURA.....	39
7. POPIS SLIKA.....	41
8. POPIS TABLICA.....	42

## 1. UVOD

Cilj izrade ovog diplomskog rada je mjerenje i usporedba koeficijenta propusnosti tla izloženog odnosno zasićenog s različitim tekućinama u laboratoriju uz pomoć hidrauličkog edometra. Koeficijent propusnosti mjeren je na dva uzorka istog tla ugrađenih pod jednakim uvjetima, ali pri čemu je prvi uzorak bio zasićen vodom dok je drugi uzorak bio zasićen naftnim derivatom (dizel).

Mjerenja koeficijenta propusnosti u laboratoriju inače se određuju mjerenjem protoka vode kroz uzorak određenog presjeka i pod određenim uvjetima tlaka. Metode koje se prilikom određivanja koeficijenta propusnosti koriste su:

- metoda s promjenjivom razlikom tlakova (za slabo propusna tla poput praha i gline),
- metoda s konstantnom razlikom tlakova (za jače propusna tla poput pijeska) i
- metoda sa zadanim protokom (za sve vrste tla). [1]

Prve dvije metode pripadaju konvencionalnim metodama mjerenja propusnosti, dok je treća metoda novija i predstavlja modificiranu/inverznu metodu konstantne razlike tlakova. Kod konvencionalnih metoda određivanje propusnosti svodi se na mjerenje protoka vode kroz uzorak određenog presjeka prilikom čega se mjeri odgovarajuća razlika tlakova. [1]

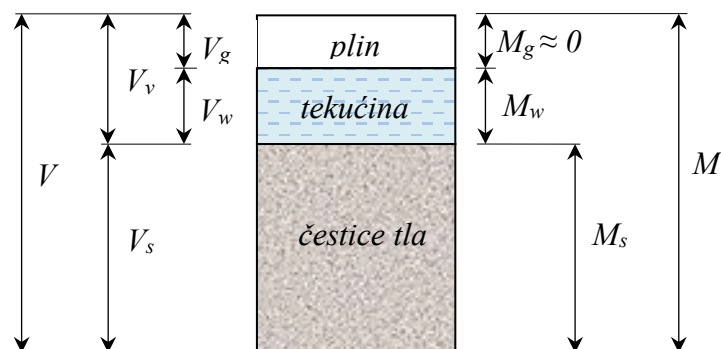
## 2. TEORETSKA OSNOVA

### 2.1. O tlu

Tlo je proizvod prirodnih procesa (raspadanja stijena, transporta i taloženja raspadnutih čestica) te je zbog toga vrlo raznoliko i često nejednoliko, čak i na ograničenoj lokaciji. Struktura i građa tla (sadržaj, veličina, oblik, organizacija i položaj čestica i grupa čestica u prostoru, veličina i raspored pora, međučestične sile i mineraloški sastav čestica tla) ovise o nastanku tla i uvjetima sredine i djelovanja kojima je tlo bilo izloženo tijekom svoje povijesti. [2, 3]

#### 2.1.1. Trokomponentni sustav tla

Tlo se sastoji od čestica različite krupnoće i od međuprostora, tj. pora, koje mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom. U prirodi se rijetko može pronaći primjer u kojem su pore u potpunosti zasićene zrakom te se iz tog razloga govori o trodijelnom sustavu u tlu (Slika 1.). Budući da tlo predstavlja trokomponentni sustav koji se sastoji od čestica tla, vode i plina (najčešće zrak) u porama tla, svako ispitivanje tla mora voditi o takvoj građi tla. Ukoliko se u porama tla osim vode nalazi i zrak tada se radi o nezasićenim tlima, a ako su sve pore ispunjene vodom onda se radi o zasićenim tlima. [2, 3]



Slika 1 Trodijelni sustav tla [4]

Gdje je:

- $V$  - ukupni volumen uzorka (sve tri faze), [cm<sup>3</sup>],
- $V_v$  - volumen pora (engl. "voids"), [cm<sup>3</sup>],
- $V_s$  - volumen čvrstih čestica (engl. "solids"), [cm<sup>3</sup>],

$V_g$	-	volumen plina ( <i>engl. "gas"</i> ), [cm <sup>3</sup> ],
$V_w$	-	volumen vode ( <i>engl. "water"</i> ), [cm <sup>3</sup> ],
$M$	-	ukupna masa uzorka, [g],
$M_g$	-	masa plina, [g],
$M_w$	-	masa vode, [g] i
$M_s$	-	masa čvrstih čestica, [g].

### 2.1.2. Klasifikacija tla

Klasifikacija tla podrazumijeva postupak kojim se različite ili iste vrste tala svrstavaju u pojedine grupe radi međusobnog razlikovanja i isticanja određenih svojstava. Najčešća i najvažnija klasifikacija kojom se tla svrstavaju u grupe su granulometrijski sastav i svojstva plastičnosti. [2]

Osnovne grupe tla prikazane su u Tablici 1., dok su u Tablici 2. prikazani simboli koji se koriste za formatiranje klasifikacijskih simbola.

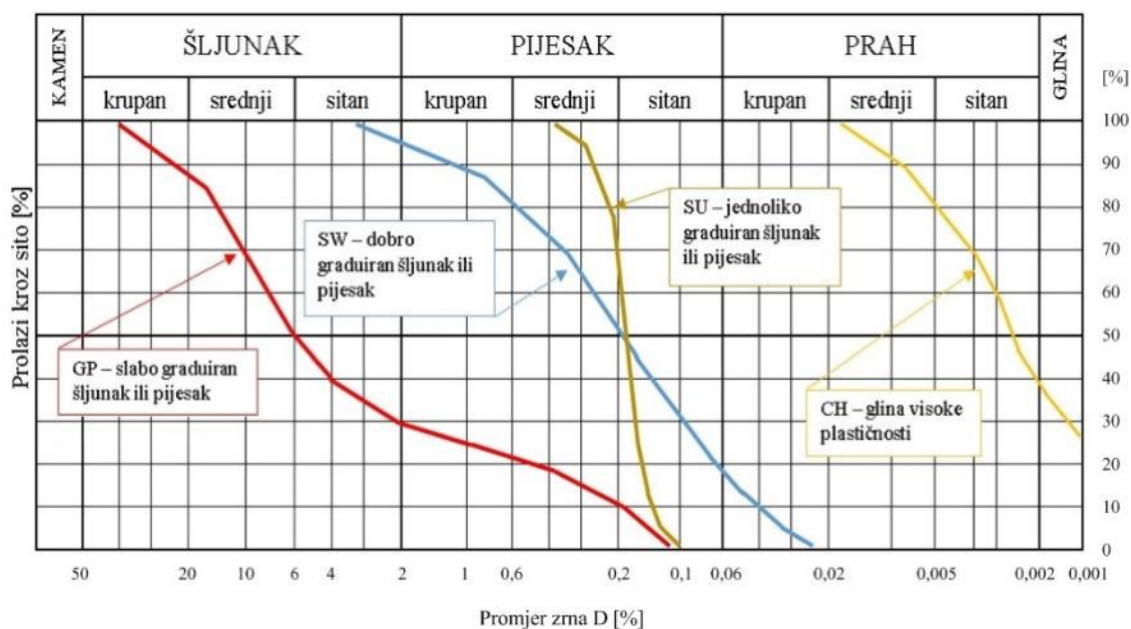
Udio čestica određene krupnoće u određenoj masi tla određuje se pomoću granulometrijske analize kojom dobivamo granulometrijsku krivulju. Granulometrijska krivulja se ucrtava u granulometrijski dijagram (Slika 2.), a služi za razredbu krupnozrnatog tla. Tlo se smatra krupnozrnatim kada se u ukupnoj masi tla ima više od 80 % krupnozrnatih čestica. [3]

*Tablica 1 Osnovne grupe tla prema veličini zrna [4]*

VRSTA TLA	PROMJER ZRNA	SIMBOL
Šljunak	60 – 2 mm	G
Pijesak	2 – 0,06 mm	S
Prah	0,06 – 0,002 mm	M
Glina	< 0,002 mm	C
Organsko tlo		O
Treset		Pt

Tablica 2 Oznake koje se koriste za formatiranje klasifikacijskih simbola [4]

SIMBOL	OPIS
W	Dobro graduirano - široko granulometrijsko područje
C	Dobro graduirano s dovoljno glinovita veziva da veže krupna zrna
P	Slabo graduirano – nedostaje neka grupa zrna, malo sitnih frakcija
Fs	Slabo graduirano s mnogo prašinih čestica
Fc	Slabo graduirano s mnogo glinovitih čestica
U	Jednolično graduirano – jednozrnasto, malo sitnih čestica



Slika 2 Granulometrijski dijagram s tipičnim granulometrijskim krivuljama

U Tablici 3. prikazana je razradba tla prema nominalnom promjeru zrna. Nominalni promjer zrna predstavlja vrijednost dužine stranice kvadratičnog otvora na situ kada se granulometrijski sastav tla određuje sijanjem. Postupak sijanja moguće je koristiti samo za tla čiji je promjer zrna veći od 0,06 mm. Za promjere zrna manje od 0,06 mm nominalni promjer određuje se hidrometrijskom analizom, a nominalni promjer je tada promjer idealne kugle. [3]



Tablica 3 Klasifikacija tla prema nominalnom promjeru zrna [3]

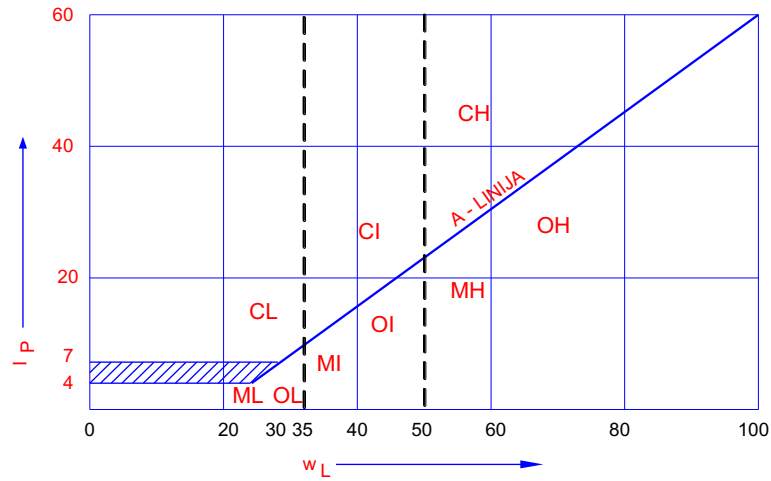
		<b>OPIS</b>	<b>NOMINALNI PROMJER ZRNA</b>	<b>TLO PREMA RAZREDBI</b>	
<b>ZRNA</b>	<b>KRUPNA</b>	KAMEN	> 60 mm	KRUPNOZRNATO TLO	
		ŠLJUNAK	KRUPAN		60 – 20 mm
			SREDNJI		20 – 6 mm
		PIJESAK	SITAN		6 – 2 mm
			KRUPAN		2 – 0,6 mm
		<b>SITNA</b>	PRAH		SREDNJI
	SITAN			0,2 – 0,06 mm	
	GLINA		KRUPAN	0,06 – 0,02 mm	
			SITAN	0,02 – 0,006 mm	
			SITAN	0,006 – 0,002 mm	
		GLINA	< 0,002 mm		

Za razradbu sitnozrnatog (koherentnog) tla koriste se Atterbegove granice. To su empirijski pokusi, oblikovani za potrebe određivanja ponašanja glina pri određenoj vlažnosti. Danas se nazivaju klasifikacijskim pokusima, a kao rezultat tih pokusa dobivaju se granice plastičnosti i indeksni pokazatelji. Klasifikacijske oznake za koherentna tla nalaze se u Tablici 4. [3]

Tablica 4 Klasifikacijske grupe praha i gline [4]

<b>SIMBOL</b>	<b>OPIS</b>
ML, CL, OL	Prah, glina i organsko tlo niske plastičnosti; $w_L < 35\%$
MI, CI, OI	Prah, glina i organsko tlo srednje plastičnosti; $35\% < w_L < 50\%$
MH, CH, OH	Prah, glina i organsko tlo visoke plastičnosti; $w_L > 50\%$

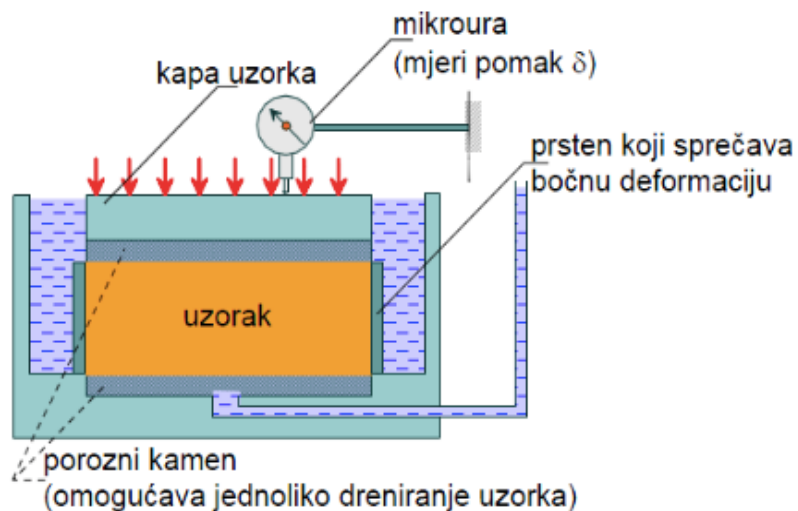
Arthur Casagrande utvrdio je da povezujući indeks plastičnosti  $I_p$  i granicu tečenja  $w_L$  za pojedine koherentne vrste materijala, nastaje grupiranje materijala u pojedinim zonama. Na taj način je dobio dijagram koji je nazvao dijagram plastičnosti. Dijagram plastičnosti (Slika 3.) je temelj općenito prihvaćenog sistema klasifikacije koherentnih materijala. [4]



Slika 3 Dijagram plastičnosti [4]

## 2.2. Edometar

Edometar je uređaj u kojem se ispituje stišljivost tla u uvjetima promjene samo jedne od šest komponenti deformacije. Sve ostale komponente deformacije, barem teoretski, ostaju nepromijenjene. Od tuda se u edometru simulira jednodimenzionalna stišljivost tla. U edometru se uz pokus stišljivosti vrši i pokus ispitivanja vodopropusnosti s promjenjivim potencijalom. Na Slici 4. prikazan je shematski prikaz edometra. [3]



Slika 4 Shematski prikaz edometra [4]

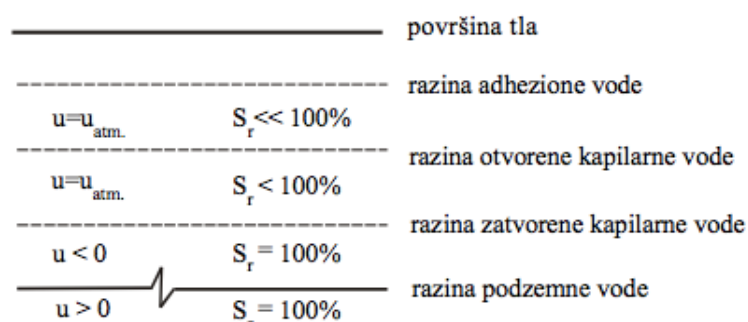
### 2.3. Voda u tlu

Voda je prisutna u tlu i utječe na njegova fizikalna i mehanička svojstva. Propusnost tla predstavlja jedno od važnijih fizikalnih svojstava tla. To svojstvo vezano je za mogućnost protjecanja fluida kroz tlo, a budući da se najčešće voda pojavljuje kao fluid u tlu, ovo svojstvo se naziva i vodopropusnost. [2]

Na protjecanje vode kroz tlo utječu sljedeća svojstva tla: granulometrijski sastav, veličina i raspored pora, oblik i raspored čestica, mineraloški sastav čestica, temperatura, viskoznost vode, stupanj zasićenosti, način i uvjeti tečenja. Uz to na brzinu tečenja vode u tlu ovisi i propusnosti tla, a voda teče od mjesta višeg prema mjestu nižeg visinskog potencijala. [2]

Voda se u tlu može pojaviti u sljedećim oblicima (Slika 5.):

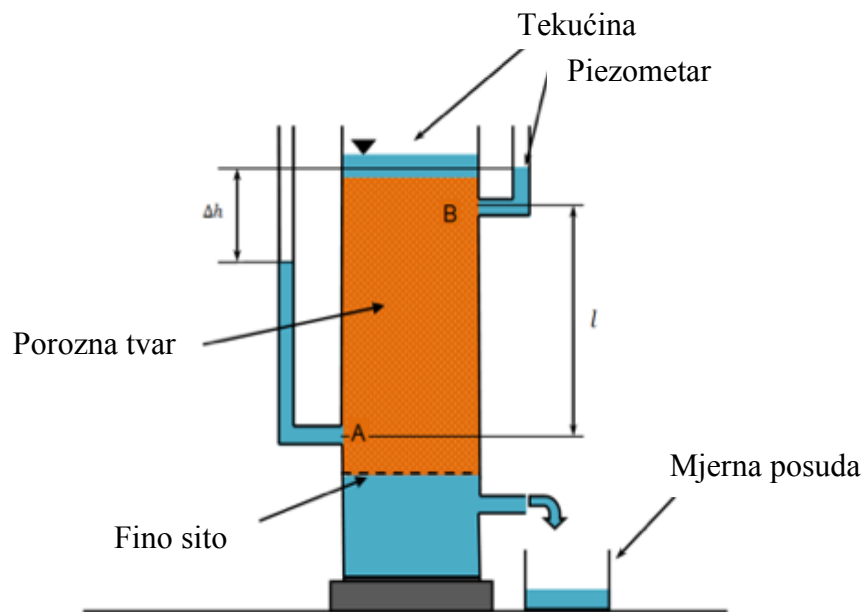
- *Adhezivna voda* - voda obavija čvrste čestice tla u tankom sloju, vezana prije svega elektrokemijskim silama, nema kapilarnih učinaka;
- *Otvorena kapilarna voda* - voda se skuplja oko mjesta dodira čvrstih čestica, oblikuju se meniskusi i kapilarno je djelovanje bitno, ali stupanj zasićenosti je posve malen;
- *Zatvorena kapilarna voda* - tlo je zasićeno ili gotovo potpuno zasićeno, porni tlak je negativan;
- *Podzemna voda* - tlo je zasićeno ili gotovo potpuno zasićeno, porni tlak jednak je hidrostatskom, a na razini podzemne vode jednak je atmosferskom tlaku. [3]



Slika 5 Oblici pojavljivanja vode u tlu [3]

### 2.3.1. Darcyjev zakon

Francuski inženjer Henry Darcy ustanovio je da je strujanje vode kroz tlo analogno strujanju vode u cijevima. Darcy je ispitivanja provodio u vertikalnoj cijevi koja je bila ispunjena pijeskom (Slika 6.). Kao rezultat tih eksperimenata utvrđeno je da je brzina toka kroz stupac zasićenog pijeska proporcionalna razlici hidrauličkog potencijala na krajevima stupca i obrnuto proporcionalna dužini stupca. [4]



Slika 6 Darcyjev pokus [4]

Ta spoznaja se naziva Darcyjev zakon, iskazan je kroz osnovnu jednadžbu koja opisuje strujanje podzemne vode. Taj zakon se matematički može izraziti kao:

$$v = \frac{k \times (h_1 - h_2)}{L} \quad (1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

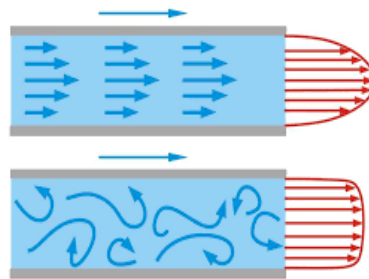
Uz pomoć gornjih izraza Darcyjeva brzina se kraće može prikazati slijedećim izrazom:

$$v = k \times i \quad (3)$$

Gdje je:

$v$	-	Darcyjeva brzina toka, [m/s],
$L$	-	razmak između pijeziometara, [m],
$\Delta h$	-	razlika totalnih pijeziometarskih nivoa, [m].
$k$	-	koeficijent propusnosti, [m/s],
$i$	-	hidraulički gradijent, [-]. [3, 4]

Darcyjev zakon vrijedi samo pri laminarnom tečenju, kada su brzine tečenja male te je zadovoljen uvjet da tijekom tečenja nije došlo do promjene volumena tla. Turbulentna tečenja se javljaju pri većim gradijentima u tlu s velikim porama. Laminarni režim tečenja pojavljuje se u svim vrstama tla osim u vrlo krupnozrnatim šljuncima i kamenim nabačajima. Granična brzina tečenja između laminarnog i turbulentnog režima tečenja u tlu je oko 1 cm/s, a njihova razlika prikazana je na Slici 7. [2, 3]



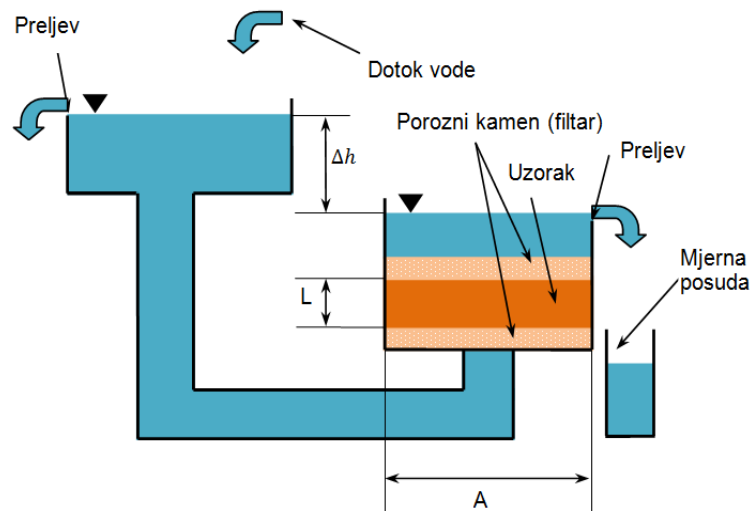
*Slika 7 Laminarni (gornja slika) i turbulentni režim tečenja (donja slika)*

### **2.3.2. Koeficijent propusnosti**

Ispitivanjima vodopropusnosti mjeri se količina vode koja protekne kroz uzorak u nekom vremenu. Tečenje može biti pod stalnom razlikom potencijala ili pri promjenjivim potencijalima. Pokus s konstantnim potencijalima koristi se za propusna tla dok se pokus s promjenjivim potencijalima koristi za slabo propusna tla. Kako bi se dobili što realniji rezultati ispitivanja, potrebno je ispitivanja provoditi na neporemećenim uzorcima ili na uzorcima na kojima se može postići zbijenost kao u tlu. [2, 5]

Mjerenje propusnosti uz stalni tlak izvodi se na neporemećenom uzorku kako je prikazano na Slici 8. Uzorak tla ugrađuje se u cilindar koji je s gornje i donje strane

omeđen filtrima, a zatim se s donje strane dovodi voda. Stalna razina vode na izlazu održava se pomoću preljeva. Protok vode se mjeri, u određenim vremenskim razmacima, u graduiranoj menzuri uz održavanje stalne razine vode u posudi s uzorkom. [5]

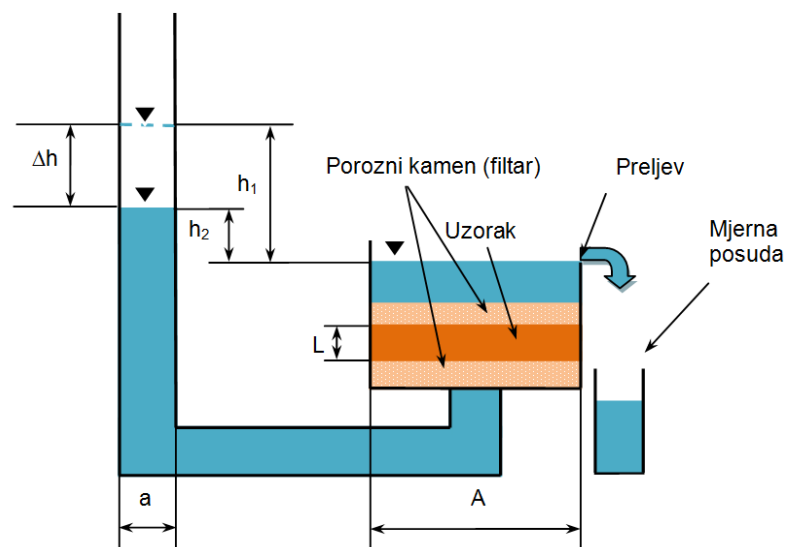


Slika 8 Skica uređaja za mjerenje koeficijenta propusnosti uz stalni tlak [4]

Pojedinačna i ukupna količina vode  $Q$  [cm<sup>3</sup>] dobije se na temelju podataka o izmjerenoj količini vode koja prođe kroz uzorak dužine  $L$  [cm] poprečnog presjeka  $A$  [cm] u vremenskim razmacima  $t$  [s]. Koeficijent propusnosti  $k$  [cm/s] dobije se prema slijedećem izrazu [5]:

$$k = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (4)$$

Mjerenje propusnosti s promjenjivim tlakom izvodi se na neporemećenom uzorku kako je prikazano na Slici 9. Uređaj se sastoji od metalnog cilindra i cijevi s centimetarskom podjelom. Uzorak se ugrađuje u cilindar dok se donji dio cilindra stavlja u posudu s vodom. Prije ispitivanja potrebno je uzorak zasititi s vodom na način da se dolijeva voda kroz staklenu cijev sve dok se ne pojavi na donjem kraju. Razina vode se također održava uz pomoć preljeva. [5]



Slika 9 Slika uređaja za mjerenje koeficijenta propusnosti uz promjenjiv tlak [4]

Na temelju podataka o visini vode u cijevi prije i poslije ispitivanja može se izračunati koeficijent propusnosti prema slijedećem izrazu:

$$k = \frac{L \times a}{A \times \Delta t} \times 2,3 \log \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

gdje je:

- |            |   |  |
|------------|---|--|
| $k$        | - | koeficijent propusnosti, [cm/s],               |
| $A$        | - | presjek uzorka, [cm <sup>2</sup> ],            |
| $L$        | - | visina uzorka, [cm],                           |
| $a$        | - | presjek vertikalne cijevi, [cm <sup>2</sup> ], |
| $h_1$      | - | visina vode u cijevi prije pokusa, [cm],       |
| $h_2$      | - | visina vode u cijevi nakon pokusa, [cm] i      |
| $\Delta t$ | - | vremenski interval, [s]. [4]                   |

Koeficijent propusnosti  $k$  izražava se u potencijama od 10 zbog same brzine toka vode koja je u tlu jako mala. U Tablici 5. prikazane su relativne vrijednosti koeficijenta  $k$ , dok su u Tablici 6. prikazane tipične vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti. [6]

Koeficijent vodopropusnosti ovisi o:

- veličini zrna – što su zrna veća, veća je i vodopropusnost,

- koeficijentu poroznosti – što je poroznost manja, manja je i vodopropusnost,
- viskoznosti vode – viskoznost vode ovisi o temperaturi, a porastom temperature raste i vodopropusnost,
- obliku zrna, njihove raspodjele i povezanosti,
- količini zraka/plina u porama tla – prisustvo zraka smanjuje vodopropusnost. [7]

*Tablica 5 Relativna vodopropusnost k u m/s [7]*

<b>OPIS</b>	<b>k [m/s]</b>
Velika ili visoka vodopropusnost	$> 10^{-3}$
Srednja vodopropusnost	$10^{-3} - 10^{-5}$
Niska ili mala vodopropusnost	$10^{-5} - 10^{-7}$
Vrlo mala vodopropusnost	$10^{-7} - 10^{-9}$
Zanemarivo, gotovo nepropusno	$< 10^{-9}$

*Tablica 6 Tipične vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti k u cm/s [6]*

<b>VRSTA TLA</b>	<b>k [cm/s]</b>
Šljunak	$10^2 - 10^1$
Pijesak	$10^{-1} - 10^{-3}$
Sitan pjeskovit prah i smjese	$10^{-3} - 10^{-7}$
Glina	$< 10^{-7}$

#### **2.4. Izloženost tla naftnim derivatima**

Česta organska onečišćivala u tlu su ulja, masti, derivati nafte, fenol, benzen, industrijska otapala, perkloretilen (PCE), policiklički aromatski ugljikovodici (PAH), poliklorirani bifenili (PCB), poliklorirani dibenzofurani (PCDF), poliklorirani dibenzo-p-dioksini (PCDD) itd. [8]

Organska onečišćivala u tlu kao što su naftni derivati pojavljuju se u formi nevodene tekuće faze (NAPL) koja se ne miješa s vodom. NAPL tekućine mogu biti gušće



od vode te se tada označavaju kao DNAPL ili rjeđe od vode LNAPL. Derivati nafte s obzirom na svoju gustoću ( $0,72 - 1,0 \text{ g/cm}^3$ ) spadaju u LNAPL tekućine. [8, 9]

Viskoznost NAPL tekućina može biti veća i manja od viskoznosti vode, npr. sirova nafta i njeni derivati teku 2 do 10 puta sporije nego voda. Također su i slabo topljivi u vodi, ali tijekom vremena će ipak doći do manjeg otapanja u vodi iako uglavnom ostaju kao zasebna tekućina u tlu. [8]

Najčešće do onečišćenja s NAPL-om dolazi zbog curenja površinskih i podzemnih spremnika naftnih derivata. Pri većim infiltriranim količinama LNAPL-a na površini podzemne vode može se pojaviti plivajući sloj tekuće LNAPL faze. Voda koja infiltracijom dolazi s površine tla otapat će LNAPL masu te će formirati oblak onečišćenja u vodenoj fazi koji se potom širi zasićenom zonom tla. [8]

Osnovna razlika između LNAPL i DNAPL onečišćenja javlja se u zasićenoj zoni tla gdje LNAPL fluidi plivaju na podzemnoj vodi dok DNAPL frakcija tone. Zbog toga remedijacija LNAPL onečišćenja predstavlja lakši zadatak od remedijacije DNAPL-a. [8]

Dalje će se u radu prikazati usporedba koeficijenata propusnosti kada je tlo bilo izloženo različitim organskim onečišćivalima kao što su voda, etanol, dizel i kerozin. Također će se, s obzirom da je uočena i ovisnost koeficijenta propusnosti s debljinom dvostrukog difuznog sloja i dielektrične konstante, opisati i ti pojmovi.

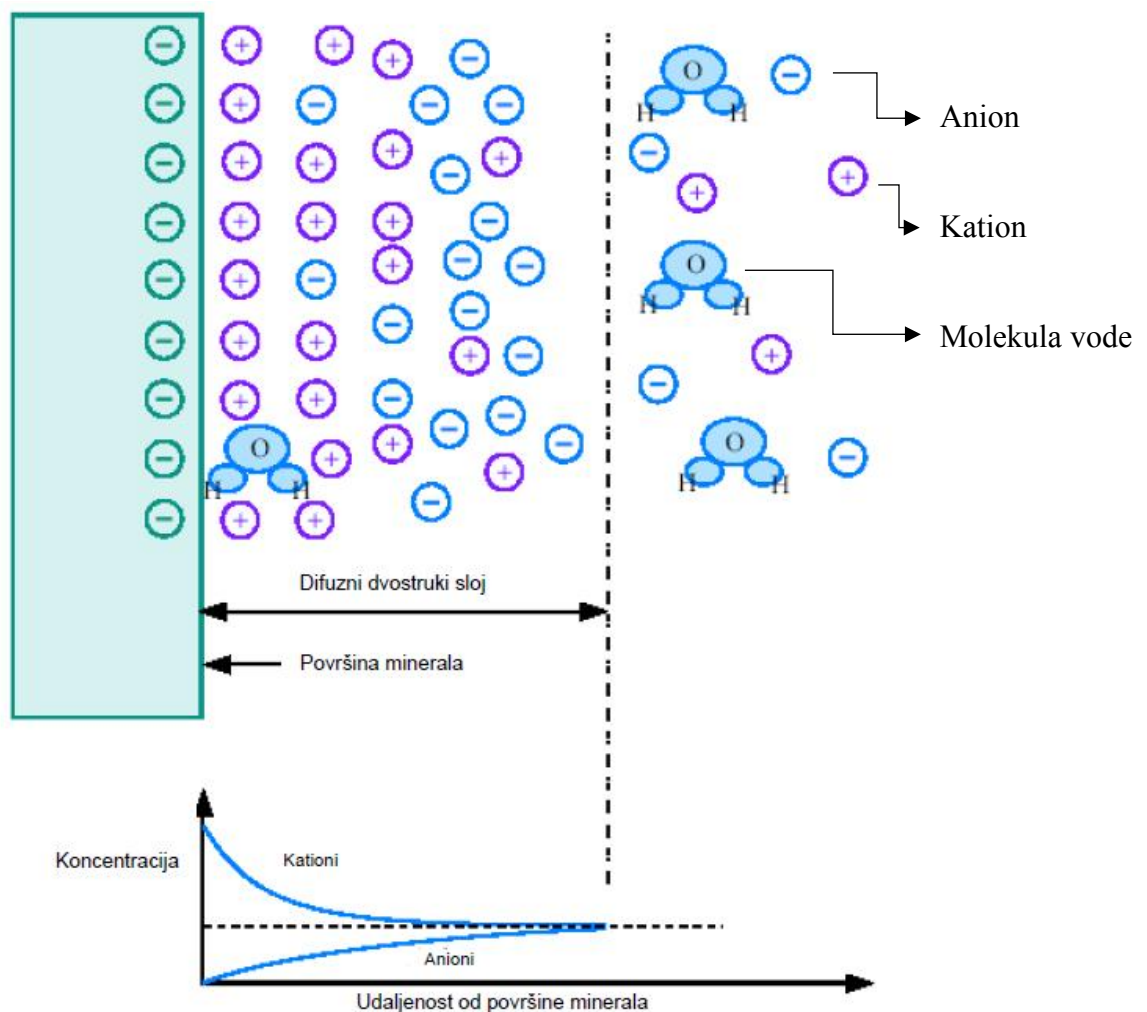
#### ***2.4.1. Dielektrična konstanta***

Razlikuju se dvije dielektrične konstante, apsolutna i relativna dielektrična konstanta. Relativna dielektrična konstanta ( $\epsilon_r$ ) je značajka pojedine tvari, tj. ovisi o vrsti dielektrika. To je broj bez dimenzije koji pokazuje koliko je puta veća gustoća električnog toka (električna indukcija) u toj tvari, nego što bi, uz istu jakost polja bila u vakuumu. Umnožak relativne dielektrične konstante ( $\epsilon_r$ ) i dielektrične konstante vakuuma ( $\epsilon_0$ ) je permitivnost (propustljivost) dielektrika ili apsolutna dielektrična konstanta ( $\epsilon$ ). [10]

### 2.4.2. Dvostruki difuzni sloj

Električki nabijena površina minerala gline s ionima koji su distribuirani uz njenu površinu naziva se dvostruki difuzni sloj. Uz samu površinu minerala gline nalazi se velika koncentracija kationa koja se smanjuje udaljavanjem od površine, a koncentracija aniona se smanjuje približavanjem površini minerala.

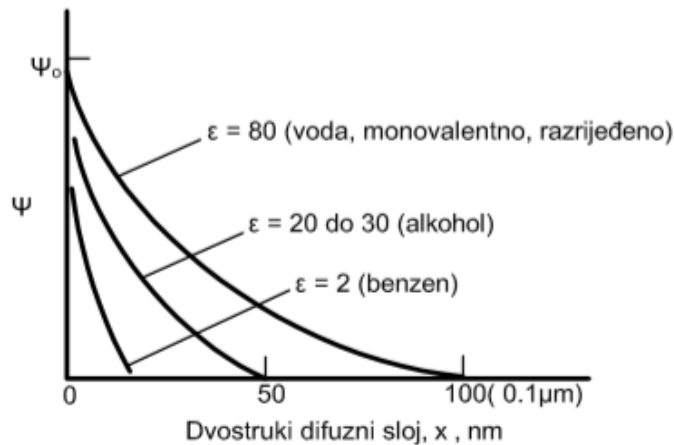
Procesom difuzije pokušava se izjednačiti koncentracija kationa i aniona u pornoj vodi čemu se opiru elektrostatičke sile na površini minerala. Takva djelovanja rezultiraju specifičnom distribucijom iona. Uz površinu minerala pojavljuje se stlačeni sloj kationa dok se dalje od nje pojavljuje difuzni sloj, od kuda je došlo do naziva dvostruki sloj. Na Slici 10. nalazi se prikaz difuznog dvostrukog sloja. [11]



Slika 10 Dvostruki difuzni sloj [11]

### 2.4.3. Veza između dvostrukog difuznog sloja i dielektrične konstante

Odnos veze između dvostrukog difuznog sloja i dielektrične konstante prikazan je na Slici 11.



Slika 11 Veza između dvostrukog difuznog sloja i dielektrične konstante [12]

Kao što se može primijetiti, električni potencijal opada s udaljenošću od čestica gline i približava se nuli na kraju dvostrukog sloja. Također se može primijetiti kako se smanjivanjem dielektrične konstante smanjuje i debljina dvostrukog difuznog sloja.

S obzirom da je većina tekućine unutar dvostrukog difuznog sloja fiksirana samim time ona ne sudjeluje u procesu protoka, ali smanjenjem debljine sloja povećava se volumen pora. Kao rezultat toga dolazi i do većeg koeficijenta propusnosti. [12]

Vrijednost debljine dvostrukog difuznog sloja može se izračunati prema izrazu:

$$t = \sqrt{\frac{\varepsilon \times K_b \times T}{8\pi \times n_e \times e^2 \times v^2}} \quad (6)$$

gdje je:

- $\varepsilon$  - dielektrična konstanta,
- $K_b$  - Boltzmann-ova konstanta,
- $T$  - temperatura,
- $n_e$  - koncentracija elektrolita,
- $e$  - osnovni naboj i

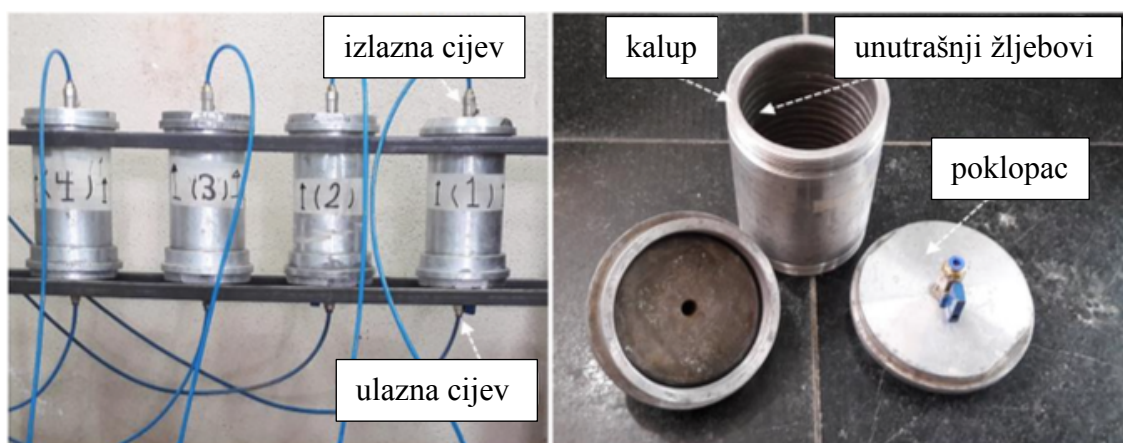
$v$  - valencija iona. [12]

#### **2.4.4. Koeficijent propusnosti istog tla za fluide s različitom dielektričnom konstantom**

Podaci o koeficijentima propusnosti dobiveni za različite naftne proizvode i organska otapala preuzeti su iz [9].

Za ovo istraživanje korištena su tla s područja Saravana, Iran. Sakupljena tla prosijana su kroz sito br. 200 (0,075 mm), a korišteni su finiji dijelovi. Preliminarnim pokusima određeno je da se radi o glinama, jedan uzorak je visoko plastična glina (CH) – tlo A, a drugi je nisko plastična glina (CL) – tlo B. Za ispitivanje su korištene slijedeće tekućine: voda iz slavine, etanol, dizel i kerozin.

Uređaj koji se koristio, napravljen je na Sveučilištu Guilan, a sastoji se od spremnika, tlačne pumpe, ventila za prilagodbu fluksa fluida, barometra, kalupa, cijevi sa žljebovima i od stakloplastike za stavljanje kalupa. Kalupi su cilindričnog oblika promjera 10 cm i visine od 17 cm, a izrađeni su od aluminijske. Na vrhu i dnu kalupa nalaze se poklopci kroz koje prolaze cijevi za prijenos tekućine. Uređaj je prikazan na Slici 12.



*Slika 12 Uređaj sa Sveučilišta Guilan [9]*

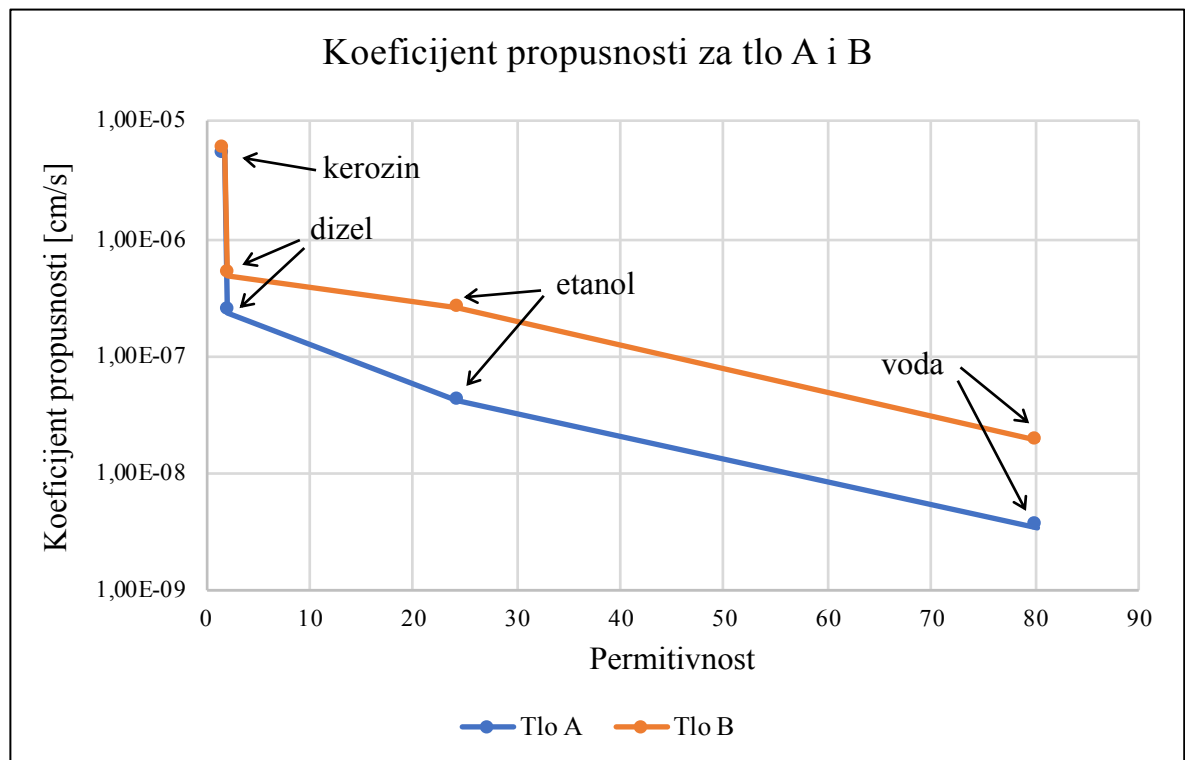
Kao i kod provođenja pokusa u hidrauličkom edometru, bitno je da uzorak u uređaju bude u potpunosti zasićen. Kako bi se omogućio ravnomjerni ulazak tekućine u

uzorak te spriječio izlazak finih čestica iz uzorka, postavljaju su se filtri od 2 cm. Filtri koji se nalaze na dnu su izrađeni od dva sloja geosintetika sa šljunkom između njih.

Mjerenjem vremena i volumena istjecanja tekućine i poznavanjem razlike u visini između dna i vrha kalupa te duljine i presjeka uzorka, može se izračunati koeficijent propusnosti prema izrazu (4). Prema dobivenim rezultatima o koeficijentu propusnosti iz [9], napravljena je Tablica 7. i graf prikazan na Slici 13.

Tablica 7 Vrijednosti koeficijenata propusnosti [9]

Vrsta tekućine	Dielektrična konstanta $\epsilon$ [-]	Koeficijent propusnosti k za tlo A [cm/s]	Koeficijent propusnosti k za tlo B [cm/s]
Voda	80,1	$3,5 \times 10^{-9}$	$1,89 \times 10^{-8}$
Etanol	24,3	$4,1 \times 10^{-8}$	$2,56 \times 10^{-7}$
Dizel	2,13	$2,37 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-7}$
Kerozin	1,8	$5,3 \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-6}$



Slika 13 Usporedba koeficijenata propusnosti [9]

Na temelju prikazanih rezultata za tlo A može se uočiti da se smanjivanjem permitivnosti od 80,1 do 1,8 povećava koeficijent propusnosti s  $10^{-9}$  na  $10^{-6}$  cm/s te se propusnost povećala za 1500 puta u odnosu na propusnost vode. Za tlo B, za isto smanjenje permitivnosti povećan je koeficijent propusnosti s  $10^{-8}$  na  $10^{-6}$  cm/s što znači da se propusnost povećala za 300 puta u odnosu na propusnost vode. Također se iz grafa može uočiti da kerozin ima najveći koeficijent propusnosti, slijedi ga dizel pa etanol.

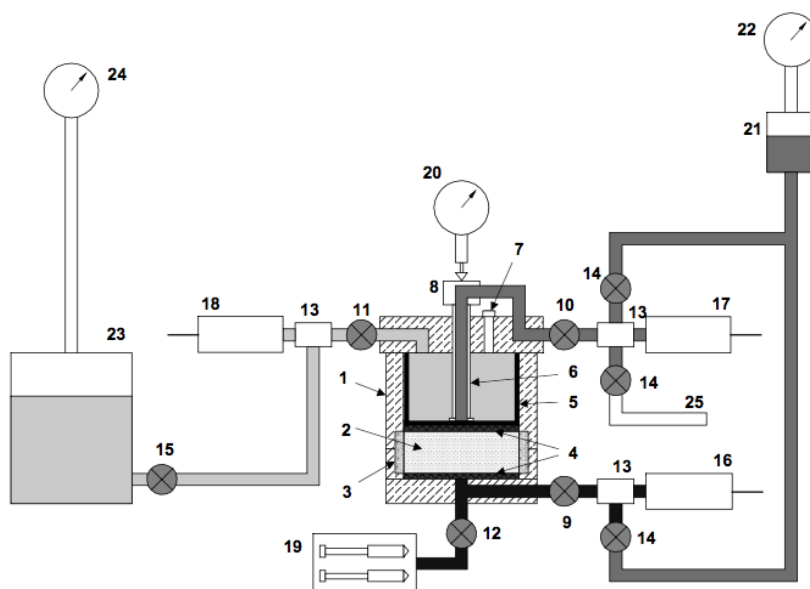
U oba tipa gline s različitim vrijednostima plastičnosti, najniža propusnost se odnosi na vodu ( $\varepsilon = 80,1$ ), etanol ( $\varepsilon = 23,4$ ) koji je relativno polarni fluid nalazi se u sredini, a visoke vrijednosti propusnosti odnose se na dizel ( $\varepsilon = 2,13$ ) i kerozin ( $\varepsilon = 1,8$ ) koji su nepolarne tekućine.

Prolaz ovih tekućina kroz tlo A povećao je propusnost kerozina do 1500 puta, a dizela do 70 puta više od vode, dok je prolazak tih tekućina kroz tlo B doveo do povećanja propusnosti za kerozin do 300 puta, a za dizel 26 puta.

Kako se plastičnost tla povećava, propusnost se smanjuje u odnosu na protok polarnih tekućina, ali nisu uočene značajne promjene u propusnosti nepolarnih fluida. Dakle, razlika između propusnosti polarnih i nepolarnih tekućina u tlu A veća je od tla B.  
[9]

### 3. HIDRAULIČKI EDMETAR

Uporabom hidrauličkog edometra, osim praćenja slijeganja uzorka, može se mjeriti i promjena volumena fluida u uzorku kako bi se izračunao koeficijent propusnosti. Preko pomičnog klipa edometra moguće je kontinuirano pratiti pomake, odnosno slijeganje uzorka tijekom trajanja pokusa. Hidraulički edometar razlikuje se od konvencionalnih edometara po tome što se konsolidacijski tlak primjenjuje hidraulički i do gornje površine uzorka prenosi preko savitljive gumene membrane, što je iskorišteno za mjerenje promjene volumena uzorka. Na Slici 14. prikazan je izgled uređaja za mjerenje koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka s uzorkom ugrađenim u hidraulički edometar. [1]



Slika 14 Shematski prikaz hidrauličkog edometra [1]

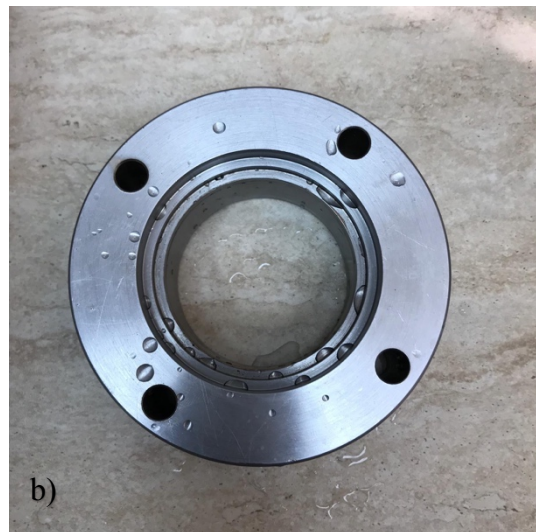
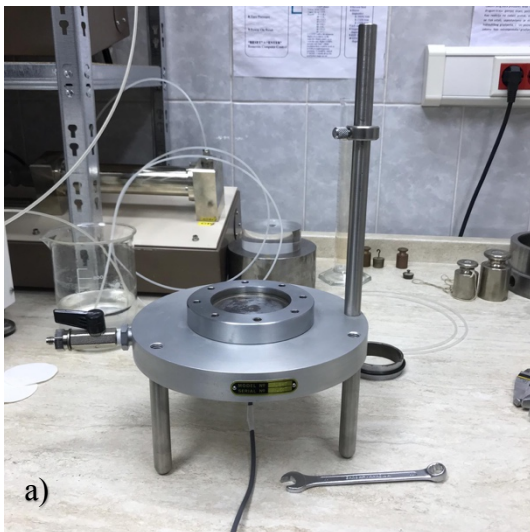
Pri čemu oznake sa slike označavaju:

1 kućište hidrauličkog edometra; 2 uzorak; 3 čelični prsten; 4 porozne pločice; 5 gumena membrana; 6 pomični klip; 7 ventil ćelije edometra; 8 metalna kapica; 9-12 Klingerovi tlačni ventili; 13 sustav za odzračivanje; 14 obični ventili; 15 ventil rezervoara za ćelijski tlak; 16-18 osjetila za tlak; 19 pumpa za zadavanje protoka; 20 mikroura za mjerenje pomaka; 21 rezervoar s vodom za porni tlak; 22 manometar za porni tlak; 23 rezervoar s vodom za ćelijski tlak; 24 manometar za ćelijski tlak; 25 cijev za isisavanje zraka. [1]

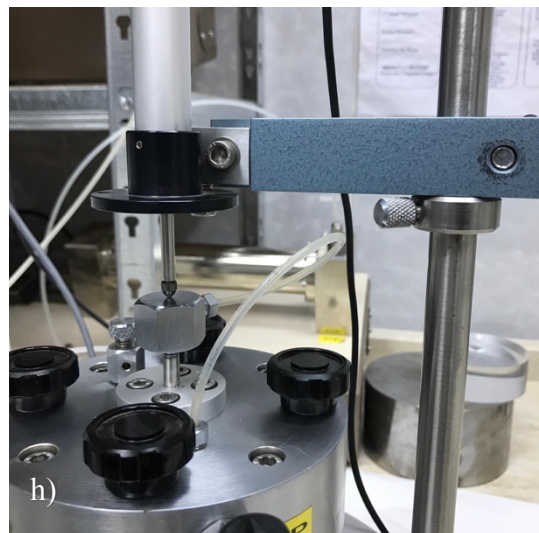
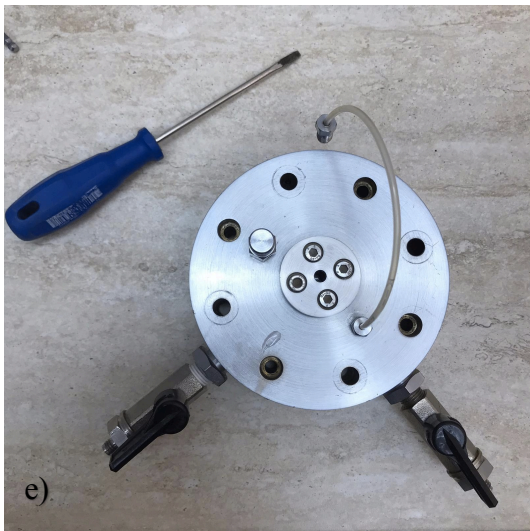
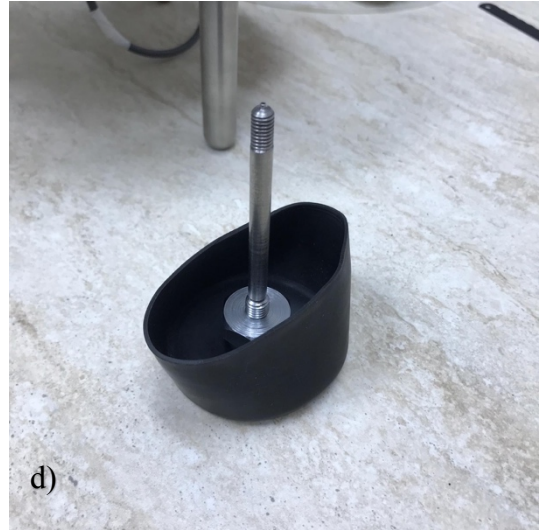
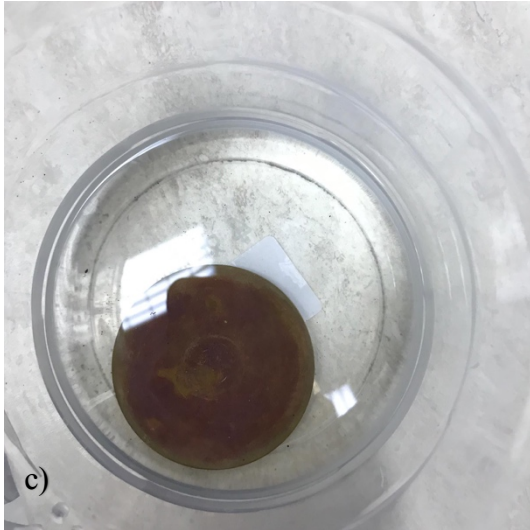
### 3.1. Dijelovi hidrauličkog edometra

Osnovni dijelovi hidrauličkog edometra su:

- postolje hidrauličkog edometra (Slika 15.a),
- kućište gumene membrane (Slika 15.b),
- čelični prsten u koji se ugradi uzorak,
- porozne pločice (Slika 15.c),
- gumena membrana (Slika 15.d),
- kapa edometra (Slika 15.e),
- vijci,
- metalni i gumeni prstenovi (Slika 15.f),
- pumpe za nanošenje ćelijskog i povratnog tlaka (Slika 15.g.),
- mjerilo vertikalnih pomaka (Slika 15.h) i
- cjevčice preko kojih su pumpe spojene na ćeliju edometra. [1]







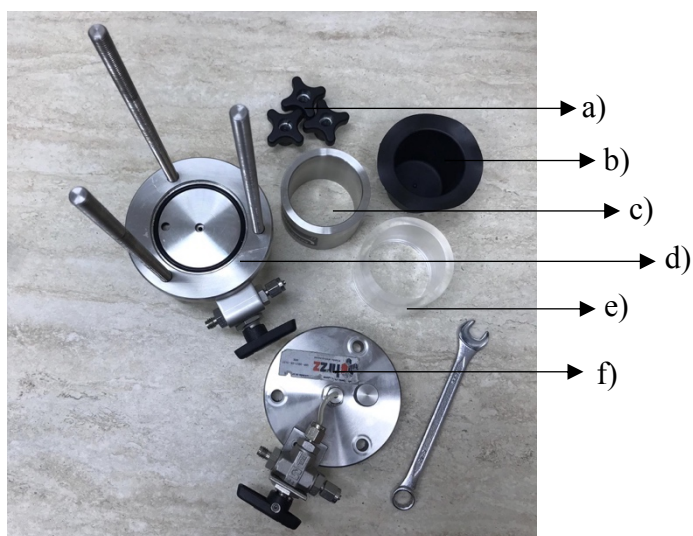
*Slika 15 Dijelovi hidrauličkog edometra*

### 3.1.1. Toksična ćelija

GDS toksična ćelija koristi se pri izvođenju pokusa prilikom kojeg se uzorak ne zasićuje vodom već kontaminiranim, štetnim tekućinama. Za vrijeme trajanja pokusa, svrha toksične ćelije je onemogućavanje ulaska kontaminirane tekućine u pumpe kojima se nanosi tlak radi njihove zaštite od štetnih utjecaja, kao npr. korozija.

Dijelovi toksične ćelije su:

- vijci (Slika 16.a),
- gumena membrana (Slika 16.b),
- metalna stjenka (Slika 16.c),
- postolje – baza ćelije (Slika 16.d),
- O-prsten (Slika 16.e),
- vrh ćelije (Slika 16.f). [13]



Slika 16 Dijelovi toksične ćelije

Kako bi se sastavila toksična ćelija potrebno je dobro podmazati njene dijelove kako bi se osiguralo dobro brtvljenje, a sastavljena toksična ćelija prikazana je na Slici 17. Slijed sastavljanja toksične ćelije:

- 1) na bazu ćelije (postolje) postavlja se metalni prsten,
- 2) na metalni prsten postavlja se gumena membrana tako da se ona u cijelosti nalazi unutar metalnog prstena,

- 3) zatim se na njih postavlja O-prsten,
- 4) kada su metalni prsten, membrana i O-prsten pravilno postavljeni na način da se nalaze u istoj ravnini potrebno je staviti vrh ćelije te
- 5) tako složenu ćeliju preostaje osigurati vijcima. [13]



*Slika 17 Sastavljena toksična ćelija*

Punjenje toksične ćelije s vodom i kontaminiranom tekućinom provodi se na sljedeći način:

- 1) gornji ventil spoji se s pumpom,
- 2) zatim se donji dio ćelije puni deaeriranom vodom,
- 3) uz pomoć regulatora tlaka ukloni se zrak iz gornjeg dijela ćelije te se zatvori ventil, a zrak se izbacila iz regulatora,
- 4) ovaj se postupak ponavlja sve dok se ne ukloni cijeli zrak iz gornjeg dijela,
- 5) toksična ćelija se zatim okreće naopako,
- 6) rezervoar kontaminirane tekućine spaja se s kontaminiranim dijelom ćelije,
- 7) uz pomoć regulatora zraka koji je spojen na gornji ventil, pomičemo membranu u suprotnom smjeru te se na taj način puni druga polovica membrane kontaminiranom tekućinom,
- 8) kada se ukloni sav zrak iz donjeg dijela ćelije zatvara se ventil,
- 9) zatim se toksična ćelija ponovno okreće kako bi se vratila u početni položaj,
- 10) na kraju se donji ventil spaja s potrebnim cijevima. [13]



### 3.2. Ugrađivanje uzorka u hidraulički edometar

#### 3.2.1. Uzorak zasićen vodom

Uzorak koji je korišten u ovom ispitivanju je poremećeni uzorak humusa prosijan kroz sito dimenzija 4 mm gustoće čestica  $\rho_s = 1,94 \text{ g/cm}^3$  (Slika 18.).



*Slika 18 Uzorak humusa i sito promjera 4 mm*

Masa ugrađenog uzorka, čija je početna vlažnost iznosila 42,8 %, dobila se razlikom masa hidrauličkog edometra bez uzorka i s ugrađenim uzorkom. Masa hidrauličkog edometra bez uzorka iznosila je 5,628 kg dok je masa s uzorkom iznosila 5,659 kg, a dobivena vrijednost mase ugrađenog uzorka iznosi:

$$m_{uzorka} = 31 \text{ g}$$

Uz masu uzorka potrebno je odrediti i volumen čeličnog prstena u koji je uzorak ugrađen. Čeličnom prstenu potrebno je odrediti visinu (Tablica 8.) i unutrašnji promjer (Tablica 9.), a mjerenja se provode više puta kako bi dobili što točniju vrijednost volumena.

Tablica 8 Visina prstena

VISINA PRSTENA h [mm]	
h <sub>1</sub>	19,00
h <sub>2</sub>	18,92
h <sub>3</sub>	18,96
h <sub>4</sub>	19,00
<b>h<sub>sr</sub></b>	<b>18,97</b>

Tablica 9 Promjer prstena

PROMJER PRSTENA d [mm]	
d <sub>1</sub>	63,26
d <sub>2</sub>	63,48
d <sub>3</sub>	63,48
d <sub>4</sub>	63,36
<b>d<sub>sr</sub></b>	<b>63,40</b>

Volumen prstena izračuna se prema izrazu:

$$V = \frac{(d_{sr})^2 \times \pi}{4} \times h_{sr} \quad (1)$$
$$V = \frac{(63,40 \text{ mm})^2 \times \pi}{4} \times 18,97 \text{ mm}$$
$$V = 59887,44 \text{ mm}^3$$
$$V = 5,99 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Uz već poznate podatke o volumenu i masi uzorka može se dobiti gustoća ugrađenog uzorka prema slijedećem izrazu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$
$$\rho = \frac{31 \text{ g}}{59,9 \text{ cm}^3}$$
$$\rho = 0,52 \text{ g/cm}^3$$

Kada se dobije gustoća uzorka moguće je izračunati gustoću suhog tla prema:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (9)$$

$$\rho_d = \frac{0,52 \text{ g/cm}^3}{1 + 0,428}$$

$$\rho_d = 0,36 \text{ g/cm}^3$$

Sad kada imamo poznatu vrijednost gustoće suhog tla može se izračunati i početni koeficijent pora prema:

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + e} \rightarrow e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (10)$$

$$e = \frac{1,94 \text{ g/cm}^3}{0,36 \text{ g/cm}^3} - 1$$

$$e = 4,39$$

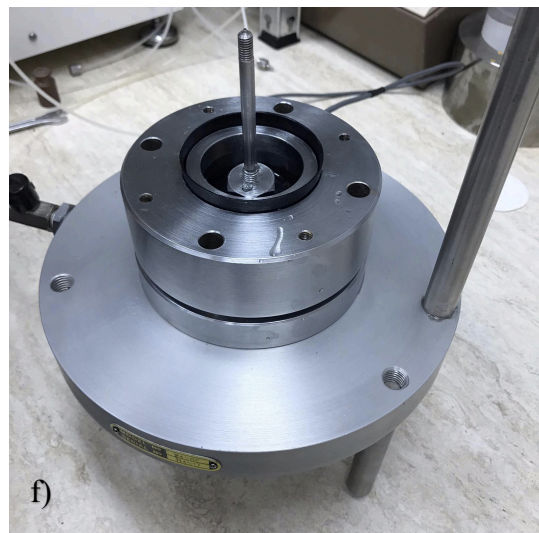
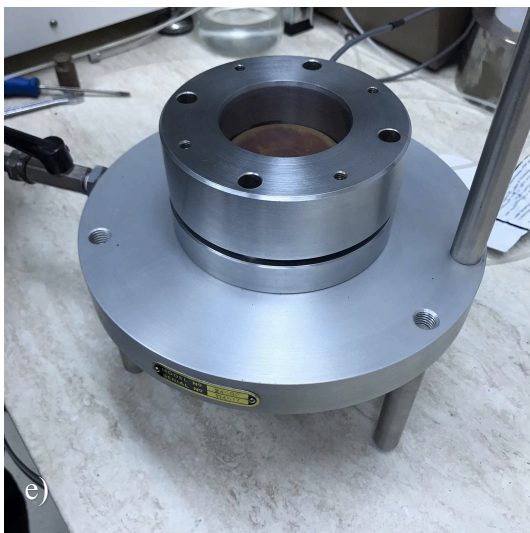
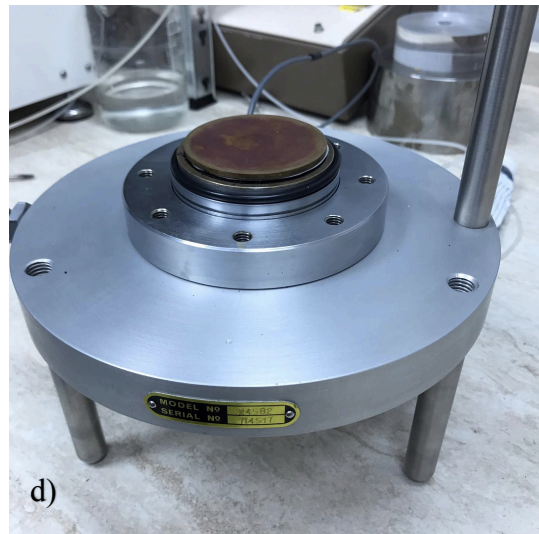
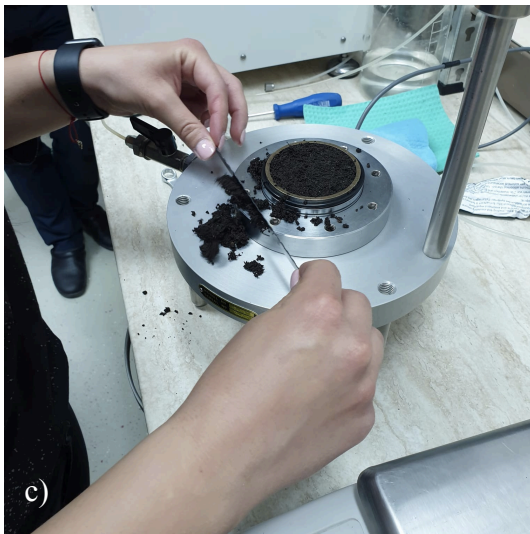
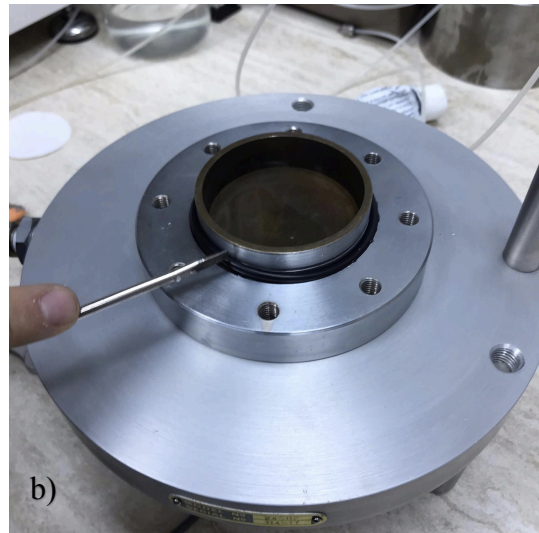
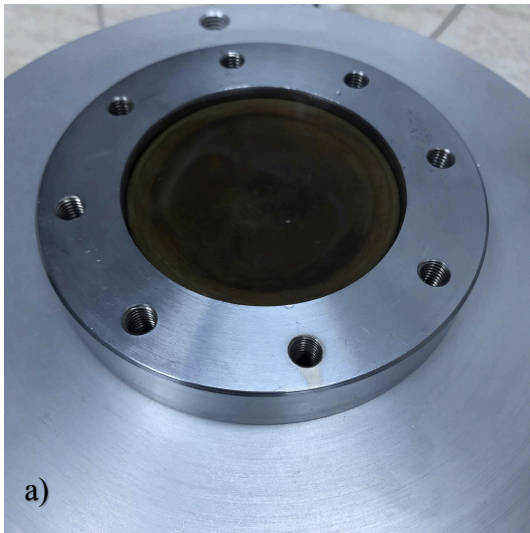
Na kraju još treba izračunati stupanj zasićenosti uzorka prema izrazu:

$$S \times e = w \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \rightarrow S = \frac{w}{e} \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (11)$$

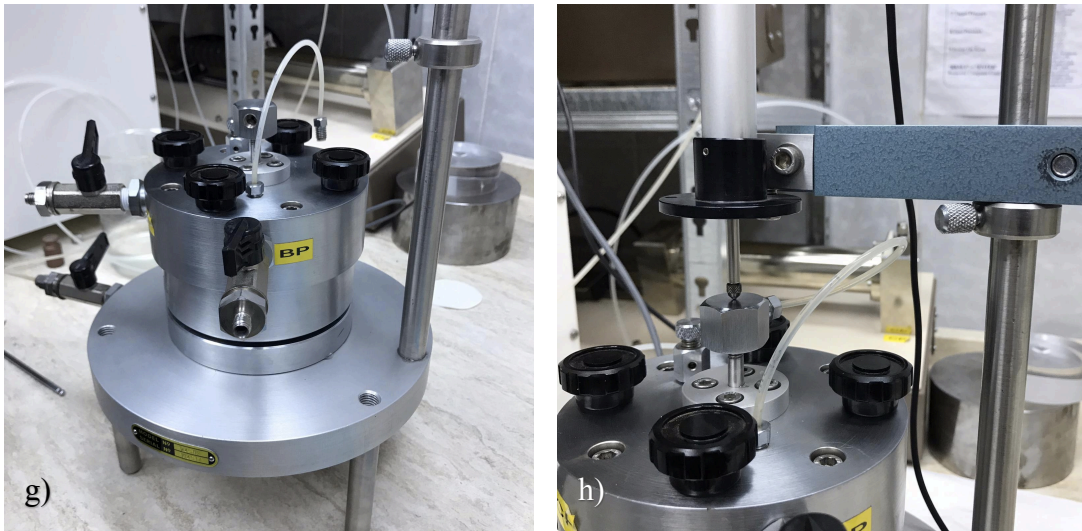
$$S = \frac{0,428}{4,39} \times \frac{1,94 \text{ g/cm}^3}{1 \text{ g/cm}^3}$$

$$S = 0,19$$

Postupak slaganja hidrauličkog edometra i ugrađivanja uzorka u prsten hidrauličkog edometra prikazan je na Slici 19. Postupak slaganja dijelova edometra započinje slaganjem donje porozne pločice (Slika 19.a), na poroznu pločicu stavlja se čelični prsten (Slika 19.b) u koji se potom ugrađuje uzorak humusa (Slika 19.c). Na uzorak se postavlja gornja porozna pločica (Slika 19.d), a nakon nje potrebno je staviti čelični cilindar (Slika 19.e). U preostali prostor između gornje porozne pločice i cilindra stavlja se gumena membrana s pripadajućim metalnim prstenom (Slika 19.f). Nakon postavljanja membrane potrebno je pažljivo sastaviti ćeliju kako se ne bi oštetio uzorak. (Slika 19.g), a na sami vrh ćelije postavlja se mjerilo vertikalnih pomaka (Slika 19.h).







*Slika 19 Postupak slaganja hidrauličkog edometra i ugrađivanja uzorka*

Ovako ugrađeni uzorak zasićen je vodom, konsolidiran pri ćelijskom pritisku od 200 kPa te je nakon konsolidacije utvrđen koeficijent propusnosti.

### ***3.2.2. Uzorak zasićen dizelom***

Za ovo ispitivanje korišten je isti uzorak humusnog tla. Uzorak je prosijan kroz sito dimenzija otvora 4 mm te se za potrebe ispitivanja koristila samo frakcija manja od 4 mm (Slika 20.).



*Slika 20 Prosijavanje uzorka*



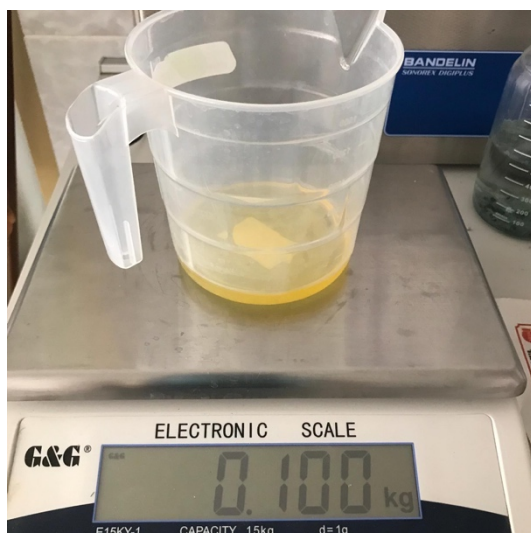
Uzorak je imao gustoću čestica  $\rho_s = 1,94 \text{ g/cm}^3$  i trebalo ga je zasititi s dizelom. Vlažnost od cca 40 % dobivena je tako što smo pomiješali određenu masu dizela i suhog uzorka. Prvo smo odvagali 248 g uzorka te ga pomiješali sa 100 g dizela. Potrebnu masu dizela smo odredili pomoću slijedećeg izraza:

$$\begin{aligned}w \times m_{\text{uzorak}} &= m_{\text{dizel}} & (12) \\0,4 \times 248 \text{ g} &= m_{\text{dizel}} \\m_{\text{dizel}} &= \mathbf{99,2 \text{ g} \approx 100 \text{ g}}\end{aligned}$$

Na Slici 21. prikazan je odvagnuti uzorak dok se na Slici 22. vidi pripremljena masa dizela potrebna za dobivanje vlažnosti uzorka od cca 40 %.



*Slika 21 Masa uzorka*



*Slika 22 Masa dizela*

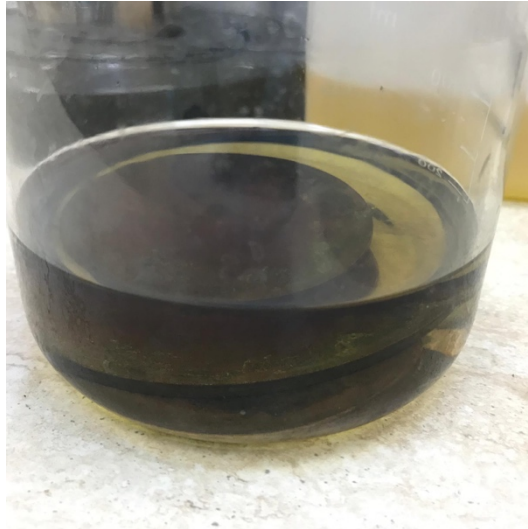
Iz dobivene smjese nastale miješanjem tla i dizela odvaž se 31 g tla koji je potrebno ugraditi u hidraulički edometar (Slika 23.). Masa uzorka tla od 31 g odgovara masi uzorka ugrađenog u hidraulički edometar u prethodnom pokusu.



*Slika 23 Masa uzorka koji se ugrađuje u hidraulički edometar*

Ugrađivanje uzorka zasićenog s dizelom, u hidraulički edometar, jednako je ugrađivanju uzorka zasićenog s vodom. Razlike su u tome što su u ovom pokusu, za razliku od prethodnog, porozne pločice zasićene s dizelom (Slika 24.) i što se dodatno uz

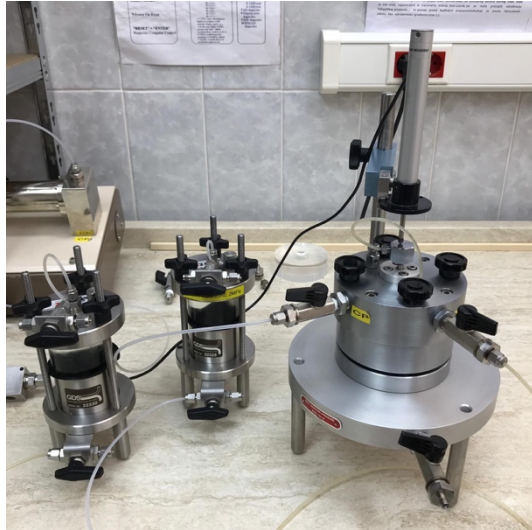
hidraulički edometar postavljaju i dvije toksične ćelije (Slika 25.). Korištenjem toksičnih ćelija izbjegava se miješanje dizela u uzorku s vodom u pumpama, tj. sprječava se oštećenje pumpi koje može uzrokovati ulazak dizela u iste. Sastavljeni hidraulički edometar s toksičnim ćelijama prikazan je na Slici 26.



*Slika 24 Porozne pločice u dizelu*



*Slika 25 Toksične ćelije*



*Slika 26 Sastavljeni hidraulički edometar s toksičnim čelijama*

## 4. REZULTATI EDOMETARSKOG ISPITIVANJA

Za vrijeme provođenja edometarskog pokusa ispituju se zasićenje, konsolidacija te prema potrebi i vodopropusnost. Svrha ovog rada je usporedba koeficijenta propusnosti tla zasićenog različitim tekućinama, u ovom slučaju radi se o vodi i dizelu.

### 4.1. Uzorak zasićen vodom

Prvu fazu pokusa čini zasićivanje, sukladno tome potrebno je uzorak zasićivati sve dok se ne postigne stupanj zasićenja od najmanje 95 %. Stupanj zasićenja možemo izračunati uz pomoć Skempton-ovog parametra koji se računa kao omjer purnog tlaka ( $\Delta u$ ) i naprezanja ( $\Delta\sigma_3$ ) u nedreniranim uvjetima, a prikazan je slijedećim izrazom:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} \quad (13)$$

Ovaj postupak se još naziva i B check-om. Kada je bila utvrđena vrijednost zasićenja od 97 % pokrenuta je faza konsolidacije pri ćelijskom pritisku od 200 kPa. U drugoj fazi pokusa došlo je do slijeganja uzorka pri čemu je zabilježeno ukupno slijeganje uzorka od 6,4 mm. Nakon procesa konsolidacije visina uzorka iznosila je 12,57 mm, a prikazan je Slikom 27.



*Slika 27 Konsolidirani uzorak*

U zadnjoj fazi provedeno je mjerenje vodopropusnosti na način da je pri konstantnoj razlici potencijala od 0,52 m mjeren protok. Koeficijent propusnosti može se izračunati slijedećim izrazom:

$$k = \frac{Q' \times L}{A \times t \times \Delta h} \quad (14)$$

gdje je:

$k$	-	koeficijent propusnosti, [m/s],
$Q'$	-	količina vode, [m <sup>3</sup> ],
$L$	-	dužina tečenja, [m],
$A$	-	površina presjeka, [m <sup>2</sup> ],
$t$	-	vrijeme, [s] i
$\Delta h$	-	razlika potencijala, [m].

Količina vode koja prođe kroz uzorak dobije se uz pomoć mjerenja promjene volumena vode u pumpama. Mjerenje je obavljeno 4 puta u vremenskom periodu od dvije minute ( $t = 120 \text{ s}$ ) te je dobivena srednja vrijednost količine vode,  $Q' = 75,5 \text{ mm}^3$ . Dužinu tečenja predstavlja visina uzorka nakon procesa konsolidacije,  $L = 12,57 \text{ mm}$ , a razlika potencijala iznosi  $\Delta h = 0,52 \text{ m}$ . Površina presjeka jednaka je površini čeličnog prstena u koji se ugrađuje uzorak,  $A = 3,157 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Slijedi izračun nastavno na izraz (14) kojim se dobije koeficijent propusnosti  $k$ :

$$k = \frac{7,55 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \times 12,57 \text{ mm}}{3,157 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times 120 \text{ s} \times 0,52 \text{ m}}$$

$$k = 4,82 \times 10^{-9} \text{ m/s}$$

#### 4.2. Uzorak zasićen naftnim derivatima

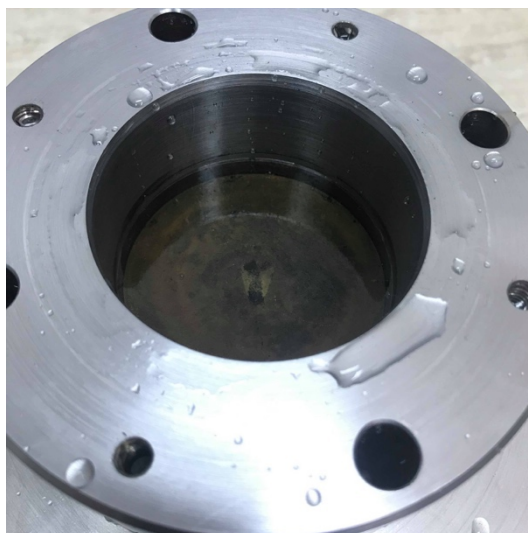
Postignuti stupanj zasićenja u ovom pokusu iznosio je 95,2 %. Po postizanju saturacije pokrenuta je faza konsolidacije tijekom koje je uočeno neobično ponašanje mjernog uređaja na način da je uočeno miješanje pornog fluida (dizela) i fluida za nanošenje opterećenja (vode). Uslijed toga pokus je prekinut te se pristupilo rastavljanju ćelije.



Rastavljanjem ćelije utvrđene su značajne deformacije i puknuće gumene membrane. Gumena membrana trebala je odvajati dizel u uzorku od vode koja se nalazila u njoj. Na Slici 28. nalazi se prikaz uništene membrane, a također se može i uočiti nakupljena voda iznad porozne pločice koja se nalazila ispod membrane (Slika 29.).



*Slika 28 Deformacija i puknuće gumene membrane*



*Slika 29 Porozna pločica povrh uzorka rastavljene ćelije s nakupljenom vodom (vode ovdje nije smjelo biti, već samo dizel)*

Nakon što smo rastavili toksičnu ćeliju, uočili smo da je gumena membrana u toksičnoj ćeliji bila neoštećena. S obzirom da nije došlo do njenog oštećenja možemo zaključiti da se sastav gumene membrane u toksičnoj ćeliji razlikuje od one koja se koristi u hidrauličkom edometru. Shodno tome treba paziti, pri izradi pokusa, o vrsti i svojstvima kontaminiranih tekućina koje se u njemu koriste. Razlika u gumenim membranama prikazana je na Slici 30. S lijeve strane nalazi se membrana za toksičnu ćeliju, a s desne strane za hidraulički edometar.





gumena membrana za toksičnu ćeliju



gumena membrana za hidraulički edometar

*Slika 30 Usporedba gumenih membrani*

Iako točan sastav gumene brtve nije poznat, može se pretpostaviti da je materijal neotporan u kontaktu sa dizelskim uljem, pri čemu se polimerni lanci uslijed reakcije s nepolarnim otapalom otvaraju i pucaju što se u konačnici manifestira bubrenjem materijala i raspadanjem. U literaturi [14] pronalazimo tablicu postojanosti konvencionalnih gumenih materijala u kontaktu sa nizom kemikalija. U kontaktu sa dizelskim uljem, većina gumenih materijala je izrazito nepostojana.

Za rad s dizelom, najprikladnija bi bila vulkanizirana automobilska guma, jer takva guma ima velik udio C-C i C-S mostova u polimernoj strukturi koje je teško rastaviti.

## 5. ZAKLJUČAK

Ispitivanje tla u hidrauličkom edometru provodi se u tri faze, fazi zasićivanja, provjere stupnja zasićenosti i konsolidacije. Dodatno se može provesti i pokus propusnosti. Ispitivanja su provedena u dva ciklusa, prilikom kojeg je uzorak tla, koji se ispitivao, bio zasićen vodom i dizelom.

Prilikom prvog ciklusa ispitivanja pokus je uspješno napravljen te se kao rezultat dobio koeficijent propusnosti za vodu. Tijekom izvođenja drugog pokusa došlo je do oštećenja gumene membrane uslijed kemijskih reakcija s dizelom, te posljedično do miješanja vode i dizela za vrijeme konsolidacije uslijed čega je bilo potrebno prekinuti pokus. Kemijskim reakcijama između membrane i dizela došlo je do pucanja i otvaranja polimernih lanaca uslijed reakcije s nepolarnim otapalom što je dovelo do bubrenja materijala i njegovog raspadanja.

Iako koeficijent propusnosti za dizel nije izmjeren, utvrđeno je da standardna gumena membrana za nanošenje opterećenja u hidrauličkom edometru nije prikladna za upotrebu s drugim fluidima. S druge strane, membrana koja se koristi u toksičnoj ćeliji nije se uništila za vrijeme njenog izlaganja dizelu, što znači da je napravljena od otpornijeg materijala nego što je to gumena membrana za hidraulički edometar te je u daljnjim ispitivanjima i za nanošenje opterećenja potrebno koristiti gumenu membranu sličnog kemijskog sastava.

## 6. LITERATURA

- [1] Ž. Veinović, B. Kovačević Zelić i P. Kvasnička, »Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propunosti tla - usporedba konvencionalnih i novih metoda,« *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, svez. 15, pp. 95-102, 2003.
- [2] M. Muldabić, Ispitivanje tla u geotehničkom laboratoriju, Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2018.
- [3] T. Roje-Bonacci, *Mehanika tla*, Split: Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2003.
- [4] S. Strelec i D. Štuhec, *Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi*, Varaždin: Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2011.
- [5] T. Ivanković, *Geotehnički istražni radovi*, Varaždin: Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [6] E. Nonveiller, *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Zagreb: Školska knjiga, 1978.
- [7] M. Maksimović, *Mehanika tla*, Beograd: AGM knjiga, 2008.
- [8] B. Kavur, »Svojstva i ponašanje NAPL onečišćivala u tlu,« u *Zaštita i remedijacija tla*, Varaždin, Interna skripta, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, akad. god. 2018./2019.
- [9] S. Alimohammadi-Jelodar i M. Karimpour-Fard, »Permeability of Two Clayey Soils Exposed to Petroleum Products and Organic Solvents,« *Civil Engineering Infrastructures Journal*, svez. 51(1), pp. 131-146, 2018.
- [10] L. Malešević, *Osnove elektrotehnike I*, Split: Sveučilišni odjel za stručne studije Sveučilišta u Splitu, 2018.
- [11] B. Kavur, »Mineraloški sastav tla, minerali glina, njihova svojstva i značaj,« u *Zaštita i remedijacija tla*, Varaždin, Interna skripta, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, akad.god. 2018./2019.
- [12] S. Machado, L. da Silva Paes Cardoso, I. Oliveira, D. de Faria Mariz i M. Karimpour-Fard, »Modeling Soil Permeability When Percolated by Different Soil,« *Transport in Porous Media*, svez. 111, pp. 1-31, 2016.
- [13] *GDS Toxic interface Handbook*. [Performance]. GDS, 2013.

[14] »MYKIN,« [Mrežno]. Available: <https://mykin.com/rubber-chemical-resistance-chart-2>. [Pokušaj pristupa 2.9.2019].

## 7. POPIS SLIKA

Slika 1 Trodijelni sustav tla [4].....	2
Slika 2 Granulometrijski dijagram s tipičnim granulometrijskim krivuljama.....	4
Slika 3 Dijagram plastičnosti [4] .....	6
Slika 4 Shematski prikaz edometra [4] .....	6
Slika 5 Oblici pojavljivanja vode u tlu [3] .....	7
Slika 6 Darcyjev pokus [4] .....	8
Slika 7 Laminarni (gornja slika) i turbulentni režim tečenja (donja slika) .....	9
Slika 8 Skica uređaja za mjerenje koeficijenta propusnosti uz stalni tlak [4] .....	10
Slika 9 Slika uređaja za mjerenje koeficijenta propusnosti uz promjenjiv tlak [4] .....	11
Slika 10 Dvostruki difuzni sloj [11].....	14
Slika 11 Veza između dvostrukog difuznog sloja i dielektrične konstante [12] .....	15
Slika 12 Uređaj sa Sveučilišta Guilan [9].....	16
Slika 13 Usporedba koeficijenata propusnosti [9].....	17
Slika 14 Shematski prikaz hidrauličkog edometra [1] .....	19
Slika 15 Dijelovi hidrauličkog edometra.....	21
Slika 16 Dijelovi toksične ćelije .....	22
Slika 17 Sastavljena toksična ćelija .....	23
Slika 18 Uzorak humusa i sito promjera 4 mm .....	24
Slika 19 Postupak slaganja hidrauličkog edometra i ugrađivanja uzorka.....	28
Slika 20 Prosijavanje uzorka .....	28
Slika 21 Masa uzorka .....	29
Slika 22 Masa dizela .....	30
Slika 23 Masa uzorka koji se ugrađuje u hidraulički edometar.....	30
Slika 24 Porozne pločice u dizelu.....	31
Slika 25 Toksične ćelije .....	31
Slika 26 Sastavljeni hidraulički edometar s toksičnim ćelijama .....	32
Slika 27 Konsolidirani uzorak .....	33
Slika 28 Deformacija i puknuće gumene membrane .....	35
Slika 29 Porozna pločica povrh uzorka rastavljene ćelije s nakupljenom vodom (vode ovdje nije smjelo biti, već samo dizel).....	36
Slika 30 Usporedba gumenih membrani .....	37

## 8. POPIS TABLICA

Tablica 1 Osnovne grupe tla prema veličini zrna [4].....	3
Tablica 2 Oznake koje se koriste za formatiranje klasifikacijskih simbola [4].....	4
Tablica 3 Klasifikacija tla prema nominalnom promjeru zrna [3].....	5
Tablica 4 Klasifikacijske grupe praha i gline [4].....	5
Tablica 5 Relativna vodopropusnost $k$ u m/s [7] .....	12
Tablica 6 Tipične vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti $k$ u cm/s [6].....	12
Tablica 7 Vrijednosti koeficijenta propusnosti [9].....	17
Tablica 8 Visina prstena.....	25
Tablica 9 Promjer prstena.....	25