Mjerenje koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru

Labaš, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

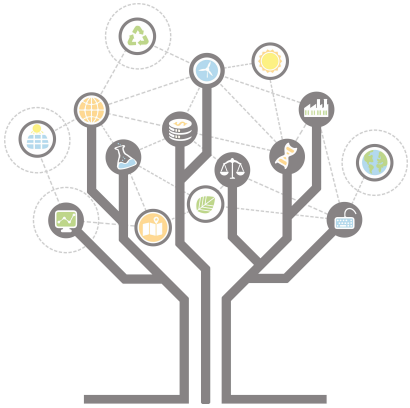
2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:550613

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Mjerenje koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru

Labaš, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:550613

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-02**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

TOMISLAV LABAŠ

MJERENJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI U HIDRAULIČKOM EDOMETRU

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

MJERENJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI U HIDRAULIČKOM EDOMETRU

KANDIDAT:
TOMISLAV LABAŠ

MENTOR:
doc. dr. sc. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: TOMISLAV LABAŠ

Matični broj: 2503 - 2014./2015.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

MJERENJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI U HIDRAULIČKOM EDOMETRU

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Osnovne karakteristike čestica tla
3. Klasifikacija tla
4. Voda u tlu i vodopropusnost
5. Hidraulički edometar
6. Zaključak
7. Literatura
8. Popis slika
9. Popis tablica

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

Zadatak zadan: 20.03.2017. Rok predaje: 08.09.2017.

Mentor:
Doc.dr.sc. Igor Petrović

REPUBLIKA HRVATSKA - GEOTEHNIČKI FAKULTET - SVEUČILIŠTE U ZAGREBU - VARAŽDIN

Predsjednik Odbora za nastavu:
Doc.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

MJERENJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI U HIDRAULIČKOM EDOMETRU

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc. 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, 6.9.2017. godine

Tomislav Labaš

(Ime i prezime)



(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Tomislav Labaš, Mjerenje koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru

Edometar je uređaj u kojem se ispituje stišljivost tla u uvjetima promjene samo jedne od komponenti deformacija. U njega se ugrađuje neporemećeni uzorak tla kružnog presjeka na kojeg se vrši kontrolirani prirast vertikalnih naprezanja. Tijekom edometarskog pokusa mijenja se opterećenje uzorka, koje mora biti dvostruko veće od prethodnog te se prati njegova vertikalna deformacija. Za razliku od klasičnog edometara gdje se opterećenje nanosi utegom, kod hidrauličkog edometra opterećenje nanosimo pomoću hidrauličkih pumpi.Hidrauličkim edometrom možemo upravljati ručno ili pomoću posebnog programskog paketa.

Osim stišljivosti, u hidrauličkom edometru moguće je za svaki vertikalni inkrement utvrditi i pripadajući koeficijent propusnosti tla direktnim mjerenjem. U ovom završnom radu provedena je, na uzorku zaglinjenog pijeska, demonstracija mjerenja koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru za više različitih inkremenata vertikalnog opterećenja. Dobiveni rezultati pokazuju da s porastom vertikalnih naprezanja koeficijent propusnosti opada.

Ključne riječi: hidraulički edometar, koeficijent propusnosti, koeficijent pora, slijeganje

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE ČESTICA TLA 2

2.1. Trokomponentni sastav tla 2

2.2. Volumni odnosi 3

2.2.1. Relativni porozitet 3

2.2.2. Koeficijent pora 3

2.2.3. Veza između relativnog poroziteta i koeficijenta pora 4

2.2.4. Stupanj zasićenosti 4

2.3. Maseni odnosi 4

2.3.1. Vlažnost 5

2.3.2. Gustoća 5

3. KLASIFIKACIJA TLA 6

3.1. Granulometrijski sastav 8

3.2. Atterbergove granice 11

4. VODA U TLU I VODOPROPUSNOST 13

4.1. Tok vode u tlu 13

4.2. Darcyjev zakon 14

4.3. Koeficijent propusnosti 16

4.3.1. Mjerenje koeficijenta propusnosti uz konstantan pad 16

4.3.2. Mjerenje koeficijenta propusnosti uz promjenjiv tlak 17

4.3.3. Red velična koeficijenta propusnosti 19

5. HIDRAULIČKI EDOMETAR 20

5.1. Dijelovi hidrauličkog edometra 21

5.2. Ugrađivanje uzorka u hidraulički edometar 23

5.3. Rezultati edometarskog ispitivanja 26

6. ZAKLJUČAK 30

7. LITERATURA 31

8. POPIS SLIKA .....

9. POPIS TABLICA .....

1. UVOD

Tlo je necementirani skup zrnastog materijala mineralnog i organskog porijekla. Cementne veze između zrna mogu utjecati na mehaničko ponašanje mase tla, ali se podrazumijeva da su cementne veze između zrna relativno slabe. Ukoliko su znatno čvršće tada se najčešće može govoriti o stijeni, a ne o tlu. Zrna tla mogu biti različitih veličina, oblika i mineralnog sastava. U ukupnom volumenu znatan dio prostora zauzimaju pore koje mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom.

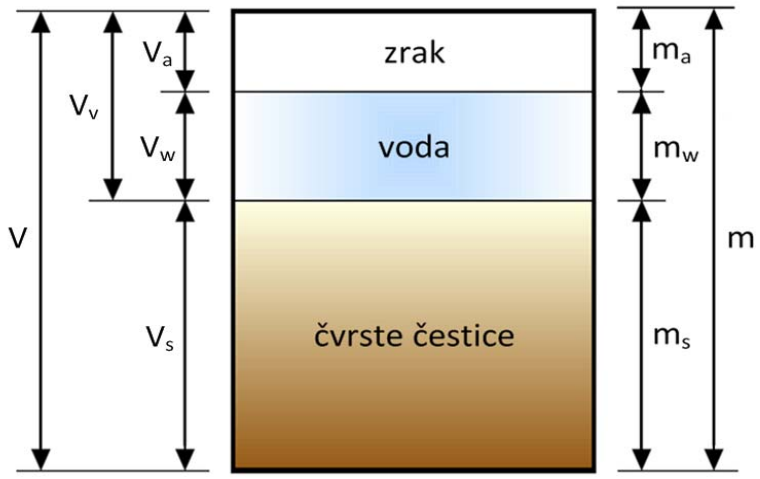
Tlo nastaje procesima trošenja stijena, transporta čestica i na kraju taloženjem transportiranih čestica. Na trošenje stijena utječu mehanički i kemijski faktori. Neki od mehaničkih faktora su tektonske sile, voda, led, abrazija, vegetacija. Tektonskim silama započinje proces trošenja gdje dolazi do deformiranja osnovne stijenske mase i pojave prvih pukotina unutar stijenske mase, što se najčešće dešava duž rasjeda. Nadalje se stijena lomi na manje blokove. Kada blokovi postanu omeđeni pukotinama sa svih strana, dolazi do pomaka blokova i otvaranja pukotina. U pukotine, čak i prsline, ulazi voda i tu počinju vanjski utjecaji na trošenje stijene. Temperaturne razlike uvjetuju širenje i skupljanje stijena izloženih intenzivnoj insolaciji. Kemijski faktori su oksidacija, karbonizacija, hidratacija, desilikacija i otapanje. Nakon trošenja stijena slijedi proces transporta sitnijih čestica stijene. Transport vrše gravitacijska sila, voda, vjetar i ledenjaci. Završni čin pretvorbe čvrstih stijena je proces sedimentacije ili taloženje, gdje je konačni proizvod tlo.

Glavna istraživanja tla i njegove fizikalne karakteristike koje se određuju laboratorijskim ispitivanjima prvi je uveo Karl von Terzaghi (1883. – 1963.), a trebala bi nam omogućiti dobivanje parametara o tlu koji opisuju njegov sastav, kvalitetu, fizikalno - mehanička svojstva, stišljivost, deformabilnost, parametre čvrstoće, klasifikaciju tla [1].

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE ČESTICA TLA

2.1. Trokomponentni sastav tla

Tlo se sastoji od čvrstih čestica različite krupnoće i od međuprostora, odnosno pora. Pore mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom. Rijetko u prirodi možemo naći primjer gdje su pore ispunjene isključivo zrakom. Osobine tla bitno ovise o rasporedu pora, o njihovom odnosu prema ukupnom volumenu i o količini vode u njima. Prema tome, tlo dijelimo na tri faze. Čvrsta faza, koju čine čvrste čestice tla, tekuća faza, voda u porama i plinovita faza, koju čini zrak, također u porama (Slika 1). Različite vrste tla mogu se sastojati iz jedne, dvije ili sve tri faze.



Slika 1. Trokomponentni sastav tla

Opis oznaka:

V – ukupni volumen uzorka

V_v – volumen pora (engl. „*voids*")

V_s – volumen čvrstih čestica (engl. „*solids*")

V_a – volumen zraka (engl. „*air*")

V_w – volumen vode (engl. „*water*")

m – ukupna masa uzorka

m_a – masa zraka (zanemaruje se)

m_w – masa vode

m_s – masa čvrstih čestica

U ponašanju tla odražavaju se svojstva svih triju faza kao i njihove interakcije. Ponašanje takvog materijala je vrlo kompleksno, radi čega je neophodno proučiti karakteristike svake faze, a zatim i njihovu interakciju [1,4].

2.2. Volumni odnosi

Definirani su slijedeći volumni odnosi: relativni porozitet, koeficijent pora i stupanj zasićenosti (bezdimenzionalne veličine, vrijednosti im se mogu izraziti i u postocima).

2.2.1.Relativni porozitet

Relativni (*apsolutni*) porozitet (n) je omjer volumena pora (V_v) i ukupnog volumena (V). Raspon mu je uglavnom između $n_{min} = 0{,}10$ i $n_{max} = 0{,}55$. Izražavamo ga u postocima.

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100\ [\%]$$

2.2.2.Koeficijent pora

Koeficijent pora (e) je omjer volumena pora (V_v) i volumena čvrstih čestica tla (V_s). Proteže se uglavnom između $e_{min} = 0{,}10$ i $e_{max} = 1{,}20$. Najprikladniji je za analizu slijeganja zbog toga jer je to onaj dio tla unutar kojeg se odvija deformacija.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

2.2.3. Veza između relativnog poroziteta i koeficijenta pora

S obzirom na pokazane definicije, vidimo da između relativnog poroziteta (n) i koeficijenta pora (e) postoji veza koja je opisana sljedećim izrazima:

$$n = \frac{e}{1+e} \cdot 100\ [\%]$$

$$e = \frac{n}{1-n}$$

2.2.4.Stupanj zasićenosti

Stupanj zasićenosti ili saturacije (S_r) je postotak volumena pora ispunjen vodom, odnosno omjer volumena vode (V_w) i volumena pora (V_v). Raspon mu je određen ispunjenošću pora vodom, $0 \leq S_r \leq 1$, ili u postocima:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100\ [\%]$$

Prema definiciji stupnja zasićenosti, moguća su tri stanja uzorka [4]:

$S_r = 0$, suho tlo

$S_r = 100\ \%$, potpuno zasićeno (saturirano) tlo

$0 \leq Sr \leq 100\ \%$, nezasićeno ili djelomično saturirano tlo

2.3. Maseni odnosi

U mehanici tla uobičajeno je da se u izrazima za masene odnose uvode, umjesto mase i gustoće, obujamska i specifična težina. Treba prihvatiti da je masa osnovno svojstvo materijala, dok je težina produkt mase i akceleracijskog ubrzanja sile teže. Stoga su definirani slijedeći odnosi masa ili maseni odnosi unutar uzorka tla.

2.3.1. Vlažnost

Vlažnost (w) je omjer mase vode u tlu (m_w) u odnosu na masu čvrstih čestica tla (m_s). Obično je manja od 100 %. Ako vlažnost iznosi 0 %, tada imamo suho tlo.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\ [\%]$$

2.3.2. Gustoća

Gustoća (ρ) je omjer mase (m) i volumena tla (V). Djelomično ovisi o porijeklu i vrsti čvrstih čestica tla, ali i o odnosima između faza u trokomponentnom sastavu tla. Određuje se laboratorijski pomoću tzv. piknometra, male vatrostalne bočice sa šupljim čepom [4].

$$\rho = \frac{m}{V}\ [kg/m^3]$$

Slijede gustoće koje se izražavaju u jedinicama [kg/m^3] ili [Mg/m^3]:

- gustoća čestica tla $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$

- gustoća vode $\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$

Gustoća se može povezati s ostalim jediničnim veličinama ovim izrazima:

$$\rho = \rho_s \cdot (1 - n) + \rho_w \cdot S_r \cdot n$$

- gustoća suhog tla ($S_r = 0$) $\rho_d = \rho_s \cdot (1 - n)$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{V_s + V_v}$$

gdje je:

ρ – gustoća tla

ρ_d – gustoća suhog tla (engl. „*dry*“)

ρ_s – gustoća čvrstih čestica

m_s – masa čvrstih čestica

n – relativni porozitet

V – ukupni volumen uzorka

ρ_w – gustoća vode

V_s – volumen čvrstih čestica

S_r – stupanj zasićenja ili saturacije

V_v – volumen pora

Veličine navedenih volumnih i masenih odnosa se određuju odgovarajućim postupcima i mjerenjima u akreditiranim laboratorijima za mehaniku tla [4]. U tablici 1 dani su rasponi vrijednosti gustoća tla.

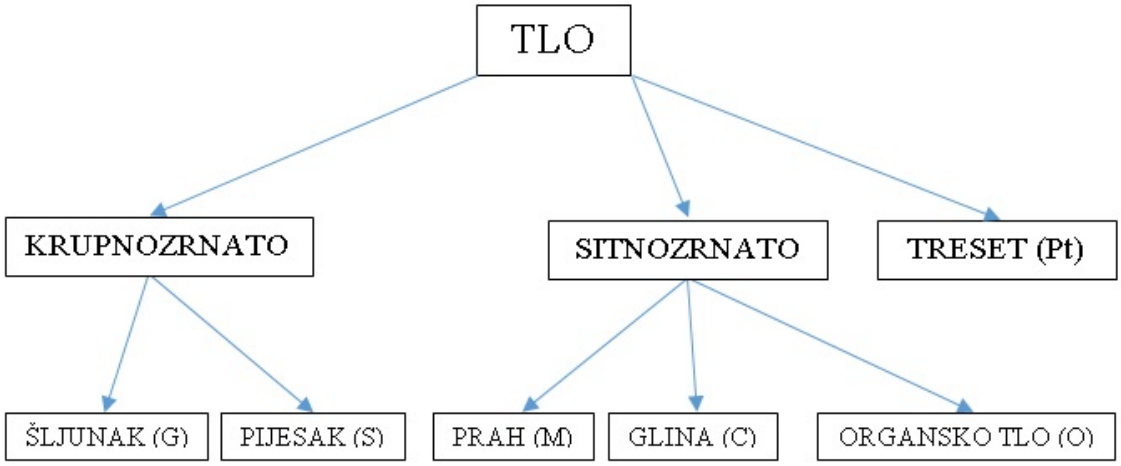
Tablica 1. Rasponi vrijednosti gustoća tla

GUSTOĆA	[kg/m^3]
ρ_s (gustoća čvrstih čestica)	2500 – 2800
ρ (gustoća tla)	1750 – 2000
ρ_d (gustoća suhog tla)	1400 – 1700

3. KLASIFIKACIJA TLA

Za potrebe mehanike tla u građevinarstvu dugo je korištena AC-klasifikacija (*AC* – engl. „*Airfield Classification*“). Razradio ju je Arthur Casagrande (1948.) za prvotne potrebe zrakoplovstva, a kasnije je ona nadopunjena i međunarodno prihvaćena. Sve

vrste tla dijele se u dvije osnovne skupine prema veličini zrna: krupnozrnata ili nekoherentna tla i sitnozrnata ili koherentna tla koja se još dijele prema plastičnosti. Krupnozrnata tla su ona kod kojih je više od 50 % čvrstih čestica većih od 0,06 *mm*. To su sipka tla, npr. šljunak ili pijesak. Sitnozrnata tla su ona kod kojih je više od 50 % čvrstih čestica manje od 0,06 *mm*. To su prah i glina. AC-klasifikacija se zasniva na podjeli tla prikazanoj na slici 2.



Slika 2. AC-klasifikacija

Opis oznaka sa slike:

G – šljunak, engl. „*gravel*“

S – pijesak, engl. „*sand*“

M – prah, engl. „*mud*“

C – glina, engl. „*clay*“

O – organsko tlo, engl. „*organic*“

Pt – treset, engl. „*peat*“

Osnovni princip klasifikacije: svaki tip tla se može opisati s dva slova, dvije oznake, a mogu se i upotrijebiti i dvojni simboli (Tablica 2) [2,5].

Tablica 2. Oznake koje se koriste za formiranje klasifikacijskih simbola

Struktura	GLAVNI SIMBOL	OPISNI SIMBOL	
Krupnozrnata tla s preko 50 % zrna većih od 0,075 mm	G (šljunak) S (pijesak)	W	dobro graduirano
		U	jednolično graduirano
		P	slabo graduirano
		F_s	slabo graduirano s mnogo prašinastih čestica
		F_c	slabo graduirano s mnogo glinovitih čestica
		C	dobro graduirano s glinom
Sitnozrnata tla s preko 50 % zrna manjih od 0,075 mm	M (prah) C (glina) O (organsko tlo)	L	nisko plastično, $W_L < 35$ %
		I	srednje plastično, $35\% < W_L < 50\%$
		H	visoko plastično, $W_L > 50$ %
Vlaknasta struktura		Pt (treset)	

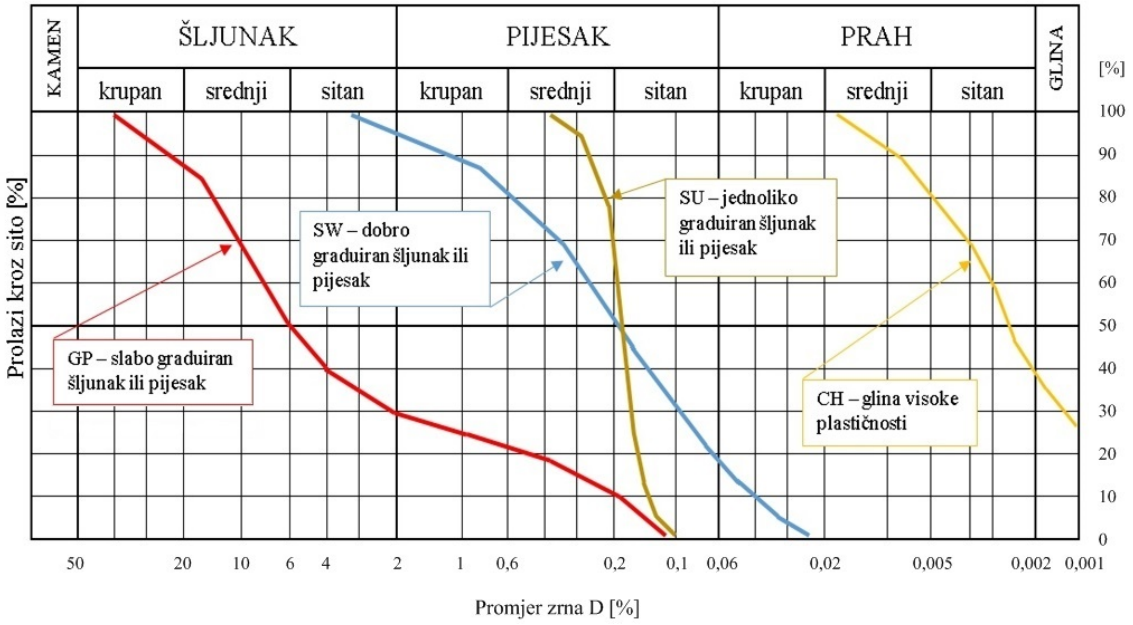
3.1. Granulometrijski sastav

Granulometrijski sastav je definiran krivuljom koja opisuje sadržaj zrna različite veličine izražen u postocima težine. To je jedna od karakteristika koja pomaže da se ocjene svojstva tla, a služi kao jedan od pokazatelja za klasifikaciju tla. Dijagram za ovakvo opisivanje je potekao u SAD-u, na MIT-u (Massachusetts Institute of Technology) i usvojen je kao standard u mnogim zemljama. Ovaj način je jednostavan za definiranje graničnih veličina frakcija zrna (šljunak, pijesak, prah) i njihovih relativnih veličina (sitan, srednji, krupan), što je prikazano u tablici 3. Budući da koristi samo brojeve dva i šest, lagano se pamti. Postupci za određivanje granulometrijskog sastava su: sijanje (za čestice veće od 0,06 *mm*), areometriranje (za čestice manje od 0,06 *mm*) i kombinirana analiza (kad materijal sadrži krupne i sitne frakcije). Na temelju granulometrijskog sastava mogu se odrediti neke fizikalne karakteristike tla kao što su vodopropusnost, stišljivost, kapilarnost, nosivost, podložnost na eroziju itd.

Tablica 3. Podjela tla prema promjeru (veličini) čestica tla

Vrsta materijala		Promjer zrna [mm]
Drobina (oblutci)		→ 60
ŠLJUNAK	krupan	→ 20
	srednji	→ 6
	sitan	→ 2
PIJESAK	krupan	→ 0,6
	srednji	→ 0,2
	sitan	→ 0,06
PRAH	krupan	→ 0,02
	srednji	→ 0,006
	sitan	→ 0,002
GLINA		

Granulometrijski sastav prikazuje se granulometrijskim dijagramomgdje se na os ordinata nanosi odnos ili postotak (*N*) količine uzorka koji je prošao kroz sito, a na os apscisu promjer zrna (*D*) u logaritamskom mjerilu. Na osnovi granulometrijskog sastava određuju se samo veličine krupnozrnatog tla, iako se i veličine sitnozrnatih tala prikazuju na dijagramu (Slika 3) [5].



Slika 3. Primjer krivulja na granulometrijskom dijagramu

Osim oblika granulometrijske krivulje, za opis krupnozrnatog materijala upotrebljavaju se i sljedeći numerički pokazatelji:

- Efektivni promjer zrna - D_{10} - promjer sita kroz kojeg prolazi 10 % ispitanog uzorka tla
- Karakteristični promjeri zrna - D_{30} i D_{60} - promjer sita kroz koji prolazi 30 %, odnosno 60 % ispitanog uzorka tla

Koristeći vrijednosti otvora na situ $D_{10,}$ D_{30} i D_{60} može se odrediti:

- Koeficijent jednolikosti (C_U)

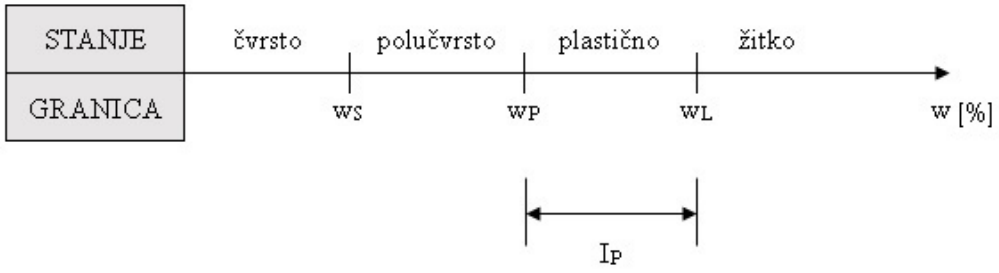
$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- Koeficijent zakrivljenosti (C_C)

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

3.2. Atterbergove granice

Karl Atterberg je u svom radu iz 1911. godine povezao vlažnost materijala (glina) i njegovo ponašanje te utvrdio da materijal povećanjem vlažnosti povećava volumen i pri tome mijenja svojstva plastičnosti. Utvrdio je još da materijal nakon određene granice, smanjenjem vlažnosti ne gubi na volumenu [1]. Količina vode pri kojoj se dešavaju ove promjene u glinovitom tlu ovisi o granulometrijskom sastavu, sadržaju koloidnih čestica i vrstama minerala gline što ih sadrži tlo. Na osnovi rezultata dugotrajnih opažanja i empirijskih pokusa Atterberg je definirao stanje plastičnosti glinovitih materijala i granice između tih stanja (Slika 4) [2].



Slika 4. Granice plastičnosti (Atterbergove granice)

Granice plastičnih stanja su:

- Granica stezanja (w_S) – (engl. „*shrinkage limit*“, raspon vrijednosti do 30 *%*) određena je sadržajem vlažnosti pri kojemu se postignuti volumen uzorka ne smanjuje daljnjim sušenjem.

- Granica plastičnosti (w_P) – (engl. „*plasticity limit*“, raspon vrijednosti od 0 *%* od 100 *%*, uglavnom manje od 40 *%*) određena je sadržajem vode na prijelazu iz plastičnog u polučvrsto konzistentno stanje tla, dok granicu stezanja definira vlažnost na prijelazu iz polučvrstog u čvrsto konzistentno stanje.

- Granica tečenja (w_L) – (engl. „*liquid limit*“, raspon vrijednosti od 0 % do 100 %, uglavnom manja od 100 %) određena je sadržajem vlage pri kojem će uzorak tla početi teći ako ga se protrese [2].

Poznavanjem vrijednosti opisanih granica plastičnosti, koherentan materijal možemo klasificirati u određene skupine plastičnosti (čvrsto, polučvrsto, plastično, tekuće). Prema tome, za klasifikaciju materijala prema plastičnosti izvodimo indeksne pokazatelje, odnosno indeks plastičnosti (I_P), indeks konzistencije (I_C) i indeks tečenja (I_L).

- Indeks plastičnosti (I_P) – razlika između sadržaja vlage između granice tečenja (w_L) i granice plastičnosti (w_P). Veći indeks plastičnosti ukazuje na veću žilavost i veću suhu čvrstoću materijala.

$$I_P = w_L - w_P$$

- Indeks konzistencije (I_C) – razlika granice tečenja (w_L) i prirodne vlažnosti (w_0) prema indeksu plastičnosti (I_P). Kada je indeks konzistencije jednak nuli (I_C = 0), tada je materijal u konzistentnom stanju na granici tečenja, a kad je jednak jedan (I_C = 1), tada je materijal u konzistentnom stanju na granici plastičnosti.

$$I_C = \frac{w_L - w_0}{I_P}$$

- Indeks tečenja (I_L) – razlika prirodne vlažnosti (w_0) i granice plastičnosti (w_P) premaindeksu plastičnosti (I_P). Ima vrijednost od 0 za tlo s vlažnošću na granici plastičnosti, a do 1 za tlo s vlažnošću na granici tečenja. Za izrazito suho tlo on može biti manji od 0 (negativan), a za tlo s prirodnom vlažnošću može biti veći od 1 [1,2].

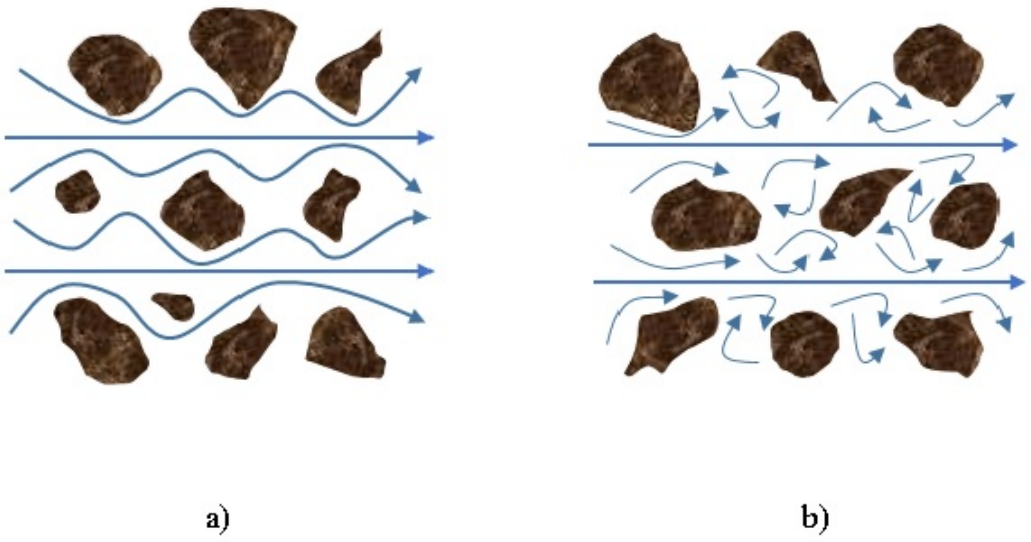
$$I_L = \frac{w_0 - w_P}{I_P}$$

4. VODA U TLU I VODOPROPUSNOST

Tečenje vode kroz tlo zapravo omogućavaju šupljine (pore) koje se nalaze između čvrstih čestica tla. Te šupljine su međusobno povezane i mogu biti potpuno ili djelomično ispunjene. Kod ispitivanja vodopropusnosti tla obično se uzima da je voda fluid koji teče kroz tlo [3].

4.1. Tok vode u tlu

Voda će teći kroz tlo ako postoji razlika potencijala vode u različitim točkama u tlu i to s mjesta višeg potencijala prema mjestu nižeg potencijala. Razlikujemo dvije vrste kretanja vode, laminarni i turbulentni tok. Kod laminarnog strujanja voda se kroz tlo kreće sporo, u „trakama“, i nema miješanja čestica vode između pojedinačnih slojeva (Slika 5a). Kod turbulentnog strujanja je obratno, voda se kreće brzo i neravnomjerno te dolazi do potpunog miješanja čestica vode (Slika 5b). Laminarno strujanje u tlu prelazi u turbulentno kada Reynoldsov broj prelazi 10.



Slika 5. a) Laminarni tok i b) turbulentni tok

4.2. Darcyjev zakon

Darcy je eksperimentalnim putem ustanovio da je brzina protjecanja fluida kroz neki porozni medij direktno proporcionalna hidrauličkom gradijentu koji izaziva tok i koeficijentu propusnosti (Slika 6). Taj zaključak se naziva Darcyjev zakon i iskazan je sljedećim izrazom:

$$v = k \cdot i \quad [m/s]$$

gdje je:

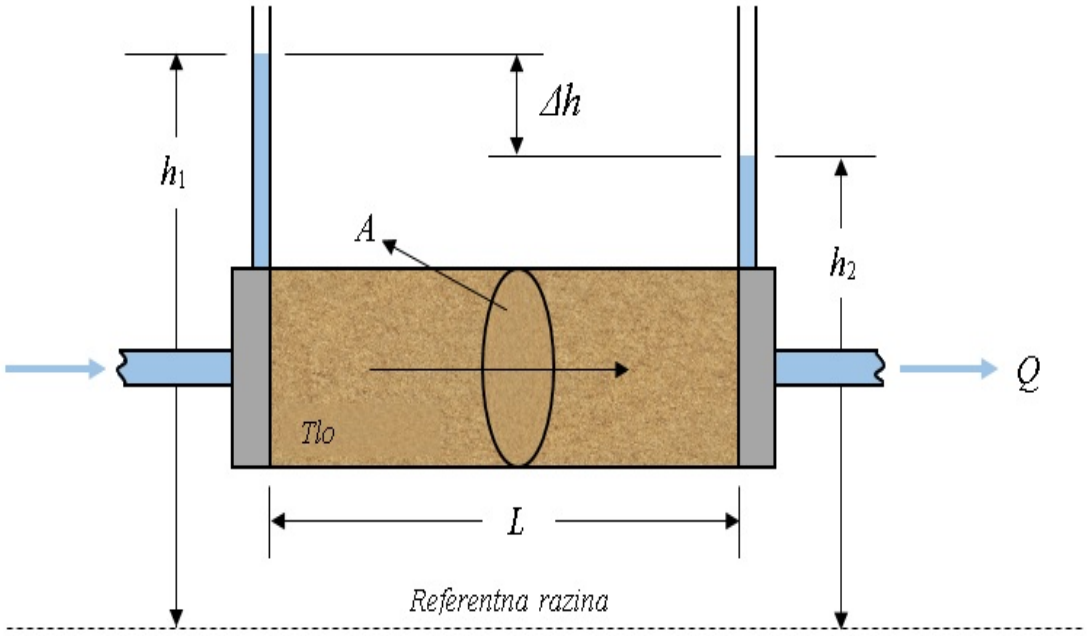
v – Darcyjeva brzina
k – koeficijent propusnosti
i – hidraulički gradijent iskazan kao:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

gdje je:

Δh – razlika potencijala
L – duljina protjecanja vode kroz tlo

Pretpostavka je da se Darcyjev zakon bazira na tome da je tok vode laminaran jer su brzine kretanja vode u tlu relativno male i rijetko kad može doći do turbulentnog toka. Laminarna kretanja vode se pojavljuju u sitnozrnatim tlima, a turbulentna kretanja vode u krupnozrnatim šljunkovitim tlima [2,3].



Slika 6. Protok vode kroz tlo (Darcyjev pokus)

Brzina toka vode kroz tlo (v) u Darcyjevu zakonu je prividna brzina, a ne stvarna brzina vode. Stvarna ili efektivna brzina (v_s) je veća od prividne brzine i ovisi o relativnom porozitetu tla (n) pa izraz glasi:

$$v_s = \frac{v}{n} \; [m/s]$$

Kao što je navedeno, stvarna ili efektivna brzina zapravo i nije stvarna brzina vode jer pretpostavljamo da voda teče najkraćim putem od višeg prema nižem potencijalu. Stvaran tok vode obilazi čestice tla kroz labirint pora u različitim smjerovima pa je i duljina tečenja i promjena potencijala različita [2].

Istjecanje (Q), odnosno količina protečene vode u nekom vremenu, jednako je umnošku brzine toka (v) i površine poprečnog presjeka (A), što izražavamo kao [3]:

$$Q = v \cdot A \; [m^3/dan]$$

$$Q = k \cdot i \cdot A \ [m^3/dan]$$

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \ [m^3/dan]$$

4.3. Koeficijent propusnosti

Koeficijent propusnosti predstavlja hidrauličku provodljivost propusnog medija te ga stoga još zovemo i koeficijent hidrauličke provodljivosti. Ovisi o veličini pora među čvrstim česticama kroz koje teče voda, o viskoznosti tekućine koja ovisi o temperaturi, itd. Određuje se laboratorijskim ispitivanjima, na terenu (*in-situ*) ili preko empirijskih korelacija. U daljnjem tekstu objašnjene su samo laboratorijske metode [2,3].

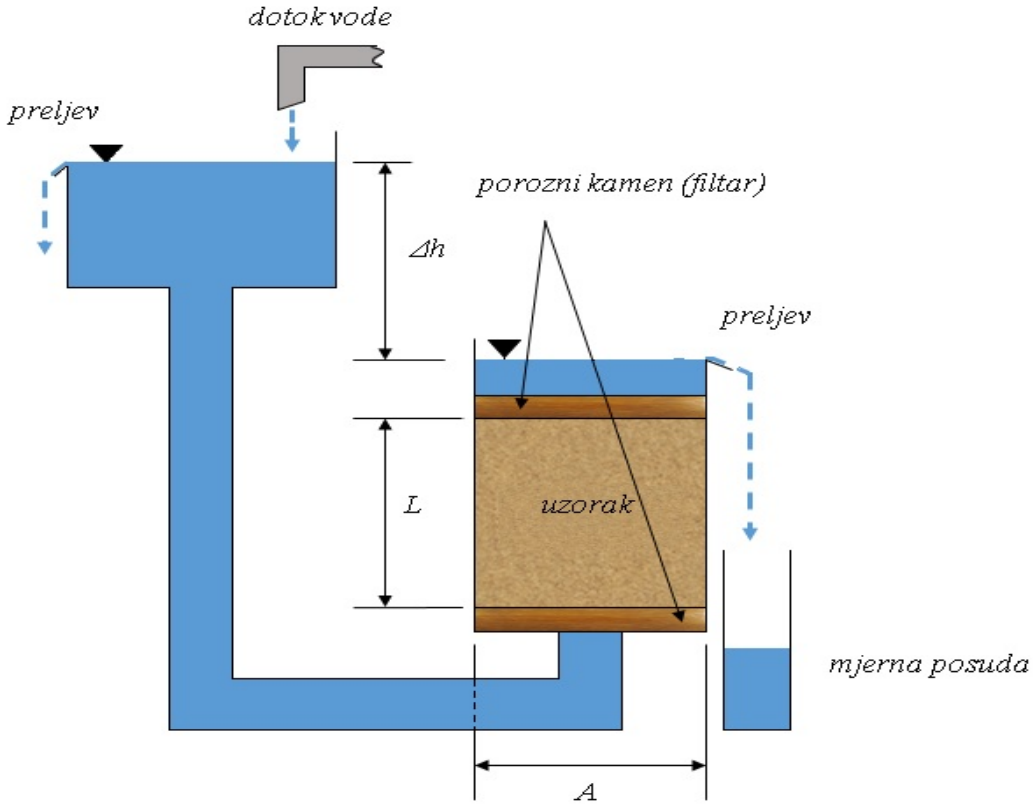
4.3.1. Mjerenje koeficijenta propusnosti uz konstantan pad

Uzorak tla duljine L ugradi se u cilindar poprečnog presjeka A koji je na krajevima zaštićen jako propusnim filterom. Voda se dovodi do uzorka kroz donji filter preko preljeva koji održava stalni nivo na ulazu, dok voda izlazi iz uzorka kroz gonji filter, također preko preljeva koji održava nivo vode na izlazu. Kada voda ispuni sve pore tada se mjeri protok (Q), koji proteče u nekom vremenu (t), mjerenjem količine vode u graduiranoj menzuri (Slika 7). Za cijelo vrijeme ispitivanja zadržana je razlika potencijala. Ovime se dobiva prosječna brzina protoka vode (v) kroz uzorak koju izražavamo izrazom [2]:

$$v = \frac{Q}{A \cdot t} \ [m/s]$$

Primijenjujući Darcyjev zakon ($v = k \cdot i$) i hidraulički gradijent tlaka ($i = \frac{\Delta h}{L}$), nakon uvrštavanja i sređivanja dobivamo koeficijent propusnosti (k):

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \ [cm/s]$$



Slika 7. Mjerenje koeficijenta propusnosti metodom konstantnog tlaka

4.3.2. Mjerenje koeficijenta propusnosti uz promjenjiv tlak

Kod ove metode uzorak je također ugrađen između dva porozna filtra. Iz vertikalne cijevi voda u uzorak ulazi kroz donji filter, a izlazi iz uzorka preko preljeva na gornjem filteru (Slika 8). U nekom vremenu nivo vode će se u cijevi sniziti za *dh* pa stoga pišemo da je protok jednak:

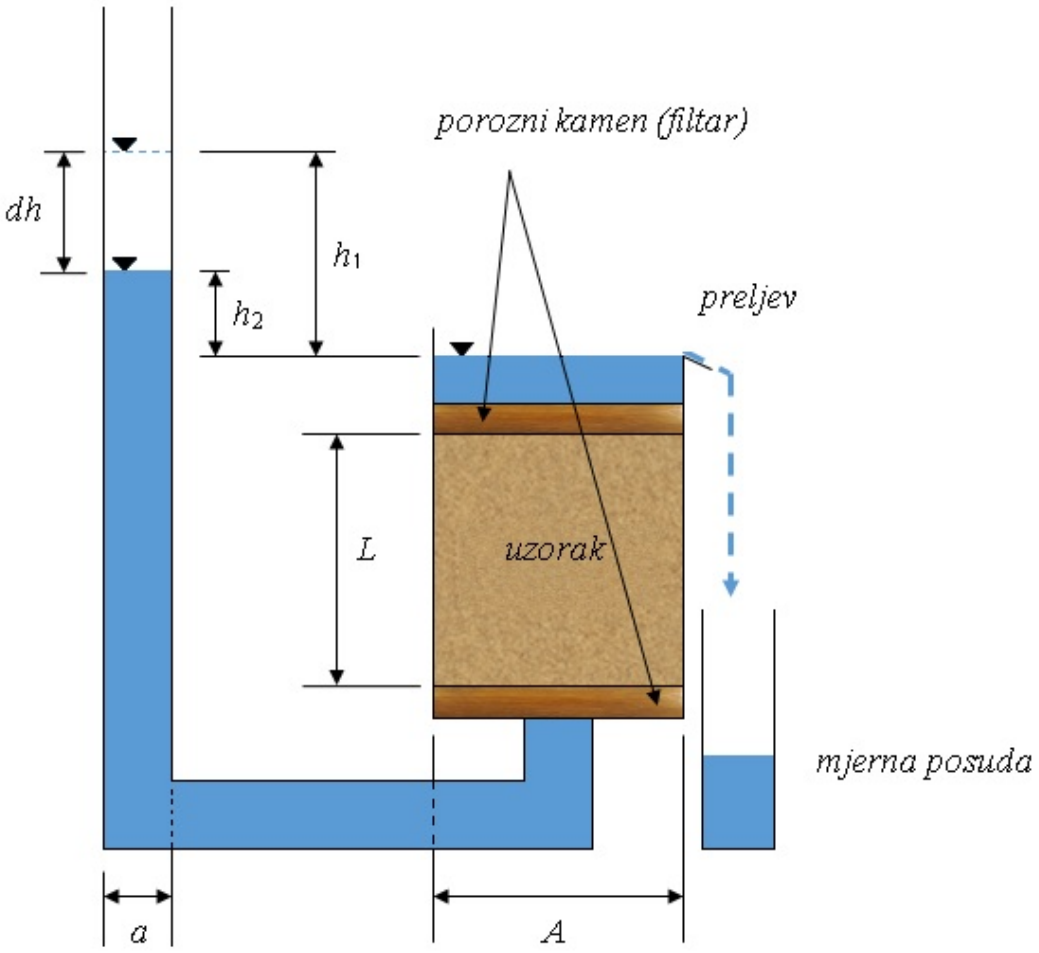
$$dQ = a \cdot dh \quad \text{i} \quad dQ = A \cdot v \cdot dt$$

Nadalje, prema Darcyjevom zakonu ($v = k \cdot i$) i hidrauličkom gradijentu ($i = \frac{\Delta h}{L}$) uvrštavamo i sređujemo diferencijalnu jednadžbu iz koje izražavamo koeficijent propusnosti (k) [2].

$$dQ = A \cdot v \cdot dt = A \cdot \frac{h}{L} \cdot k \cdot dt = a \cdot dh$$

$$\frac{dh}{h} = k \cdot \frac{A}{a \cdot L}\, dt \quad \rightarrow \quad \text{rj.} \quad \ln h = k \cdot t \cdot \frac{A}{a \cdot L}$$

$$k = 2{,}3\, \frac{L \cdot a}{A \cdot \Delta t}\, \log \frac{h_1}{h_2}$$



Slika 8. Mjerenje koeficijenta propusnosti metodom promjenjivog tlaka

4.3.3. Red veličina koeficijenta propusnosti

Koeficijent propusnosti izražavamo u potencijama od 10, u obliku $k = a \cdot 10^{-b}$ i mjernom jedinicom *cm/s.* Kao što je već navedeno propusnost ovisi o više faktora, a to su: promjer zrna, koeficijent poroznosti, viskoznost tekućine, oblik, raspodjela i međusobna povezanost pora, količina plinova u porama. U sljedećim tablicama dane su vrijednosti koeficijenta propusnosti raznih vrsta tla (Tablica 4) i klasifikacija tla prema stupnju propusnosti (Tablica 5) [2,5].

Tablica 4. Vrijednosti koeficijenta propusnosti za razne vrste tla

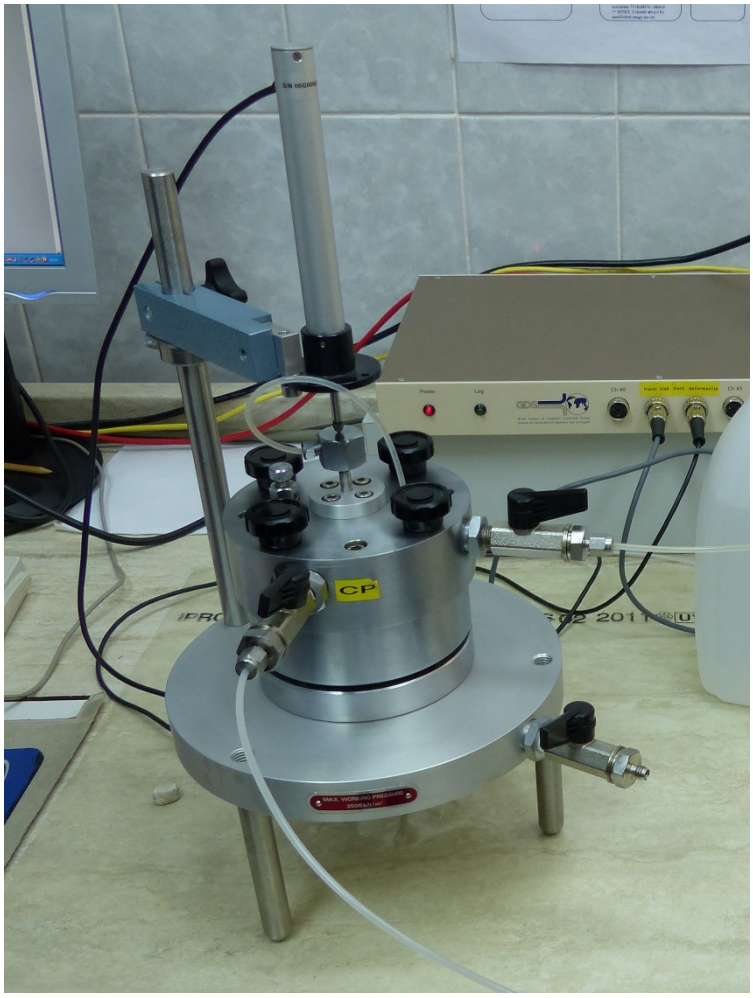
Materijal	šljunak	pijesak	sitan pjeskovit prah i smjese	glina
Koeficijent propusnosti k [cm/s]	$10^{2} – 10^{-1}$	$10^{-1} – 10^{-3}$	$10^{-3} – 10^{-7}$	$<10^{-7}$

Tablica 5. Klasifikacija tla prema stupnju propusnosti

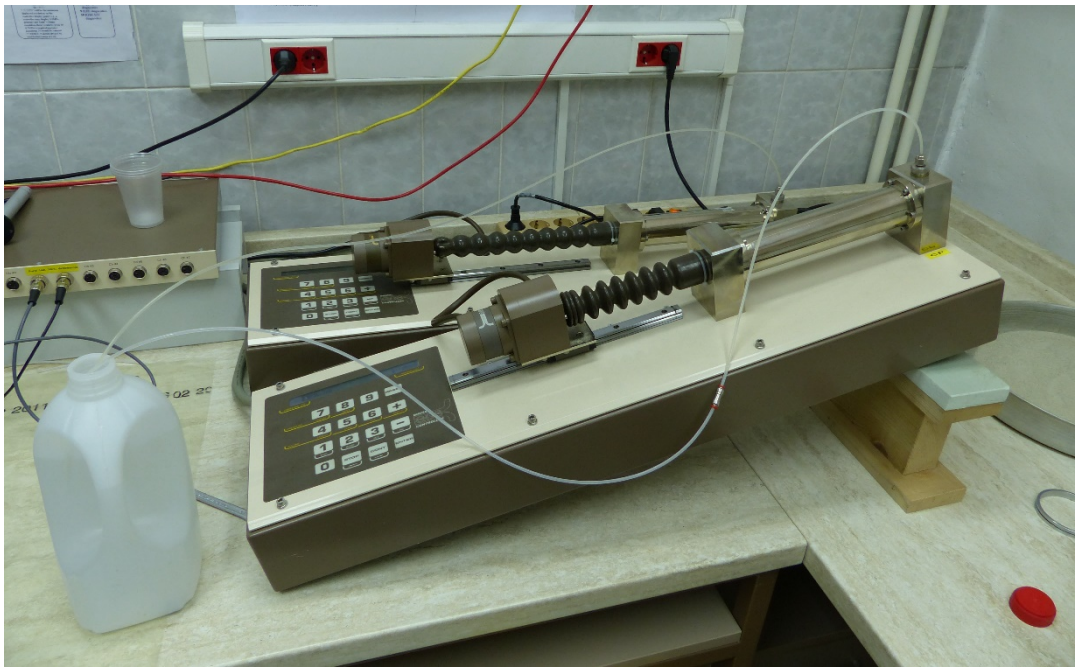
Stupanj propusnosti	Vrijednost koeficijenta propusnosti k [m/s]
visoki	$> 10^{-3}$
srednji	$10^{-3} – 10^{-5}$
niski	$10^{-5} – 10^{-7}$
vrlo niski	$10^{-7} – 10^{-9}$
zanemariv, praktički nepropustan	$<10^{-9}$

5. HIDRAULIČKI EDOMETAR

Hidraulički edometar (Slika 9) je laboratorijski uređaj gdje se konsolidacijski tlak primjenjuje hidraulički te se do gornje površine uzroka prenosi preko savitljive gumene membrane, što ga razlikuje od konvencionalnih edometarskih uređaja. Pritisak na uzorak vrši se vodom koja se ubrizgava kroz tanka crijeva pomoću specijaliziranih hidrauličkih pumpi (Slika 10) [6].



Slika 9. Hidraulički edometar

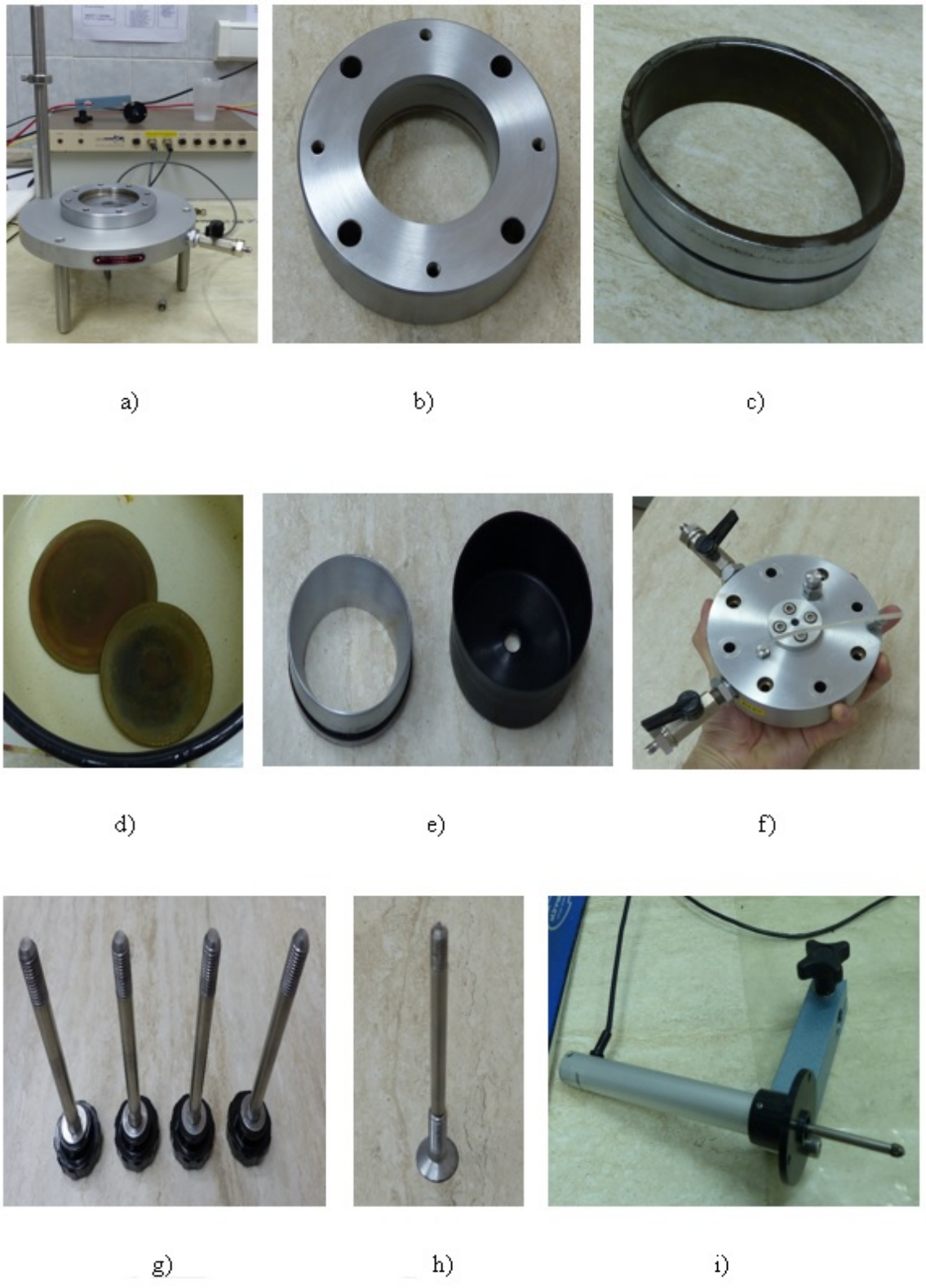


Slika 10. Specijalizirane hidrauličke pumpe

5.1. Dijelovi hidrauličkog edometra

Hidraulički edometar se sastoji od slijedećih elemenata (Slika 11):

a) Postolja koje na dnu ima spojen senzor za očitavanje pornog tlaka, a sa strane ima priključak za regulaciju pornog tlaka pomoću hidrauličke pumpe
b) Kućišta u koji se ugrađuje uzorak
c) Čelični prsten u koji se ugradi uzorak
d) Porozne pločice od kojih se jedna postavlja ispod uzorka, a jedna na uzorak
e) Gumena membrana koja prenosi opterećenje na uzorak i mali čelični prsten koji se ugradi unutar membrane
f) Čelični cilindar s priključcima za nametanje ćelijskog i tzv. „*back*“ pritiska koji nasjeda na velikičelični prsten s membranom
g) Vijci kojima se čelični cilindar pričvrsti za postolje edometra
h) Čelični klip gdje voda tijekom pokusa teče prema gore
i) Mjerilo vertikalnih pomaka uzorka [6]



Slika 11. Dijelovi hidrauličkog edometra: a) postolje, b) kućište, c) čelični prsten zauzorak, d) porozne pločice, e) gumena membrana, f) čelični cilindar s priključcima, g) vijci, h) čelični klip, i) mjerilo pomaka

5.2. Ugrađivanje uzorka u hidraulički edometar

Uzorak koji je korišten u ovom mjerenju je zaglinjeni pijesak gustoće čestica ρ = 1,961 g/cm^3 te prirodne vlažnosti w = 15,57 %. Uzorak se ugradi u čelični prsten kojem se prethodno odredi volumen. Mjerenje promjera (Tablica 6) i visine prstena (Tablica 7) provodi se više puta kako bi ukupnu grešku volumena sveli na minimum.

Tablica 6. Promjer prstena

Promjer prstena d [mm]	
d_1	63,40
d_2	63,41
d_3	63,36
d_4	63,38
d_5	63,38
d_6	63,37
d_7	63,38
d_8	63,45
$\mathbf{d_{sr}}$	63,39

Tablica 7. Visina prstena

Visina prstena L [mm]	
L_1	19,14
L_2	19,10
L_3	19,08
L_4	19,13
$\mathbf{L_{sr}}$	19,11

Volumen prstena se izračuna prema izrazu za volumen valjka koristeći vrijednosti iz tablica za srednji promjer (d_{sr}) i srednju visinu (L_{sr}):

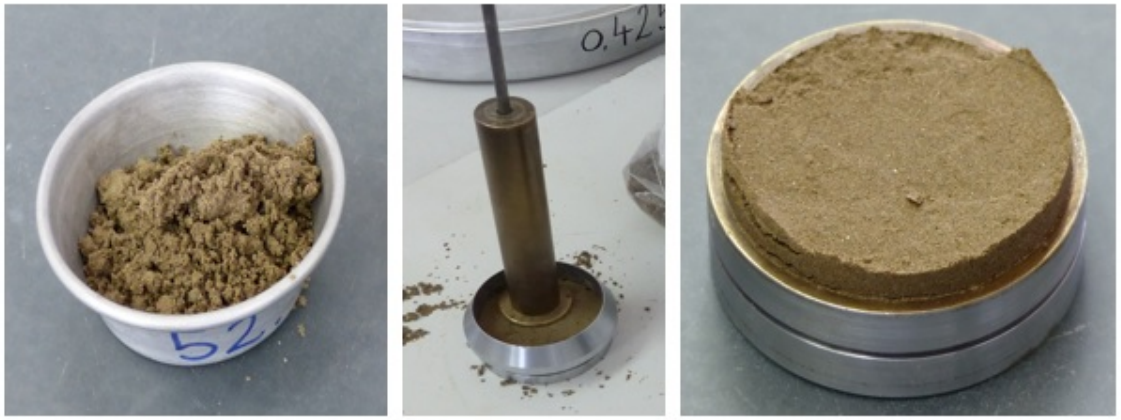
$$V = \frac{(d_{sr})^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{sr}\ [cm^3]$$

$$V = \frac{(63{,}39)^2 \cdot \pi}{4} \cdot 19{,}11 = 60310{,}38\ [mm^3] = 60{,}31\ [cm^3]$$

Masa uzorka koja nam je potrebna za ugradnju u čelični prsten može se dobiti pomoću izračunatog volumena prema izrazu:

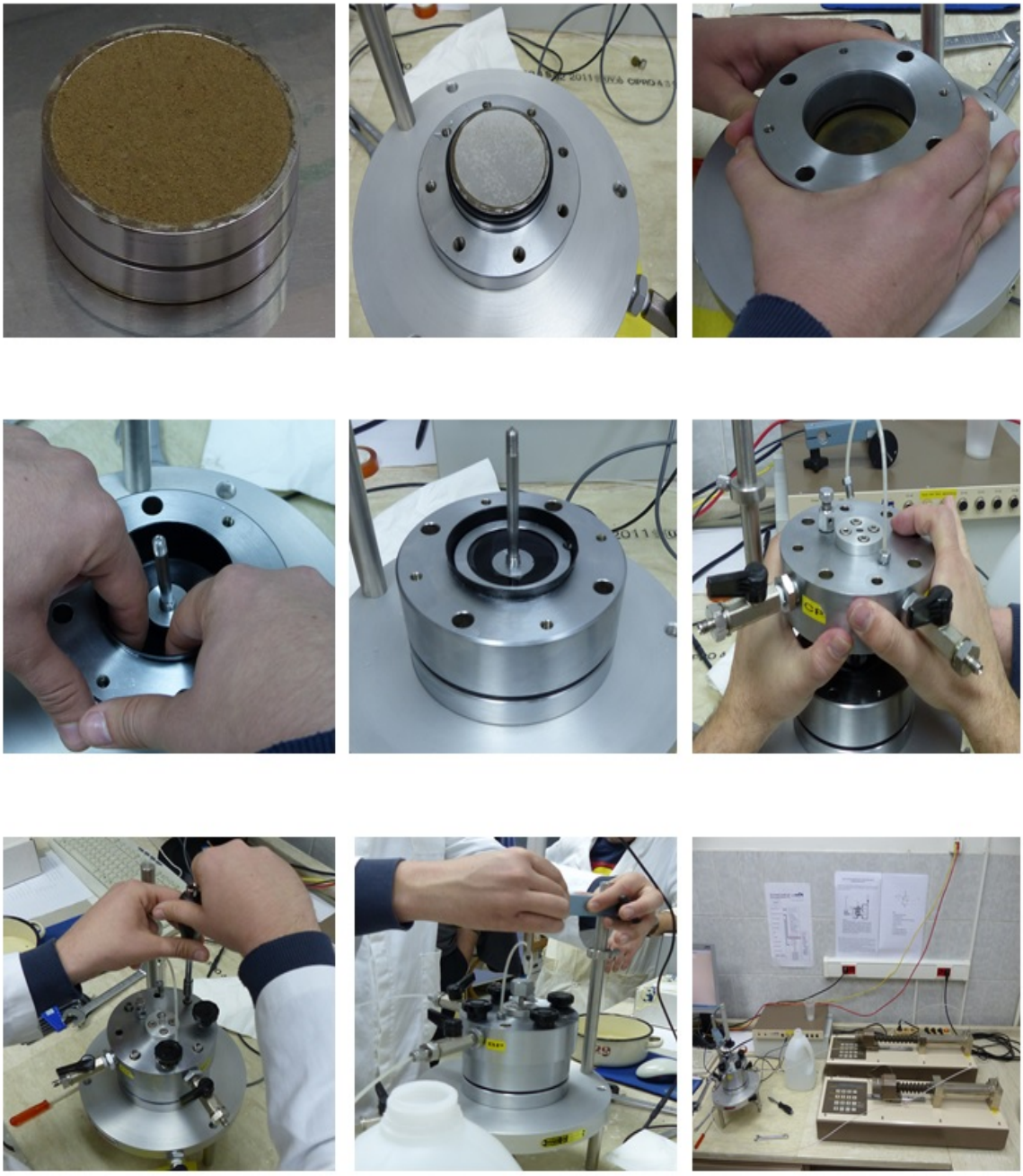
$$m = \rho \cdot V = 1{,}961\ g/cm^3 \cdot 60{,}31\ cm^3 = 118{,}27\ g$$

Izračunata masa uzorka ugradi se u čelični prsten (Slika 12).



Slika 12. Ugrađivanje uzorka u čelični prsten

Zatim se uzorak pažljivo stavlja u ležište postolja hidrauličkog edometra i dio po dio se sastavlja ćelija (Slika 13). Kod ugrađivanja i sastavljanja valja biti oprezan kako se uzorak ne bi oštetio i kako bi se svi elementi dobro pričvrstili vijcima, u protivnom je moguća interpretacija krivih rezultata. Kada se ovaj postupak dobro obavi, u program unosimo potrebne podatke i namjestimo odgovarajuće parametre te započinjemo s mjerenjem.



Slika 13. Sastavljanje ćelije hidrauličkog edometra

5.3. Rezultati edometarskog ispitivanja

Prije nego što se počelo s mjerenjem koeficijenta propusnosti proveden je postupak zasićivanja uzorka. Postupak zasićivanja uzorka opisan je u [7]. Stupanj zasićenja je iznosio 99 *%*. Hidrauličke pumpe smo podesili na 810 *kPa* i stavili ih u ravnotežno stanje, stanje kod kojeg nema tečenja. Da bi voda tekla kroz uzorak mora postojati razlika potencijala. Sva ispitivanja su provedena pri razlici potencijala od 0,5 *m*. Nakon početnih prilagodbi, krenulo se opterećivati uzorak. Prvi inkrement vertikalnog opterećenja je iznosio 100 *kPa*, s 810 *kP*a na 910 *kPa*, a svako sljedeće opterećenje na uzorak je bilo dvostruko veće od prethodnog. Budući da je uzorak bio zasićen porni tlak se povećao za isti iznos. Zatim smo otvorili ventil i dozvolili smanjenje pornog tlaka te pomoću mjerila pomaka mjerili pomake, odnosno slijeganje uzorka. Kada je porni tlak pao na početnu vrijednost od 810 *kPa* završen je proces konsolidacije. Po završetku procesa konsolidacije krenuli smo u mjerenje vodopropusnosti. Zatvorili smo ventil za nanošenje ćelijskog pritiska i time osigurali konstantan ćelijski pritisak. Pumpu smo prespojili na čelični cilindar koji je u kontaktu s pornom vodom s gornje strane uzorka. Nadalje, povećali smo tlak te pumpe za 5 *kP*a, s 810 *kPa* na 815 *kPa*, i time ostvarili tečenje vode. Jedna pumpa utiskuje vodu na vrhu uzorka kroz čelični klip dok druga na dnu siše. Nakon nekog vremena protoci su se ustabilili te smo izmjerili volumen vode koji ulazi i izlazi iz pumpi u jednoj minuti. Uz izmjerene i poznate vrijednosti, koeficijent propusnosti je izračunat prema Darcyjevom zakonu kao odnos protoka i hidrauličkog gradijenta. Isti postupak smo ponovili za naredne inkremente i dekremente. Početni dekrement faze rasterećenja iznosio je 200 *kPa*, s 1110 *kPa* na 910 *kPa*, a sljedeći je bio dvostruko manji. Analogno tome, mjerilo pomaka je ovog puta mjerilo relaksaciju uzorka, a ne slijeganje. Metoda računanja koeficijenta propusnosti je bila ista kao i kod faze opterećenja. U tablici 8 dane su vrijednosti i koeficijenti propusnosti za svaki inkrement opterećenja i dekrement rasterećenja. Radi boljeg razumijevanja kako se ponaša visina uzorka tijekom pokusa,u tablici 9 prikazan je postupak računanja visine uzorka nakon vertikalnih opterećenja i rasterećenja. Odnosi krivulja koeficijenta propusnosti i efektivnih naprezanja dani su na slici 14.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja

Br. pokusa	$\boldsymbol{\sigma_v}$ [kPa]	$\boldsymbol{\Delta\sigma_v}$ [kPa]	$\boldsymbol{L_{1\text{-}6}}$ [cm]	**V** [cm^3]	**k** [cm/s]
	Faza opterećenja				
1.	810 – 910	100	0,0012	0,3195	$6{,}44 \cdot 10^{-6}$
2.	910 – 1110	200	0,0028	0,1471	$2{,}96 \cdot 10^{-6}$
3.	1110 – 1510	400	0,0034	0,0930	$1{,}87 \cdot 10^{-6}$
	Faza rasterećenja				
4.	1110 – 910	200	0,0001	0,0523	$1{,}05 \cdot 10^{-6}$
5.	910 – 810	100	0,0009	0,0718	$1{,}44 \cdot 10^{-6}$
6.	810	0	0,0014	0,1080	$2{,}17 \cdot 10^{-6}$

Tablica 9. Postupak računanja visine uzorka nakon opterećenja i rasterećenja

Broj pokusa	$\boldsymbol{L_{1\text{-}6}}$ [cm]	**Postupak računanja visine uzorka nakon opterećenja i rasterećenja**	$\boldsymbol{\Delta L_{1\text{-}6}}$ [cm]
Faza opterećenja			
1.	0,0012	$L_0 - L_1 = 1{,}9110 - 0{,}0012 =$	1,9098
2.	0,0028	$\Delta L_1 - L_2 = 1{,}9098 - 0{,}0028 =$	1,9070
3.	0,0034	$\Delta L_2 - L_3 = 1{,}9070 - 0{,}0034 =$	1,9036
Faza rasterećenja			
4.	0,0001	$\Delta L_3 + L_4 = 1{,}9036 + 0{,}0001 =$	1,9037
5.	0,0009	$\Delta L_4 + L_5 = 1{,}9037 + 0{,}0009 =$	1,9046
6.	0,0014	$\Delta L_5 + L_6 = 1{,}9046 + 0{,}0014 =$	1,9060

Gdje je:

$L_{1\text{-}6}$ – visina slijeganja, odnosno relaksacije uzorka koja se desila tijekom opterećivanja, odnosno rasterećivanja uzorka

L_0 – početna visina uzorka koja iznosi 1,911 *cm*

$\Delta L_{1\text{-}6}$ – visina uzorka nakon inkrementa opterećenja i dekrementa rasterećenja

Koeficijente propusnosti za navedene inkremente opterećenja i dekremente rasterećenja dobili smo uvrštavanjem izmjerenih i izračunatih vrijednosti u sljedeći izraz:

$$k = \frac{\Delta L_{1\text{-}6} \cdot V}{A \cdot \Delta h \cdot t} [cm/s]$$

gdje je:

$\Delta L_{1\text{-}6}$ – visina uzorka nakon inkrementa opterećenja i dekrementa rasterećenja (tablica 9)

V – volumen protečene tekućine kroz uzorak u određenom vremenu (tablica 8)

A – površina poprečnog presjeka prstena u koji smo ugradili uzorak

$$A = \frac{(d_{sr})^2 \cdot \pi}{4} = \frac{(63{,}39^2) \cdot \pi}{4} = 3155{,}96\ mm^2 = 31{,}56\ cm^2$$

Δh – razlika potencijala bez koje nema tečenja

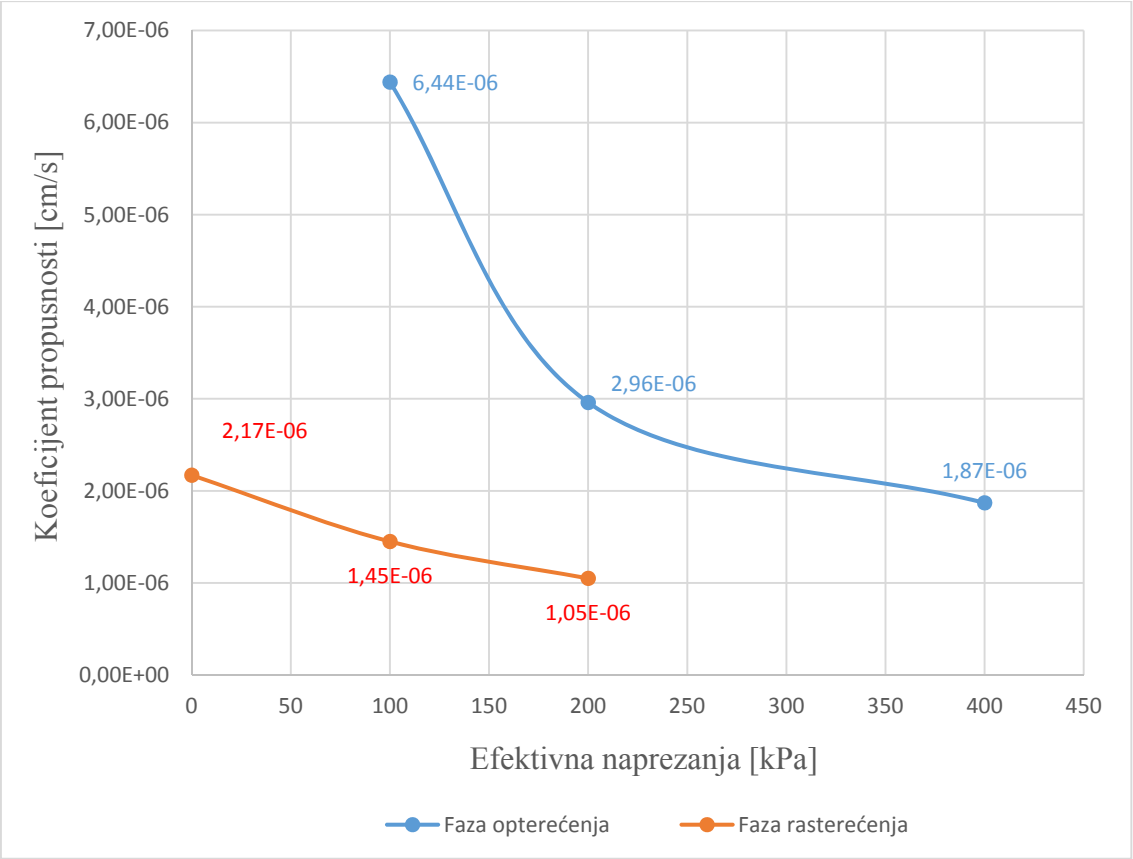
$$\Delta h = \frac{\Delta u}{\gamma_w} = \frac{5\ kN/m^2}{10\ kN/m^3} = 0{,}5\ m = 50\ cm,$$

Δu – promjena pornog tlaka

γ_w – zapreminska težina vode

t – vrijeme u kojem proteče određeni volumen tekućine kroz uzorak

$$t = 60\ s$$



Slika 14. Ovisnost koeficijenta propusnosti o efektivnim naprezanjima

6. ZAKLJUČAK

Ovim ispitivanjem pokazali smo kako se ponaša koeficijent propusnosti obzirom na naprezanja. Porastom ćelijskog pritiska u opteretnoj fazi, što implicira na smanjenje volumena pora, koeficijent propusnosti se smanjuje. U rasteretnoj fazi, smanjenjem ćelijskog pritiskapovećava se volumen pora te se koeficijent propusnosti povećava, ali ipak ne na početnu vrijednost zbog plastičnosti tla i pojave trajnih deformacija. Važno je napomenuti da bez razlike potencijala nema tečenja vode kroz uzorak. Budući da je uzorak bio zaglinjeni pijesak, vrijednosti koeficijenta propusnosti su bile očekivane.

7. LITERATURA

[1] Roje-Bonacci, T. *Mehanika tla*. 3. izd. Split: Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet; 2007.

[2] Nonveiller, E.*Mehanika tla i temeljenje građevina*.Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. Zagreb: Školska knjiga; 1979.

[3] Strelec S., Štuhec D. *Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi*. Interna skripta. Varaždin; Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2011.

[4] Kvasnička P., Domitrović, D. *Mehanika tla*. Interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet; 2007.

[5] Maksimović Milan M. *Mehanika tla*. 3. izd. Beograd: Građevinska knjiga; 2005.

[6] Veinović Ž., Kovačević-Zelić B., Kvasnička P. *Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda*. U: Malvić, T., ur. Rudarsko-geološko-naftni zbornik: Vol. 15. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. 2003. Str. 95-102.

[7] Jancetić M. *Postupak zasićivanja sitnozrnatog tla u hidrauličkom edometru*. Završni rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. 2017.

8. POPIS SLIKA

Slika 1. Trokomponentni sastav tla

Slika 2. AC-klasifikacija

Slika 3. Primjer krivulja na granulometrijskom dijagramu

Slika 4. Granice plastičnosti (Atterbergove granice)

Slika 5. Laminarni i turbulentni tok

Slika 6. Protok vode kroz tlo (Darcyjev pokus)

Slika 7. Mjerenje koeficijenta propusnosti metodom konstantnog tlaka

Slika 8. Mjerenje koeficijenta propusnosti metodom promjenjivog tlaka

Slika 9. Hidraulički edometar

Slika 10. Specijalizirane hidrauličke pumpe

Slika 11. Dijelovi hidrauličkog edometra

Slika 12. Ugrađivanje uzorka u čelični prsten Standardnim Proctor-ovim pokusom

Slika 13. Sastavljanje ćelije hidrauličkog edometra

Slika 14. Ovisnost koeficijenta propusnosti o efektivnim naprezanjima

9. POPIS TABLICA

Tablica 1. Rasponi vrijednosti gustoća tla

Tablica 2. Oznake koje se koriste za formiranje klasifikacijskih simbola

Tablica 3. Podjela tla prema promjeru (veličini) čestica tla

Tablica 4. Vrijednosti koeficijenta propusnosti za razne vrste tla

Tablica 5. Klasifikacija tla prema stupnju propusnosti

Tablica 6. Promjer prstena

Tablica 7. Visina prstena

Tablica 8. Rezultati ispitivanja

Tablica 9. Postupak računanja visine uzorka nakon opterećenja i rasterećenja