

# Mjerenje pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzorka tla u hidrauličkom edometru

---

**Purgar, Marija**

**Undergraduate thesis / Završni 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:130:648719>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MARIJA PURGAR

MJERENJE PORNIH PRITISAKA TIJEKOM  
KONSOLIDACIJE UZORKA TLA U HIDRAULIČKOM  
EDOMETRU

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

MJERENJE PORNIH PRITISAKA TIJEKOM  
KONSOLIDACIJE UZORKA TLA U HIDRAULIČKOM  
EDOMETRU

KANDIDAT:

MARIJA PURGAR

MENTOR:

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

VARAŽDIN, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnica: MARIJA PURGAR

Matični broj: 2764 - 2016./2017.

### NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

MJERENJE PORNIH PRITISAKA TIJEKOM KONSOLIDACIJE UZORKA TLA U  
HIDRAULIČKOM EDOMETRU

- Rad treba sadržati:
1. Uvod
  2. Teorijska osnova
  3. Hidraulički edometar
  4. Mjerenje pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzorka tla u hidrauličkom edometru
  5. Zaključak

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

Zadatak zadan: 01.05.2019.

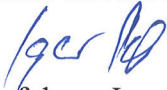
Rok predaje: 05.07.2019.

Mentor:

  
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

**MJERENJE PORNIH PRITISAKA TIJEKOM KONSOLIDACIJE UZORKA  
TLA U HIDRAULIČKOM EDOMETRU**

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.

Varaždin, 3. srpnja 2019. godine

Marija Purgar

(Ime i prezime)

26081212511

(OIB)

*Marija Purgar*

(Vlastoručni potpis)

*Tijekom studiranja na Geotehničkom fakultetu, naučila sam da je za uspjeh važno imati stručne i pouzdane suradnike. Zahvaljujem svima koji su me poticali i ohrabrivali da ustrajem na svojem putu, za pomoć i podršku tijekom preddiplomskoga studija.*

*Posebno zahvaljujem mentoru, izv.prof.dr.sc. Igoru Petroviću, na vremenu, strpljenju i znanju koje je nesebično podijelio sa mnom prilikom izrade ovoga rada.*

*Izražavam zahvalnost članovima komisije doc.dr.sc. Borisu Kavuru i izv.prof.dr.sc. Kreši Ivandiću, na smjernicama i savjetima prilikom izrade završnoga rada.*

*Mojoj majci i bratu, koji uvijek vjeruju u mene i moj uspjeh, kada sama više ne mogu – hvala, za bezuvjetnu ljubav i razumijevanje.*

## **Sažetak**

Marija Purgar, Mjerenje pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzorka tla u hidrauličkom edometru

Hidraulički edometar ubraja se u nepredne uređaje za određivanje deformacijskih svojstava tla. Osim definiranja i izračuna koeficijenta stišljivosti, modula stišljivosti, koeficijenta promjene volumena te indeksa kompresije i indeksa rekompresije, obradom podataka dobivenih iz hidrauličkog edometra moguće je prikazati i interpretirati promjenu pornog tlaka te prikazati odnose ćelijskog i povratnog tlaka, kao i odnos ćelijskog i pornog tlaka kroz vrijeme. Razmatrajući promjenu totalnih naprezanja u tlu i koncept efektivnih naprezanja, uslijed nanošenja opterećenja dolazi do povećanja pornog tlaka u tlu.

U radu su predstavljene prednosti ispitivanja hidrauličkim edometrom te način i rezultati mjerenja pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzorka tla.

**Ključne riječi:** porni pritisak, konsolidacija, hidraulički edometar.

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Teorijska osnova .....	2
2.1. Svojstva tla.....	2
2.2. Trodijelni sustav tla.....	3
2.3. Fazni odnosi u tlu .....	3
2.3.1. Vlažnost.....	4
2.3.2. Gustoća.....	4
2.3.3. Porozitet.....	5
2.3.4. Koeficijent pora .....	5
2.3.5. Veza između relativnog poroziteta i koeficijenta pora.....	6
2.3.6. Stupanj zasićenosti.....	6
2.4. Naprezanje i deformacije u zrnatoj masi .....	6
2.5. Voda u tlu .....	8
2.5.1. Kapilarnost.....	9
2.5.2. Pomi pritisci u vodom zasićenom tlu .....	10
2.5.3. Darcyjev zakon .....	12
2.6. Slijeganje .....	14
2.7. Konsolidacija .....	15
3. Hidraulički edometar .....	16
3.1. Osnovni dijelovi uređaja.....	16
3.1.1. Točnost i preciznost mjernih uređaja .....	19
3.2. Princip rada mjerila pritisaka i umjeravanje .....	20
3.3. Ugradnja uzorka.....	21
3.4. Provođenje pokusa .....	23
3.4.1. Zasićivanje uzorka .....	23



3.4.2.	Provjera stupnja zasićenosti.....	23
3.4.3.	Konsolidacija .....	24
4.	Mjerenje pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzorka tla u hidrauličkom edometru .....	25
4.1.	Postupak pripreme uzorka .....	25
4.2.	Tijek pokusa.....	26
4.3.	Rezultati iz hidrauličkog edometra .....	27
5.	Zaključak .....	31
6.	Literatura .....	32
7.	Popis slika.....	33
8.	Popis tablica.....	34

# 1. Uvod

Grana mehanike koja izučava i opisuje tlo u prostoru na kojem ili unutar kojeg se gradi naziva se mehanika tla (Roje-Bonacci, 2003). Takav materijal sastoji se od dijelova raspadnutih stijena, vode i plinova između tih dijelova. Uslijed djelovanja sila na obodu ili unutar tog materijala, dolazi do deformacija koje utječu na stabilnost tla. Mehanika tla ima važnu primjenu u graditeljstvu. Preko temelja, teret svake građevine prenosi se na tlo u kojem uzrokuje naprezanje i deformacije.

Uz vanjske čimbenike razmatra se i priroda promatranog uzorka tla. Prema ESCS klasifikaciji tla koja se temelji na načelima EN ISO 14668-2 tlo se dijeli na krupnozrnato tlo, sitnozrnato tlo i organsko tlo. Za klasificiranje tla koriste se granulometrijski sastav tla i granice konzistencije. Glavne frakcije krupnozrnatog tla su šljunak i pijesak, a sitnozrnato tlo čine prah, glina i organsko tlo (Kovačević, Jurić-Kačunić 2014).

Osim klasifikacije tla, jedan od najvažnijih čimbenika prilikom ispitivanja je pojava vode. Voda ispunjava sve pore u tlu ispod razine podzemne vode. Izdizanje iznad te razine uzrokuju kapilarne pojave. Voda uzrokuje i promjenu efektivne težine ovisno o promatranoj zoni tla i njezino strujanje može dovesti do neželjenih posljedica (Tehnička enciklopedija, 1982). Analizirajući koncept efektivnih naprezanja i promjenu totalnih naprezanja u tlu uslijed dodatnih opterećenja na površini, u trenutku nanošenja opterećenja dolazi do povećanja pornog pritiska (Roje-Bonacci 2003). Promjenom naprezanja utječe se na koeficijent pora, koje rezultira promjenom pornih pritisaka u tlu. Odnos čvrstih čestica i vode u tlu predstavlja temelj razmatranja deformacijskih svojstava tla.

Kako bi se deformacijska svojstva tla i njegova stabilnost preciznije odredili, važno je poznavati promjenu pornih pritisaka uslijed promjene naprezanja. U ovome radu mjereni su porni pritisci tijekom konsolidacije uzorka tla u hidrauličkom edometru.

## 2. Teorijska osnova

Teorijsku osnovu ovog rada čine: svojstva tla, naprezanje i deformacije u zrnatoj masi, voda u tlu, stišljivost i konsolidacija. Za izgradnju, racionalno projektiranje i sigurnost građevina važna su proučavanja svojstava i vrste materijala na kojima će doći do određenih zahvata. Povezanost pojmova vode u tlu, stišljivosti i konsolidacije važni su i čine osnovu prilikom izvođenja ispitivanja uzorka tla u hidrauličkom edometru.

### 2.1. Svojstva tla

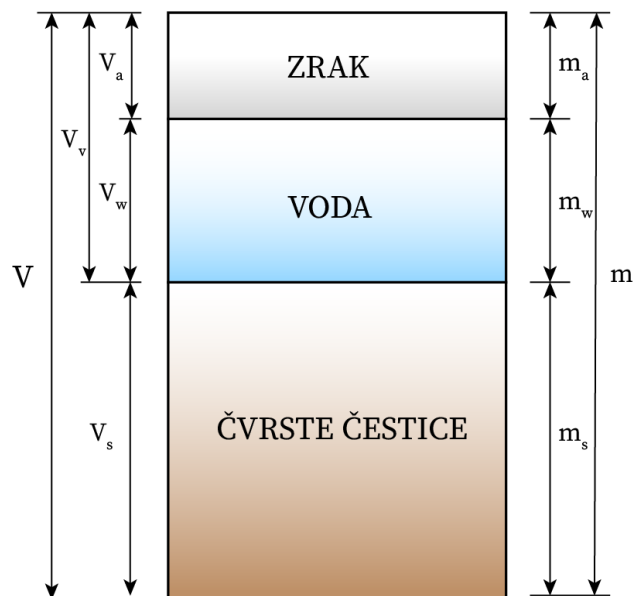
Svojstva tla znatno se razlikuju od svojstava homogenog materijala zbog njegove zrnate strukture. Sila na konturi prenosi se unutar prostora koji zauzima zrnata masa pojedinačnim silama na kontaktima između susjednih čestica. Te sile drobe, pomiču ili savijaju čestice, a sile se među česticama i pri konstantnom opterećenju mijenjaju s vremenom. R. J. Marsal (1973.) pokazao je kako broj kontakata po zrnju ovisi o veličini zrna, zbijenosti i granulaciji uzorka. Prosječno ima šest dodirnih točaka na svakom zrnju u tipičnoj šljunčanoj smjesi koja se sastoji od zrna s promjerom od 1 do 200 mm i od zrna promjera od 18 do 27 mm. Specifičan broj kontakata po jedinici volumena uzorka ovisi o veličini zrna, a sile na kontaktima pri zadanom prosječnom napreznju rastu s veličinom zrna. Tipične vrijednosti kontaktnih sila vide se u Tablici 1. (Tehnička enciklopedija 1982).

Tablica 1. Vrijednosti kontaktnih sila na kontaktima zrna zrnate strukture

Vrsta tla	Promjer zrna [mm]	Prosječna kontaktna sila [kN] za naprezanje [kN/m <sup>2</sup> ]		
		10	100	1000
Šljunak	60	21	210	2100
Pijesak	2	0,02	0,21	2,1
Prah	0,06	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
Glina	0,002	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$

## 2.2. Trodijelni sustav tla

Osnovni model razmatranja tla temelji se na trodijelnom sustavu. Tlo čine čestice različite krupnoće i međuprostor, odnosno pore. Pore u tlu mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom. Na Slici 1. prikazan je trodijelni sustav na modelu jedinične zapremnine tla (Roje-Bonacci 2003).



Slika 1. Trodijelni sustav prikazan na modelu jedinične zapremnine tla (Roje-Bonacci 2003).

Promatrajući jediničnu zapreminu tla u prirodi, razlikuju se zapreminna čvrstih čestica i zapreminna pora. Zapreminna pora dijeli se na dio pora ispunjen vodom i dio pora ispunjen zrakom (Roje-Bonacci 2003).

## 2.3. Fazni odnosi u tlu

Masa i gustoća čine osnovne veličine u mehanici tla. Uz navedene pojmove uobičajeno je korištenje obujamske i specifične težine. Iz trodijelnog modela tla definirani su odnosi za vlažnost i gustoću tla. Relativni porozitet, koeficijent pora i stupanj zasićenosti predstavljaju bezdimenzionalne veličine definirane volumnim odnosima u trodijelnom sustavu tla.

### 2.3.1. Vlažnost

Vlažnost  $w$  je omjer mase vode u tlu  $m_w$  i mase čvrstih čestica tla  $m_s$ . Izražava se u postocima. Kod suhog tla vlažnost iznosi 0%, dok porastom mase vode u tlu raste i postotak vlažnosti.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

### 2.3.2. Gustoća

Gustoća  $\rho$  definirana je omjerom mase  $m$  i volumena tla  $V$ . Ovisi o vrsti i porijeklu čestica tla i odnosu između čvrstih čestica tla i pora koje mogu biti ispunjene vodom ili zrakom.

$$\rho = \frac{m}{V} [kg/m^3] \text{ ili } [g/cm^3] \quad (2)$$

Gustoća čestica tla  $\rho_s$  predstavlja omjer mase suhih čestica  $m_s$  tla i volumena suhih čestica tla  $V_s$ .

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} [kg/m^3] \text{ ili } [g/cm^3] \quad (3)$$

Gustoća vode  $\rho_w$  je omjer mase vode  $m_w$  i volumena vode  $V_w$  sadržanog u uzorku tla.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg/m^3] \text{ ili } [g/cm^3] \quad (4)$$

Za izračun gustoća vrijede izrazi (Roje-Bonacci 2003):

$$\text{Gustoća vlažnog tla} \quad \rho = (1 - n) \cdot \rho_s + n \cdot S_r \cdot \rho_w \quad (5)$$

$$\text{Gustoća suhog tla } (S_r = 0) \quad \rho_d = (1 - n) \cdot \rho_s \quad (6)$$

$$\text{Gustoća potpuno zasićenog tla } (S_r = 1) \quad \rho = (1 - n) \cdot \rho_s + n \cdot \rho_w \quad (7)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{V_s + V_v} \quad (8)$$

gdje je:

$\rho$ – gustoća tla	$V$ – ukupni volumen uzorka
$\rho_s$ – gustoća čvrstih čestica	$V_s$ – volumen čvrstih čestica
$\rho_d$ – gustoća suhog tla	$V_v$ – volumen pora
$\rho_w$ – gustoća vode	$n$ – porozitet
$m_s$ – masa čvrstih čestica	$S_r$ – stupanj zasićenja

U tablici 2. prikazani su rasponi vrijednosti za gustoću tla (Kvasnička 2007).

Tablica 2. Rasponi vrijednosti za gustoću tla

Gustoća	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$ (gustoća čvrstih čestica)	2500 – 2800
$\rho$ (gustoća tla)	1750 – 2000
$\rho_d$ (gustoća suhog tla)	1400 – 1700

### 2.3.3. Porozitet

Porozitet (apsolutni porozitet)  $n$  određuje se kao omjer volumena pora  $V_v$  i ukupnog volumena  $V$ . Izražava se u postocima.

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100 [\%] \quad (9)$$

### 2.3.4. Koeficijent pora

Koeficijent pora  $e$  je omjer volumena pora  $V_v$  i volumena čvrstih čestica tla  $V_s$ . Koristi se prilikom analize slijeganja jer se deformacije odvijaju prvenstveno zbog smanjenja koeficijenta pora.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (10)$$

### 2.3.5. Veza između relativnog poroziteta i koeficijenta pora

Razmatrajući definicije poroziteta i koeficijenta pora dobivena je veza između spomenute dvije veličine i opisana je izrazima:

$$n = \frac{e}{1 + e} \cdot 100[\%] \quad (11)$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (12)$$

### 2.3.6. Stupanj zasićenosti

Stupanj zasićenosti ili saturacije  $S_r$  je postotak volumena pora ispunjen vodom. Izražen je omjerom volumena vode  $V_w$  i volumena pora  $V_v$ .

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100[\%] \quad (13)$$

Raspon stupnja zasićenosti određen je odnosom  $0 \leq S_r \leq 1$  ili u postocima od 0 do 100%. Moguća su tri stanja uzorka prema definiciji stupnja zasićenosti (Kvasnička 2007):

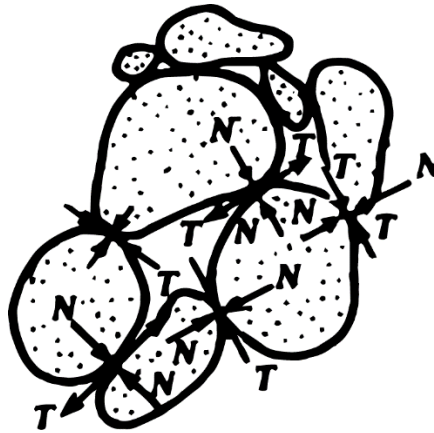
$S_r = 0$ , suho tlo

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

$0 \leq S_r \leq 100\%$ , nezasićeno ili djelomično zasićeno tlo.

## 2.4. Naprezanje i deformacije u zrnatoj masi

Naprezanje u zrnatoj masi nije homogeno raspodijeljeno po plohi presjeka, nego je rezultanta pojedinačnih koncentriranih sila koje prenose reakcije vanjskog opterećenja normalnim  $N$  i tangencijalnim silama  $T$  u točkama dodira među česticama (Slika 2).



Slika 2. Sile na dodirima zrna unutar zrnate mase

Naprezanje u tlu statički je pojam koji se u ravnini  $x, y$  na razini  $z$ , može izraziti relacijama:

$$\sigma_z = \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^n N_{zi} \quad (14)$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^n T_{zxi} \quad (15)$$

$$\tau_{yz} = \frac{1}{a^2} \sum_{i=1}^n T_{zyi} \quad (16)$$

gdje su  $N_{zi}$ ,  $T_{zxi}$  i  $T_{zyi}$  komponente sila na kontaktima zrna na razini  $z$ , odnosno na presjecima kroz zrna koje ona siječe. Naprezanje je zbroj komponentata sila među zrnima po jedinici površine. Intenzitet naprezanja varira od točke do točke iako je u promatranom predjelu naprezanje konstantno. Promjena naprezanja uzrokuje deformacije koje nastaju djelovanjem više pojava u zrnatoj masi kao što su deformacije zrna od sila na kontaktima, klizanje i rotacija susjednih zrna, savijanje pločastih tankih zrna, drobljenje i promjena rasporeda zrna. Djelovanjem tih pojava smanjuje se volumen pora među česticama pri povećanju opterećenja. Ponašanje materijala pri promjeni naprezanja određuje medij u porama, zrak ili voda (Tehnička enciklopedija 1982).

Deformacije nastaju uz svladavanje otpora na kontaktima. Ako je u porama zrak u kojem male promjene volumena ne uzrokuju znatniju promjenu tlaka, stišljivost pora znatno je veća od stišljivosti zrnatog skeleta. Kada su pore ispunjene vodom, promjena volumena nastaje ukoliko dođe do istjecanja vode. Taj proces nastaje polagano, a sporiji je što su



pore manje (Tehnička enciklopedija 1982). U trenutku promjene opterećenja, voda u porama preuzima dio dodatne sile. Efektivno naprezanje  $\sigma'$  je onaj dio ukupnog naprezanja kojeg prenosi skelet tla. Prilikom ispitivanja uzorka, mjere se totalna naprezanja  $\sigma$  i porni tlak  $u$ , a efektivno naprezanje računa se pomoću izraza (Roje-Bonacci 2003):

$$\sigma = \sigma' - u \quad (17)$$

## 2.5. Voda u tlu

Voda u tlu ispunjava sve pore ispod razine podzemne vode. Zbog kapilarnih pojava voda se u sitnozrnatom tlu diže i iznad te razine. Do visine podizanja vode u najkrupnijim porama tlo je zasićeno, a iznad te visine sve je više pora bez vode (Slika 3). Razina zasićene zone ovisi o oborinama, isparavanju i trošenju vode u biljkama, a tijekom godine je promjenjiva (Tehnička enciklopedija 1982).



Slika 3. Gravitacijska i kapilarna voda u tlu

Voda s vodoravnom razinom u tlu smanjuje efektivnu specifičnu težinu tla zbog djelovanja uzgona ispod razine podzemne vode, pa se efektivna naprezanja u tlu mijenjaju pri promjeni razine podzemne vode i pri promjeni debljine zone kapilarne vode. (Tehnička enciklopedija 1982).

Kada voda teče okomito prema gore, strujni tlak djeluje suprotno od gravitacije pa se efektivno naprezanje u toj zoni znatno smanjuje. Pri kritičnom gradijentu tlaka

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (18)$$

efektivna specifična težina tla iznosi

$$\gamma'' = \gamma' - i_c \gamma_w = 0 \quad (19)$$

pa zrna nekoherentnog tla lebde u vodi i nastaje hidraulički slom tla.

Pri promjeni tenzora naprezanja mijenja se koeficijent pora, što zahtjeva istjecanje vode iz zone s povećanim naprezanjima prema površini, prema propusnijim granicama i prema okolnim zonama s manjom promjenom naprezanja ili bez njega. Nastaje privremeno stanje u kojem veći dio povećanog naprezanja preuzima povećani tlak vode u porama uz malu promjenu efektivnog naprezanja. Voda pod većim tlakom istječe, porni tlak se smanjuje, a efektivno se naprezanje povećava (Tehnička enciklopedija 1982).

### 2.5.1. Kapilarnost

Kapilarnost je pojava u tlu koja se očituje kapilarnim dizanjem vode. U tlu kapilare nastaju spajanjem pora u uske cijevi promjenjivog promjera (Roje-Bonacci 2003).

Kapilarni učinak objašnjava se na idealnoj kapilari stalnog promjera, prema Giacomo Meniscusu. Kapilarno dizanje (Slika 4.)  $h_c$ , funkcija je veličine sile po jedinici dužine na dodiru meniskusa i kapilare  $f$ , promjera  $d$ :

$$Z = f \cdot d \cdot \pi = \rho_w \cdot g \cdot h_c \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = D \quad (20)$$

Pri tome su:

$f$  – komponenta sile površinske napetosti usporedna sa stijenkom kapilare [kN/m]

$d$  – promjer kapilare [m]

$g$  – Zemljina sila teža [m/s<sup>2</sup>]

$\rho_w$  – gustoća vode u [Mg/m<sup>3</sup>]

$h_c$  – visina kapilarnog dizanja

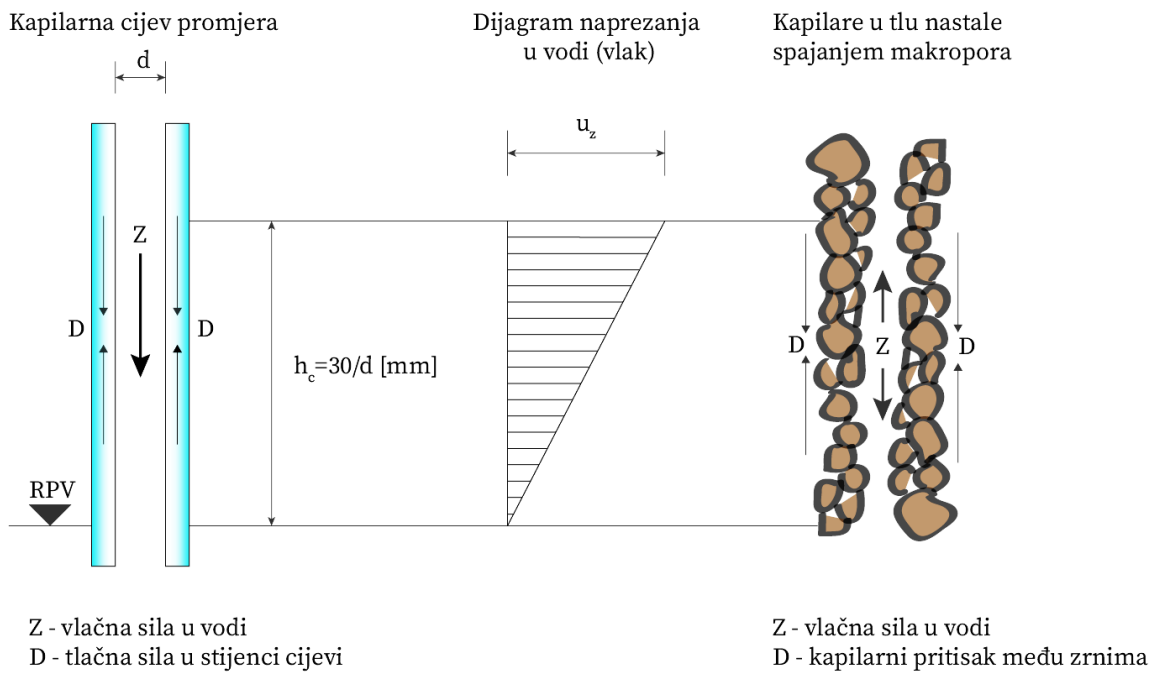
$Z$  – vlačna sila u vodi

$D$  – kapilarni pritisak među zrnima

Visina kapilarnog dizanja računa se prema izrazu:

$$h_c = \frac{4 \cdot f}{\rho_w \cdot g} \cdot \frac{1}{d} = - \frac{u_c}{\rho_w \cdot g} \quad (21)$$

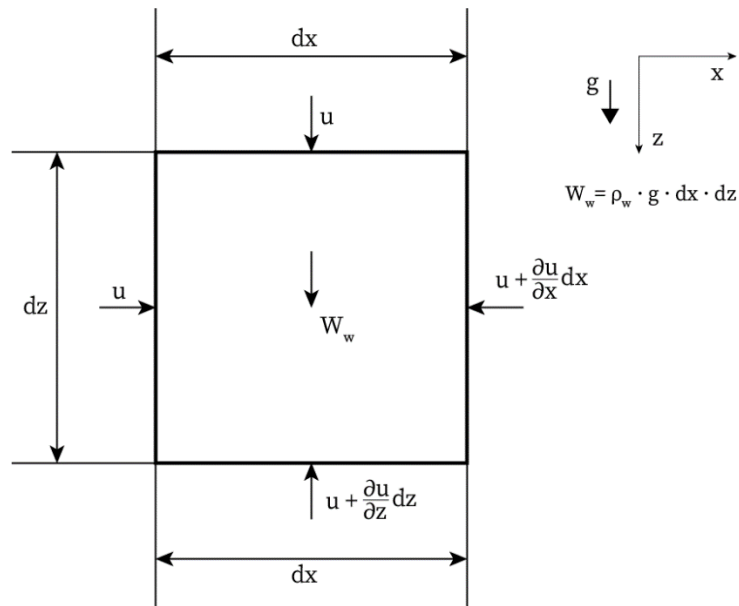
u kojem  $-u_c$  označava kapilarni vlak u vodi, koji se na čestice tla prenosi kao tlak (Roje-Bonacci 2003).



Slika 4. Kapilarno dizanje  $h_c$  u kapilari stalnog promjera

### 2.5.2. Porni pritisci u vodom zasićenom tlu

Pritisci vode u svim su smjerovima jednaki kada je voda u stanju mirovanja. Na slici 5. prikazan je element vode u mirovanju u ravnotežnom stanju (Roje-Bonacci 2003).



Slika 5. Diferencijalni element vode u ravnotežnom stanju

Jednadžba ravnoteže sila u horizontalnom ( $x$ ) smjeru je:

$$u - u - \frac{\partial u}{\partial x} dx = 0 \quad (22)$$

s rezultantom  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ , gdje je  $u$  u svim točkama ravnine na dubini  $z$  pritisak  $u$  konstantan u horizontalnom smjeru.

U vertikalnom ( $z$ ) smjeru jednadžba ravnoteže određena je prema:

$$u + \gamma_w dx dz - u - \frac{\partial u}{\partial z} dz = 0 \quad (23)$$

Za  $dx = 1$  i  $\gamma_w = \rho_w \cdot g$  ostaje:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \rho_w \cdot g \quad (24)$$

Integracijom izraza određena je jednadžba:

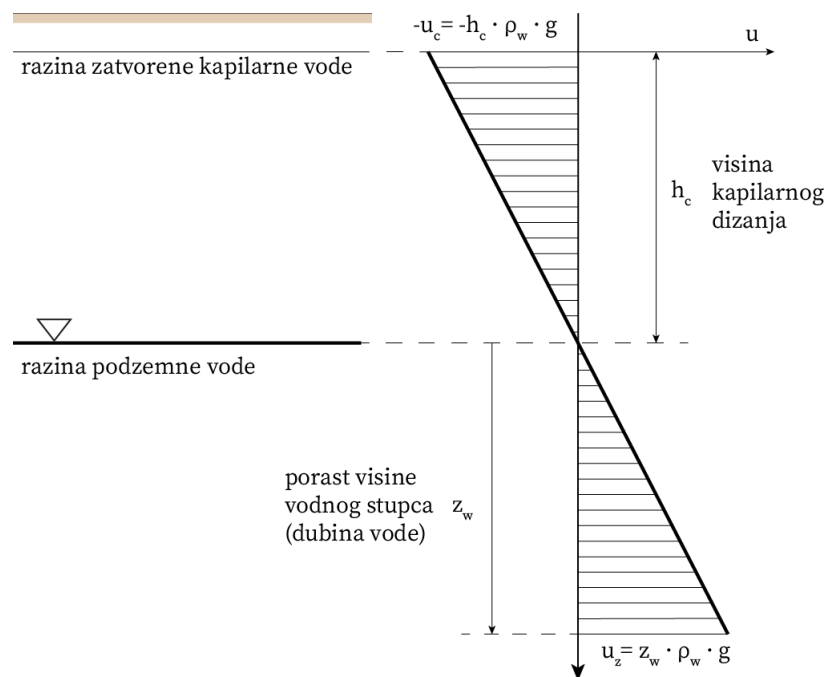
$$u(z) = u_0 + \rho_w \cdot g \cdot z \quad (25)$$

u kojoj je  $u_0$  pritisak vode za  $z = 0$ .

Početak koordinatne osi  $z$  stavlja se u točku gdje je  $u_0 = 0$  iz čega slijedi izraz:

$$u(z) = \rho_w \cdot g \cdot z = \gamma_w \cdot z \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (26)$$

na temelju kojeg se može zaključiti da su porni pritisci linearna funkcija dubine vode  $z$ , ako se voda nalazi u stanju statičke ravnoteže. Na slici 6. prikazan je dijagram rasporeda pritisaka mirne vode u presjeku kroz tlo s pritiscima koji nastaju uslijed kapilarnog dizanja vode (Roje-Bonacci 2003).



Slika 6. Raspored pritisaka vode u području potpune zasićenosti ( $S_r=100\%$ ) u presjeku tla

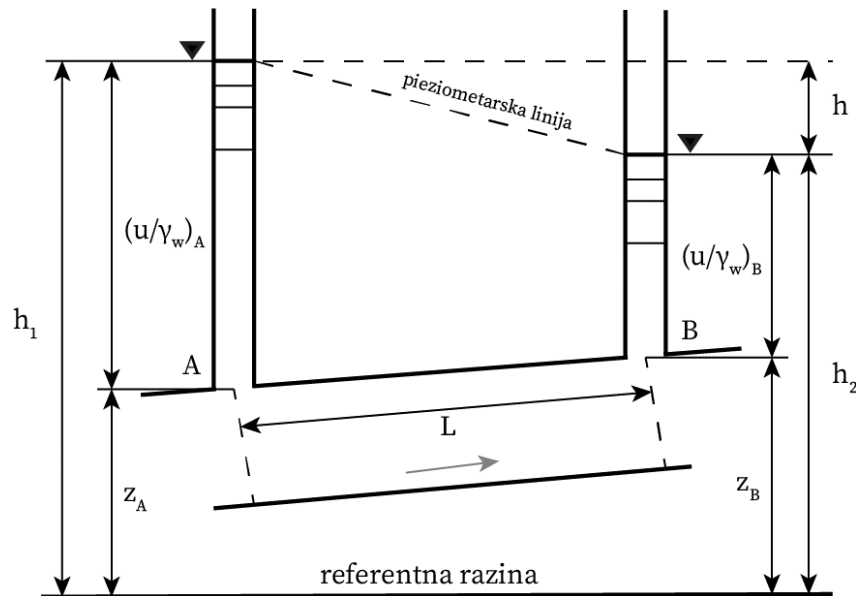
### 2.5.3. Darcyjev zakon

*„Brzina kretanja vode kroz tlo proporcionalna je hidrauličkom gradijentu i koeficijentu propusnosti.“*

Prema Maksimoviću (2005.) kretanje vode kroz tlo objašnjava se razlikom piezometarskih razina između dvije točke, prikazano na slici 7. Kretanje vode odvija se

od točke više razine prema točki niže razine. Razlika između točaka  $A$  i  $B$  definirana je izrazom  $h_1 - h_2$ , a udaljenost između točaka je  $L$ . Hidraulički gradijent određen je izrazom

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (27)$$



Slika 7. Hidraulički gradijent

Darcyjev zakon, (Darcy 1856.) vrijedi za kretanje vode u zasićenoj poroznoj sredini. Količina vode koja proteče kroz presjek površine  $A$  proporcionalna je hidrauličkom gradijentu, a protok  $Q$  određen je formulom:

$$Q = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} \cdot A \quad (28)$$

gdje je  $k$  konstanta proporcionalnosti s dimenzijom brzine. Za ovu konstantu koriste se nazivi koeficijent vodopropusnosti ili koeficijent filtracije, a određuje se eksperimentalno mjerenjima za promatrano tlo. Protok  $Q$  izražava se volumenom u jedinici vremena. Ako se protok izrazi volumenom vode koja u jedinici vremena proteče kroz presjek određene površine, Darcyjev zakon izražava se brzinom prema formuli:

$$v = \frac{Q}{A} = k \cdot i \quad (29)$$

Navedeni izraz opisuje fiktivnu brzinu kretanja vode kroz uzorak koju daje protok kroz promatrani uzorak tla. Stvarna brzina kretanja vode kroz čestice tla znatno je veća. (Maksimović 2005).

Tablica 3. prikazuje klasifikaciju tla prema vrijednosti koeficijenta propusnosti  $k$  (m/s) s rasponima vrijednosti Maksimović (2005.), dok Tablica 4. sadrži karakteristične vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti  $k$  u (cm/s) prema Roje-Bonacci (2003.).

Tablica 3. Klasifikacija tla prema stupnju propusnosti  $k$  (m/s)

Stupanj vodopropusnosti	$k$ (m/s)
Visok	$k > 10^{-4}$
Srednji	$10^{-3} - 10^{-5}$
Niski	$10^{-5} - 10^{-7}$
Veoma niski	$10^{-7} - 10^{-9}$
Zanemariv, praktički nepropusan	$k < 10^{-9}$

Tablica 4. Karakteristične vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti  $k$  (cm/s)

Vrsta tla	$k$ (cm/s)
Šljunak	1,0 i veći
Pijesak	$1,0 - 10^{-3}$
Prah	$2 \cdot 10^{-3} - 10^{-5}$
Glina	$< 10^{-6}$

## 2.6. Slijeganje

Vertikalni pomak tla izazvan opterećenjem, konstrukcijom, teretom, promjenom razine podzemne vode i drugim utjecajima naziva se slijeganje. Predstavlja važan parametar u geotehničkoj praksi jer predstavlja provjeru djelotvornosti temeljne konstrukcije. Slijeganje površine tla jednako je deformaciji tla nastaloj porastom naprezanja u tlu u vertikalnom smjeru.

Ukupno slijeganje  $s_u$  definirano je formulom (Roje-Bonacci 2003.):

$$s_u = s_t + s_k + s_s \quad (30)$$

gdje  $s_t$  označava trenutno slijeganje,  $s_k$  konsolidacijsko slijeganje i  $s_s$  sekundarno konsolidacijsko slijeganje.

Prema Roje-Bonacci (2003.) trenutno slijeganje vremenski prati promjene opterećenja i kod potpuno zasićenih slabo propusnih materijala izazvano je deformacijama kod kojih nema promjene zapremnine, odnosno distorzionim deformacijama. Konsolidacijsko slijeganje nastaje zapreminskim deformacijama tla i vremenski je ovisno zbog brzine istjecanja vode i zraka iz pora. Ostvaruje se tijekom procesa konsolidacije. Sekundarno konsolidacijsko slijeganje javlja se u koherentnim tlima, a izazvano je puzanjem tla.

## **2.7. Konsolidacija**

Postupno smanjivanje volumena, opadanje pornog tlaka i povećanje efektivnih naprezanja naziva se procesom konsolidacije. Veličina promjene volumena jednaka je volumenu vode istisnute iz pora i ovisna je o veličini opterećenja i stišljivosti promatranog tla. Brzina promjene volumena ovisna je i o vodopropusnosti. Kod krupnozrnatih tla kao što su šljunak i pijesak, vrijeme potrebno za istjecanje vode iz tla relativno je kratko i gotovo zanemarivo. Ukoliko se promatraju koherentna tla, poput gline, potrebno je više vremena za istiskivanje vode iz pora zbog niske vodopropusnosti (Maksimović 2005).



### **3. Hidraulički edometar**

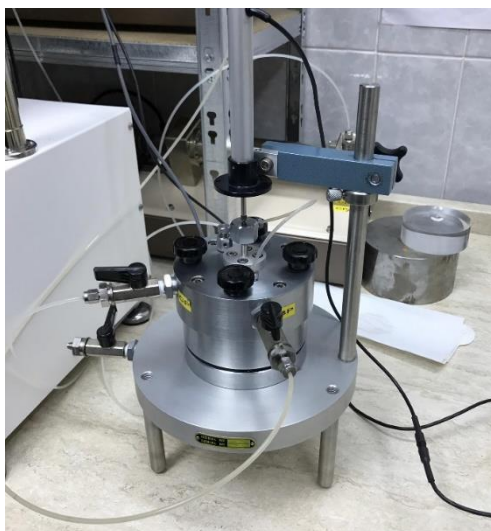
Edometar je uređaj koji služi za ispitivanje stišljivosti na uzorcima tla. Različita vertikalna naprezanja nanose se u inkrementima na uzorak sa spriječenom bočnom deformacijom. Predstavlja najčešći način utvrđivanja mehaničkih svojstava tla, stišljivost i karakteristike konsolidacije tla (Mulabdić, 2018).

U hidrauličkom edometru tlak se nanosi hidrauličkim putem i prenosi putem gumene membrane. (Veinović i sur. 2003).

Najznačajnije karakteristike hidrauličkog edometra čine mogućnost mjerenja pornog tlaka, kontrola dreniranja i mogućnost nanošenja povratnog tlaka „back pressure“ na uzorak. Uz različite uvjete dreniranja i opterećenja uzoraka mogu se mjeriti slijevanja s dreniranjem na gornjem dijelu uzorka uz mjerenje pornog tlaka na donjem dijelu, mjerenje slijevanja uz obostrano dreniranje bez mjerenja pornog tlaka i mjerenje propusnosti uzorka (Grediček, Matić 2010).

#### **3.1. Osnovni dijelovi uređaja**

Hidraulički edometar čine dva osnovna dijela, hidraulička ćelija (Slika 8.) i hidrauličke pumpe (Slika 9.). „GDS standard controller“ predstavlja tip hidrauličkih pumpi kojima se upravlja samostalno ili računalnim programom. Koriste se za preciznu regulaciju tlaka i volumena. Kao tekućina u pumpama koristi se deaerirana voda. Korištenjem računalnog programa GDSLab osiguran je automatiziran sustav ispitivanja te trajni zapis svih mjerenih veličina za daljnju obradu.



Slika 8. Čelija hidrauličkog edometra



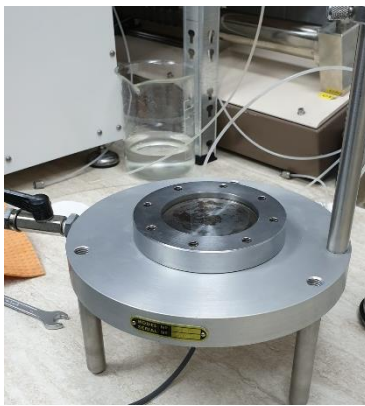
Slika 9. Hidraulička pumpa

Hidrauličku ćeliju čine sljedeći elementi (Veinović i sur. 2003.):

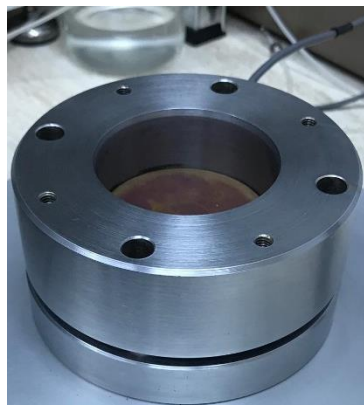
- a) Postolje sa spojenim senzorom za očitavanje pornog tlaka, dok se sa strane nalazi priključak za regulaciju pornog tlaka pomoću hidrauličke pumpe
- b) Kućište za ugradnju čeličnog prstena s uzorkom
- c) Čelični prsten za ugradnju uzorka
- d) Porozne pločice koje se postavljaju iznad i ispod uzorka

- e) Gumena membrana za prenošenje opterećenja na uzorak i manji čelični prsten koji se postavlja unutar membrane
- f) Čelični cilindar s priključcima za nametanje čelijskog i „back“ pritiska koji nasjeda na veliki čelični prsten s membranom
- g) Vijci za pričvršćivanje čeličnog cilindra i postolja edometra
- h) Čelični klip gdje voda tijekom pokusa teče prema gore
- i) Mjerilo vertikalnih pomaka uzorka

Dijelovi hidrauličke ćelije prikazani su na slici 10.



a) postolja



b) kućište



c) čelični prsten



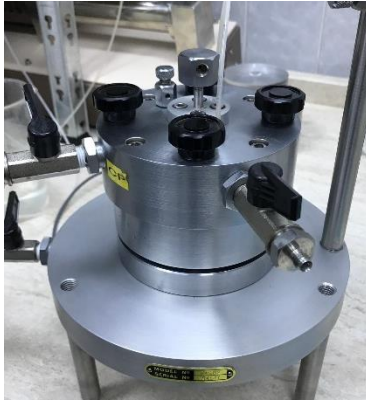
d) porozne pločice



e) gumena membrana



f) čelični cilindar s priključcima



g) vijci za pričvršćivanje



h) čelični klip



i) mjerilo pomaka

Slika 10. Dijelovi hidrauličke ćelije: a) postolje, b) kućište, c) čelični prsten d) porozne pločice, e) gumena membrana, f) čelični cilindar s priključcima, g) vijci, h) čelični klip, i) mjerilo pomaka

### 3.1.1. Točnost i preciznost mjernih uređaja

Kvalitativni pojmovi točnost, istinitost i preciznost koriste se za opisivanje nekog postupka mjerenja i pripadajuće mjerne nesigurnosti. Mjera podudaranja nekog mjernog rezultata s istinitom vrijednošću naziva se točnost. Razmatrajući više mjernih rezultata, podudaranje srednje vrijednosti tih rezultata s istinitom vrijednošću je istinitost, a međusobno podudaranje pojedinačnih vrijednosti je preciznost (Vrkljan 2004). Bliskost slaganja između izmjerenih vrijednosti veličine dobivenih ponovljenim mjerenjima na istim ili sličnim predmetima pod utvrđenim uvjetima označava mjernu preciznost. Mjerna preciznost obično se izražava brojčano mjerama nepreciznosti, kao što su varijanca, standardno odstupanje ili koeficijent promjene pod utvrđenim mjernim uvjetima. (Runje, 2007).

Točnost mjerila i preciznost uređaja mijenja se tijekom vremena, kao i pod djelovanjem vanjskih utjecaja poput temperature, vlage, strujanja zraka i ostalih. Kako bi se osigurala točnost i ispravnost mjerila mjernih uređaja provodi se postupak umjeravanja.

Umjeravanje je radnja kojom se pod određenim uvjetima u prvome koraku uspostavlja odnos između vrijednosti veličine s mjernim nesigurnostima koje daju mjerni etaloni i odgovarajućih pokazivanja kojima su pridružene mjerne nesigurnosti, a u drugome

koraku ti se podaci upotrebljavaju za uspostavljanje odnosa za dobivanje mjernog rezultata iz pokazivanja (Zakon o mjeriteljstvu, NN broj 74/14 i 111/18). Nakon provedenog umjeravanja dobiva se službena Potvrda o umjeravanju.

### **3.2. Princip rada mjerila pritisaka i umjeravanje**

U ovom pokusu korišten je hidraulički edometar tipa *Rowe i Barden* (1966.) uz osjetnik tlaka *Maywood Instrumentsa Ltd.* (Velika Britanija), tipa P-102. Piezo hidraulički osjetnik tlaka povezan je s mjernim pojačalom i računalnim programom za detekciju i očitavanje tlaka. Nazivno mjerno područje ovog uređaja je u rasponu od 0 do 3548,7 kPa. Za potrebe izvođenja pokusa korišteno je mjerno područje raspona 0 – 2000 kPa. Kapacitet promjene napona u ovom uređaju je 0 – 200 mV. Električna osjetljivost mjerila iznosi 17,1439 kPa/mV. Kada uređaj registrira promjenu od jednog mV to označava promjenu tlaka za 17,1439 kPa.

Umjeravanje uređaja provedeno je u skladu s internom tehničkom uputom za umjeravanje UPML-DKD-R 6-1, izdanje 1 od 24.03.2017. Prije umjeravanja, mjerni je uređaj dva puta opterećen do nazivnog tlaka umjeravanog područja. Provedeno je umjeravanje pri rastućem tlaku uz tri ponavljanja unutar područja 10% do 100% vrijednosti tlaka na mjernom području. Umjeravanje je provedeno s konstantnim vrijednostima tlaka  $p_i$  očitano na digitalnom pokazniku tlaka, odnosno računalnom programu, pri maksimalnoj temperaturi od 22,9°C i minimalnoj temperaturi 20,8 °C. Potvrda o umjeravanju prikazana je na slici 11.



test sistemi d.o.o.

Mjeriteljski laboratorij  
Metrology Laboratory

Laboratorij za umjeravanje mjerila duljine, mjerila sile, vibracijskih stolova s mjernim sustavom i neautomatskih vaga  
Laboratory for calibration of length gauges, force measuring instruments, vibration tables with measuring system and non automatic weighing instruments

ADR test sistemi d.o.o. – Mjeriteljski laboratorij • Ulica Milovana Kovačevića 3 • HR – 10010 Zagreb

**POTVRDA O  
UMJERAVANJU**  
Calibration certificate

Broj: 28122018-083  
Number

Stranica 1 od 5  
Page from

Umjerna oznaka  
Calibration label



Naručitelj umjeravanja:  
Customer

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
Geotehnički fakultet u Varaždinu  
Hallerova aleja 7  
HR-42000 Varaždin

Ponuda/Narudžbenica/Ugovor broj i datum:  
Offer/Purchase Order/Contract Order number and date

Narudžbenica broj 17/2018 od 7. prosinca 2018.

Predmet umjeravanja:  
Measurement object

Pretvornik tlaka

Proizvođač:  
Manufacturer

Maywood Instruments Ltd. (Velika Britanija)

Tip / model:  
Type / model

P-102 / -

Serijski broj / Godina proizvodnje:  
Serial number / Year of manufacture

086652 / -

Nazivno mjerno područje:  
Nominal measuring range

0 – 3548,7 kPa (0 – 500 PSIG)

Ukupni broj stranica  
Total number of pages

- 5 -

Mjesto i datum umjeravanja:  
Place and date of calibration

Varaždin, 28. prosinca 2018.

Ova potvrda o umjeravanju dokumentira sljedivost prema nacionalnim standardima za mjerne jedinice u skladu s Međunarodnim sustavom mjernih jedinica (SI). Naručitelj skrbi o ponovnom umjeravanju mjerila.  
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The user is obliged to have the object recalibrated.

Mjerenje obavio: Measured by	Datum izdavanja: Date of issue	Žig: ADR test sistemi d.o.o. ZAGREB	Voditelj Mjeriteljskog laboratorija: Head of the Metrology Laboratory
Siniša Mirković, dipl. ing. stroj.	8. siječnja 2019.		Siniša Mirković, dipl. ing. stroj.

ADR test sistemi d.o.o.  
Mjeriteljski laboratorij  
Ulica Milovana Kovačevića 3  
HR – 10010 Zagreb  
Hrvatska

Tel.: +385 (0)1 / 2303-578  
Fax.: +385 (0)1 / 2303-583  
Mob.: +385 (0)98 / 871-544  
E-mail: mjeriteljski-laboratorij@adr-ts.hr  
WEB: www.adr-ts.hr

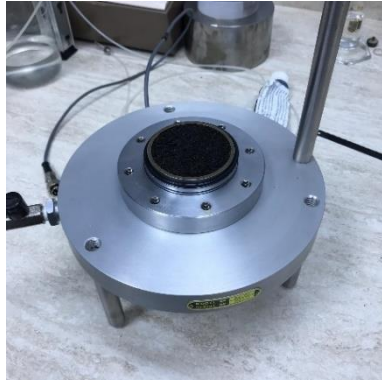
OBUPM-OND-R 6-1  
Obrazac: ODP018-01/01  
Pismohrana: registarator ML-UMJ-NM-12/18  
Arhive: filing folder

Ovaj dokument može se obnoviti samo u cijelosti. Doplomina obnavljanje moguće je samo uz pismeno odobrenje Mjeriteljskog laboratorija tvrtke ADR test sistemi d.o.o., uz navođenje broja pod kojim se vodi isto pismeno odobrenje. Potvrda o umjeravanju bez žiga i potpisa je nevažeća.  
This document may be reproduced only in full. It may be partially reproduced only by written approval of the Metrology Laboratory of ADR test sistemi d.o.o., together with the quotation of the reference number of the same written approval. Calibration certificate without seal and signature is not valid.

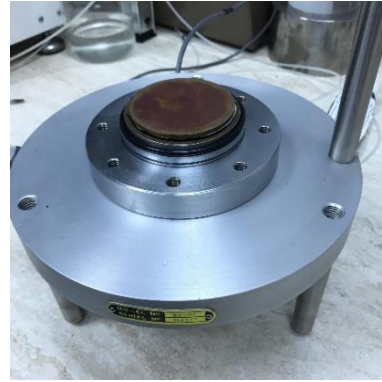
Slika 11. Potvrda o umjeravanju

### 3.3. Ugradnja uzorka

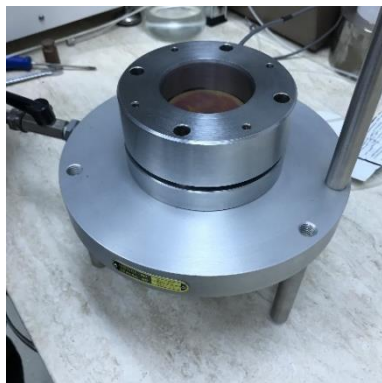
Prije sastavljanja edometra metalni prsten u koji se umeće uzorak maže se brtvnom mašću, kao i svi gumeni dijelovi koje čine gumena membrana i svi prstenovi u dodiru s metalnim dijelovima. Na taj se način sprječava moguće procjeđivanje vode između uzorka i prstena. Uzorak se umeće u prsten i s njim ugrađuje, pri tome je važno ugraditi sustav bez prisustva mjehurića zraka koji uslijed stlačivanja mogu poremetiti mjerne rezultate. Donja porozna pločica umeće se u postolje hidrauličkog edometra i na nju se postavlja čelični prsten s uzorkom. Zatim slijedi gornja porozna pločica i čelični cilindar u koji naliježe gumena membrana kako je prikazano na slici 12.



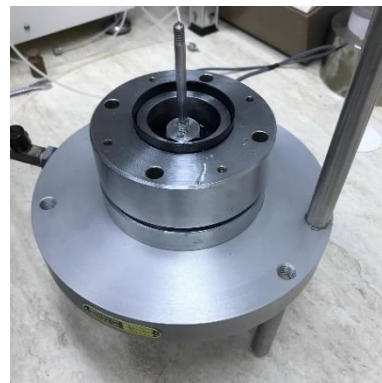
a) Postavljanje čeličnog prstena s uzorkom



b) Postavljanje gornje porozne pločice



c) Učvršćivanje čeličnog cilindra



d) Postavljanje gumene membrane

Slika 12. Ugradnja uzorka u hidraulički edometar: a) Postavljanje čeličnog prstena s uzorkom, b) Postavljanje gornje porozne pločice, c) Učvršćivanje čeličnog cilindra, d) Postavljanje gumene membrane

U gumenu membranu postavlja se metalni prsten koji osigurava povezanost membrane i stijenke metalnog cilindra. S donje strane membrane nalazi se metalna pločica koja liježe na gornju stranu uzorka i slijedi vertikalne pomake koji se prenose pomičnim klipom koji je u kontaktu s mjerilom pomaka, a preko njega se odvija i tečenje porne vode prema gore. Zatim slijedi postavljanje čeličnog cilindra s priključcima za nametanje pritiska. Uređaj se učvršćuje vijcima. U sustav se pušta destilirana i deaerirana voda nakon čega započinje punjenje ćelije vodom. Hidrauličkim pumpama nanosi se opterećenje. Jedna pumpa služi za nanošenje ćelijskog tlaka, a druga za nanošenje povratnog tlaka.

Za vrijeme pokusa svi dijelovi uređaja moraju biti zaštićeni od neposrednog utjecaja sunčevog zračenja i topline. Metalni dijelovi uređaja otporni su na hrđu i habanje te su

izrađeni od istog materijala kako bi se smanjila vjerojatnost elektrolitičke korozije. Temperaturne promjene u prostoriji s hidrauličnim edometrom ne smiju biti veće od  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Porozne pločice uronjene su u vodu minimalno 24 sata prije izvođenja pokusa, a sadrže veću poroznost od materijala koji se ispituje (Grediček, Matić 2010).

### **3.4. Provođenje pokusa**

Za analizu rezultata pokusa potrebni su sljedeći podaci: veličina uzorka, uvjeti drenaže, početni uvjeti, referentna točka za mjerenje pornog tlaka, proračun koeficijenta pora, određivanje povećanja ili smanjenja efektivnih naprezanja, kriteriji za završavanje svake faze konsolidacije i procjena nužnosti podataka o sekundarnoj kompresiji (Grediček, Matić 2010).

Ispitivanje u hidrauličkom edometru, koje uključuje i mjerenje pornih pritisaka, izvodi se u više faza:

- 1) zasićivanje uzorka
- 2) provjera stupnja zasićenosti (kontrola B parametra)
- 3) konsolidacija.

#### **3.4.1. Zasićivanje uzorka**

Prije izvođenja pokusa potrebno je sve pore ispuniti s vodom. Zasićivanje uzorka odvija se automatiziranim postupkom, putem GDSLab računalnog programa, istovremenim podizanjem pornih i ćelijskih pritisaka.

#### **3.4.2. Provjera stupnja zasićenosti**

Stupanj zasićenosti mjeri se izrazom  $\Delta u / \Delta \sigma$ , gdje je  $\Delta u$  inkrementalna promjena pornog tlaka koja je rezultat inkrementalne promjene vertikalnog naprezanja  $\Delta \sigma$ , u nedreniranim uvjetima. Navedeni izraz naziva se i Skemptonov parametar B. Dovoljna zasićenost uzorka definirana je uvjetom  $\frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \geq 0,95$  (BS 1377, dio 6, 1990). Mjerenje stupnja zasićenosti omogućeno je nanošenjem ćelijskog tlaka u nedreniranim uvjetima.



### **3.4.3. Konsolidacija**

Proces konsolidacije započinje otvaranjem ventila za dreniranje. Istjecanje vode iz uzorka dovodi do prenošenja naprezanja na čestice tla, odnosno do porasta efektivnog naprezanja. Pomi tlak opada i bilježe se promjena volumena vode u uzorku kao i nastala deformacija.

U ovome radu uzorak je konsolidiran pri ćelijskom pritisku od 200 kPa.

## 4. Mjerenje pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzorka tla u hidrauličkom edometru

U ovom poglavlju opisan je postupak mjerenja pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzorka tla u hidrauličkom edometru. Prikazane su tri faze mjerenja na pripremljenom uzorku: zasićivanje, provjera stupnja zasićenosti (kontrola B parametra) i konsolidacija.

### 4.1. Postupak pripreme uzorka

U ovom ispitivanju korišten je uzorak tla s visokim sadržajem organske tvari. Postupak pripreme uzorka prikazan je na slici 13. Prije provođenja pokusa, uzorak je prosijan na situ promjera 4,0 mm (13 a). Dobivena količina uzorka sušena je u sušioniku 24 sata na temperaturi od 60°C (13 b).



Slika 13. a) Prosijan uzorak



Slika 13. b) Sušenje uzorka u sušioniku

Slika 13. Priprema uzorka

Gustoća suhih čestica ispitivanog uzorka iznosila je  $1,94 \text{ g/cm}^3$ , koja je izmjerena pomoću piknometra s vodom. Suhi je uzorak pripremljen s ciljanom vlažnosti koja je iznosila 42,8%.

## 4.2. Tijek pokusa

Pripremljen uzorak ugrađen je u hidraulički edometar kako je opisano u Poglavlju 3.3. Prije ugradnje određen je volumen čeličnog prstena. Volumen čeličnog prstena određuje se mjerenjima promjera (Tablica 5.) i visine prstena (Tablica 6.), koja su provedena više puta s ciljem smanjenja pogreške.

Tablica 5. Promjer prstena

Unutarnji 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>

Tablica 6. 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>

Volumen prstena računa se prema izrazu za volumen valjka koristeći vrijednosti srednjeg promjera  $d_{sr}$  i srednje visine  $h_{sr}$ :

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

$$V = \frac{(63,40)^2 \cdot \pi}{4} \cdot 18,97 \text{ mm} = 59887,44 \text{ mm}^3 = 59,89 \text{ cm}^3$$

Volumen uzorka u prstenu iznosio je 59,89 cm<sup>3</sup>.

Masa uzorka ugrađena u prsten iznosila je 31 gram, a dobivena je iz razlike odvaga ćelije bez uzorka i ćelije s ugrađenim uzorkom.

Iz ovih podataka slijedi da je gustoća ugrađenog uzorka iznosila 0,52 g/cm<sup>3</sup>.

Nakon ugrađivanja uzorka, u računalni program unose se odgovarajući parametri za zasićivanje uzorka. Zasićivanje uzorka izvedeno je istovremenim podizanjem ćelijskog pritiska i pritiska u uzorku, kako bi efektivna naprezanja ostala nepromijenjena.

Proces konsolidacije započinje nakon zasićenja uzorka kojem je zabilježen stupanj saturacije  $S_r = 0,96$ . Stupanj saturacije određen je kontrolom B parametra koju izvodi računalni program.

Konsolidacija uzorka odvijala se u obostrano dreniranim uvjetima pri kojima je omogućeno istjecanje vode. Rezultat toga je promjena volumena pora, koja je istovjetna promjeni volumena istisnute vode.

Završetkom ispitivanja, zabilježeno je slijeganje uzorka od 6,4 mm prikazano na slici 14.

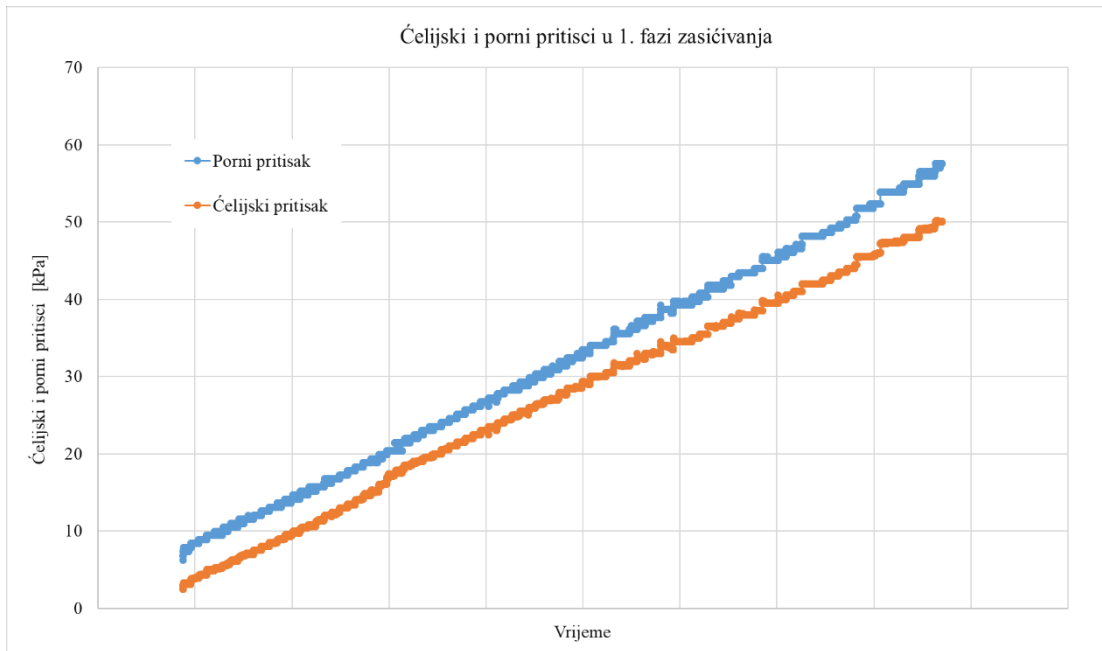


Slika 14. Slijeganje uzorka nakon provedenih ispitivanja

### 4.3. Rezultati iz hidrauličkog edometra

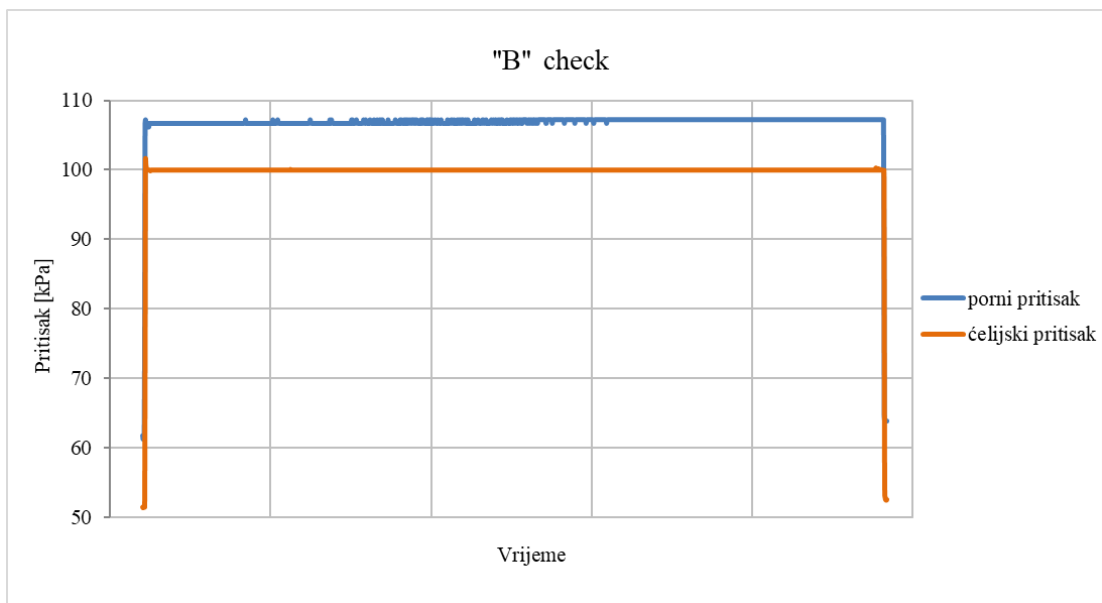
Dobiveni rezultati temelje se na tri faze ispitivanja uzorka, zasićivanju uzorka, kontroli B parametra i konsolidaciji.

Faza zasićivanja izvodi se postupnim podizanjem ćelijskog pritiska pri spriječenom dreniranju uzorka i istovremenim praćenjem promjena pornog pritiska u uzorku. Po sastavljanju ćelije, mjerilo pornih pritisaka bilježilo je početni tlak od 8 kPa, a pumpa ćelijskog pritiska 3 kPa. Prva faza zasićivanja započela je postupnim podizanjem ćelijskog pritiska do 50 kPa. Na slici 15. prikazan je porast ćelijskog i pornog pritiska u prvoj fazi zasićivanja.



Slika 15. Dijagram porasta pornog i ćelijskog pritiska tijekom prve faze zasićivanja

Računalni program izvodi kontrolu B parametra, tzv. „B“ check (Slika 16) i dobiveni stupanj zasićenja za zadano opterećenje nije zadovoljio uvjet  $S_r > 0,95$ .

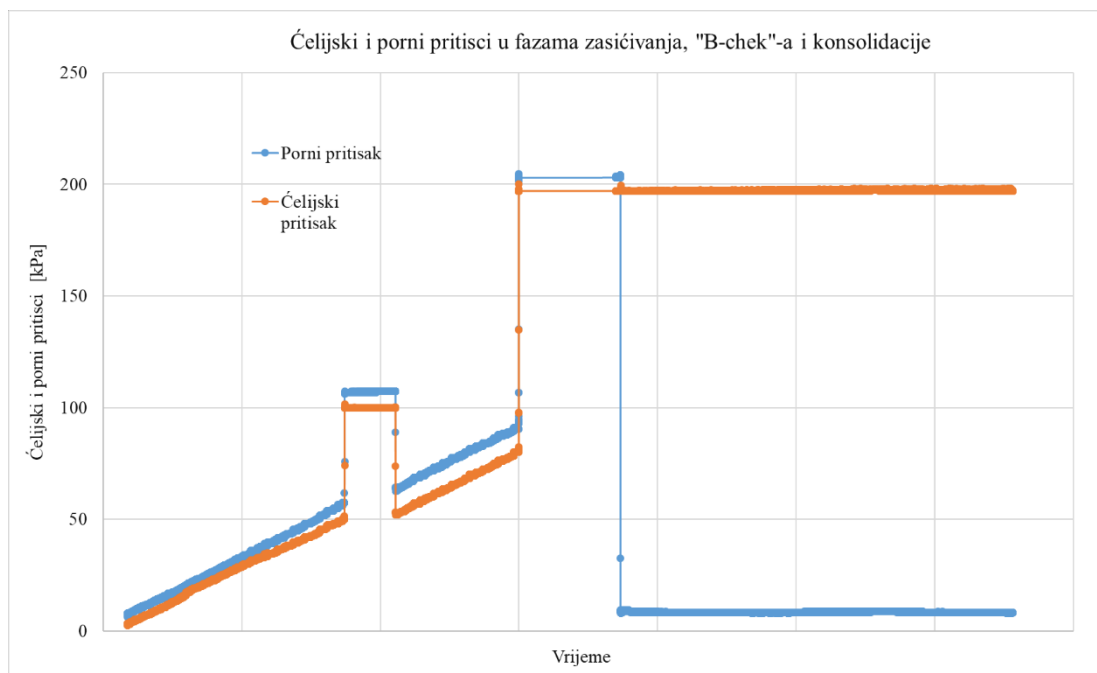


Slika 16. Dijagram „B“ check provjere stupnja zasićenosti nakon prve faze zasićivanja ( $S_r < 0,95$ )

Završetkom prve faze zasićivanja, pritisci su se postupno povećavali do 80 kPa (Slika 17), nakon čega je izvedena druga provjera stupnja zasićenosti uzorka povećanjem ćelijskog pritiska na 200 kPa (Slika 17). Provedenim ispitivanjem za fazu zasićivanja, izračunom Skemptonovog parametra B u nedreniranim uvjetima, kao omjer pornog pritiska i naprezanja, dobiven je stupanj saturacije 0,96, odnosno 96%.

Nakon zasićivanja uzorka otvoren je ventil za dreniranje s donje strane ćelije, neposredno uz mjerni uređaj tlaka te je pokrenuta 3. faza pokusa – konsolidacija.

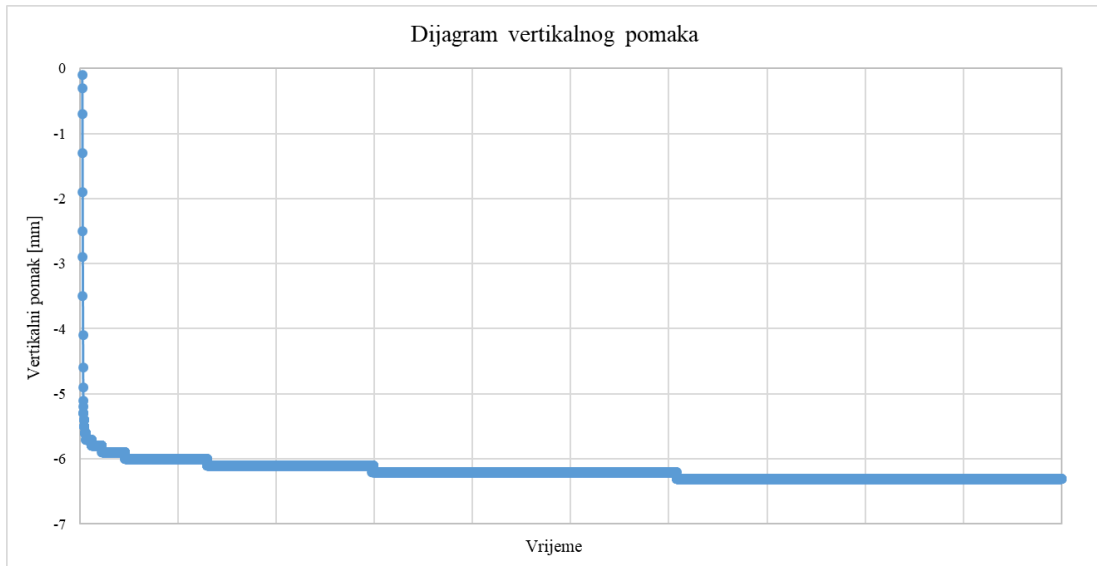
Vrijednost pornog pritiska trenutno je pala na početnu vrijednost (8 kPa), dok je ćelijski pritisak ostao konstantan tijekom faze konsolidacije (Slika 17).



Slika 17. Dijagram pritiska u hidrauličkom edometru tijekom ispitivanja

Tijekom faze konsolidacije zabilježeno je slijeganje uzorka od 6,4 mm. Vertikalni pomak zabilježen je digitalnim mjerilom pomaka. Provjera rezultata provedena je pomičnom mjerkom po rastavljanju ćelije. Pomičnom mjerkom utvrđeno je slijeganje uzorka od 5,5 mm. Odstupanje u utvrđenim iznosima slijeganja vjerojatno je posljedica remećenja uzorka tijekom rastavljanja ćelije.

Slika 18 prikazuje dijagram vertikalnog pomaka za vrijeme konsolidacije. Može se uočiti da je najveći dio slijeganja nastao u prvim trenucima. Velik iznos slijeganja može se protumačiti činjenicom da je uzorak bio ugrađen u vrlo rahlom stanju.



Slika 18. Dijagram vertikalnog pomaka

## 5. Zaključak

Rezultati provedenog ispitivanja ukazuju na prednosti mjerenja u hidrauličkom edometru. Prikazani postupci i rezultati zasićivanja uzorka i promjene pornih pritisaka daju više informacija od konvencionalne metode ispitivanja klasičnim edometrom o deformacijskim svojstvima tla. Naglasak je na mjerenju pornih pritisaka koji ovisno o fazi ispitivanja rastu ili padaju. Tijekom faze zasićivanja porni pritisak zajedno s ćelijskim pritiskom linearno raste. Za vrijeme konsolidacije porni pritisak pada, dok ćelijski zadržava svoju vrijednost. Pad pornog pritiska označava istjecanje porne vode, a opterećenje preuzimaju čestice tla. Rezultati ispitivanja bilježe se kontinuirano računalnim programom, što olakšava njihovu interpretaciju.



## 6. Literatura

BS 1377: Part 6. (1990). *Permeability in a Hydraulic Consolidation Cell*

Grediček D., Matić I. (2010). *Određivanje stišljivosti koherentnog tla u klasičnom i hidrauličkom edometru*. Rad za Rektorovu nagradu. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.

Kovačević, M. S., Jurić-Kaćunić, D. (2014). Europska klasifikacija tla za inženjerske potrebe. *Građevinar*. 66(9), str. 801-810.

Kvasnička P., Domitrović, D. (2007). *Mehanika tla*. Interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Maksimović, M. (2005). *Mehanika tla*. Treće izdanje. Beograd: Građevinska knjiga a.d.

Mulabdić, M. (2018). *Ispitivanje tla u geotehničkom laboratoriju*. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera: Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Požar, H. i sur. (1982). *Tehnička enciklopedija: Svezak 8. Meh-Mos*. Zagreb: Jugoslavenski leksikografski zavod „Miroslav Krleža“. str. 235-255.

Roje-Bonacci, T. (2003). *Mehanika tla*. Drugo dopunjeno i izmijenjeno izdanje. Split: Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu.

Runje, B. (2014). *Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja*. Sveučilište u Zagrebu: Fakultet strojarstva i brodogradnje. [Online]. Dostupno na: [https://bib.irb.hr/datoteka/764412.Predavanja\\_TTM.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/764412.Predavanja_TTM.pdf) [5.6.2019.]

Veinović, Ž., Kovačević-Zelić, B., Kvasnička, P. (2003). Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda. U: Matanović, D., ur. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet. str. 95-102.

Vrkljan, I. *Ispitivanje i opažanje u geotehnici. Mjerna nesigurnost*. [Online]. Dostupno na: [https://helpdesk.uniri.hr/system/resources/docs/000/002/800/original/Mjerna\\_nesigurnost.pdf?1395651930](https://helpdesk.uniri.hr/system/resources/docs/000/002/800/original/Mjerna_nesigurnost.pdf?1395651930) [5.6.2019.]

*Zakon o mjeriteljstvu*. (2014). Narodne novine. Broj 74, str. 1-4. [18.6.2014.]

## 7. Popis slika

Slika 1. Trodjelni sustav prikazan na modelu jedinične zapremnine tla (Roje-Bonacci 2003).

Slika 2. Sile na dodirima zrna unutar zrnate mase

Slika 3. Gravitacijska i kapilarna voda u tlu

Slika 4. Kapilarno dizanje  $h_c$  u kapilari stalnog promjera

Slika 5. Diferencijalni element vode u ravnotežnom stanju

Slika 6. Raspored pritisaka vode u području potpune zasićenosti ( $S_r=100\%$ ) u presjeku tla

Slika 7. Hidraulički gradijent

Slika 8. Čelija hidrauličkog edometra

Slika 9. Hidrauličke pumpe

Slika 10. Dijelovi hidrauličke ćelije: a) postolja, b) kućište, c) čelični prsten d) porozne pločice, e) gumena membrana, f) čelični cilindar s priključcima, g) vijci, h) čelični klip, i) mjerilo pomaka

Slika 11. Potvrda o umjeravanju

Slika 12. Ugradnja uzorka u hidraulički edometar: a) Postavljanje čeličnog prstena s uzorkom, b) Postavljanje gornje porozne pločice, c) Učvršćivanje čeličnog cilindra, d) Postavljanje gumene membrane

Slika 13. Priprema uzorka: a) Prosijan uzorak, b) Sušenje uzorka u peći

Slika 14. Slijeganje uzorka nakon provedenih ispitivanja

Slika 15. Dijagram porasta pornog i ćelijskog pritiska tijekom prve faze zasićivanja

Slika 16. Dijagram „B“ check provjere stupnja zasićenosti nakon prve faze zasićivanja ( $S_r < 0,95$ )

Slika 17. Dijagram pritisaka u hidrauličkom edometru tijekom ispitivanja

Slika 18. Dijagram vertikalnog pomaka

## 8. Popis tablica

Tablica 1. Vrijednosti kontaktnih sila na kontaktima zrna zrnate strukture

Tablica 2. Rasponi vrijednosti za gustoću tla

Tablica 3. Klasifikacija tla prema stupnju propusnosti  $k$  (m/s)

Tablica 4. Karakteristične vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti  $k$  (cm/s)

Tablica 5. Promjer prstena

Tablica 6. Visina prstena