

# Utjecaj stanja poremećenosti uzorka na koeficijent konsolidacije

---

**Pecak, Vlatka**

**Master's thesis / Diplomski 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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:447441>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-28**



*Repository / Repozitorij:*

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



# Utjecaj stanja poremećenosti uzorka na koeficijent konsolidacije

---

**Pecak, Vlatka**

**Master's thesis / Diplomski 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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:447441>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

VLATKA PECAK

**UTJECAJ STANJA POREMEĆENOSTI UZORKA NA  
KOEFIČIJENT KONSOLIDACIJE**

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**UTJECAJ STANJA POREMEĆENOSTI UZORKA NA  
KOEFIČIJENT KONSOLIDACIJE**

KANDIDAT:

VLATKA PEČAK

MENTOR:

DOC. DR. SC. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2017.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

UTJECAJ STANJA POREMEĆENOSTI UZORKA NA KOEFICIJENT  
KONSOLIDACIJE

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenj 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, 28.06.2017.

Vlatka Pecak

Vlatka Pecak

## SAŽETAK

Vlatka Pecak, Utjecaj stanja poremećenosti uzorka na koeficijent konsolidacije

Konsolidacija je vremenski proces slijeganja. Pod pojmom slijeganja tla podrazumijeva se vertikalni pomak tla izazvan nekim opterećenjem. To je proces pri kojemu uslijed promjene naprezanja dolazi do premještanja čestica tla i smanjenja volumena pora u tlu.

U ovom radu je opisan proces konsolidacije i edometarski pokus. Edometarski pokus nam služi za određivanje konsolidacijskih svojstava tla. Cilj ovog rada je opisati tijek edometarskog pokusa te ispitati utjecaj stanja poremećenosti uzorka na koeficijent konsolidacije.

Za potrebe ovog rada usporedno se vršilo ispitivanje u edometru na dva uzorka, različitog stupnja zbijenosti u dva različita stanja, neporemećenom i poremećenom stanju radi usporedbe njihovih konsolidacijskih svojstava. Pod neporemećenim uzorkom podrazumijeva se uzorak koje se nalazi u izvornom stanju kao na terenu, odnosno takav uzorak mora biti dostavljen u laboratorij sa svim zatečenim svojstvima. Poremećeni uzorak je onaj uzorak kojemu su njegova svojstva poremećena, promijenjena u odnosu na stvarno stanje u prirodi. Ispitivanje uzoraka i njihovi rezultati će biti opisani i prikazani u praktičnom dijelu ovoga rada.

Rezultati ispitivanja uzoraka pokazali su da je koeficijent konsolidacije neporemećenog uzorka u pravilu za jedan red veličine veći od koeficijenta konsolidacije dobivenog na istom uzorku tla, ali u poremećenom stanju.

Ključne riječi: konsolidacija, koeficijent konsolidacije, slijeganje, edometar

## **Sadržaj**

1.UVOD.....	1
2.SVOJSTVA TLA.....	2
2.1.FAZNI ODNOSI.....	2
2.1.1.Volumni odnosi.....	3
2.1.2.Maseni odnosi.....	4
2.2.KLASIFIKACIJA TLA.....	7
2.2.1.Granulometrijski sastav.....	9
2.2.2.Granice konzistencije.....	11
2.3.DEFORMACIJSKA SVOJSTVA TLA.....	15
2.3.1.Slijeganje tla.....	16
2.3.2.Konsolidacija – vremenski tok slijeganja.....	17
2.4.EDOMETAR.....	25
3.PRAKTIČNI DIO.....	29
4.ZAKLJUČAK.....	45
5.POPIS LITERATURE.....	46
6.POPIS SLIKA.....	47
7.POPIS TABLICA.....	49
8.POPIS PRILOGA.....	50

## 1.UVOD

Tlo je prirodno tijelo nastalo iz rastresite stijene ili na trošini čvrste stijene pod utjecajem pedogenetskih čimbenika (Slika 1).

U tlo ubrajamo: prah, glinu, pijesak, šljunak i treset (organsko tlo). Takve mješavine tla nastaju mehaničkim i kemijskim trošenjem stijena te utjecajem klimatskih čimbenika.

Nastaje dugotrajnim i složenim procesima: rastrošba stijena (mehaničko - tektonske sile, led, abrazija, vegetacija, kemijska-oksidacija, karbonizacija, hidratacija, desilikacija), transport sitnijih fragmenata (transport sitnijih fragmenata omogućuju: gravitacija, voda, vjetar i led) i taloženje transportiranih fragmenata i čestica.

Tlo se sastoji od tvari u tri agregatna stanja, i to su: čvrste čestice (mineralna + organska tvar), voda ili tekućina u porama i zrak ili plin u porama (Slika 2).



Slika 1.Nastanak tla



Slika 2.Sastav tla



## 2.SVOJSTVA TLA

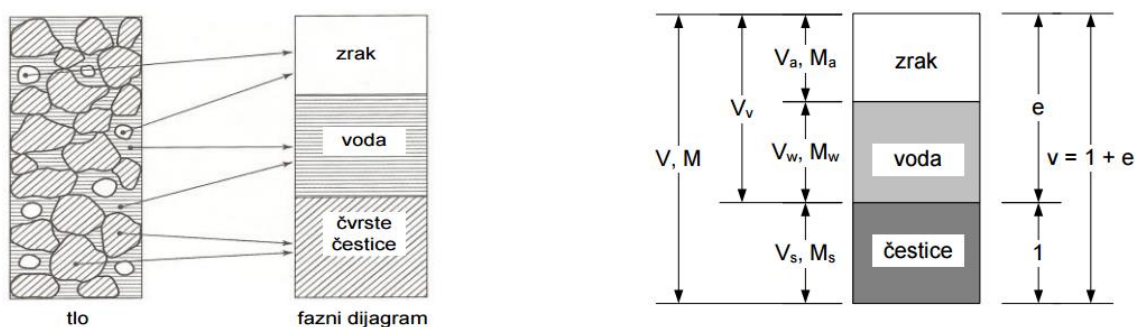
Vrlo važno je poznavati sastav tla i njegova svojstva. Sastav i njegova svojstva su presudni kriteriji kod donošenja odluka o korištenju tla i provođenju određenih zahvata u tlu.

### 2.1.FAZNI ODNOSI

Tlo je trofazni materijal. Sastoji se od zrna i čestica koja tvore skelet tla (čvrste čestice) i od pora koje mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom. Tlo je porozni materijal. U slučaju kada su sve pore ispunjene vodom tlo je zasićeno, a kada su ispunjene zrakom tlo je suho.

Za definiranje odnosa među fazama tla, predočimo element tla kao da je podijeljen na tri dijela: na volumen ispunjen samo čvrstim česticama, volumen ispunjen samo vodom i volumen ispunjen samo zrakom. Tako se mogu definirati svojstva tla, koja su neophodna za analizu njegova ponašanja.

Međusobni odnos triju faza u tlu ima utjecaj na mehaničko ponašanje tla. Taj se odnos prikazuje u faznom dijagramu (Slika3).



Slika 3.Fazni dijagram tla (V.Szavits Nossan)

$e$  - koeficijent pora

$$M_a \cong 0$$

$V_a$  - volumen zraka u porama [ m<sup>3</sup> ]

$M_a$  – masa zraka u porama[ g ]

$V_w$  - volumen vode u porama [ m<sup>3</sup> ]

$M_w$  –masa vode u porama [ g ]

$V_s$ - volumen čvrstih čestica u tlu [ m<sup>3</sup> ]

$M_s$  – masa čvrstih čestica[ g ]

$V_v$  – volumen pora [ m<sup>3</sup> ]

$V \equiv v = 1 + e \longrightarrow$  specifični volumen

### 2.1.1. Volumni odnosi

Volumen pora i volumen čvrstih čestica čine ukupan volumen elementa tla. Isti odnosi vrijede i za mase faza.

$$V = V_v + V_s \quad (1)$$

gdje je:  $V$  - ukupan volumen [ m<sup>3</sup> ]

$V_s$ - volumen čvrstih čestica u tlu [ m<sup>3</sup> ]

$V_v$  – volumen pora [ m<sup>3</sup> ]

Iz odnosa volumena faza definiramo tri svojstva tla: to su koeficijent pora  $e$ , stupanj zasićenosti ili saturiranosti tla  $Sr$  i relativni porozitet  $n$ .

U izrazu (1),  $V_s$  se ne mijenja, bez obzira na procese kroz koje tlo prolazi. Mijenja se samo volumen pora  $V_v$ , pa ova promjena volumena pora ujedno čini i promjenu ukupnog volumena tla  $V$ . Ako volumen čvrstih čestica svedemo na jedinični, dakle  $V_s = 1 \text{ m}^3$ , onda je volumen pora jednak koeficijentu pora, odnosno  $e = V_v$ , kao što je prikazano na slici 3. Često se, za jedinični volumen čvrstih čestica, definira specifični volumen  $v = 1 + e$ , koji odgovara ukupnom volumenu  $V$  za jedinični volumen čvrstih čestica.

Koeficijent pora ( $e$ ) je omjer volumena pora i volumena čvrstih čestica, bezdimenzionalna veličina.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2)$$

gdje je:  $e$  – koeficijent pora

$V_s$ - volumen čvrstih čestica u tlu [ m<sup>3</sup> ]

$V_v$  – volumen pora [ m<sup>3</sup> ]

Stupanj zasićenosti ( $s_r$ ) pokazuje koliki je postotak volumena pora ispunjen vodom.

Raspon mu je određen ispunjenošću pora vodom,  $0 \leq Sr \leq 1$ , ili u postocima:

$Sr = 0$ , suho tlo

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

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

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} \quad (3)$$

gdje je:  $S_r$  - stupanj zasićenosti [ %]

$V_w$  - volumen vode u porama [ m<sup>3</sup> ]

$V_v$  – volumen pora [ m<sup>3</sup> ]

Relativni porozitet i koeficijent pora ( $n$ ) su međusobno zavisne veličine. Njihova veza dobije se iz izraza:

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} \Rightarrow \frac{1}{n} = \frac{V_v + V_s}{V_v} = 1 + \frac{1}{e} = \frac{e + 1}{e} \quad (4)$$

$$n = \frac{e + 1}{e} \quad (5)$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (6)$$

gdje je:  $n$  - relativni porozitet

$e$  - koeficijent pora

$V_v$ - volumen pora [ m<sup>3</sup> ]

$V_s$ - volumen čvrstih čestica tla [ m<sup>3</sup> ]

Nijedno od definiranih svojstava tla iz faznih odnosa volumena, koeficijent pora, stupanj zasićenosti tla ni relativni porozitet, ne određuju se izravno laboratorijskim pokusima, već neizravno pomoću drugih svojstava.

### 2.1.2. Maseni odnosi

Iz masenih odnosa definiramo tri svojstva, i to: vlažnost  $w$ , gustoću  $\rho$ , i jediničnu težinu  $\gamma$ . Masa je osnovno svojstvo materijala, dok je u mehanici tla uobičajeno da se umjesto mase uzima težina i to obujamska i specifična.

Vlažnost tla je jedno od osnovnih svojstava tla koje se utvrđuje u laboratoriju za svaki uzorak tla, budući da voda ima značajan utjecaj na mehaničko ponašanje tla.

Vlažnost  $w$  (%) je odnos između mase vode u uzorku  $m_w$  i mase čvrstih čestica  $m_s$ .

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \text{ [%]} \quad (7)$$

gdje je:  $w$  – vlažnost[%]

$m_w$  – masa vode[g]

$m_s$  – masa čvrstih čestica[g]

Kako bi se odredila vlažnost uzorka u laboratoriju, uzorak je najprije potrebno izvagati  $m$ , zatim se uzorak suši u peći na 105 °C u trajanju od 24 sata, pa se ponovo izvaže kako bi se dobila masa suhog uzorka  $m_d$ , koja je jednaka masi čvrstih čestica  $m_s$  u uzorku. Iz čega slijedi izraz(8), razlika mase vlažnog i mase suhog uzorka jednaka je masi vode u uzorku.

$$m_w = m - m_s \quad (8)$$

gdje je:  $m$  – masa vlažnog uzorka[g]

$m_w$  – masa vode[g]

$m_d$  – masa suhog uzorka =  $m_s$  - masa čvrstih čestica[g]

Gustoća je jedna od osnovnih veličina koje opisuju mehaničke karakteristike svakog materijala. Definiira se kao masa jediničnog volumena materijala. Izražava se u mjernim jedinicama [Mg/m<sup>3</sup>] i [g/cm<sup>3</sup>].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

gdje je:  $\rho$  – gustoća [Mg/m<sup>3</sup>] , [g/cm<sup>3</sup>]

$m$  – masa [g]

$V$  – volumen [m<sup>3</sup>]

Gustoću u mehanici tla definiramo za pojedine faze, osim zraka, koji ima zanemaru masu, i za cijeli element tla. Tako definiramo gustoću vode  $\rho_w$  i gustoću zrna i čestica  $\rho_s$ :

Gustoća vode,  $\rho_w$ :

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (10)$$

gdje je:  $m_w$  – masa vode [g], [Mg]

$V_w$  – volumen vode [m<sup>3</sup>]

Gustoća čestica tla,  $\rho_s$ :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (11)$$

gdje je:  $m_s$  – masa čvrstih čestica [g], [Mg]

$V_s$  – volumen čvrstih čestica [m<sup>3</sup>]

Mjerenje gustoće provodi se konzistentno s njenom definicijom, mjerenjem mase poznatog volumena. Masa se mjeri preciznom vagom. Dok je za vodu relativno jednostavno odrediti volumen koji zauzima dana masa vode, volumen koji zauzima neka masa čvrstih čestica nije jednostavno izmjeriti, jer se među čvrstim česticama nalaze pore. Za određivanje gustoće čvrstih čestica, u geotehničkom laboratoriju služi piknometar.

U piknometar se ulije voda do vrha, doda se poznata masa čvrstih čestica. Nakon dodavanja čvrstih čestica tla, prema Arhimedovom zakon (na svako tijelo uronjeno u tekućinu djeluje sila uzgona jednaka težini tekućine istisnute tim tijelom) iz piknometra se prelije odgovarajući volumen vode. Masa vode koja se prelila iz piknometra odredi se tako da se zbroji masa piknometra s vodom ( $m_1$ ) s masom čvrstih čestica ( $m_s$ ) i oduzme s masom piknometra s vodom i čvrstim česticama ( $m_2$ ), prema izrazu:  $m_w = m_1 + m_s - m_2$ . Osim toga,  $m_w = \rho_w \cdot V_w$ , a prema Arhimedovu zakonu,  $V_w = V_s$ . Sada imamo određene  $m_s$  i  $V_s$  pa time i gustoću čvrstih čestica  $\rho_s$ . Gustoća čvrstih čestica u tlu kreće se u relativno uskim granicama, obično između 2,65 i 2,75 Mg/m<sup>3</sup>.

Gustoća suhog tla,  $\rho_d$  je omjer mase čvrstih čestica i ukupnog volumena elementa tla.

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (12)$$

Gdje je:  $m_d$  – masa čvrstih čestica [g], [Mg]

$V$  – ukupni volumen [m<sup>3</sup>]

Gustoća suhog tla odredi se vaganjem suhog uzorka (koji se prethodno sušio u peći) poznatog volumena.

Ako gustoću povežemo s ostalim jediničnim veličinama dobijemo korisne izraze za fazne odnose:

$$\frac{\rho}{1+w} = \frac{\rho_s}{1+e} = \rho_d \quad (13)$$

gdje je:  $\rho$  – gustoća [Mg/m<sup>3</sup>], [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_s$  – gustoća suhog tla [Mg/m<sup>3</sup>], [g/cm<sup>3</sup>]

$w$  – vlažnost [%]

$e$  – koeficijent pora

Specifična gustoća,  $G_s$ :

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (14)$$

gdje je:  $\rho_s$  – gustoća suhog tla [ $\text{Mg/m}^3$ ], [ $\text{g/cm}^3$ ]

$\rho_w$  – gustoća vlažnog tla [ $\text{Mg/m}^3$ ], [ $\text{g/cm}^3$ ]

Iz prethodnog izraza možemo odrediti stupanj zasićenosti tla:

$$S_r \cdot e = G_s \cdot w \quad (15)$$

Zapreminsku težinu (jedinična težina,  $\gamma$ ) definiramo kao težinu jediničnog volumena materijala. Budući da je odnos između težine i mase takav da težinu dobijemo kada masu pomnožimo s gravitacijom sile teže  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , zapreminsku težinu tla dobijemo iz izraza:

$$\gamma = g \cdot \rho = \frac{m \cdot g}{V} \quad (16)$$

gdje je:  $g$  – ubrzanje sile teže (gravitacija,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ )

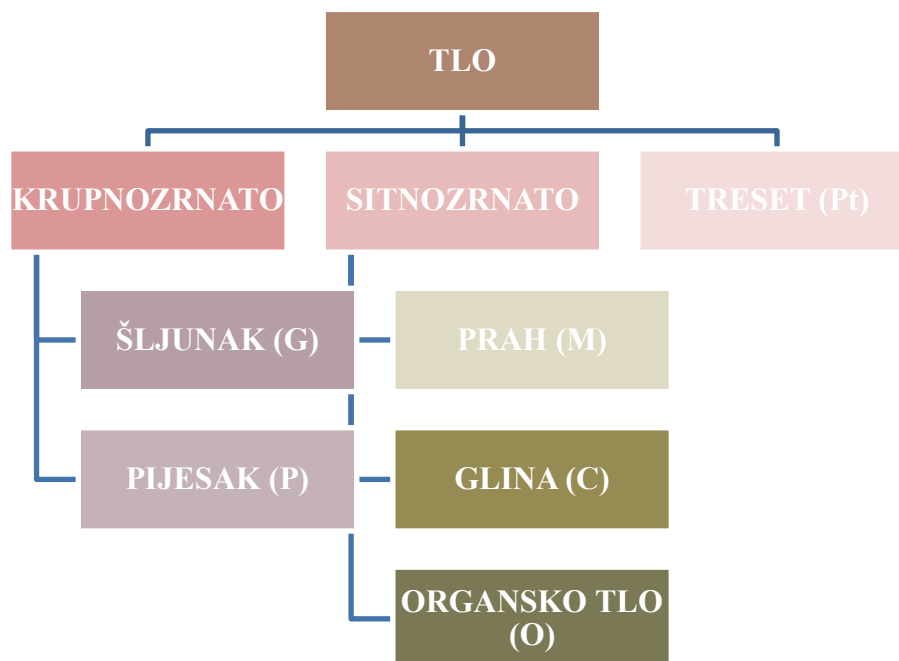
$\rho$  – gustoća

## 2.2.KLASIFIKACIJA TLA

Jedinstvena klasifikacija dijeli vrste tla na skupine i podskupine dajući im nakon klasificiranja oznaku od obično dva slova, prvo koje označava skupinu a drugo koje označava podskupinu unutar te skupine. Jedinstvena klasifikacija dijeli tla na: krupno zrnata tla (šljunak i pijesak), sitnozrnata tla (prah i glina) i organska tla, te na treset.

Krupnozrnata se od sitnozrnatih tala razlikuju u odnosu na  $D = 0,06 \text{ mm}$ , što predstavlja promjer zrna na granici pijeska i praha. Krupnozrnata tla su, prema jedinstvenoj klasifikaciji, ona kojima je prosječno zrno,  $D_{50}$ , veće od  $0,06 \text{ mm}$ . Sitnozrnata tla su ona kojima je prosječno zrno manje od  $0,06 \text{ mm}$ .

Danas se kod nas najviše koristi USCS (USCS - Unified Soil Classification System) klasifikacija (Tablica 1.) na kojoj se temelji AC klasifikacija (Slika 4. ).



Slika 4. AC klasifikacija tla

Tablica 1. USCS klasifikacija tla

GLAVNA PODJELA		SIMBOL GRUPE	OPIS GRUPE	KLASIFIKACIJSKI KRITERIJ ZA KRUPNOZRNATA TLA	
Krupnozrnata tla (više od polovice materijala s zrnima većim od 0.06 mm)	Šljunak (više od polovice krupnih frakcija s zrnima većim od 2 mm)	GW	Dobro graduiran šljunak, mješavina šljunka i pijeska, malo ili ništa sitnih čestica	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = 1 < \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} < 3$	
		GP	Slabo graduiran šljunak, mješavina šljunka i pijeska, malo ili ništa sitnih čestica	Sve gradacije koje ne dozvoljavaju kriteije za GW	
		GM	Prašnasti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i praha	Atterbergove granice ispod A-linije ili $I_p < 4$	Iznad A-linije sa $4 < I_p < 7$ su granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola
		GC	Glinoviti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i mulja	Atterbergove granice iznad A-linije ili $I_p > 7$	
	Pijesak (više od polovicekrupnih frakcija s zrnima manjim od 2 mm)	SW	Dobro graduirani pijesci, šljunkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $C_c = 1 < \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} < 3$	
		SP	Slabo graduirani pijesci, šljunkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica	Sve gradacije koje ne dozvoljavaju kriterije za SW	
		SM	Prašnasti pijesci,	Atterbergove	Isctane granice u zoni

	sitnim česticama (znatna količina sitnijih čestica)	SC	mješavina pijeska i praha	granice ispod A-linije ili $Ip < 4$	vrijednosti s $4 < Ip < 7$ su granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola
			Glinoviti pijesci, mješavina pijeska i praha	Atterbergove granice iznad A-linije ili $Ip > 7$	
Sitnozrnata tla (više od polovice materijala s zrnima manjim od 0.06 mm)	Prašina i glina (granica tečenja < 50)	ML	Neorganski prah i vrlo fini pijesci, kameno brašno, prašnasti i glinoviti pijesci ili glinovite prašine niske plastičnosti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- odrediti postotke pijeska i šljunka iz granulometrijske krivulje</li> <li>- u ovisnosti o postotcima sitnih čestica (frakcije &lt;0.06 mm), krupnozrnata tla su klasificirana: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manje od 5% : GW, GP, SW, SP</li> <li>- Od 5% do 12% : granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola</li> </ul> </li> </ul>	
		CL	Neorganske gline niske do srednje plastičnosti, šljunkovite gline, pjeskovite gline, muljevite gline, mršave gline		
		OL	Organski prah i organske prašnaste gline niske plastičnosti		
	Prašina i glina (granica tečenja > 50)	MH	Neorganski prah, tinjčasti i dijatomejski materijali		
		CH	Neorganske gline visoke plastičnosti, masna glina		
		OH	Organske gline srednje do visoke plastičnosti, organski prah		
	Visoko organska tla	PT	Treset i druga visoko organska tla		

### 2.2.1. Granulometrijski sastav

Granulometrijski sastav je raspodjela čestica (zrna) po veličini u određenoj količini (uzorku) tla, izražena u postotku mase. Na temelju krupnoće zrna, tlo se dijeli u razredbene kategorije prema dominantnoj veličini zrna te ih klasificiramo kao krupnozrnate ( pijesak i šljunak ) i sitnozrnate ( glina i prah ).

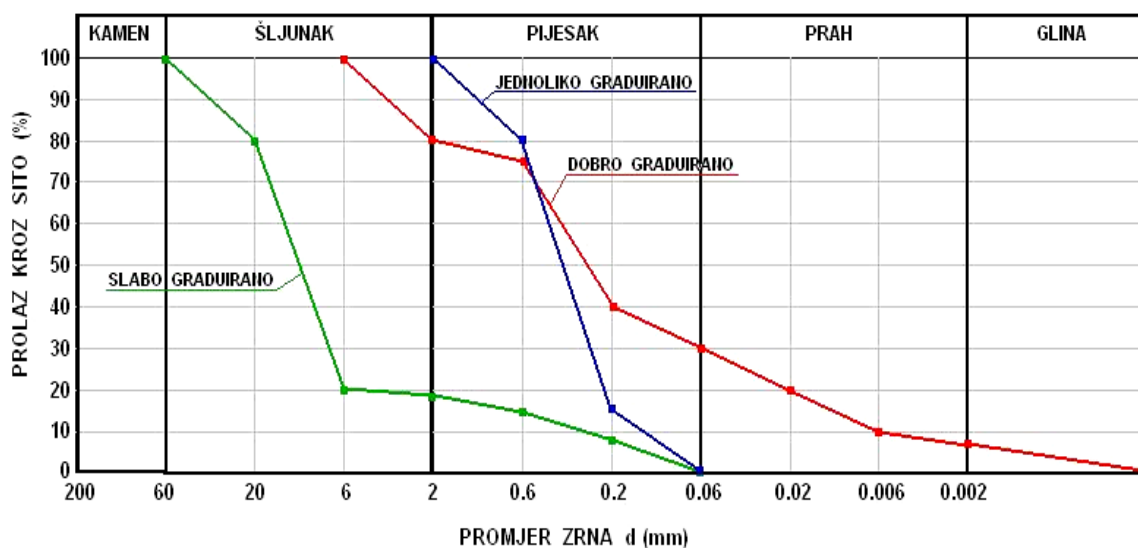
Granulometrijski sastav određuje se sijanjem ukoliko je tlo sastavljeno isključivo od krupnozrnatih materijala - čestice veće od 0,06 mm, prosijavanjem kroz sita svrstana u standardni niz graničnih veličina koje su prikazane u Tablici 2. Sita većih otvora izrađena su od perforiranog lima, dok su sita manjeg otvora izrađena od metalne mreže s kvadratnim otvorima. Tlo sastavljeno od sitnozrnatog materijala - čestice manje od 0,06 mm nije moguće sijati da bi se odredila krupnoća čestica već se ona određuje temeljem određivanja promjene gustoće suspenzije, a postupak se naziva hidrometrijska analiza ili areometriranje. Kod nas su prihvaćene granice koje su dane po MIT-u ( Massachusetts Institute of Technology, SAD ) koja je internacionalno prihvaćena (Tablica 2. ).



Tablica 2. Granulometrijski sastav tla

Drobina	Glina	Prah	Pijesak	Šljunak
Promjer zrna	< 0,002 mm	0,002 – 0,06 mm	0,06 – 2 mm	2 – 60 mm
		Sitni 0,002 – 0,006 mm	Krpuni 0,6 – 2 mm	Krupni 20 – 60 mm
		Srednji 0,006 – 0,02 mm	Srednji 0,2 – 0,6 mm	Srednji 6 – 20 mm
		Sitni 0,002 – 0,006 mm	Sitni 0,06 – 0,2 mm	Sitni 2 – 6 mm

Granulometrijski sastav prikazuje se dijagramom ( Slika 5. ) u kojemu se na osi ordinata nanosi odnos ili postotak N količine uzorka koji je prošao kroz sito u linearnom mjerilu, a na apscisi promjer zrna D u logaritamskom mjerilu.



Slika 5. Granulometrijski dijagram (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

Za karakterizaciju granulometrijskog sastava tla definiraju se dva koeficijenta: koeficijent jednolikosti ( $C_u$ ) i koeficijent zakrivljenosti ( $C_c$ ). Oni se definiraju na temelju karakterističnih vrijednosti promjera zrna.

Koeficijent jednolikosti,  $C_u$ :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (17)$$

$C_u > 4 \rightarrow$  dobro graduiran šljunak,

$C_u > 6 \rightarrow$  dobro graduiran pijesak

Koeficijent zakrivljenosti,  $C_c$ :

$$c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (18)$$

$C_c$  = vrijednosti od 1 do 3 za dobro graduiran materijal

gdje su :  $D_{10}$  - efektivni promjer zrna, promjer sita kroz kojeg prolazi posljednjih 10 %  
ispitanog uzorka

$D_{30}$  - je promjer sita kroz koji prolazi 30 % ukupne količine uzorka

$D_{60}$  - je promjer sita kroz koji prolazi 60 % ukupne količine uzorka

### 2.2.2. Granice konzistencije

Indeksni pokazatelji su parametri koji, uz granulometrijski sastav, daju dodatne informacije o svojstvima tla koja su povezana s porozitetom i vlažnošću tla. To je posebno važno za sitnozrnate materijale, kod kojih svojstva tla i ne ovise toliko o granulometrijskom sastavu. Podaci kojima se detaljnije opisuju svojstva tla, ovisno o porozitetu i vlažnosti, su:

- indeks relativne gustoće – za nekoherentne materijale

- granice plastičnih stanja – za koherentne materijale.

Indeks relativne gustoće,  $I_D$ :

$$I_D = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (19)$$

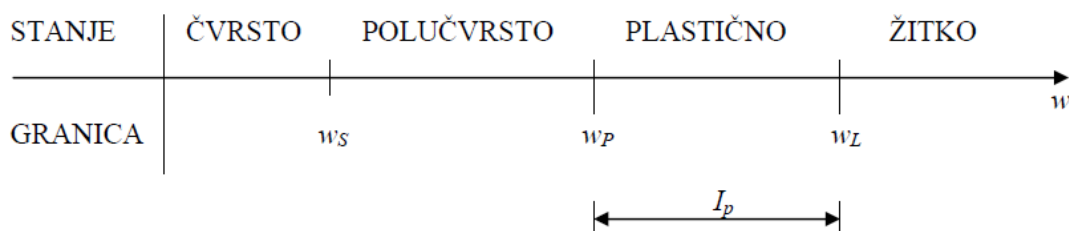
gdje su :  $e_0$  - koeficijent pora uzorka u prirodnom stanju

$e_{min}$  – koeficijent pora uzorka u najgušćem stanju

$e_{max}$  – koeficijent pora uzorka u najrahljijem stanju

Fizikalne osobine glina mijenjaju se s promjenom sadržaja vode (Slika 6.). Zato se njihovo stanje definira preko granica plastičnih stanja, koje je, na temelju iskustva, postavio švedski geokemičar Albert Atterberg, početkom dvadesetog stoljeća, pa ih zovu i Atterbergove granice.

Za razliku od elastičnosti, plastičnost je svojstvo materijala da zadržava deformirani oblik nakon uklanjanja opterećenja koje ga je deformiralo.



Slika 6. Stanja koherentnog tla sa povećanjem vlažnosti (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

Granice plastičnih stanja su:

Granica stezanja (shrinkage limit),  $w_s$ -raspon vrijednosti od 0 do 30 %

Granica plastičnosti (plastic limit),  $w_p$  - raspon vrijednosti od 0 do 100 %, uglavnom je < 40 %

Granica tečenja (liquid limit),  $w_l$  - raspon vrijednosti od 0 do 100 %, uglavnom je < 100%.

Poznavanjem spomenutih granica koherentan materijal možemo klasificirati u određene skupine prema plastičnosti. Za klasificiranje materijala prema plastičnosti, potrebno je odrediti indeksne pokazatelje:

Indeks plastičnosti,  $I_p$ :

$$I_p = w_L - w_P \quad (20)$$

gdje je:  $w_L$  – granica tečenja

$w_P$  – granica plastičnosti

Tablica 3. Klasificiranje koherentnih materijala prema plastičnosti

Stupanj plastičnosti	Granica tečenja [%]		Indeks plastičnosti, $I_p$	
	AC sustav	USCS sustav	AC sustav	USCS sustav
Neplastično	-	-	< 12,0	< 12,0
Nisko plastično	< 12,0	< 50	12,0 – 25,0	-
Srednje plastično	30,0 – 50,0	-	25,0 – 40,0	-
Visoko plastično	> 50,0	> 50	> 40,0	> 40,0

Indeks konzistencije,  $I_C$ :

$$I_C = \frac{w_L - w_0}{w_L - w_P} = \frac{w_L - w_0}{I_P} \quad (21)$$

gdje je:  $w_0$  – prirodna vlažnost

$w_L$  – granica tečenja

$w_P$  – granica plastičnosti

$I_P$  – indeks plastičnosti

Indeks konzistencije se, s povećanjem vlažnosti, kreće u rasponu od nule do jedinice, tj. od stanja u kojemu je uzorak praktički tekuć, do polučvrstog stanja.

Tablica 4. Indeks konzistencije za prahove i gline (laboratorijska podjela)

Konzistencije prahova i glina	Indeks konzistencije, $I_C$
Tekuće	< 0
Vrlo meko plastično	0 – 0,25
Meko plastično	0,25 – 0,50
Srednje plastično	0,50 – 0,75
Kruto plastično	0,75 - 1

Indeks tečenja,  $I_L$ :

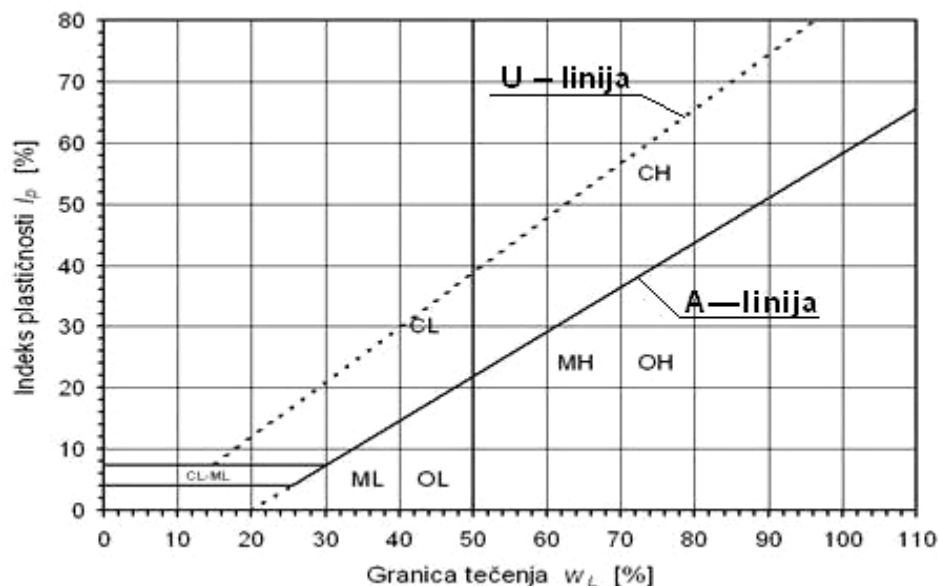
$$I_L = \frac{w_0 - w_P}{I_P} \quad (22)$$

gdje je:  $w_0$  – prirodna vlažnost

$w_P$  – granica plastičnosti

$I_P$  – indeks plastičnosti

Arthur Casagrande (1947.) 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 plastičnosti (Slika 7.). U dijagramu plastičnosti karakteristike plastičnosti uzoraka koherentnih tala prikazuju se kao točke koje odgovaraju vlaži na granici tečenja i indeksu plastičnosti u koordinatnom sustavu kod kojeg se indeks plastičnosti označava na apscisi, a granica tečenja na ordinati.



Slika 7. Dijagram plastičnosti

U dijagramu plastičnosti se rezultati ispitivanja grupiraju oko A - linije, odnosno ispod U - linije.

Jednadžbe linija glase:

$$A - linija: \quad I_P = 0,73 \cdot (w_L - 20) \quad (23)$$

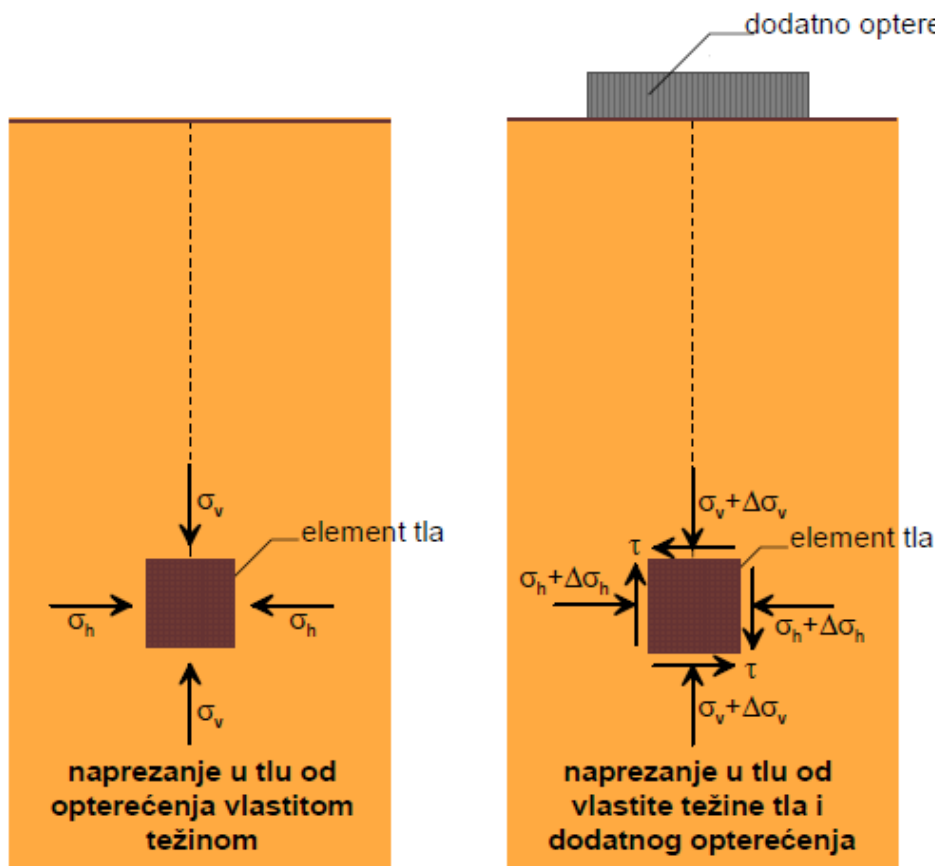
$$U - linija: \quad I_P = 0,9 \cdot (w_L - 8)$$

Pravac A - linije dijeli područje dijagrama na dvije zone: iznad linije su točke glinovitih materijala, a ispod nje točke prašinih materijala i organskih glina.

Dijagram plastičnosti prikladan je za komparaciju uzoraka tla sa istog ili različitih područja i za svrstavanje uzoraka u skupine sličnih svojstva. Taj je dijagram temelj općenito prihvaćenog sistema klasifikacije koherentnih materijala.

### 2.3.DEFORMACIJSKA SVOJSTVA TLA

Naprežanja u tlu najčešće nastaju od vlastite težine tla i dodatnog opterećenja (od građevine), odnosno rasterećenja (nakon iskopa). U horizontalno uslojenom tlu se pretpostavlja da su vertikalna ( $\sigma_v$ ) i horizontalna ( $\sigma_h$ ) naprežanja ujedno i glavna naprežanja tj.  $\tau = 0$ . Kada se nanese dodatno opterećenje, u svakom se elementu tla pojave i posmična naprežanja, a  $\sigma_v$  i  $\sigma_h$  se uvećaju za  $\Delta\sigma_v$  i  $\Delta\sigma_h$  (Slika 8).



Slika 8. Prikaz početnih i dodatnih naprežanja u tlu (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

U tlu uvijek imamo početna naprežanja, kojima se onda pribroje dodatna naprežanja kako bi se dobilo konačno stanje naprežanja. Kod geotehničkih problema kod kojih se traže deformacije, treba odrediti početna i konačna stanja naprežanja.

Deformacije ovise o promjeni stanja naprezanja, ali i o vrsti i svojstvima tla u kojima ta promjena nastaje.

Skelet tla čine čvrste čestice i pore, koje su povezane u jedinstveni prostor potpuno ili djelomično ispunjen vodom, zbog toga se razlikuje dio naprezanja u tlu koja prenosi skelet tla – ukupno naprezanje i dio koji preuzima voda – porni tlak.

Razliku između ukupnog naprezanja i pornog tlaka zove se efektivno naprezanje.

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \quad (24)$$

gdje je:  $\sigma'_v$  – efektivno naprezanje

$\sigma_v$  – ukupno naprezanje

$u$  – porni tlak

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (25)$$

gdje je:  $\varepsilon$  – relativna deformacija

$\Delta H$  – relativna promjena visina

$H_0$  – početna visina

### 2.3.1. Slijeganje tla

Slijeganje je vertikalni pomak površine tla (ili temeljne konstrukcije), koji nastaje pod djelovanjem opterećenja. Sliježu se i pojedinačni dijelovi građevine, kao što su: temelji, temeljne ploče, piloti i sl.

Slijeganje je najčešće uzrokovano opterećenjem, no može se javiti i uslijed drugih pojava: zbog sniženja razine podzemne vode, puzanja, dinamičkih efekata i sl. Teško ga je procijeniti jer:

- je tlo nehomogeno,
- tlo ima složene odnose naprezanja i deformacija,
- je teško odrediti reprezentativne parametre deformabilnosti tla,
- se slijeganje slojeva od koherentnih tala razvija s vremenom.

Općenito se ukupno slijeganje ( $s_t$ ) može podijeliti na: trenutno ( $s_i$ ), primarno konsolidacijsko ( $s_c$ ) i sekundarno konsolidacijsko ( $s_s$ ):

$$s_t = s_i + s_c + s_s \quad (26)$$

*Trenutno slijeganje* nastupa neposredno nakon promjene opterećenja. Kod krupnozrnatih tala je to i najizraženija komponenta slijeganja. Kod slabopropusnih, potpuno saturiranih tala (zbog nemogućnosti brzog istjecanja vode iz pora) izazvano je samo promjenom oblika tla (distorzionom deformacijom), a bez promjene volumena. Stanje ili proces prilikom kojeg ne dolazi do istjecanja vode, odnosno promjene volumena nazivamo nedreniranim stanjem.

*Konsolidacijsko slijeganje (primarno)* je posljedica promjene i oblika i volumena uslijed istjecanja viška vode iz pora, a izrazito je sporo kod zasićenih slabopropusnih tala (glina, prah, jako zaglinjeni pijesak ili šljunak). Stanje ili proces prilikom kojeg dolazi do istjecanja vode, odnosno promjene volumena nazivamo dreniranim stanjem.

*Konsolidacijsko slijeganje (sekundarno)* je izazvano puzanjem tla (deformacijom pri konstantnom opterećenju), a izraženo je kod koherentnih tala. Smatra se da je puzanje posljedica deformacije samih čestica, a ne više istjecanja vode. Puzanje je izraženo uglavnom kod visokoplastičnih glina i treseta.

### 2.3.2. Konsolidacija – vremenski tok slijeganja

Konsolidacija je proces promjenljivih volumnih deformacija tla u vremenu, koje nastaju kao posljedica postupnog istjecanja vode iz tla, nakon pojave dodatnog tlaka vode  $u_e$  u nedreniranom stanju. Konsolidacija je prijelazna faza između nedreniranog i dreniranog stanja tla. Tijekom konsolidacije, dok voda istječe iz tla, vanjsko se opterećenje postupno prenosi s vode u porama tla na skelet tla te efektivna naprezanja u svakom trenutku narastu upravo za vrijednost pada dodatnog tlaka vode.

Teoriju konsolidacije je, zajedno s matematičarom O.K. Fröhlichom, razradio “otac mehanike tla” Karl Terzaghi (Terzaghi & Fröhlich, 1936). Početne su postavke jednake kao i kod tečenja vode u tlu tj. da je pri protjecanju kroz element tla promjena protoka jednaka promjeni volumena vode u elementu tla u vremenu, a za smjerove  $x$  i  $y$ :

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) dx dz = \frac{dV}{dt} \quad (27)$$

Ako promatramo tečenje i deformaciju u jednoj dimenziji,  $z$ , primjenom Darcyevog zakona prethodni izraz (27) se pojednostavljuje:

$$\Delta q = \Delta q_z = \left(k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) \cdot dx dy dz \quad (28)$$

Pretpostavljeno je da je proces vremenski nepromjenjiv, odnosno, da se volumen elementa tla kroz koji voda protječe u vremenu ne mijenja. Element tla u primarnoj konsolidaciji se sliježe, tada vrijedi sljedeći izraz:

$$\frac{\partial v_w}{\partial t} \neq 0 \quad (29)$$



Volumen vode u elementu tla se može izraziti preko stupnja zasićenosti  $S_r$  i koeficijenta pora  $e$ :

$$V_w = \frac{S_r \cdot e_0}{1+e_0} \cdot dx dy dz \quad (30)$$

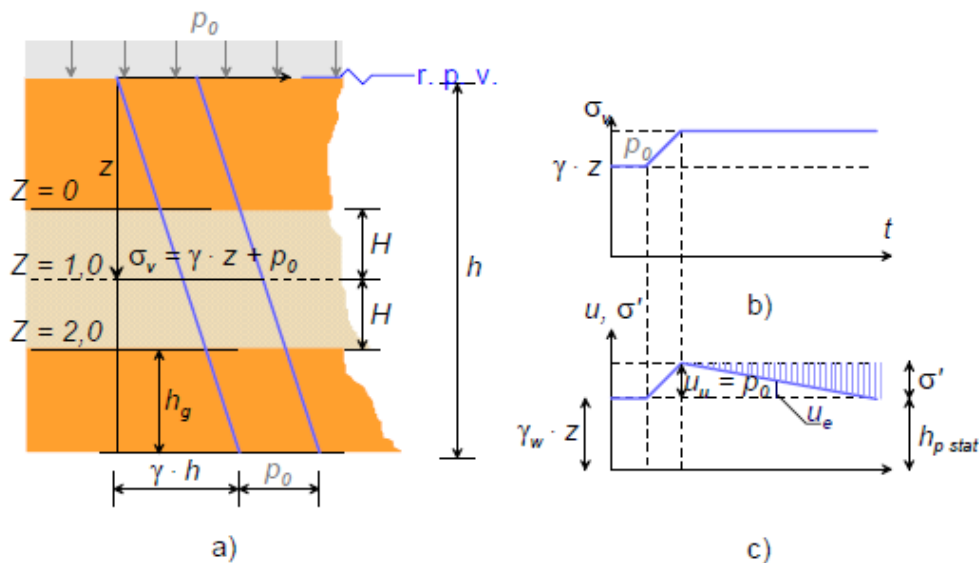
Onda je promjena volumena vode u elemntu tla:

$$\Delta q = \frac{\partial V_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{S_r \cdot e_0}{1+e_0} \cdot dx dy dz \right) \quad (31)$$

Iz uvjeta ravnoteže masa, volumen vode koji istekne iz pora elementa tla jednak je promjeni volumena vode u elementu (izraz 28 i 31):

$$k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \left( e_0 \cdot \frac{\partial S_r}{\partial t} + S_r \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (32)$$

Kako bi se dobilo slijeganje potrebno je promjenu volumena elementa tla povezati s opterećenjem na površini. U prethodni izraz je potrebno uvesti vezu naprezanja i deformacija. Cijeli slučaj se može pojednostaviti tako da se osim uvjeta ravnoteže u vertikalnom smjeru, pretpostavi da je tlo potpuno zasićeno ( $S_r=1$ ), te da je veza naprezanja i deformacija linearna. Slika 9 nam služi kao skica za izvođenje jednadžbe konsolidacije.



Slika 9. a) Skica početnih i dodatnih naprezanja za rješavanje jednodimenzionalne konsolidacije, u smjeru osi z, b) prikaz promjene u vremenu vertikalnih totalnih naprezanja, c) poreni tlakovi i efektivna naprezanja u dubini z (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

1. Uvjeti ravnoteže u smjeru osi z:

$$\sigma_v = \gamma \cdot z + p_0 \quad (33)$$

2. Ravnoteža masa (izraz 32), uz uvjet da nema promjene  $S_r$ -a:

$$k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (34)$$

3. Odnos naprezanja i deformacija:

$$\text{Deformacija uzorka tla: } \varepsilon = \frac{\Delta h_v}{h_0} = \frac{h_v - h_{v1}}{h_v + h_s} / : h_s \quad (35)$$

$$\text{Veza relativne deformacije i koeficijenta pora: } \varepsilon = \frac{e_0 - e_1}{e_0 + 1} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (36)$$

$$\frac{\partial e}{1 + e_0} = \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E_{oed}} \quad (37)$$

$$k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{E_{oed}} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} \quad (38)$$

$$k \cdot E_{oed} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}, (\sigma_v = \sigma'_v + u_e) \quad (40)$$

U prethodnoj jednadžbi imamo derivacije različitih funkcija, kako bi dobili rješenje potrebno je svesti na jednu funkciju.

Ako promatramo jednostavan slučaj kad nema promjene ukupnog naprezanja na površini u vremenu, u prethodnom izrazu umjesto  $\sigma'_v$  uvrstimo  $\sigma_v - u_e$  na desnoj strani dobijemo slijedeće:

$$\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} = - \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (41)$$

Ukupni potencijal  $h$  možemo na slijedeći način prebaciti u porast pornog tlaka  $u_e$  (Slika 9. a) i b)):

$$h = h_g + (h_{pstat} + h_{pe}) = h_g + \frac{u_{stat}}{\gamma_w} + \frac{u_e}{\gamma_w} \quad (42)$$

gdje je:  $u_e$  - porast pornog tlaka, u odnosu na već postojeći od vlastite težine vode  $u_{stat}$ , zbog pojave opterećenja na površini

Ako lijevu stranu jednadžbe (40) umjesto  $h$  uvrstimo u prethodni izraz (42)  $h_g$  i  $u_{stat}$  su linearne funkcije, njihove druge derivacije po ordinati  $z$  biti će jednake 0, ostati će samo druga derivacija  $u_e$ .

Izraz koji ćemo dobiti će se sastojati od konstanti pa ćemo dobiti **koeficijent konsolidacije**  $c_v$ :

$$\frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (43)$$

$$c_v = \frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_w} \quad (44)$$

gdje je:  $k$  – koeficijent propusnosti

$E_{oed}$  – edometarski modul

$\gamma_w$  – objamska težina vode

Sada izraz 42 možemo napisati kao:

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (45)$$

Ovakav oblik hiperbolične parcijalne diferencijalne jednačbe rješava se uvođenjem bezdimenzionalnih varijabli:

$$\text{Bezdimenzionalna dubina: } z = \frac{z}{H} \quad (46)$$

$$\text{Vremenski faktor: } T_v = c_v \cdot \frac{t}{H^2} \quad (47)$$

Nakon uvođenja bezdimenzionalnih varijabli, izraz 45 se svodi:

$$u \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial T^2} \quad (48)$$

Diferencijalna jednačba se rješava uz zadane početne i rubne uvjete.

1.rubni uvjet: Ako od opterećenja  $p$  u prvom trenutku nastaje porni predtlak  $u_0$ , onda je početni uvjet slijedeći:

$$t > 0 \Rightarrow u_e = u_0, \text{ za } 0 \leq Z \leq 2 \quad (49)$$

Svo dodatno opterećenje u prvom trenutku preuzima voda u porama po čitavoj visini sloja.

2.rubni uvjet: za svaki kasniji  $t$ :

$$t > 0 \Rightarrow u_e = 0 \text{ za } Z = 0 \text{ i } Z = 2 \quad (50)$$

Na gornjem i donjem rubu sloja koji se konsolidira, nakon početne vrijednosti  $u_e = u_0$ ,  $u_e$  odmah pada na nulu.

Rješenje (Slika 10.) se dobije kao suma niza trigonometrijskih funkcija:

$$u_e = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_0}{M} (\sin MZ) e^{-M^2 T_v} \quad (51)$$

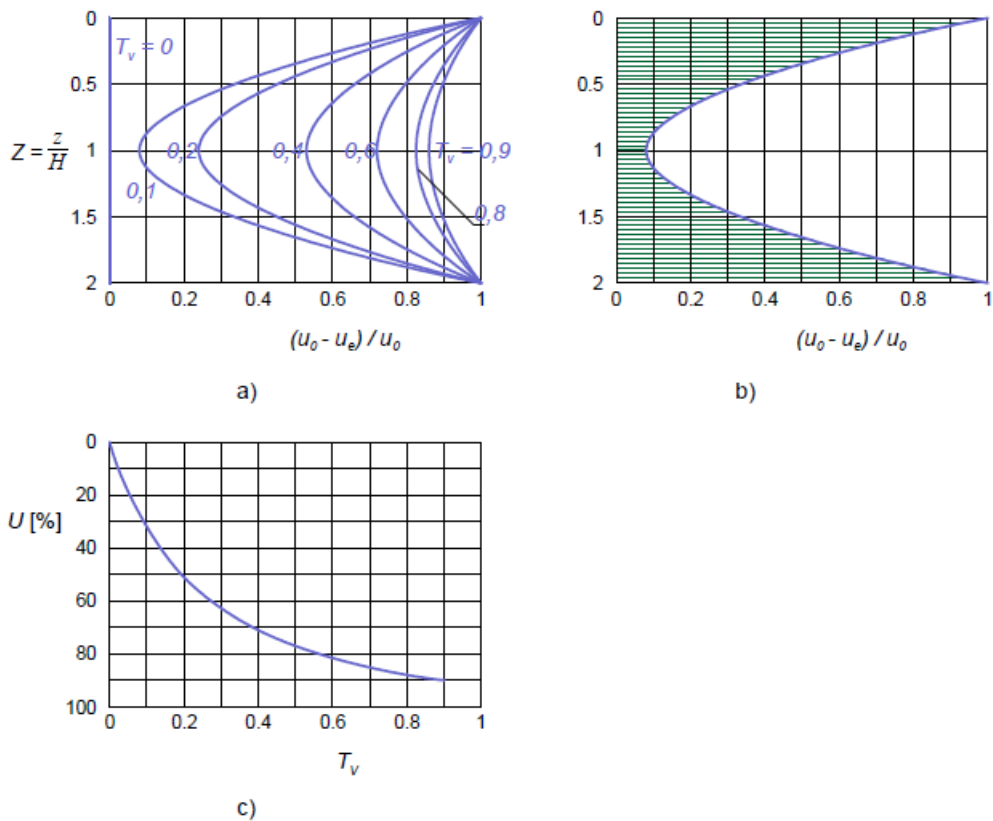
$$M = \frac{\pi}{2} (2m + 1), m = 1,2,3 \quad (52)$$

$U$ , prosječni stupanj konsolidacije:

$$U = \frac{\text{osjen.površina}}{\text{ukupna površina}} = \frac{w_t}{w_0} \quad (53)$$

gdje je:  $w_t$  – trenutno slijeganje

$w_0$  – konačno slijeganje



Slika 10. Grafičko rješenje jednadžbe konsolidacije (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

Opis dijagrama sa Slike 10:

-odmah nakon opterećivanja, nastaju veliki gradijenti na gornjem i donjem rubu sloja gline, pa tamo dolazi do brzog slijeganja, a u srednjem djelu je tek za  $T_v > 0,05$

- za  $T_v > 0,3$  su krivulje normaliziranih porenih tlakova skoro čista sinusna funkcija, pa se koristi samo prvi član jednadžbe izraza(51)

-za  $Z=1,0$  su gradijenti uvijek jednaki nuli, nema tečenja kroz sredinu

Rješenje vrijedi za jednodimenzionalni slučaj (tj. spriječeno bočno širenje, kao u edometru), a varijable - slijeganje i vrijeme su bez dimenzija, pa se, za svaki konkretni primjer mogu prilagoditi vrsti materijala i debljini sloja koji se sliježe. U problemima slijeganja u vremenu, varijable su prosječni stupanj konsolidacije  $U$  i vremenski faktor,  $T_v$ :

$$U = \frac{w_t}{w_0} \text{ i } T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2} \quad (54)$$

Gdje je:  $w_t$  – slijeganje koje odgovara vremenu  $t$ ,

$H$  – „put dreniranja“

Vremenski tok slijeganja, se onda izračuna tako da se, za konkretni sloj prvo izračuna konačno slijeganje, a slijeganje u vremenu se izračuna iz odnosa  $U : T_v$  koji se očitava iz dijagrama (Slika 10.c) ili iz Tablice 5. gdje je  $t = T_v \cdot \frac{H^2}{c_v}$ .

Tablica 5. Vrijednosti za  $U$  i  $T_v$ , za slučaj konstantnog opterećenja

$U$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$T_v$	0,008	0,031	0,071	0,126	0,197	0,287	0,403	0,567	0,848

Prema ovom se vidi da brzina slijeganja ne ovisi o intenzitetu opterećenja.  $U$  i  $T_v$  veza se može jednostavno izraziti na način (Craig 1978):

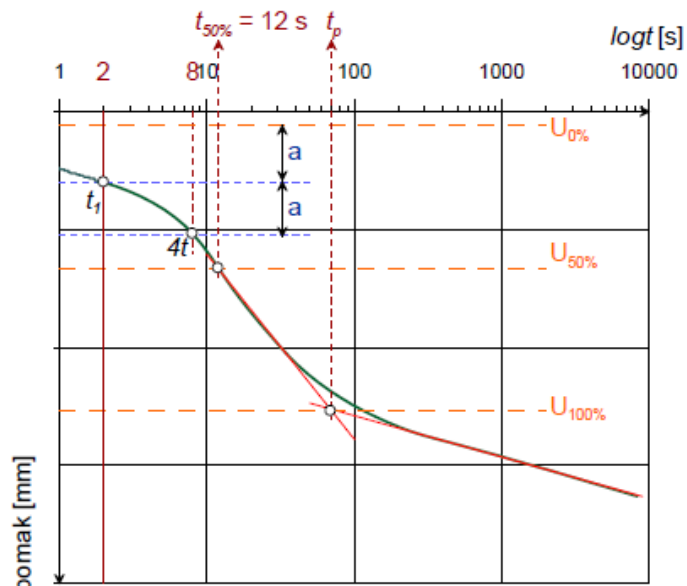
$$\text{za } U < 0,60 \text{ je } T_v = \frac{\pi U^2}{4} \quad (55)$$

$$\text{za } U > 0,60 \text{ je } T_v = -0,933 \log(1 - U) - 0,085$$

Jednodimenzionalna konsolidacija nastaje pri širokom, jednoliko raspodijeljenom opterećenju površine vodoravno uslojenog tla. Za jednodimenzionalnu se konsolidaciju pretpostavlja da se deformacije tla realiziraju samo u vertikalnom smjeru, kao slijeganje tla. Slijeganje tla je pozitivni pomak tla u mehanici tla. Također se pretpostavlja da se, u ovom slučaju, nestacionarno strujanje vode tijekom konsolidacije odvija samo u vertikalnom smjeru. Ovaj je problem prvi postavio i riješio K. Terzaghi 1923. godine, što se smatra početkom moderne mehanike tla.

## Određivanje koeficijenta konsolidacije u laboratoriju

Koeficijent konsolidacije je svojstvo materijala, pa se, prema tome, treba odrediti na temelju ispitivanja uzoraka u laboratoriju. Može se izračunati ako su poznati koeficijenti vodopropusnosti i edometarski modul. Česta su još dva načina izravnog određivanja  $c_v$ -a, prema Casagrandeu i Tayloru, na temelju pokusa u edometru.



$$T_v = c_v \frac{t}{H^2}, \quad c_v = T_v \frac{H^2}{t_{50\%}} = \frac{0.197 \cdot 1.0^2}{12}, \quad c_v = 0.0164 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

Slika 11. Dijagram mjerenja vremenskog toka slijeganja u edometru i određivanje  $c_v$ -a prema Casagrandeu (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

U prva dva slučaja se pretpostavlja da se konsolidacija sloja tla i uzorka u edometru odvijaju prema istom zakonu - razlika je samo u visini sloja koji se sliježe (konsolidira). Budući da je uzorak u edometru daleko tanji od sloja tla, u njemu će se primarna konsolidacija daleko brže odvijati, ovisi o kvadratu puta dreniranja), pa se s edometrom sve može brže obaviti (uglavnom za 24 sata).

*Casagrande (1938) - vremenska os u logaritamskom mjerilu.* Završetak primarne konsolidacije određuje se povlačenjem tangenti (u točki infleksije i na asimptotu za velike vrijednosti) na krivulju kao i na slici 11. Budući da je logaritam za  $t = 0$ , beskonačno velik, početak krivulje određuje se aproksimacijom logaritamske krivulje parabolom i to tako da se uzmu po dvije vrijednosti vremena na apscisi od kojih se veća dobije množenjem manje s brojem 4 (primjerice 2s i 8s, ili 4s i 16s). Početak se odredi tako da se odsječak na ordinati za te dvije vrijednosti prenese od manje vrijednosti prema gore (veličina  $a$  na slici 11). Tako odredimo početak i kraj primarne konsolidacije. Budući da su krajnje vrijednosti dobivene rekonstrukcijom, smatra se da je krivulja "najbolja" negdje oko sredine, pa se za reprezentativnu točku uzima prosječni

stupanj konsolidacije  $U_{50}$  (odgovarajući  $T_v= 0,197$ ), za koji se očita vrijeme konsolidacije  $t_{50}$ . Put dreniranja u edometru je pola visine uzorka (uzorak je obostrano dreniran), što je približno  $1,0 \text{ cm}$  ( $H^2$ ). Koeficijent konsolidacije se tada odredi kao što je prikazano izrazima na Slici 11. pomoću izraza:

$$c_v = \frac{0,197 \cdot H^2}{t} [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (56)$$

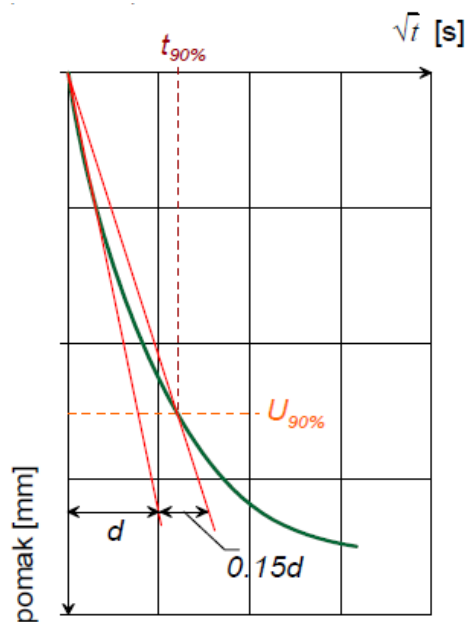
gdje je:  $c_v$  – koeficijent konsolidacije

$T_v=0,197$  – bezdimenzionalna veličina

$H^2$  – duljina drenažnog puta vode kroz uzorak

$t$ – vrijeme

*Taylor (1948) - vremenska os je u mjerilu drugog korijena.* Pristup je sličan, s time što ima i vrijednost za  $t = 0$ . Vrijeme 90-postotne konsolidacije određuje se povlačenjem pravca iz ishodišta koji siječe krivulju slijeganja na udaljenosti  $0.15 d$ , gdje je  $d$  horizontalna udaljenost pravca kroz ishodište od osi ordinate, a koji se najbolje približava krivulji u početku slijeganja (Slika 12.).



Slika 12. Dijagram mjerenja vremenskog toka slijeganja u edometru i određivanje  $c_v$ -a prema Tayloru (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Postupak po Tayloru uzima kao mjerodavni 90%-tni stupanj konsolidacije i koeficijent konsolidacije se odredi prema izrazu:

$$c_v = \frac{0,848 \cdot H^2}{t} [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (57)$$

gdje je:  $c_v$  – koeficijent konsolidacije

$T_v=0,848$  – bezdimenzionalna veličina

$H^2$  – duljina drenažnog puta vode kroz uzorak

$t$  – vrijeme

Pokazatelj stupnja konsolidacije tla je stupanj prekonsolidacije ili OCR, a predstavlja omjer najvećeg vertikalnog naprezanja u prošlosti i onog geološkog naprezanja koje odgovara dubini s koje je uzorak izvađen.

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma_g} \quad (58)$$

Gdje je:  $\sigma_p$  - najveće vertikalno naprezanje u prošlosti

$\sigma_g$  – geološko (geostatičko) naprezanje

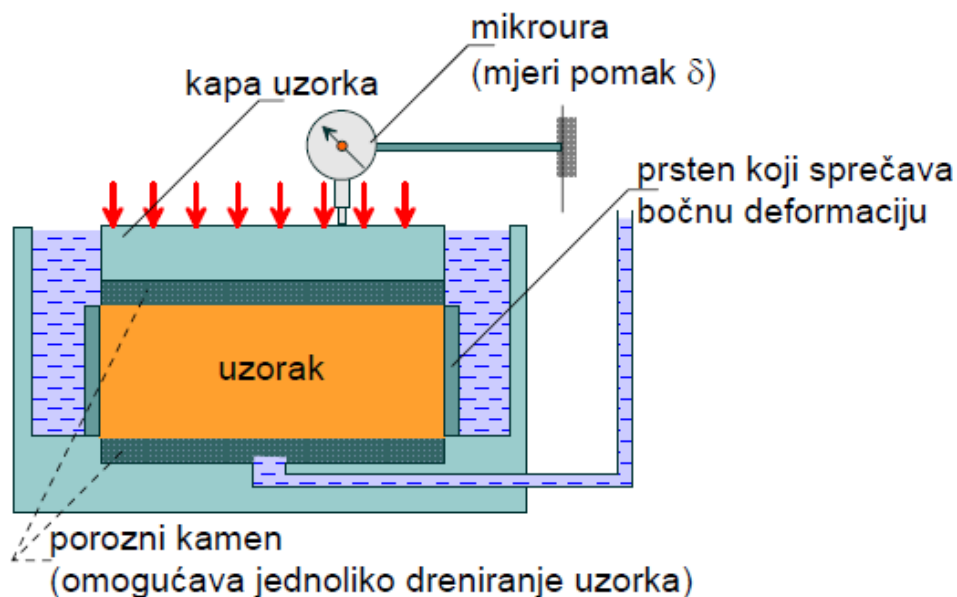
Prekonsolidacija može nastati zbog težine slojeva materijala koji su nakon taloženja u geološkom ciklusu erodirani, od težine ledenjaka, a ponekad su uzrok i kapilarne sile koje nastaju zbog sušenja površine glinovitih tala.

- u slučaju normalno konsolidiranog tla OCR će biti približno 1 ( $OCR \approx 1$ ),
- ako je tlo prekonsolidirano OCR će biti veći od 1 ( $OCR > 1$ ),
- a ako je nekonsolidirano OCR će biti manji od 1 ( $OCR < 1$ )

## 2.4.EDOMETAR

Edometar je laboratorijski uređaj za proračun vertikalnih komponenti volumne deformacije, tj. slijeganja tla. Ugrađuje se neporemećeni uzorak, mjeri početna visina uzorka te promjena visine tijekom opterećivanja. Rezultati se koriste kod procjene slijeganja i vremenskog tijeka slijeganja za standardne objekte.





Slika 13. Shema edometra (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

Osnovni dijelovi edometra:

-okrugli čelični prsten- u koji se uzorak ugradi: unutrašnjost prstena je glatka, a rub prstena zaoštren je s vanjske strane, tako da se ugradnja vrši utiskivanjem prstena u uzorak. (Uzorku je već pripremljena jedna horizontalna površina, utiskivanje se vrši okomito na tu površinu i posve nježno – bez zakretanja i nepotrebnog poremećivanja; druga stranica uzorka odreže se nježno posebnim nožem, opet bez nepotrebnog poremećivanja.) Ugrađivanjem u kruti prsten sprječavaju se horizontalne deformacije uzorka tijekom pokusa. Visina prstena bira se što manja (npr. 2 cm) da bi što manji bili utjecaji trenja na prstenu; širina prstena određena je širinom uzorka koji se ugrađuje, dakle dostupnom/korištenom garniturom za vađenje uzorka;

-dvije porozne ploče-koje se postavljaju ispod i iznad uzorka ugrađenog u prsten tako da nesmetano bude dreniranje (tj. istjecanje vode iz uzorka) tijekom pokusa; ploče pri opterećivanju tijesno (često sa zazorom od 0,5 mm) klize u prsten;

-edometarska ćelija – posuda koja osigurava kad je potrebno potopljenost i zasićenost uzorka

-čelična ploča postavljena na gornju poroznu ploču -jednoliko prenosi opterećenje po cijeloj horizontalnoj površini uzorka; udubljenje na vrhu i kuglica u njoj omogućavaju da se opterećenje na uzorak prenosi jednoliko

- sustav za opterećivanje - najčešće preko kuglice na čeličnoj ploči koja poklapa uzorak – poluga koja povećava djelovanje utega; opterećenje se može nanositi i hidraulički;

- osjetilo za mjerenje pomaka gornje čelične ploče odnosno deformacije uzorka – to je najčešće mjerna urica pričvršćena na okvir uređaja koja je pomičnim ticalom oslonjena na ploču

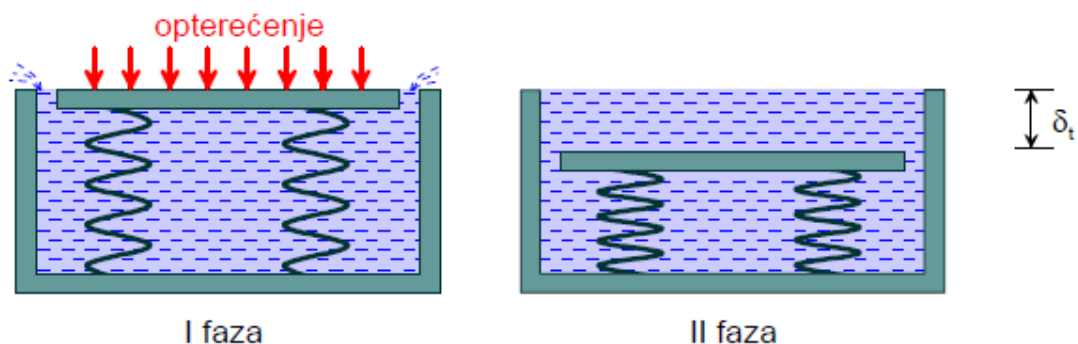
Edometarski pokus služi za određivanje jednodimenzionalne krutosti i konsolidacijskih svojstava tla. Obično se izvodi na neporemećenim uzorcima tla s terena (uzorak tla dobiven posebnom tehnologijom i postupkom koji u najvećoj mogućoj mjeri osiguravaju da je tlo u uzorku zadržalo svojstva koja je posjedovalo originalno tlo na terenu prije vađenja uzorka). Kako je pribavljanje neporemećenih uzoraka pjeskovitih i šljunkovitih tala vrlo otežano ili gotovo nemoguće, najčešće se edometarski pokusi provode na sitnozrnatim vodom zasićenim tlima kao što su gline i prahovi. U edometarski uređaj ugrađuje se valjkasti uzorak tla promjera  $D = 6-7$  cm i visine oko  $H = 2$  cm.

Deformabilnost uzorka se ispituje tako da se optereti vertikalno, preko kape uzorka, a porozni kamenovi (pločice) s gornje i donje strane omogućuju dreniranje uzorka. Zbog opterećivanja, u pornoj se vodi uzorka povećaju gradijenti i voda istječe u prostor oko uzorka. Pri opterećivanju se uzorak ne može bočno širiti jer je sa strane omeđen krutim prstenom ( $\epsilon_h = 0$ ). Obzirom da nema bočne deformacije, vertikalna deformacija uzorka je upravo jednaka volumenu istisnute vode podijeljenom s površinom uzorka, pa se sve odvija u jednoj dimenziji (u smjeru vertikalne osi).

Opterećenje se nanosi u stupnjevima i to tako da je svaki slijedeći stupanj opterećenja dva puta veći od prethodnog. Kod svakog stupnja opterećenja se mora čekati da višak vode izađe iz uzorka. Naime, zbog mogućnosti dreniranja vode na krajevima uzorka, u edometru se nakon nanošenja opterećenja, odvijaju dvije faze (Slika 14.):

I. FAZA: ( $t_0 = 0$ ) u početku svo opterećenje preuzima voda (kao krući medij), a čvrste čestice nisu opterećene. Praktički nema promjene volumena uzorka (nedrenirano stanje).

II. FAZA: ( $t_0 > 0$ ) voda koja prolazi između čvrstih čestica i kroz porozne kamenove prelazi u okolinu, a volumen uzorka se smanjuje, tj. uzorak se sliježe (drenirano stanje).



Slika 14. Shematski prikaz faza edometarskog pokusa (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

U I. fazi svo opterećenje preuzima voda (opuštene opruge):

$$\Delta u = p \quad \text{i} \quad \Delta \sigma' = 0 \quad (59)$$

U II. fazi, s istjecanjem vode iz pora, opterećenje preuzimaju i čvrste čestice. Dio dodatnog opterećenja preuzima voda, a dio opruge:

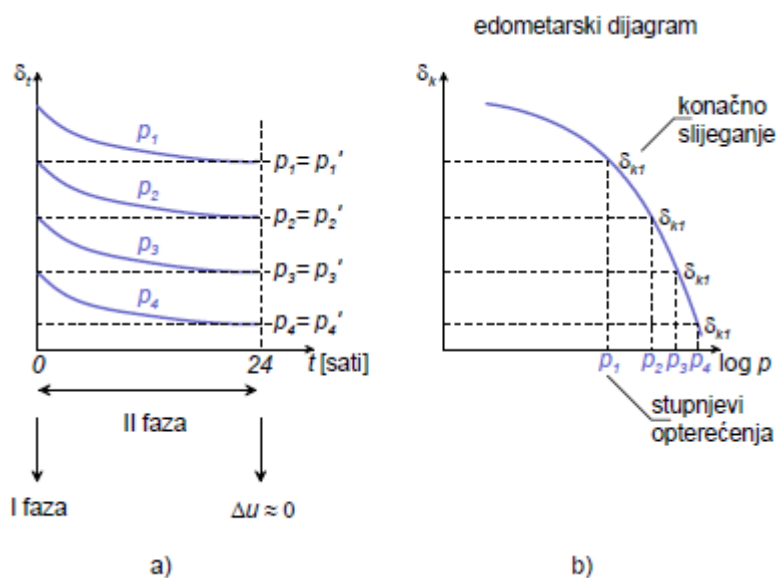
$$p = \Delta u + \Delta \sigma' \quad (60)$$

Na kraju druge faze edometarskog pokusa višak vode je istekao kroz otvore, a svo opterećenje preuzimaju opruge (porni tlak je na nuli,  $\Delta u = 0$ ):

$$\Delta \sigma' = p \quad \text{i} \quad \Delta u = 0 \quad (61)$$

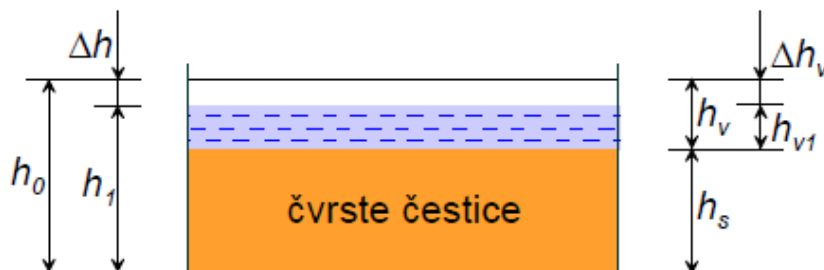
U edometarskom model prikazano je da se slijeganje odvija u dvije faze. U prvoj fazi ( $t_0 = 0$ ), u početku svo opterećenje preuzima voda (kao krući medij), a čvrste čestice nisu opterećene i nema promjene volumena uzorka (nedrenirano stanje). Zatim nastupa (za  $t > t_0$ ) sekundarna konsolidacija; voda koja prolazi između čvrstih čestica i kroz porozne kamenove prelazi u okolinu (drenirano stanje).

U edometru se ne može mjeriti porni tlak, pa zbog toga treba čekati da se slijeganje, pri određenom stupnju opterećenja, umiri, a što je znak da je prestalo istjecanje vode iz pora. Za svaki stupanj opterećenja čeka se obično 24 sata. Slijeganje, po stupnjevima opterećenja, je prikazano na dijagramu (Slika 15.a). Edometarski dijagram (slika 15.b), izveden iz prethodnog, a prikazuje ovisnost slijeganja uzorka o efektivnim vertikalnim naprezanjima (na kraju II. faze kad se smatra da su porni tlakovi jednaki nuli).



Slika 15.a) dijagram slijeganja uzorka u vremenu, b) edometarski dijagram (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

Običaj je da se edometarski dijagram prikazuje, umjesto sa slijevanjem uzorka,  $\delta_{ki}$  s promjenom koeficijenta pora  $e$ . Budući da je spriječeno bočno širenje, promjena visine izravno je povezana s promjenom koeficijenta pora. Kod slijevanja uzorka u edometru mijenja se samo sadržaj vode, a čvrste čestice ostaju (Slika 16.).



Slika 16. Promjena visine edometarskog uzorka za prvi stupanj opterećenja (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

### 3. PRAKTIČNI DIO

Ispitivanja potrebna za ovaj diplomski rad provedena su u geotehničkom laboratoriju Geotehničkog fakulteta. Provodila su se ispitivanja na dva različita uzorka, sa različitim lokacijama. Uzorci su različitog stupnja zbijenosti, te se ispitivanje provodilo u dva različita stanja, neporemećenom stanju i poremećenom (pregnjećenom) stanju.

Uzorci tla se u laboratorij dopremaju kao neporemećeni (Slika 17.), tj. da budu što sličniji stvarnom stanju kao na terenu, uz zadržanu prirodnu vlažnost i ostala svojstva. Kako bi uzorci bili dopremljeni u takvom, neporemećenom stanju u laboratorij, potrebno je s njima pravilno rukovati, pravilno ih zapakirati i skladištiti dok se ne dopreme na ispitivanje.



Slika 17. Neporemećeni uzorak tla

Svaki uzorak odmah na terenu potrebno je pravilno označiti. I to na način da se kasnije u laboratoriju mogu raspoznati, sa koje dubine su bušotine i dubine dopremljeni uzorci za ispitivanje. Uzorci na kojima se provodilo ispitivanje:

U1- uzorak 1: dubina 2,00 – 2,30 m,

U2- uzorak 2: dubina 6,00 – 6,40 m.

## Određivanje vlažnosti

Prvi korak kod ispitivanja uzorka je odrediti njegovu zatečenu vlažnost (Tablica 6). Vlažnost određujemo tako što odmah nakon raspakiranja uzorka dio odvojimo za određivanje ovog svojstva. Potrebno je izvagati posudice u kojima se suši uzorak kako bi se računski mogla odrediti zatečena vlaga. Potrebno je zabilježiti masu praznih posudica i masu posudica zajedno s vlažnim uzorkom. Nakon što se zabilježe ove mase, uzorak se stavlja u sušionik. Nakon njegovog sušenja, uzorak se ponovo važe i bilježi njegova masa. A prirodnu vlažnost, odnosno zatečenu vlažnost dobijemo tako što najprije izračunamo masu vode  $M_w$  i masu suhog uzorka  $M_d$  (izraz 62 i 63). Nakon što nam je poznata masu vode  $M_w$  i masu suhog uzorka  $M_d$  možemo izračunati prirodnu vlažnost uzorka  $w_0$  (izraz 64).

$$M_w = M_{p1} - M_{p2} \quad (62)$$

$$M_d = M_{p2} - M_p \quad (63)$$

$$w_0 = \frac{M_w}{M_d} \cdot 100 \% \quad (64)$$

gdje je:  $M_p$ -masa posude

$M_{p1}$ – masa posude i vlažnog uzorka

$M_{p2}$ – masa posude i suhog uzorka

$M_w$  – masa vode

$M_d$  – masa suhog uzorka

$w_0$ - prirodna vlažnost

Tablica 6. Dobiveni rezultati zatečene vlažnosti uzorka

Uzorak	Zatečena vlaga $w_0$ [%]
U1	35,28
U2	27,43



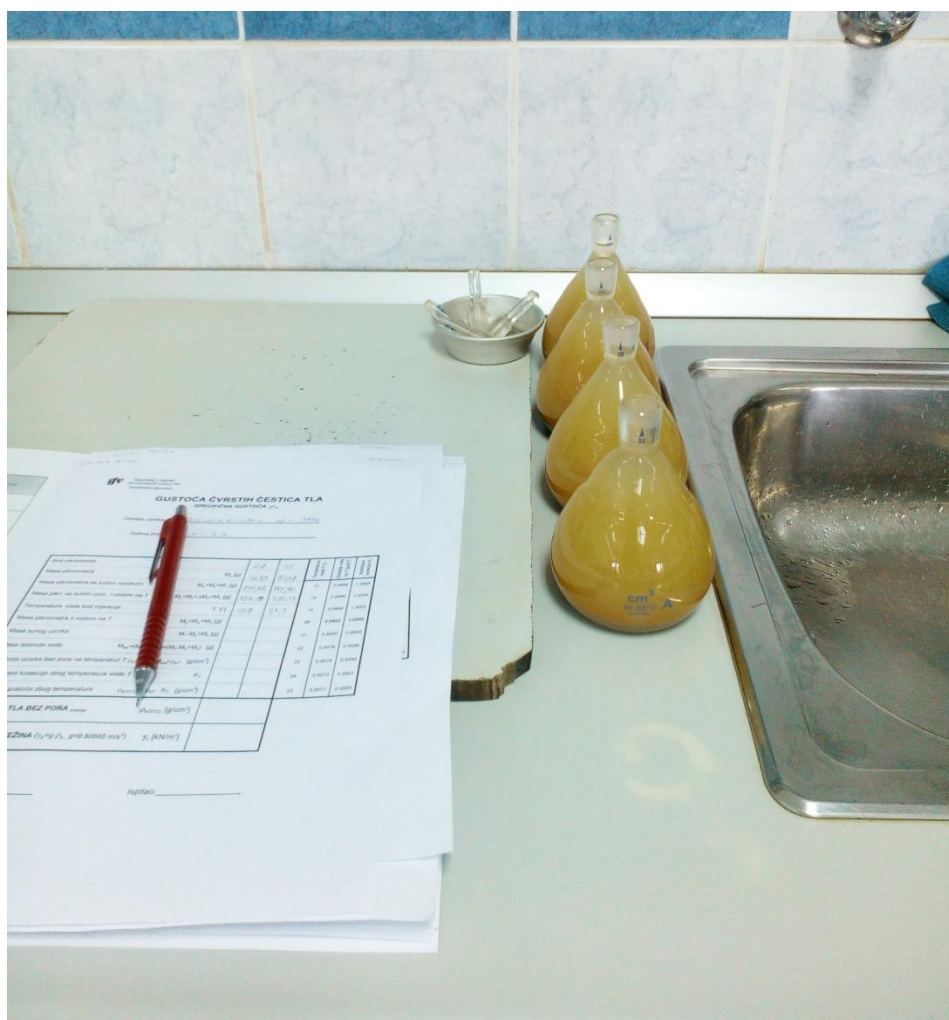
## Određivanje gustoće

Za određivanje gustoće čvrstih čestica, u geotehničkom laboratoriju služi piknometar, vatrostalna staklena posuda poznatog volumena (Slika 18.).

Gustoća čestica tla- predstavlja omjer mase suhog uzorka tla u odnosu na masu istisnute vode, pomnoženo s gustoćom vode (Tablica 7).

Tablica 7. Gustoća čestica tla za ispitivane uzorke

Uzorak	Gustoća čestica tla $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]
U1	2,72
U2	2,74



Slika 18. Određivanje gustoće čestica tla u laboratoriju

## Određivanje granice tečenja

Granice tečenja koherentnih tla u laboratoriju se određuje pomoću konusnog penetrometra (Slika 19.). Metoda se provodi na mjerenju prodiranja konusa u homogenizirani uzorak tla koji se nalazi u posudi standardnih dimenzija, kroz vremenski period od 5 s.

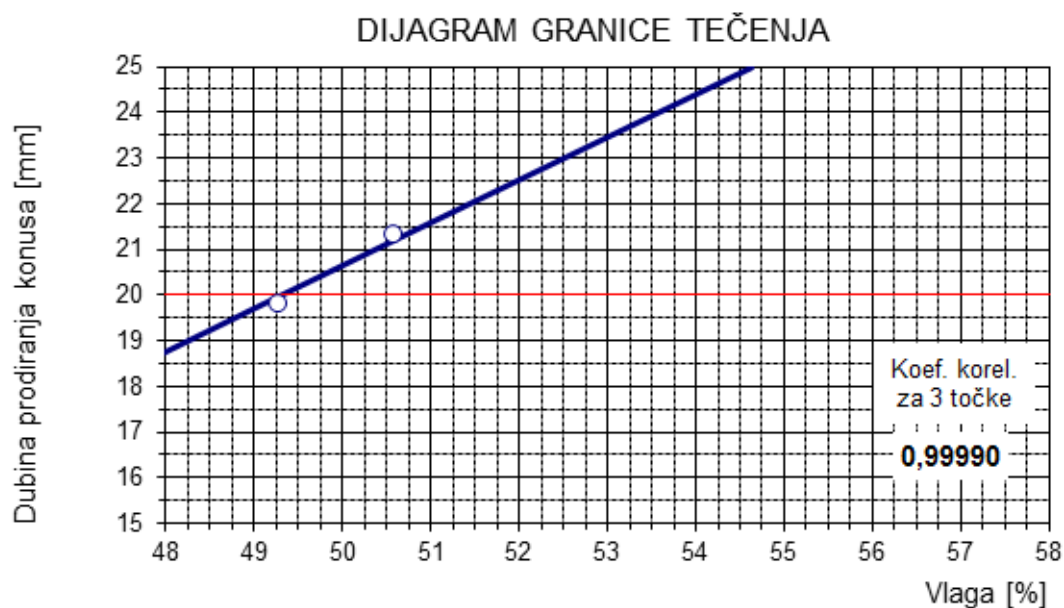
Konzistentno stanje ispitivanih uzoraka mora odgovarati dubini prodiranja konusa od 15 do 25 mm. Granica tečenja odgovara vlažnosti koherentnog tla u kojem dubina prodiranja konusa iznosi 20 mm nakon 5 sekundi.



Slika 19. Određivanje granice tečenja pomoću konusnog penetrometra



Uzorak prije ispitivanja penetrometrom je potrebno homogenizirati.. Nakon ispitivanja penetrometrom iz posuda u kojima smo provodili ispitivanje dio uzorka se vadi u druge posudice i stavlja se sušiti u sušionik. Postupak je isti kao i u određivanju prirodne vlažnosti. Ovaj postupak ponavljamo kako bi utvrdili koliko je uzorak bio vlažan za vrijeme ispitivanja penetrometrom. Nakon što se uzorak osuši izračunamo vlažnost. Dobivene vrijednosti vlage i dubine prodiranja konusa unosimo u dijagram, određujemo regresijski pravac, te iz gotovog dijagrama određujemo granicu tečenja (Slika 20.).



Slika 20. Dijagram tečenja

### Određivanje granice plastičnosti

Granica plastičnosti se određuje tako da uzorak pripremimo u pregnečeno stanje, te od njega oblikujemo (valjamo) valjčić od 3 mm. Kada se dosegne promjer od 3 mm na valjčiću moraju biti vidljive pukotine, tada je dosegnuta granica plastičnosti (Slika 21). Ako se na valjčiću ne pojave pukotine postupak se ponavlja, ponovo se pregneči u grumen i valja se valjčić od 3 mm, dok se ne pojave pukotine.



Slika 21. Valjčići za određivanje granice plastičnosti

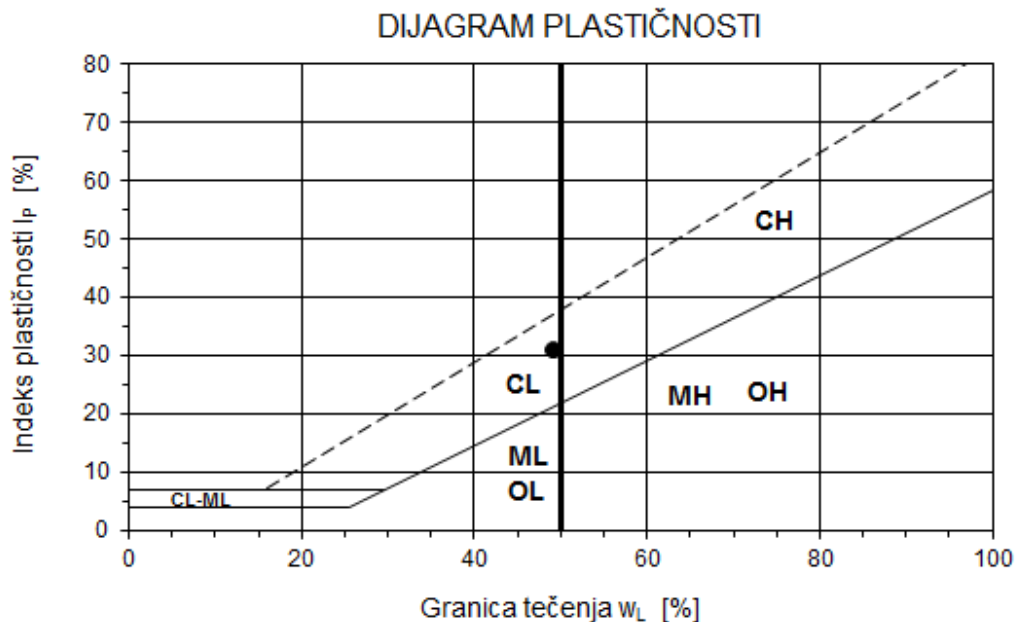
Nakon što smo dobili valjčiće s pukotinama stavljamo ih sa Petrijevim posudicama u sušionik na sušenje, s tim da smo prethodno zabilježili masu prazni posudica i masu posudica s vlažnim valjčićima. Nakon sušenja računamo vlažnost i granicu plastičnosti.

Sada imamo vrijednosti za granicu tečenja i granicu plastičnosti za oba uzorka (Tablica 8). Kako bi klasificirali tlo prema USCS klasifikaciji (Slika 22.) potrebno je odrediti indeks plastičnosti. Indeks plastičnosti je razlika sadržaja vlage između granice tečenja i granice plastičnosti. Izračunamo ga preko sljedećeg izraza:

$$I_p = w_L - w_P \quad (65)$$

Tablica 8. Dobivene vrijednosti za granice tečenja i plastičnosti i klasifikacija uzorka tla

Uzorak	Granica tečenja $w_L$ [%]	Granica plastičnosti $w_P$ [%]	Indeks plastičnosti $I_P$ [%]	Klasifikacija prema USCS
U1	53,58	28,46	25,13	CH
U2	49,32	18,55	30,78	CL s pijeskom



Slika 22. Dijagram plastičnosti

### Određivanje granulometrijskog sastava

Granulometrijski sastav na ovim uzorcima određivao se postupkom areometriranja. Areometriranje je metoda određivanja granulometrijskog sastava tla za materijal koji sadrži zrna manja od 0,06 mm. Veličina i postotak pojedinih frakcija određuje se indirektno, mjerenjem gustoće suspenzije u određenim vremenskim intervalima, primjenjujući Stokes-ov zakon.

Stokes-ovim zakonom se definira brzina padanja zrnaca u mirnoj tekućini, koja je to veća što su čestice krupnije. U vodu se sipa mala količina materijala koji se sastoji od čestica različite veličine, krupnije čestice padaju brže, a sitnije sporije.

Za mjerenje prolaska čestica u ovakvom postupku koristi se areometar, gustoćama baždareni plovak. Areometrom mjerimo gustoću na dubini gdje pluta njegovo težište. Gustoća suspenzije se očitava na vratu areometra gdje on izvire iz vode.

Prvo uzimamo manje posudice u koje stavljamo podjednaku količinu uzorka. Njih izvažemo prazne i zajedno s uzorkom. Nakon toga ih stavljamo u sušionik na temperaturu od 105°C. Nakon sušenja ih ponovno važemo i na taj način određujemo vlažnost uzorka.

U veću posudu odvojimo 60 g uzorka i dodamo destiliranu vodu kako bi se uzorak namočio (Slika 23.). Namočeni uzorak grubo homogeniziramo rukom. Nakon toga isti uzorak ispiramo kroz sito određenog otvora ovisno o normi mjerenja .



Slika 23. Priprema uzorka za areometriranje

Uzorak koji se ostao na situ nakon ispiranja, stavljamo u posudu i na sušenje u sušionik na temperaturu od 100 – 105°C. Nakon 24 h uzorak se vadi iz sušionika i važe se. Ukupna masa ispranog i osušenog uzorka trebala bi biti manja od 2,5% od ukupne mase uzorka kako ne bi trebali prosijavati ostatak kroz sito. Ako nam je masa osušenog i ispranog uzorka dobra mjerimo najveće zrno i zapisujemo njegove dimenzije.

Suspenziju materijala koju smo isprali kroz sito ulijemo u čašu i dodajemo 100 ml antikoagulansa kako bi spriječili koaguliranje čestica. Suspenziju dispergiramo u miješalici. Nakon miješanja suspenzije, ulijemo je u menzuru i dodamo destiliranu vodu kako bi menzuru napunili do 1000 ml. Potrebno je protresti suspenziju u menzuri. Sada je sve spremno za mjerenje gustoće areometrom. Areometar polagano uronimo u menzuru i mjerimo gustoću u određenim vremenskim intervalima. Tijekom mjerenja gustoće je potrebno mjeriti i temperaturu (Slika 24).





Slika 24. Areometriranje

## **Ispitivanje u edometru**

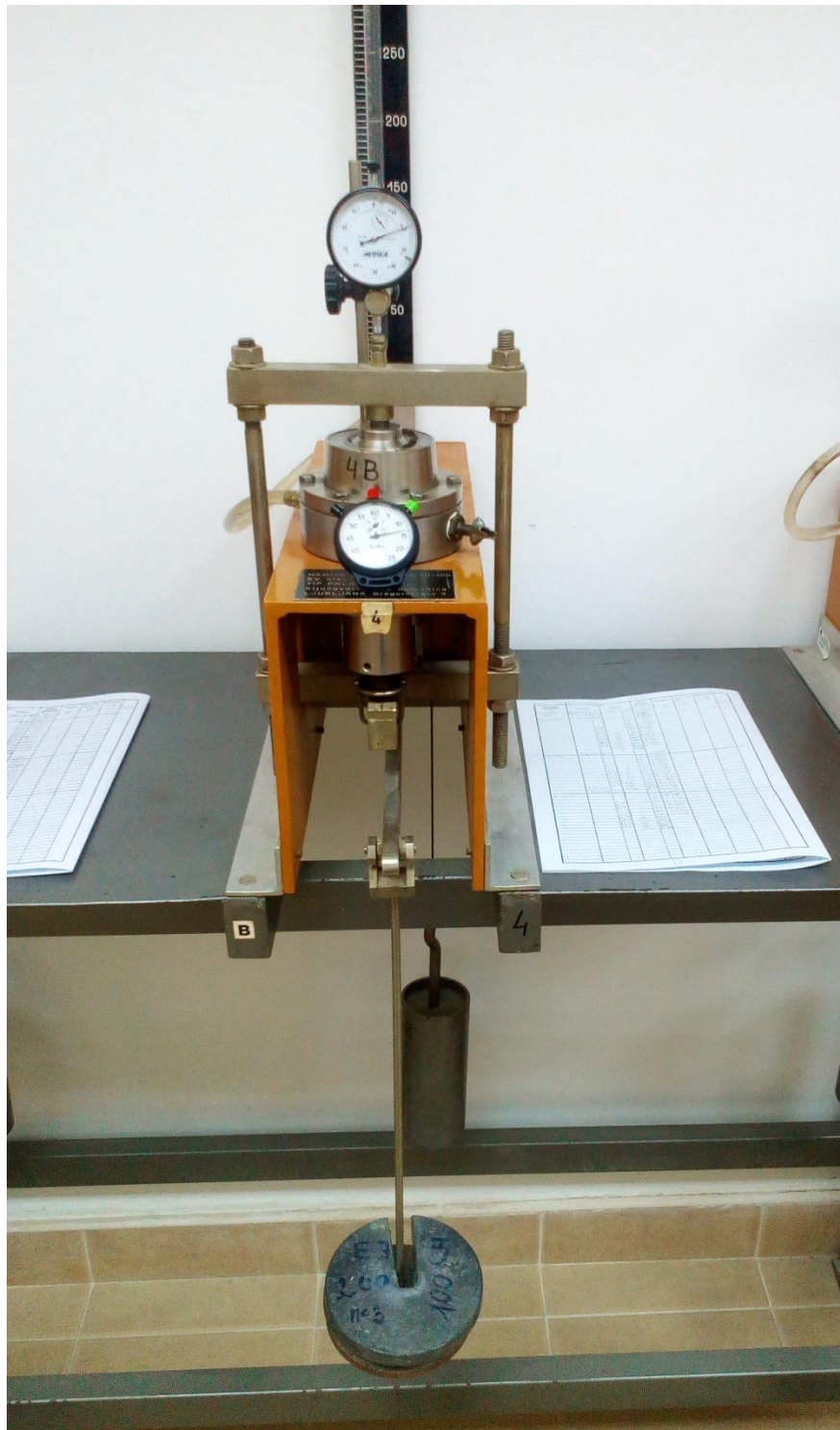
Pokus se odvijao u klasičnom edometru u Geotehničkom laboratoriju Geotehničkog fakulteta (Slika 25.).

Ispitivanje se vršilo na dva uzorka različitog stupnja zbijenosti u dva različita stanja, neporemećenom i poremećenom stanju.

Uzorke u neporemećenom stanju je potrebno ugraditi u prsten edometra. Uzorci se ugrađuju na način da se prsten okomito utiskuje u uzorak. Utiskivanje prstena u uzorak je potrebno izvesti nježno, bez zakretanja kako se ne bi poremetio uzorak. Druga strana uzorka, višak, odstrani se posebnim nožem koji je namijenjen za to. Ugrađivanjem uzorka u kruti prsten sprječavaju se njegove horizontalne deformacije tijekom pokusa. Nakon ugrađivanja uzorka u prsten sa obje strane prstena stavlja se filter papir koji odgovara promjeru prstena. Filter papir prije stavljanja u poroznih pločica s obje strane lagano se navlaži vodom. A porozne pločice s obje strane uzorka služe za nesmetano dreniranje vode iz uzorka. Uzorku je potrebno omogućiti zasićivanje vodom. Na gornju poroznu pločicu dolazi čelična ploča koja prenosi opterećenje po cijeloj horizontalnoj površini uzorka jednoliko. Na čeličnoj ploči se nalazi kuglica koja je spojena s polugom gdje se utezima nanose opterećenja- sustav za opterećivanje uzorka. Nakon konačne ugradnje uzorka u uređaj, na čeličnu ploču sjeda mjerna urica, ona je pričvršćena na okviru uređaja koja dodiruje čeličnu ploču, te na njoj očitavamo vertikalne deformacije uzorka.

Zbog prisustva vode u porama tla usporava se odvijanje deformacije. Zato se, za svaki stupanj opterećenja, više puta očitava visina ploče. Najbrže promjene događaju se odmah nakon nanošenja opterećenja, a potom se kontinuirano usporavaju.

Za uzorke u poremećenom stanju, prvo je potrebno početni uzorak koji se nalazi u neporemećenom stanju pregnječiti (poremetiti). Uzorak u neporemećenom stanju se usitni sa lopaticom- poremeti se početno stanje (stanje u kakvom se nalazi na terenu). Ugradnja u prsten je ista kao i kod uzorka u neporemećenom stanju.



Slika 25. Klasični edometar s ugrađenim uzorkom

Nakon ugrađivanja uzorka u edometar potrebno je očitati vertikalne deformacije, te se dalje može nastaviti s pokusom. Uzorak počinjemo opterećivati. Svako novo opterećenje na uzorak nanosilo se svaka 24 sata. Tijekom 24 sata mjeri se vertikalni pomak uzorka pod konstantnim opterećenjem, tako da se krivulja pomaka u vremenu crta u polulogaritamskom mjerilo (vrijeme je u minutama na logaritamskoj skali), što

znači da se ubrzo nakon nanošenja određenog inkrementa opterećenja, očitavanja vrše češće, a kasnije sve rjeđe.

Svaka 24 sata se može početi s novim stupnjem opterećenja. nakon što se deformacija umiri, nanese se slijedeći stupanj opterećenja: najčešće dva puta veći od prethodnog tijekom opterećivanja. Uzorke smo opterećivali u inkrementima 1,8 – 50 kPa, 50 - 100 kPa, 100 – 200 kPa, 200 – 400 kPa i 400 – 800 kPa. Vremena očitavanja vertikalne deformacije za svaki stupanja opterećenja bila su nakon: 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 50 min, 1 h i 40 min, 5 h i nakon 24 h. Nakon što smo nanijeli određeni broj inkremenata opterećenja, uzorak je potrebno rasteretiti. Rasterećenje uzorka se provodi u dekrementima i oni traju 24 sata. Po završetku opterećivanja i rasterećivanja uzorka u edometru uzorak se izvadi i važe kako bi izračunali njegovu vlažnost nakon pokusa (Slika 26).



Slika 26. Uzorak nakon pokusa u edometru

Po završetku pokusa u edometru, mjerenja koja smo zabilježili potrebno je grafički interpretirati. Vertikalne deformacije u ovisnosti s vremenom se prikazuju u dijagramu. Dijagram se crtao za svaki stupanj opterećenja i za svaki uzorak, neporemećenog i pregnječenog stanja. Podatci su se interpretirali na dva načina: očitavanja vertikalnih deformacija u vremenu prikazana su u dva dijagrama, razlika je što je u jednom vrijeme prikazano u logaritamskom mjerilu a u drugome, u korijenu iz vremena.

Dijagrami nam dalje služe za izračunavanje koeficijenta konsolidacije, što je i cilj ovoga rada i ispitivanja. Koeficijente konsolidacije izračunavali smo prema dvije metode, prema Casagrandeu i Tayloru (Tablica 9 i 10), na temelju ispitivanja u edometru.



Tablica 9. Dobivene vrijednosti koeficijenta konsolidacije prema Taylor-ovoj metodi

UZORAK	Stanje uzorka		Vertikalno opterećenje $\sigma_v$ [kPa]				
	N	P	1,8-50	50-100	100-200	200-400	400-800
			$\sqrt{t}$	$\sqrt{t}$	$\sqrt{t}$	$\sqrt{t}$	$\sqrt{t}$
	Koeficijent konsolidacije, $c_v$						
U1	x		$2,49 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$
U1		x	$7,78 \cdot 10^{-5}$	$2,54 \cdot 10^{-4}$	$8,06 \cdot 10^{-4}$	$5,90 \cdot 10^{-5}$	$5,46 \cdot 10^{-5}$
U2	x		$9,28 \cdot 10^{-4}$	$3,00 \cdot 10^{-4}$	$3,41 \cdot 10^{-4}$	$3,68 \cdot 10^{-4}$	$3,42 \cdot 10^{-4}$
U2		x	$9,27 \cdot 10^{-4}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$7,10 \cdot 10^{-5}$	$9,38 \cdot 10^{-5}$	$8,92 \cdot 10^{-5}$

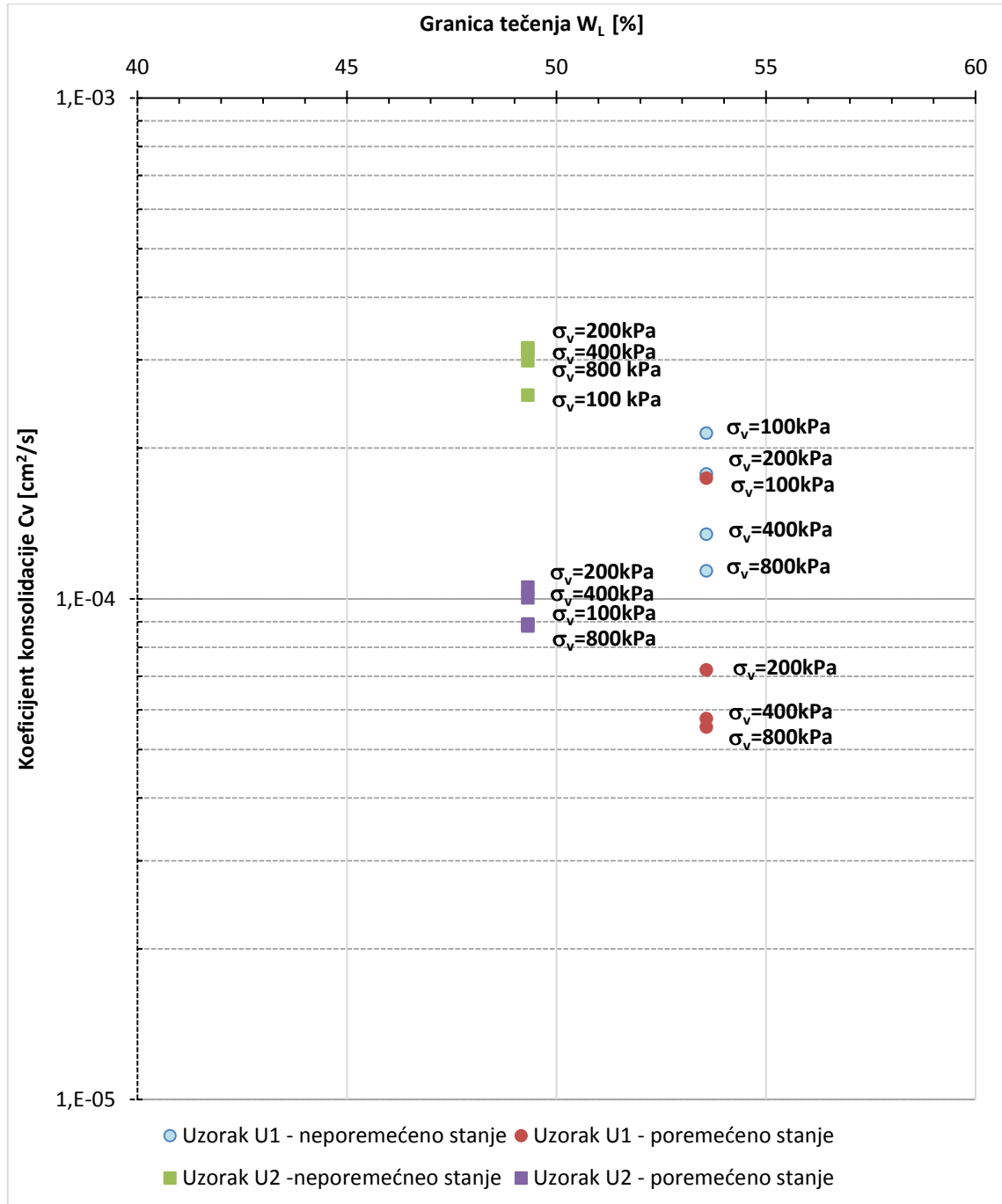
Tablica 10. Dobivene vrijednosti koeficijenta konsolidacije prema Casagrande-ovoj metodi

UZORAK	Stanje uzorka		Vertikalno opterećenje $\sigma_v$ [kPa]				
	N	P	1,8-50	50-100	100-200	200-400	400-800
			log t	log t	log t	log t	log t
	Koeficijent konsolidacije, $c_v$						
U1	x		$2,66 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$9,25 \cdot 10^{-5}$
U1		x	$7,72 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$6,36 \cdot 10^{-5}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$
U2	x		$3,34 \cdot 10^{-4}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$	$2,55 \cdot 10^{-4}$
U2		x	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$7,80 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$8,73 \cdot 10^{-5}$

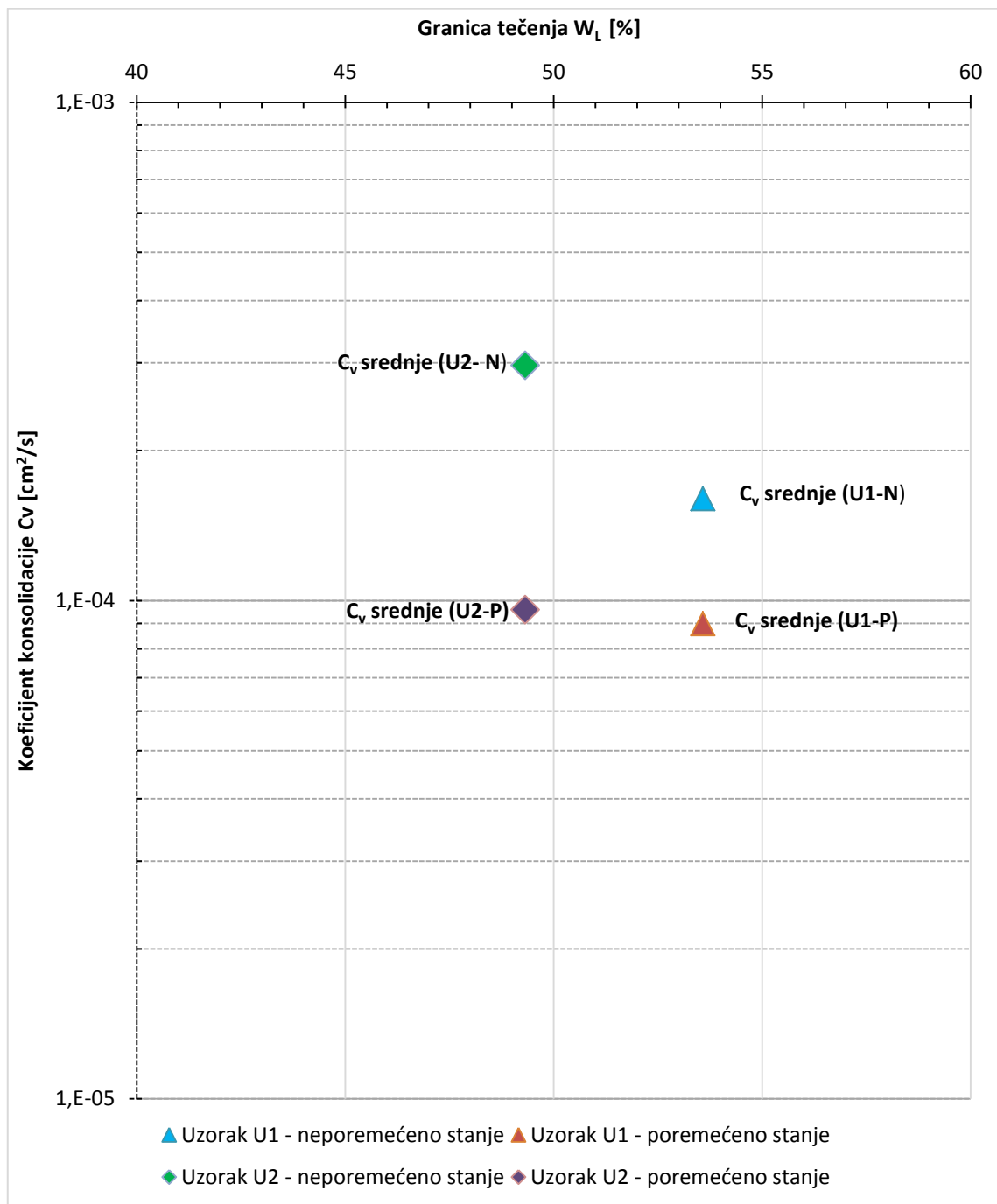
Tablica 11. Dobivene srednje vrijednosti koeficijenta konsolidacije za svaki ispitivani uzorak

UZORAK	Stanje uzorka		SREDNJE VRIJEDNOSTI $c_{v-a}$
	N	P	
U1	x		$1,60 \cdot 10^{-4}$

U1		x	$8,98 \cdot 10^{-5}$
U2	x		$2,96 \cdot 10^{-4}$
U2		x	$9,58 \cdot 10^{-5}$



Slika 27. Dijagram koeficijenta konsolidacije za svaki inkrement opterećenja



Slika 28. Dijagram za srednje vrijednosti koeficijenta konsolidacije

## 4.ZAKLJUČAK

U ovom radu cilj je bio prikazati utjecaj stanja poremećenosti uzorka na koeficijent konsolidacije. Koeficijent konsolidacije utvrđivan je sa dvije metode, Casagrandeovom i Taylorovom metodom temeljem rezultata provedenih edometarskih pokusa.

Iz priloženih rezultata može se uočiti da se koeficijenti konsolidacije bitno razlikuju kod različitih stanja uzorka, poremećenog i neporemećenog stanja. Kod poremećenog stanja uzorka vrijednosti koeficijenta konsolidacije su u prosjeku jedan red veličine manje od vrijednosti koeficijenta konsolidacije u neporemećenom stanju.

Na osnovu dobivenih rezultata može se zaključiti da stanje uzorka bitno utječe laboratorijski utvrđeni vrijednost koeficijenta konsolidacije. Drugim riječima, vrlo je bitno kojim metodama se uzorak uzima s terena te na koji način se s njim postupa tijekom vađenja i dopremanja u laboratorij. Uzorak s terena namijenjen za ispitivanja u laboratoriju potrebno je dopremiti u neporemećenom stanju, kao što se nalazi na terenu.

Također je važno da ispitni laboratorij u izvješću naznači stanje ispitivanog uzorka s obzirom na stanje poremećenosti.

## **5.POPIS LITERATURE**

1. Kvasnička, P. i Domitrović, D. (2007): Mehanika tla, Interna skripta, Rudarsko - geološko - naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu
2. Vlasta Szavits – Nosan: Konsolidacija tla, Interna skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
3. Zlatović, S. (2006): Uvod u mehaniku tla, Udžbenik Tehničkog veleučilišta u Zagrebu
4. Roje - Bonacci, T. (2003): Mehanika tla, Sveučilište u Splitu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Izdavač: Dugi rat

## 6. POPIS SLIKA

Slika 1. Nastanak tla

Slika 2. Sastav tla

Slika 3. Fazni dijagram tla (*V. Szavits Nossan*)

Slika 4. AC klasifikacija tla

Slika 5. Granulometrijski dijagram (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 6. Stanja koherentnog tla s povećanjem vlažnosti (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 7. Dijagram plastičnosti

Slika 8. Prikaz početnih i dodatnih naprezanja u tlu (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 9. a) Skica početnih i dodatnih naprezanja za rješavanje jednadžbe konsolidacije, u smjeru osi z, b) prikaz promjene u vremenu vertikalnih totalnih naprezanja, c) porni tlakovi i efektivna naprezanja (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 10. Grafičko rješenje jednadžbe konsolidacije (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 11. Dijagram mjerenja vremenskog toka slijeganja u edometru i odreivanje  $c_v$ -a prema Casagrandeu (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 12. Dijagram mjerenja vremenskog toka slijeganja u edometru i odreivanje  $c_v$ -a prema Tayloru (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 13. Shema edometra (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 14. Shematski prikaz faza edometarskog pokusa (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 15. a) Dijagram slijeganja uzorka u vremenu, b) edometrski dijagram (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 16. Promjena visine edometarskog uzorka za prvi stupanj opterećenja (*Kvasnička i Domitrović, 2007.*)

Slika 17. Neporemećeni uzorak tla

Slika 18. Odreivanje gustoće čestica tla u laboratoriju

Slika 19. Odreivanje granice tečenja pomoću konusnog penetrometra

Slika 20. Dijagram tečenja

Slika 21. Valjčići za odreivanje granice plastičnosti

Slika 22. Dijagram plastičnosti

Slika 23. Priprema uzorka za areometeiranje

Slika 24. Areometeiranje

Slika 25. Klasični edometar s ugrađenim uzorkom

Slika 26. Uzorak nakon pikusa u edometru

Slika 27. Dijagram koeficijenta konsolidacije za svaki inkrement opterećenja

Slika 28. Dijagram za srednje vrijednosti koeficijenta konsolidacije

## 7.POPIS TABLICA

Tablica 1. USCS klasifikacija tla

Tablica 2. Granulometrijski sastav tla

Tablica 3. Klasificiranje koherentnih materijala prema plastičnosti

Tablica 4. Indeks konzistencije za prahove i gline (laboratorijska podjela)

Tablica 5. Vrijednosti za  $U$  i  $T_v$ , za slučaj konstantnog opterećenja

Tablica 6. Dobiveni rezultati zatečene vlažnosti uzorka

Tablica 7. Gustoća čestica tla za ispitivane uzorke

Tablica 8. Dobivene vrijednosti granica tečenja, granica plastičnosti i klasifikacija uzorka tla

Tablica 9. Dobivene vrijednosti koeficijenta konsolidacije,  $c_v$ -a, prema Taylor-ovoj metodi

Tablica 10. Dobivene vrijednosti koeficijenta konsolidacije,  $c_v$ -a, prema Casagrande-ovoj metodi

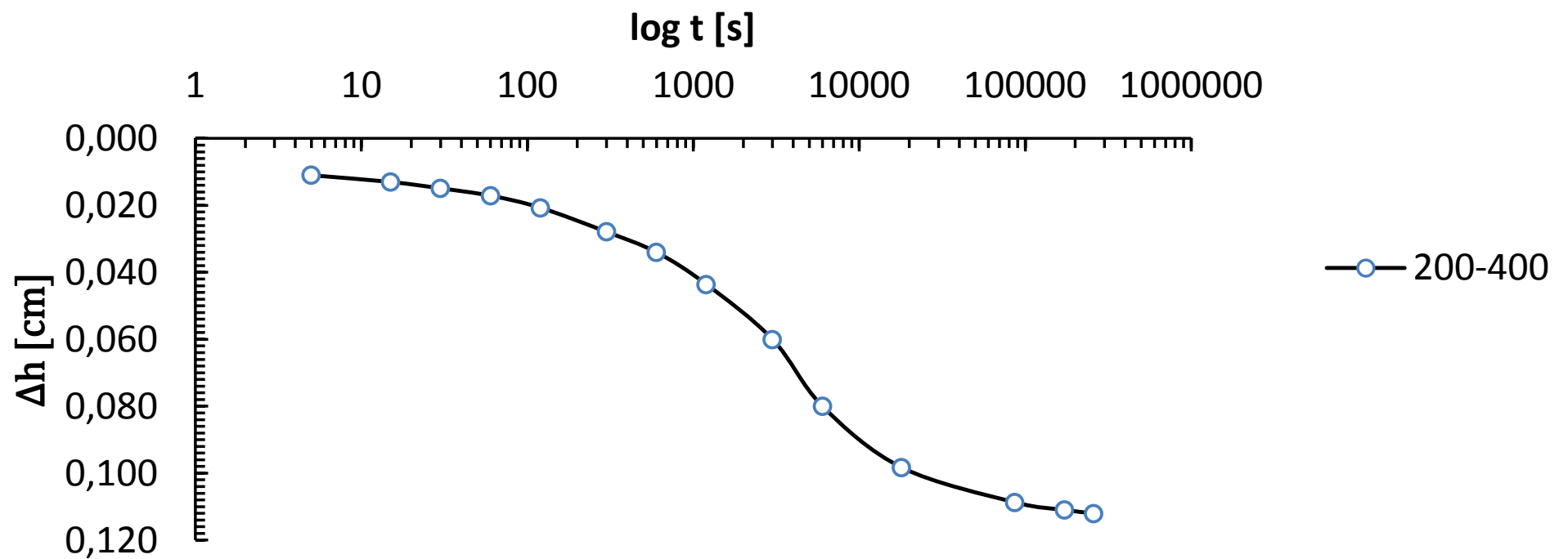
Tablica 11. Dobivene srednje vrijednosti koeficijenta konsolidacije za svaki ispitivani uzorak



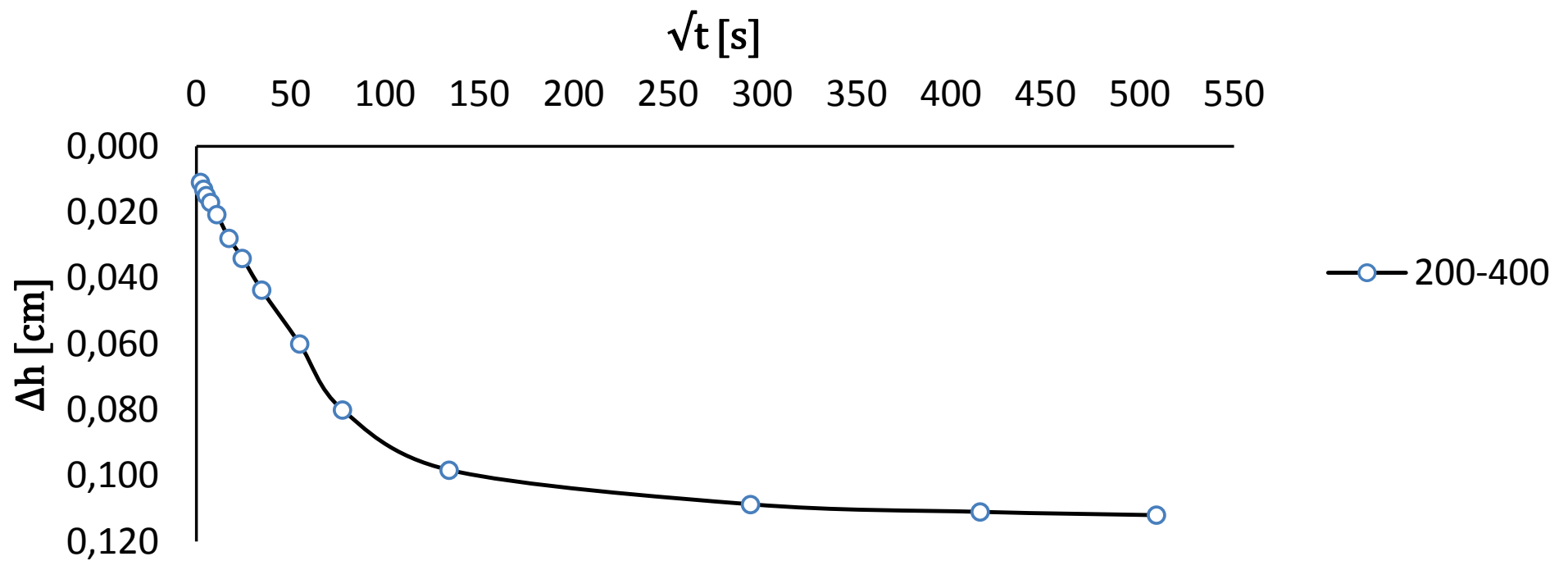
## **8.POPIS PRILOGA**

Prilog 1.Konsolidacijske krivulje

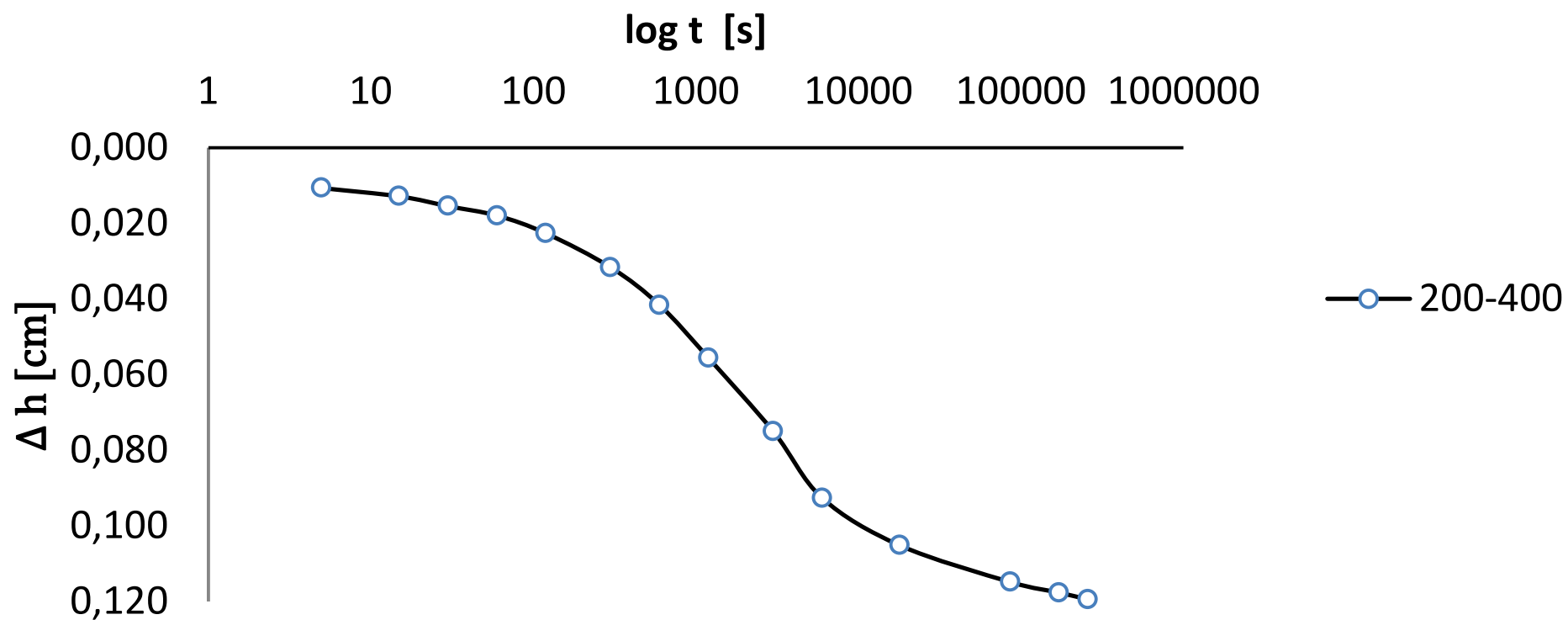
# U1 - neporemećeno stanje



# U1 - neporemećeno stanje



# U1 - poremećeno stanje



# U1 - poremećeno stanje

