Određivanje deformabilnosti tla u edometru

Gavez, Bernard

Undergraduate thesis / Završni rad

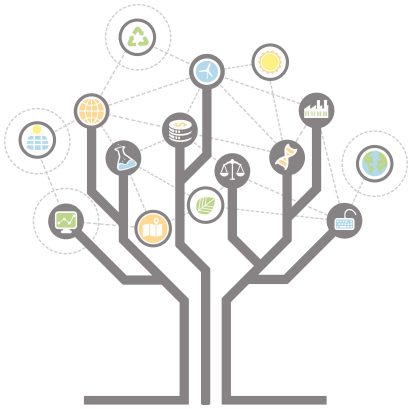
2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:095025

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Određivanje deformabilnosti tla u edometru

Gavez, Bernard

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:095025

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-10-27**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

BERNARD GAVEZ

ODREĐIVANJE DEFORMABILNOSTI TLA U EDOMETRU

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

ODREĐIVANJE DEFORMABILNOSTI TLA U EDOMETRU

KANDIDAT:

BERNARD GAVEZ

MENTOR:

prof.dr.sc. STJEPAN STRELEC

NEPOSREDNI VODITELJ:

DAMIR ŠTUHEC, dipl. ing. geot.

VARAŽDIN, 2018.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

ODREĐIVANJE DEFORMABILNOSTI TLA U EDOMETRU

(naslov završnog rada)

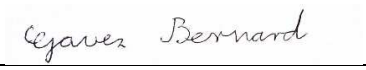
rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof. dr. sc. Stjepana Streleca.**

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, 06.09.2018.

Bernard Gavez

(Ime i prezime)



(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Ime i prezime: Bernard Gavez

Naslov rada: Određivanje deformabilnosti tla u edometru

Edometar je laboratorijski uređaj za mjerenje deformabilnosti (stišljivosti) uzorka tla pod djelovanjem vertikalnog opterećenja pri čemu je spriječena bočna deformacija uzorka. Edometarskim pokusom utvrđuju se konsolidacijska svojstva tla te se dobiva krivulja vremenskog toka slijeganja kao vrlo važan podatak u proračunu 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 opisan je edometarski pokus. Cilj ovog rada bio je odrediti deformabilna svojstva za dva različita uzorka koherentnog tla. Ispitivanje uzoraka i njihovi rezultati će biti opisani i prikazani u praktičnom dijelu ovoga rada.

Ključne riječi: Tlo, slijeganje, konsolidacija, edometar

Sadržaj

1. UVOD **1**
2. OSNOVNA SVOJSTVA TLA **1**
2.1. Trofazni karakter tla 2
2.2. Fazni odnosi 2
2.2.1. Volumni odnosi 3
2.2.2. Maseni odnosi 5
2.3. Klasifikacija tla 9
2.3.1. Granulometrijski sastav 11
2.3.2. Atterbergove granice ili granice konzistencije 11
3. SLIJEGANJE TLA **13**
3.1. Naprezanja i deformacije u tlu 13
3.2. Slijeganje tla 14
3.3. Edometar 15
3.3.1. Edometarski model tla 17
4. PRAKTIČNI DIO **19**
4.1. Određivanje zatečene vlažnosti uzoraka 19
4.2. Ispitivanje u edometru (edometarski pokus) 20
4.3. Rezultati edometarskog testa 22
4.3.1. Edometarski dijagrami 25
4.3.1.1. Izračunavanje OCR-a za ispitivane uzorke 27
4.3.2. Konsolidacijske krivulje slijeganja 29
4.3.2.1. Određivanje c_v-a ispitivanih uzoraka prema Casagrandeovoj metodi 33
4.3.2.2. Određivanje c_v-a ispitivanih uzoraka prema Taylorovoj metodi 34
5. ZAKLJUČAK **37**
6. LITERATURA **39**
Popis slika **40**
Popis tablica **42**

1. UVOD

Tlo je nastalo kao posljedica rastrošbe ili trošenja Zemljine kore pod utjecajem atmosferilija. Kao što voda kruži u prirodi, tako se isto može promatrati kruženje stijena koje tvore Zemljinu koru.

Očvrsla stijenska masa onog trenutka kada se pojavi na površini Zemljine kore, dolazi pod utjecaj atmosferilija. Atmosferilije je skupno ime za čimbenike koji utječu na rastrošbu stijenske mase, a što je početak stvaranja tvorevine koja se naziva tlo. Najčešća podjela čimbenika rastrošbe je na:

mehaničke čimbenike:	**kemijske čimbenike**:
- tektonske sile	- oksidacija
- voda	- karbonizacija
- led	- hidratacija
- abrazija	- desilikacija
- vegetacija	- otapanje

Rastrošbom se stijena više ili manje usitni, a djelomično se izmjeni i kemijski sastav osnovnih kristala. Ovisno o kristalografiji, pojedine stijene su više ili manje podložne rastrošbi.

Nakon rastrošbe slijedi **prijenos** sitnijih čestica stijene (transport sitnijih fragmenata omogućuju: gravitacija, voda, vjetar i led) te na kraju taloženje transportiranih čestica. [1]

2. OSNOVNA SVOJSTVA TLA

Tlom se bave razne struke (geologija, mineralogija, rudarstvo, graditeljstvo, agronomija, ...), i svaka razmatra “svoja” svojstva tla. Ovdje ćemo se zadržati prvenstveno na onim svojstvima tla koja su bitna za ono što bi se moglo nazvati *inženjerskim svojstvima tla*, tj. svojstvima koja su bitna za projektiranje i izvođenje građevinskih i rudarskih objekata i zahvata. [2]

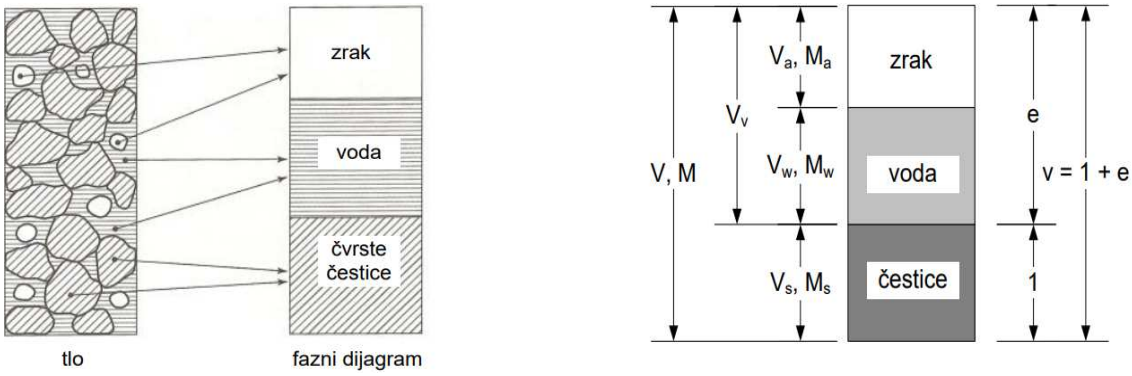
2.1. Trofazni karakter tla

Tlo je trofazni materijal. Sastoji se od zrna i čestica koja tvore skelet tla i od pora koje mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom (za pore će se koristiti indeks v – od engleskog „voids“, šupljine). Tri faze koje promatramo su zrna i čestice, koje ćemo ubuduće zvati čvrstim česticama (indeks s – od engleskog „solids“, čvrste tvari), voda (indeks w – od engleskog „water“) i zrak (indeks a – od engleskog „air“). [3]

2.2. Fazni odnosi

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 jednostavno možemo definirati svojstva tla, koja su neophodna za analizu njegova ponašanja. [3]

Uvodi se tzv. fazni dijagram uz pomoć kojega se kvantificiraju jedinični odnosi volumena i masa u uzorku tla. Fazni dijagram prikazan je na slici 1.



Slika 1. Fazni dijagram tla i oznake volumena i masa [3]

Oznake na slici su:

- V_a – volumen zraka u porama
- M_a – masa zraka u porama
- V_w – volumen vode u porama
- M_w – masa vode u porama

- V_s – volumen čvrstih čestica - M_s – masa čvrstih čestica

- V_v – volumen pora

- *e* – koeficijent pora

- V ≡ ν = 1 + e –> volumen

2.2.1. Volumni odnosi

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

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

gdje je: *V* – ukupan volumen

V_s – volumen čvrstih čestica u tlu

V_v – volumen pora

Iz odnosa volumena definiramo tri svojstva tla: to su *koeficijent pora e*, *stupanj zasićenosti* ili *saturiranosti tla* S_r i *porozitet n*.

Koeficijent pora (*e*) predstavlja omjer volumena pora i volumena čvrstih čestica. Koeficijent pora je bezdimenzionalna veličina. Izražava se pomoću decimalnog broja, koji može biti i veći od 1. [1]

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

gdje je: *e* – koeficijent pora

V_v – volumen pora

V_s – volumen čvrstih čestica u tlu

Stupanj zasićenosti tla (S_r) predstavlja omjer volumena vode u porama i volumena pora. Pokazuje koliki je postotak pora ispunjen vodom. Raspon mu je određen ispunjenošću pora vodom, $0 \leq S_r \leq 1$, ili u postocima.
Ako je $S_r = 0$, tlo je suho. Ako je $S_r = 100$ %, pore u tlu su u potpunosti ispunjene vodom, pa kažemo da je tlo potpuno zasićeno ili potpuno saturirano. Ako je $0 < S_r < 100$ %, pore su ispunjene vodom i zrakom i kažemo da je tlo djelomično zasićeno ili parcijalno saturirano. [3]

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} * 100 \qquad (3)$$

gdje je: S_r – stupanj zasićenosti [%]

V_w – volumen vode u porama

V_v – volumen pora

Porozitet (n) predstavlja omjer volumena pora i ukupnog volumena tla. Izražava se u postocima. [1]

$$n = \frac{V_v}{V} * 100 \qquad (4)$$

gdje je: n – porozitet [%]

V_v – volumen pora

V – ukupni volumen tla

Porozitet (n) i koeficijent pora (e) su međusobno zavisne veličine. Njihova veza dobije se iz izraza:

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{1 + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{e}{1+e} * 100 \qquad (5)$$

$$n = \frac{e+1}{e} * 100 \quad (6)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (7)$$

gdje je: *n* – porozitet

e – koeficijent pora

V_v – volumen pora

V_s – volumen čvrstih čestica tla

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. [3]

2.2.2. Maseni odnosi

Iz masenih odnosa mogu se definirati tri svojstva tla, a to su: vlažnost *w*, gustoća *ρ*, i obujamska težina *γ*. U mehanici tla je uobičajeno da se umjesto mase koristi težina i to obujamska i specifična. [2]

Vlažnost (*w*) se definira kao odnos između mase vode u uzorku i mase čvrstih čestica u uzorku tla. Vlažnost se izražava u postocima.

$$w = \frac{m_w}{m_s} * 100\ [\%] \quad (8)$$

gdje je: *w* – vlažnost

m_w – masa vode

m_s – masa čvrstih čestica

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.

Budući da su brojnik i nazivnik u izrazu (8) međusobno nezavisne veličine, vrijednost vlažnosti može biti veća od 100 %. Pogodnost ovog svojstva očituje se u jednostavnosti njegovog određivanja. Kako bi se odredila vlažnost uzorka u laboratoriju, uzorak je najprije potrebno izvagati (odredi mu se masa m). Zatim se osuši u peći na 105±5 °C do stalne mase, pa se ponovo izvaže da bi se dobila masa suhog uzorka m_d, koja je jednaka masi čvrstih čestica m_s u uzorku. Iz toga slijedi izraz (9) koji pokazuje da je razlika mase vlažnog i mase suhog uzorka tla jednaka masi vode u uzorku [3].

$$m_w = m - m_s \qquad (9)$$

gdje je: m – masa vlažnog uzorka

m_w – masa vode

m_s – masa čvrstih čestica = m_d – masa suhog uzorka

Gustoću u mehanici tla definiramo za pojedine faze, osim zraka, koji ima zanemarivu masu za cijeli element tla. Tako definiramo gustoću vode ρ_w i gustoću čvrstih čestica ρ_s:

Gustoća vode (ρ_w):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \ [\text{g/cm}^3] \ ; \ [\text{kg/m}^3] \qquad (10)$$

gdje je: ρ_w – gustoća vode

m_w – masa vode

V_w – volumen vode

Gustoća čvrstih čestica tla (ρ_s):

$$\rho_S = \frac{m_S}{V_S} \text{ [g/cm}^3\text{] ; [kg/m}^3\text{]} \qquad (11)$$

gdje je: ρ_s – gustoća čvrstih čestica tla

m_s – masa čvrstih čestica

V_s – volumen čvrstih čestica

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.

Gustoća suhog tla, ρ_d je omjer mase čvrstih čestica i ukupnog volumena elementa tla.

$$\rho_d = \frac{m_S}{V} \text{ [g/cm}^3\text{] ; [kg/m}^3\text{]} \qquad (12)$$

gdje je: ρ_d – gustoća suhog tla

m_d – masa čvrstih čestica

V – ukupni volumen

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

Ako gustoću uvrstimo u jednadžbu s ostalim jediničnim veličinama dobijemo korisne izraze za fazne odnose:

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

gdje je: ρ – gustoća

ρ_s – gustoća čvrstih čestica tla

ρ_d – gustoća suhog tla

w – vlažnost

e – koeficijent pora

Specifična gustoća (G_s), može se definirati izrazom:

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \text{ [1]} \qquad (14)$$

gdje je: ρ_s – gustoća čvrstih čestica tla

ρ_w – gustoća vode

Pomoću prethodnog izraza može se odrediti stupanj zasićenosti tla:

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

Obujamsku težinu γ 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 m/s^2, obujamsku težinu tla dobijemo iz izraza: [3]

$$\gamma = g \cdot \rho = \frac{m \cdot g}{V} \text{ [kN/m}^3\text{]} \qquad (16)$$

gdje je: γ – jedinična težina

g – ubrzanje sile teže (gravitacija, g = 9,81m/s^2)

ρ – gustoća tla

m – masa uzorka

V – volumen uzorka

2.3. Klasifikacija tla

Pokazalo se da se tla temeljem nekih svojstava mogu svrstati u određene grupe, koje se nazivaju razredbene grupe. Razredba se vrši temeljem niza pokusa [1]. Zato je razvijeno nekoliko različitih klasifikacija tla u odnosu na te grube pokazatelje. Najčešće se u praksi koristi jedinstvena klasifikacija tla (USCS – Unified Soil Classification System) koja je prikazana u tablici 1.

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 tla su ona kod kojih je više od 50 % čvrstih čestica veće od 0,06 *mm*. Sitnozrnata tla su ona kod kojih je više od 50 % čvrstih čestica manje od 0,06 *mm*. [3]

Tablica 1. USCS klasifikacija [3]

<table>
<tr><th colspan="3">GLAVNA PODJELA</th><th>SIMBOL GRUPE</th><th>OPIS GRUPE</th><th colspan="2">KLASIFIKACIJSKI KRITERIJ ZA KRUPNOZRNATA TLA</th></tr>
<tr><td rowspan="6">Krupnozrnata tla (više od polovice materijala s zrncima većim od 0.06 mm)</td><td rowspan="3">Šljunak (više od polovice krupnih frakcija s zrnima većim od 2 mm)</td><td rowspan="2">Čisti šljunak (malo ili ništa sitnih frakcija)</td><td>GW</td><td>Dobro graduiran šljunak, mješavina šljunka i pijeska, malo ili ništa sitnih čestica</td><td colspan="2">$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$
$C_c = 1 < \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} < 3$</td></tr>
<tr><td>GP</td><td>Slabo graduiran šljunak, mješavina šljunka i pijeska, malo ili ništa sitnih čestica</td><td colspan="2">Sve gradacije koje ne dozvoljavaju kriteije za GW</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Šljunak sa sitnim česticama (znatna količina sitnijih čestica)</td><td>GM</td><td>Prašinasti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i praha</td><td>Atterbergove granice ispod A-linije ili I_p<4</td><td rowspan="2">Iznad A-linije sa 4<I_p<7 su granični slučajevi koji zahtjevaju uporabu dvojnih simbola</td></tr>
<tr><td>GC</td><td>Glinoviti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i mulja</td><td>Atterbergove granice iznad A-linije ili Ip>7</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Pijesak (više od polovicekrupnih frakcija s zrnima manjim od 2 mm)</td><td rowspan="2">Čisti pijesak (malo ili ništa sitnih čestica)</td><td>SW</td><td>Dobro graduirani pijesci, šljunkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica</td><td colspan="2">$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$
$C_c = 1 < \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} < 3$</td></tr>
<tr><td>SP</td><td>Slabo graduirani pijesci, šljunkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica</td><td colspan="2">Sve gradacije koje ne dozvoljavaju kriterije za SW</td></tr>
<tr><td>Pijesak sa sitnim česticama (znatna količina sitnijih čestica)</td><td>SM</td><td>Prašinasti pijesci, mješavina pijeska i praha</td><td>Atterbergove granice ispod A-linije ili Ip<4</td><td>Iscrtane granice u zoni vrijednosti s 4<Ip<7 su granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>SC</td><td>Glinoviti pijesci, mješavina pijeska i praha</td><td>Atterbergove granice iznad A-linije ili Ip>7</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="5">Sitnozrnata tla (više od polovice materijala s zrnima manjim od 0.06 mm)</td><td colspan="2" rowspan="3">Prašina i glina (granica tečenja < 50)</td><td>ML</td><td>Neorganski prah i vrlo fini pijesci, kameno brašno, prašinasti i glinoviti pijesci ili glinovite prašine niske plastičnosti</td><td colspan="2" rowspan="3">- odrediti postotke pijeska i šljunka iz granulometrijske krivulje
- u ovisnosti o postotcima sitnih čestica (frakcije <0.06 mm), krupnozrnata tla su klasificirana:
- Manje od 5% : GW, GP, SW, SP
- Od 5% do 12% : granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola</td></tr>
<tr><td>CL</td><td>Neorganske gline niske do srednje plastičnosti, šljunkovite gline, pjeskovite gline, muljevite gline, mršave gline</td></tr>
<tr><td>OL</td><td>Organski prah i organske prašinaste gline niske plastičnosti</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">Prašina i glina (granica tečenja > 50)</td><td>MH</td><td>Neorganski prah, tinjčasti i dijatomejski materijali</td><td colspan="2" rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>CH</td><td>Neorganske gline visoke plastičnosti, masna glina</td></tr>
<tr><td>OH</td><td>Organske gline srednje do visoke plastičnosti, organski prah</td></tr>
<tr><td colspan="2">Visoko organska tla</td><td>PT</td><td>Treset i druga visoko organska tla</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

2.3.1. Granulometrijski sastav

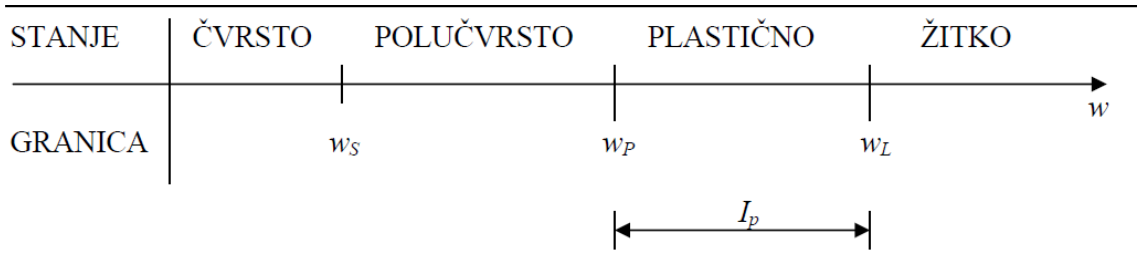
Granulometrijski sastav je raspodjela čestica tla po veličini, izražena u postotku mase. Poznavanjem granulometrijskog sastava tla mogu se ocijeniti njegova fizikalna ili mehanička svojstva. Kao što je već prije bilo spomenuto, tlo se dijeli u razredbene grupe prema dominantnoj veličini zrna te ih klasificiramo kao krupnozrnate (pijesak i šljunak), i sitnozrnate (prah i glina). [2]

Ukoliko je tlo sastavljeno isključivo od krupnozrnatih materijala – čestice veće od 0,06 mm provodi se analiza sijanjem. Za sijanje se koristi niz (garnitura) sita standardnih dimenzija, čiji se otvori smanjuju na svakom slijedećem situ (odozgo prema dolje). [2]

Tlo, koje je sastavljeno od sitnozrnog 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 uslijed taloženja čestica različitih promjera u vremenu, u poznatoj tekućini. Postupak se naziva hidrometrijska analiza ili areometriranje.
Tlo, koje je sastavljeno od krupnih i sitnih čestica podvrgava se mokrom postupku sijanja da bi se iz uzorka isprale čestice tla manje od 0,06 mm. [1]

2.3.2. Atterbergove granice ili granice konzistencije

Granice konzistencije su vlažnosti koje sitnozrnati (koherentni) materijal ima u određenom trenutku. Fizikalna svojstva takvih materijala mijenjaju se s promjenom sadržaja vode. Zato se njihovo stanje definira preko granica konzistentnih stanja, koje je, na temelju iskustva, postavio švedski geokemičar Albert Atterberg, pa ih zovu i Atterbergove granice. Danas važeće granice konzistencije prikazane su na slici 2. [2]



Slika 2. Konzistentna stanja koherentnog tla sa povećanjem vlažnosti [2]

Granice konzistencije su:

Granica stezanja (w_S), (engl. „*shrinkage limit*“, raspon vrijednosti do 30 *%)* je ona vlažnost pri kojoj se postignuti volumen uzorka ne smanjuje daljnjim sušenjem.

Granica plastičnosti (w_P), (engl. „*plasticity limit*“, raspon vrijednosti od 0 % od 100 %, uglavnom manje od 40 %) je ona minimalna vlažnost kod koje se uzorak tla još može plastično deformirati bez da na površini nastanu pukotine.

Granica tečenja (w_L), (engl. „*liquid limit*“, raspon vrijednosti od 0 % do 100 %, uglavnom manja od 100 %) je ona minimalna vlažnost kod koje se pri malom poremećaju tlo počne ponašati kao žitka masa ili vrlo gusta tekućina. [1]

Poznavanjem gore spomenutih granica koherentan materijal možemo klasificirati u određene skupine prema plastičnosti. Za klasificiranje materijala prema plastičnosti, potrebno je odrediti i tzv. *indeks plastičnosti* [2].

Indeks plastičnosti, I_P:

$$I_P = w_L - w_P \quad [\%] \qquad (17)$$

gdje je: I_P – indeks plastičnosti

w_L – granica tečenja

w_P – granica plastičnosti

Tablica 2. Klasificiranje koherentnih materijala prema plastičnosti [2]

stupanj plastičnosti	granica tečenja u [%]	indeks plastičnosti, I_P
neplastično	-	< 12,0
nisko plastično	< 12,0	12,0 do 25,0
srednje plastično	30,0-50,0	25,0 do 40,0
visoko plastično	>50,0	>40,0

3. SLIJEGANJE TLA

3.1. Naprezanja i deformacije u tlu

Naprezanja u tlu najčešće nastaju od vlastite težine tla i dodatnog opterećenja (od građevine), odnosno rasterećenja (nakon iskopa).

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

Deformacije ovise o promjeni stanja naprezanja, ali i o vrsti i svojstvima tla u kojima ta promjena nastaje. [2]

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.

Razlika između ukupnog naprezanja i pornog tlaka zove se efektivno naprezanje. [1]

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \qquad (18)$$

gdje je: σ'_v – efektivno naprezanje

σ_v – ukupno naprezanje

u – porni tlak

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} \qquad (19)$$

gdje je: ε_V – vertikalna relativna deformacija

ΔH – relativna promjena visine

H_0 – početna visina

3.2. Slijeganje tla

Slijeganje je vertikalni pomak površine tla (ili temeljne konstrukcije), koji nastaje pod djelovanjem opterećenja. Slijeganje je najčešće uzrokovano dodatnim opterećenjem, no može se javiti i uslijed drugih pojava: zbog sniženja razine podzemne vode, puzanja, dinamičkih efekata i sl. Procjena slijeganja je često otežana zbog nehomogenosti tla, složenih odnosa naprezanja i deformacija te zbog teškog određivanja reprezentativnih parametara deformabilnosti tla. To je proces kod kojeg uslijed promjene naprezanja dolazi do premještanja čestica tla i smanjenja volumena pora u tlu na račun istjecanja vode iz tla.

U krupnozrnatom tlu, gdje su veliki koeficijenti vodopropusnosti, brzina istjecanja vode iz pora prati brzinu porasta opterećenja, pa u ovim vrstama tla nema vremenskog zaostajanja smanjenja pornog tlaka za porastom opterećenja. Taj se proces u nekoherentnim tlima događa gotovo trenutno.

Kada se slijeganje odvija u nekom vremenskom razdoblju, zbog sporog istjecanja vode, odnosno male vodopropusnosti tla, ta se pojava naziva proces konsolidacije.

Zbog toga je određivanje slijeganja u mehanici tla ispravnije nazvati procjenom (prognozom) nego proračunom.

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

$$s_t = s_i + s_c + s_s \qquad (20)$$

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

Primarno konsolidacijsko slijeganje je posljedica promjene i oblika i volumena uslijed istjecanja viška vode iz pora, u kojoj opada porni tlak te rastu efektivna naprezanja. Primarna konsolidacija završava kada sav višak tlaka vode padne na nulu i efektivna naprezanja u potpunosti preuzmu vanjsko opterećenje. Taj proces je izrazito spor 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.

Sekundarno konsolidacijsko slijeganje 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]

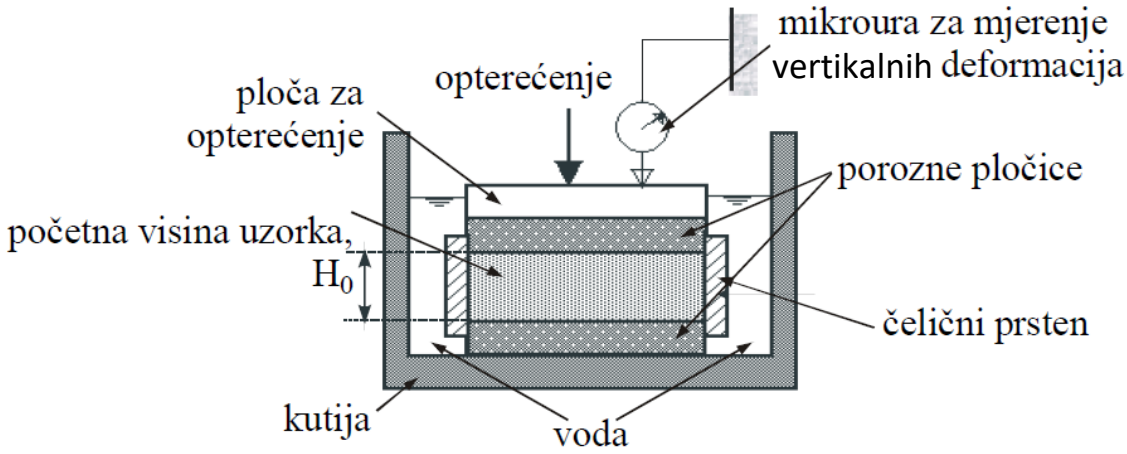
U slučajevima gdje je tlo horizontalno uslojeno (vrlo čest slučaj) za procjenu slijeganja tla koristi se tzv. edometarski model tla. Naziv edometarski model potječe od edometra, laboratorijskog uređaja za mjerenje deformabilnosti tla. [4]

3.3. Edometar

Edometar je laboratorijski uređaj za mjerenje deformabilnosti (stišljivosti) uzorka tla pod djelovanjem vertikalnog opterećenja pri čemu je spriječena bočna deformacija uzorka. [4]

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. [3]

Na slici 3. prikazana je shema edometra [1].



Slika 3. Shema edometra

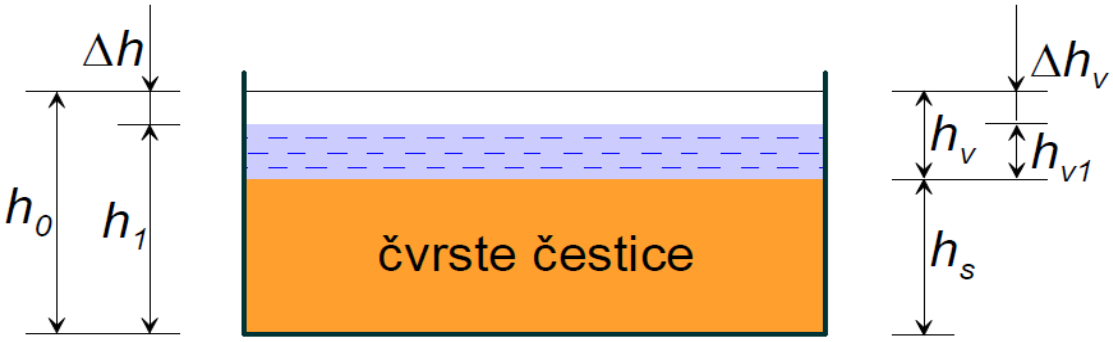
Deformabilnost se ispituje tako da se uzorak tla optereti vertikalno, preko ploče za opterećenje, a porozne pločice s gornje i donje strane omogućuju dreniranje uzorka. Zbog opterećivanja, u pornoj se vodi uzorka poveća tlak i voda istječe u prostor oko uzorka. Stanje deformacija u uzorku je jednoosno zbog spriječenog bočnog širenja. 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). Stoga se ovaj uređaj i pokus koji on omogućava, izvodi vrlo često. Ne samo što je vrlo jednostavan, već i prilično dobro opisuje terenske uvjete stanja deformacija pod utjecajem promjene naprezanja u vertikalnom smjeru.

Tijekom edometarskog pokusa mijenja se opterećenje uzoraka, a prati se njihova vertikalna deformacija u vremenu, pod utjecajem svakog pojedinog stupnja opterećenja. Uzorak tla se opterećuje postupno i to obično tako da je pri opterećenju, porast opterećenja jednak prethodnom ukupnom opterećenju uzorka, a pri rasterećenju da je jednak polovici prethodnog opterećenja. [1]

3.3.1. Edometarski model tla

U mehanici tla pretpostavljamo da su čvrste čestice tla i voda u porama nestišljivi. To znači da, uslijed vanjskog opterećenja, neće doći do promjene volumena čvrstih čestica tla ni vode u zatvorenoj posudi. Deformacije se u potpunosti realiziraju u porama tla, tako da se (za pozitivnu deformaciju) smanjuje njihov volumen. [3]

Budući da je spriječeno bočno širenje, promjena visine izravno je povezana s promjenom koeficijenta pora pa se uzorak može prikazati i kao na slici 4. Ovakav način prikazivanja nazivamo edometarski model tla. [2]



Slika 4. Promjena visine edometarskog uzorka za prvi stupanj opterećenja [2]

Početni koeficijent pora e_0 je:

$$e_0 = \frac{h_v}{h_s}\,, \qquad (21)$$

a koeficijent pora nakon slijeganja e_1 (pri čemu h_s ostaje konstantan):

$$e_1 = \frac{h_{v1}}{h_s} \qquad (22)$$

gdje je: h_v – početna visina pora

h_s – visina čvrstih čestica tla

h_{v1} – visina pora nakon slijeganja

Deformacija uzorka tla $\boldsymbol{\varepsilon}$ jednaka je:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_v}{h_0} = \frac{h_v - h_{v1}}{h_v + h_s} /: h_s \qquad (23)$$

Veza relativne deformacije $\boldsymbol{\varepsilon}$ i koeficijenata pora *e* dana je izrazom:

$$\varepsilon = \frac{e_0 - e_1}{e_0 + 1} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \qquad (24)$$

gdje je: Δ_{hv} – promjena visine uzorka (slijeganje)

h_0 – početna visina uzorka

Δe – promjena koeficijenta pora prije i nakon slijeganja

Kako promjena koeficijenta pora Δe odgovara promjeni vertikalnog naprezanja $\Delta\sigma_v$, iz toga konačno slijedi modul stišljivosti ili edometarski modul M_v : [2]

$$M_v = \frac{\Delta\sigma_v}{\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta e}(1 + e_0) \qquad (25)$$

Modul stišljivosti nije konstanta već se mijenja s promjenom opterećenja odnosno jedna vrijednost modula može se odrediti samo za jedan uski interval vertikalnog opterećenja (između dva inkrementa). Što je vrijednost modula veća, stišljivost tla je manja i obratno. [4]

Postoji još jedan zapis modula stišljivosti i to pomoću promjene visine uzorka Δh.

$$M_v = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta h} h_0 \qquad (26)$$

pri čemu je h_0 početna veličina uzorka. [2]

4. PRAKTIČNI DIO

Za potrebe ovog završnog rada trebalo je provesti određena ispitivanja na uzorcima tla. Ta ispitivanja bila su provedena u geotehničkom laboratoriju koji se nalazi u sklopu Zavoda za geotehniku Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Ispitivanja su rađena na dva različita uzorka jer je cilj bio prikazati te usporediti kako se dvije različite vrste tla ponašaju prilikom procesa konsolidacije. Uzorci tla potrebni za ovaj edometarski pokus bili su neporemećeni. To znači da su u najvećoj mogućoj mjeri zadržali svojstva koja je posjedovalo originalno tlo na terenu prije vađenja uzorka. Zbog toga je s njima potrebno pravilno i pažljivo rukovati, zapakirati ih i skladištiti u vlažnoj komori sve do ispitivanja.

4.1. Određivanje zatečene vlažnosti uzoraka

Zatečena vlažnost uzorka određuje se odmah nakon raspakiravanja uzorka tako da se dio odvoji za određivanje ovog svojstva. Odvojeni dio svakog uzorka natrga se na komadiće i stavi u prazne posudice kojima se prethodno odredi masa. Uzorak vlažnog tla izvaže se zajedno s pripadajućom posudicom te se zatim osuši u peći na 105±5 °C do stalne mase. Nakon sušenja uzorak se ponovo izvaže. Sada se može računski odrediti vlažnost uzorka. Prvo se izračunaju masa vode M_w i masa suhog uzorka M_d (izrazi 27 i 28). Iz toga je moguće odrediti zatečenu vlažnost uzorka w_0. (izraz 29).

$$M_w = M_{p_1} - M_{p_2} \tag{27}$$

$$M_d = M_{p_2} - M_p \tag{28}$$

$$w_0 = \frac{M_w}{M_d} * 100\% \tag{29}$$

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 – zatečena vlažnost

Tablica 3. Dobiveni rezultati zatečene vlažnosti uzoraka

Uzorak	Zatečena vlažnost w_0 [%]
Mekani uzorak	54,88
Tvrdi uzorak	19, 82

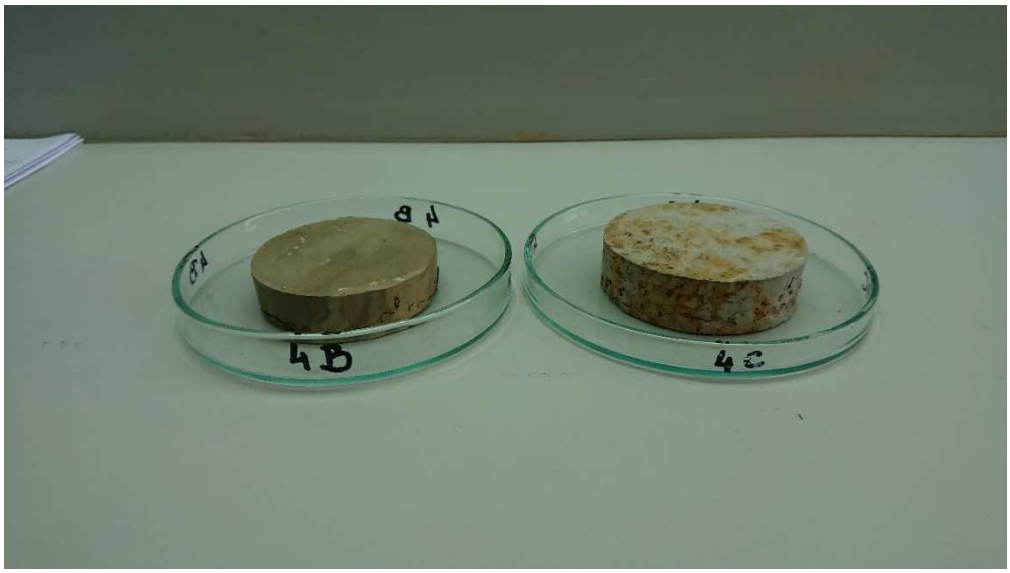
4.2. Ispitivanje u edometru (edometarski pokus)

Pokus se odvijao u dva klasična edometra u geotehničkom laboratoriju Geotehničkog fakulteta. Ispitivanje je bilo rađeno na dva različita neporemećena uzorka koherentnog tla.

Prije pokusa uzorak je bilo potrebno ugraditi u metalni prsten edometra. Uzorak se ugrađuje na način da se prsten okomito utiskuje u uzorak. Utiskivanje prstena u uzorak je potrebno izvesti pažljivo i bez zakretanja kako se uzorak ne bi poremetio. Višak materijala se odreže te se izravna površina s rubom prstena (s gornje i donje strane). Izvaže se masa edometarskog prstena sa uzorkom (masa edometarskog prstena je poznata) za određivanje prirodne vlažnosti uzorka. Ugrađivanje uzorka u prsten se radi zbog toga jer se time sprječavaju njegove bočne deformacije tijekom pokusa. Nakon ugrađivanja uzorka u prsten sa obje strane uzorka stavlja se filter papir koji odgovara promjeru prstena. Filter papir se

prije stavljanja u porozne pločice s obje strane lagano navlaži destiliranom vodom. S gornje i donje horizontalne površine uzorka postavimo porozne pločice da bi s obje strane uzorka bilo omogućeno dreniranje pošto je uzorak potpuno zasićen vodom. Nakon toga se prsten sa uzorkom i poroznim pločicama ugradi u edometar. Na vrh uzorka stavlja se metalna ploča preko koje se sistemom poluga nanosi opterećenje i koja omogućava da se opterećenje ravnomjerno preraspodijeli po uzorku. Opterećenje se prenosi centrično preko čelične kuglice postavljene na vrh metalne ploče i uređaja za prijenos sile. Na vrh metalne ploče postavi se senzor koji služi za očitavanje vertikalne deformacije uzorka, tzv. mikroura. Takav postupak vrijedi za oba dva uzorka koja su se ispitivala.

Nedugo nakon što se uzorci ugrade u edometar potrebno je očitati vertikalne deformacije zbog toga što, iz tehničkih razloga, već samo postavljanje prstena s uzorkom u edometar stvara opterećenje od 1,8 kPa.
Uzorke počinjemo opterećivati. Prema pravilu svako novo opterećenje na uzorak nanosi se svaka 24 h, no zbog toga što je kod mekanog uzorka slijeganje nakon 24 h bilo preveliko, novo opterećenje nanosilo se otprilike svakih 48 h. Na taj način omogućila se potpuna realizacija primarnog slijeganja koja je uvjet za slijedeći inkrement vertikalnog opterećenja.
Uzorci su se opterećivali u inkrementima: 1,8 – 50 kPa, 50 – 100 kPa, 100 – 200 kPa, 200 – 400 kPa. Vremena očitavanja vertikalne deformacije za svaki stupanj opterećenja bila su nakon: 5 sek, 15 sek, 30 sek, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 50 min, 1 h i 40 min, 5 h i nakon 24 h (za mekani uzorak i nakon 48 h).
Kao što je već prije bilo napisano, nakon nanošenja dovoljnog broja inkremenata opterećenja, uzorke je potrebno rasteretiti. Ukupno vrijeme rasterećenja uzoraka se provodi u dekrementima i traje oko 24 sata. Nakon svakog smanjenja opterećenja očitava se vertikalna deformacija u određenim vremenskim razmacima sve dok se ne dođe do početnog opterećenja od 1,8 kPa. Radi potpune relaksacije, uzorci se ostave u edometru još 24 h te im se nakon toga očita vertikalna deformacija. Na kraju pokusa metalni prsten s uzorkom stavlja se u pećnicu na sušenje te se na već opisani način odredi prirodna vlažnost uzorka. (slika 4).



Slika 4. Uzorci nakon pokusa u edometru (lijevo – mekani uzorak, desno – tvrdi uzorak)

4.3. Rezultati edometarskog ispitivanja

U sljedećim tablicama (tablica 4. i tablica 5.) prikazani su podaci o uzorcima te određena svojstva ispitivanih uzoraka tla.

Tablica 4. Podaci i svojstva za mekani uzorak tla

Naziv uzorka: MEKANI UZORAK		
Dubina uzorka: 5,70 - 6,00 m	**RPV:** 2,50 m	
AC klasifikacija tla: Visokoplastična glina s organskim primjesama		
Priprema uzorka: Utiskivanje edometarskog prstena u neporemećeni uzorak		
Uvjeti ispitivanja: Uzorak potopljen kroz čitavo vrijeme ispitivanja		
	Prije ispitivanja	Nakon ispitivanja
Vlažnost uzorka w [%]	54,88	39,30
Koeficijent pora e	1,53530	1,06513
Stupanj zasićenosti S_r [%]	96,52	99,58
Masa vlažnog uzorka M **:**	126,95 g	
Gustoća uzorka ρ **:**	1,649 g/cm^3	
Procijenjena gustoća čvrstih čestica G_s**:**	2,7	
Obujamska težina uzorka γ **:**	16,18 kN/m^3	
Površina uzorka A:	38,485 cm^2	
Početna visina uzorka h_0:	2,00 cm	
Visina čvrstih čestica h_s:	0,78886 cm	

Tablica 5. Podaci i svojstva za tvrdi uzorak tla

Naziv uzorka: TVRDI UZORAK		
Dubina uzorka: 4,00 - 4,30 m	**RPV:** nema	
AC klasifikacija tla: Visokoplastična glina		
Priprema uzorka: Utiskivanje edometarskog prstena u neporemećeni uzorak		
Uvjeti ispitivanja: Uzorak potopljen kroz čitavo vrijeme isptivanja		
Napomena: U početku pokusa zamijećeno bubrenje uzorka		
	Prije ispitivanja	Nakon ispitivanja
Vlažnost uzorka *w* [%]	19,84	21,84
Koeficijent pora *e*	0,56408	0,56165
Stupanj zasićenosti S_r [%]	94,88	100
Masa vlažnog uzorka *M* **:**	159,21 g	
Gustoća uzorka ρ **:**	2,069 g/cm^3	
Procijenjena gustoća čvrstih čestica G_s**:**	2,7	
Obujamska težina uzorka γ **:**	20,29 kN/m^3	
Površina uzorka *A*:	38,485 cm^2	
Početna visina uzorka h_0:	2,00 cm	
Visina čvrstih čestica h_s:	1,27871 cm	

Za svako vrijeme očitavanja vertikalne deformacije potrebno je izračunati pripadajuću promjenu visine (slijeganje) te koeficijent pora uzoraka u tom trenutku. Isto tako, treba izračunati module stišljivosti po Δe i Δh za svaki inkrement opterećenja. To se radi na temelju već objašnjenog edometarskog modela tla koristeći izraze 21., 22., 25. i 26.

Ti rezultati prikazani su u tablici 6. i tablici 7.

Tablica 6. Izračunate promjene visine, koeficijenta pora te moduli stišljivosti po Δ*e* i Δ*h* za mekani uzorak

Proračun promjene visine, koeficijenta pora i modula stišljivosti – MEKANI UZORAK					
Inkrement opterećenja na uzorak [kPa]	Promjena visine Δ*h* [cm]	Visina uzorka $h = h_0 - \Delta h$ [cm]	Koef. pora $e = \frac{(h - h_s)}{h_s}$	Modul stišljivosti po Δ*e* [MPa]	Modul stišljivosti po Δ*h* [MPa]
1,8	0,0355	1,96450	1,49030	-	-
1,8 – 50	0,1136	1,85090	1,34630	0,8336	0,8335
50 – 100	0,0918	1,75910	1,22993	1,0081	1,0081
100 – 200	0,1156	1,64350	1,08339	1,5217	1,5217
200 – 400	0,1165	1,5270	0,93570	2,8213	2,8215
400 – 200	0,0066	1,53360	0,94407	-	-
200 – 100	0,0114	1,5450	0,95852	-	-
100 – 50	0,0115	1,55650	0,97310	-	-
50 – 1,8	0,0726	1,62910	1,06513	-	-

Napomena: razlike u vrijednostima modula stišljivosti računatih po Δ*e* i Δ*h* posljedica su zaokruživanja vrijednosti koeficijenta pora *e* u računu

Tablica 7. Izračunate promjene visine, koeficijenta pora te moduli stišljivosti po Δ*e* i Δ*h* za tvrdi uzorka

Proračun promjene visine, koeficijenta pora i modula stišljivosti – TVRDI UZORAK					
Inkrement opterećenja na uzorak [kPa]	Promjena visine Δ*h* [cm]	Visina uzorka $h = h_0 - \Delta h$ [cm]	Koef. pora $e = \frac{(h - h_s)}{h_s}$	Modul stišljivosti po Δ*e* [MPa]	Modul stišljivosti po Δ*h* [MPa]
1,8	0,0146	2,01460	0,57549	-	-
1,8 – 50	0,0020	2,01260	0,57393	48,6786	48,5519
50 – 100	0,0111	2,00150	0,56525	9,0664	9,0658
100 – 200	0,0215	1,98000	0,54844	9,3114	9,3093
200 – 400	0,0288	1,95120	0,52591	13,7456	13,7500
400 – 200	0,0038	1,95500	0,52888	-	-
200 – 100	0,0100	1,96500	0,53670	-	-
100 – 50	0,0099	1,97490	0,54445	-	-
50 – 1,8	0,0220	1,99690	0,56165	-	-

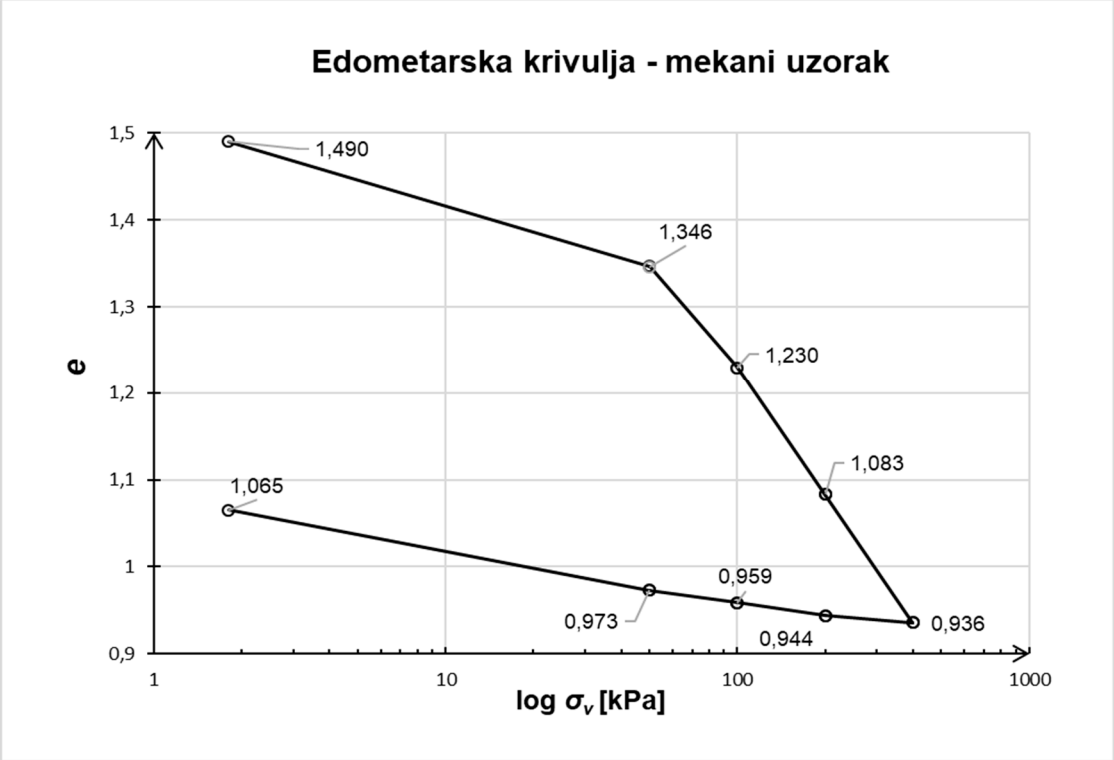
Napomena: razlike u vrijednostima modula stišljivosti računatih po Δ*e* i Δ*h* posljedica su zaokruživanja vrijednosti koeficijenta pora *e* u računu

Rezultati edometarskih pokusa prikazuju se u obliku edometarskog dijagrama i u obliku konsolidacijskih krivulja slijeganja uzorka tla u vremenu.

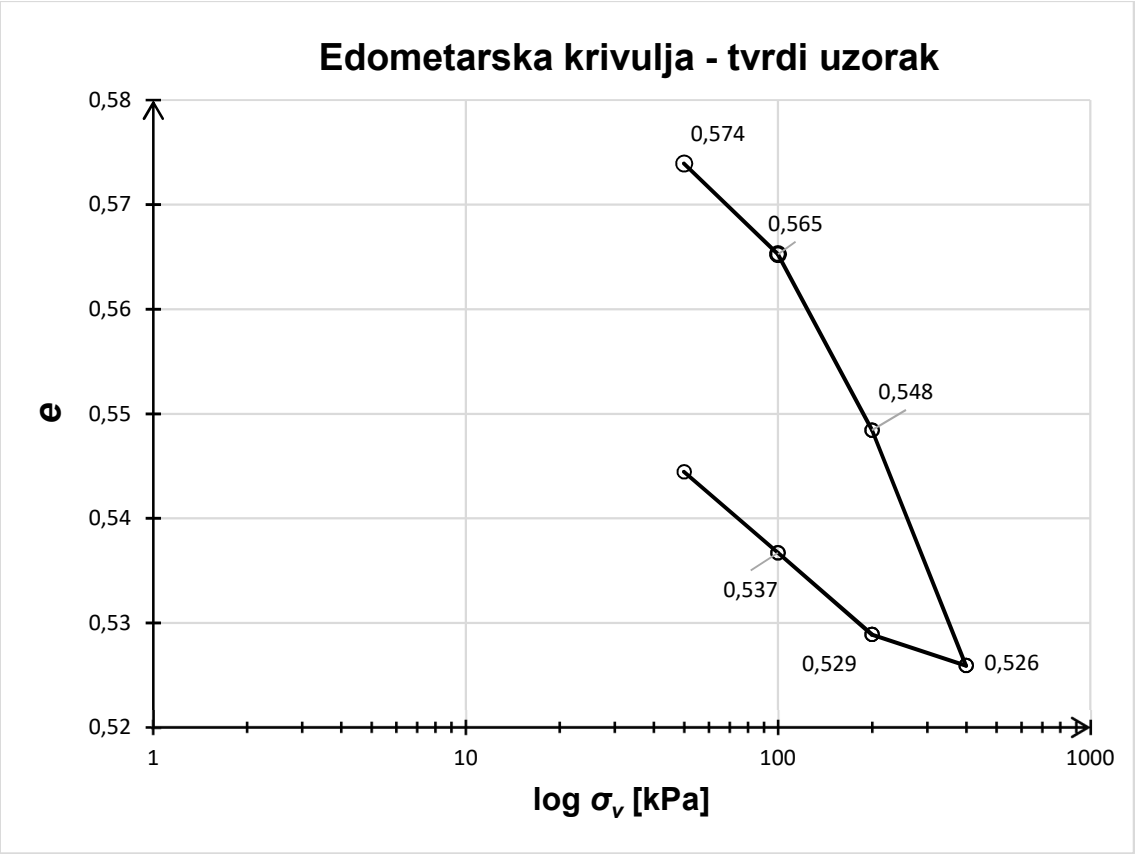
Edometarski dijagram prikazuje ovisnost koeficijenta pora o vertikalnom naprezanju na kraju svakog inkrementa opterećenja. Dijagram se obično prikazuje u polulogaritamskom mjerilu. Na logaritamskoj osi apscise označava se vrijednost opterećenja. Konsolidacijska krivulja slijeganja prikazuje vertikalni pomak metalne ploče (kape) edometra u vremenu tijekom jednog inkrementa opterećenja. Ona se obično prikazuje u polulogaritamskom mjerilu. Na logaritamskoj skali apscise označava se vrijednost vremena u minutama ili sekundama. Konsolidacijska krivulja može se prikazati i na način tako da se na os ordinata umjesto slijeganja označi promjena koeficijenta pora za određeni inkrement opterećenja.

4.3.1. Edometarski dijagrami

U ovom odlomku prikazani su edometarski dijagrami za mekani i tvrdi uzorak (slika 5. i slika 6.). Objašnjeni su svi podaci koje možemo dobiti na temelju analize krivulje edometarskog dijagrama.



Slika 5. Edometarska krivulja mekanog uzorka



Slika 6. Edometarska krivulja tvrdog uzorka

Iz ovih edometarskih dijagrama može se vidjeti da kod oba uzorka krivulja ima dvije grane. Početnu blaže nagnutu i završnu, strmiju. Blaži nagib krivulje ukazuje da je tlo pod trenutnim opterećenjem već bilo u svojoj geološkoj prošlosti. Strmiji nagib krivulje pokazuje područje naprezanja pod kojim je tlo prvi puta. Nakon preplavljivanja vodom kod vertikalnog opterećenja od 1,8 kPa došlo je do bubrenja tvrdog uzorka. Iz tog razloga početak edometarske krivulje počinje na 50 kPa.

Najveće naprezanje iz geološke prošlosti uzorka koje se naziva „naprezanje prekonsolidacije“ može se grafički odrediti iz edometarskog dijagrama. Odnos između naprezanja prekonsolidacije i geostatičkog naprezanja naziva se stupnjem prekonsolidacije ili OCR (OverConsolidation Ratio).

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \qquad (30)$$

gdje je: σ'_p – najveće efektivno vertikalno naprezanje u geološkoj prošlosti

σ'_{v0} – geostatičko efektivno 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. [1]

- u slučaju normalno konsolidiranog tla OCR će biti približno 1 (OCR ≈ 1),

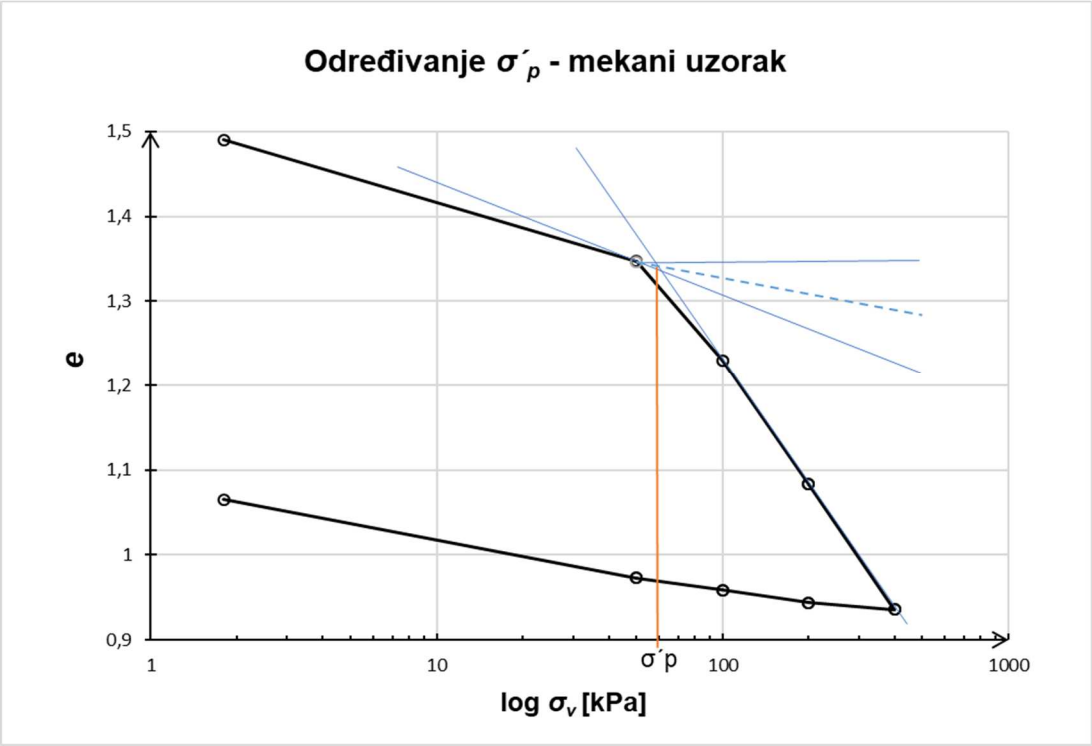
- ako je tlo prekonsolidirano OCR će biti veći od 1 (OCR > 1),

- a ako je podkonsolidirano OCR će biti manji od 1 (OCR < 1)

4.3.1.1. Izračunavanje OCR-a za ispitivane uzorke

Da bi mogli izračunati OCR treba nam najveće vertikalno naprezanje u prošlosti koje dobivamo pomoću edometarske krivulje te geostatičko naprezanje koje odgovara dubini s koje je uzorak izvađen.

- *Konstrukcija točke naprezanja prekonsolidacije*:
Točka prekonsolidacije konstruira se tako da se u točki najveće zakrivljenosti na dijagramu povuku horizontala, tangenta i simetrala kuta među njima. Na završni dio krivulje se povuče asimptota i gdje ona siječe simetralu kuta – tu je tražena točka. [2]
Na slici ispod prikazana je konstrukcija točke naprezanja prekonsolidacije za mekani uzorak. Zbog bubrenja tvrdog uzorka naprezanje prekonsolidacije nije prikazano jer je maksimalno opterećenje uzorka od 400 kPa u pokusu bilo nedovoljno za njegovu valjanu procjenu.



Slika 7. Konstrukcija točke naprezanja prekonsolidacije za mekani uzorak

Izračunavanje geostatičkog efektivnog naprezanja:

$$\sigma'_{v0} = \gamma \cdot z \qquad (31)$$

gdje je: γ – obujamska težina tla (za tlo ispod razine podzemne vode, koristi se uronjena obujamska težina: $\gamma' = \gamma - \gamma_w$)

z – dubina s koje je uzorak izvađen

Za mekani uzorak geostatičko efektivno naprezanje računa se kako slijedi:

$$\sigma'_{v0} = 16{,}18 \cdot 2{,}5 + 6{,}18 \cdot 3{,}35 = 61{,}2 \text{ kPa}$$

Geostatičko efektivno naprezanje za tvrdi uzorak računa se na način:

$$\sigma'_{v0} = 20{,}29 \cdot 4{,}15 = 84{,}2 \text{ kPa}$$

Radi jednostavnosti računa, korištena je obujamska težina vode γ_w=10 kPa kao i srednja dubina s koje je pojedini uzorak izvađen.

U sljedećoj tablici prikazana su izračunata geostatička naprezanja, prekonsolidacijska naprezanja i stupanj prekonsolidacije OCR za ispitivane uzorke tla.

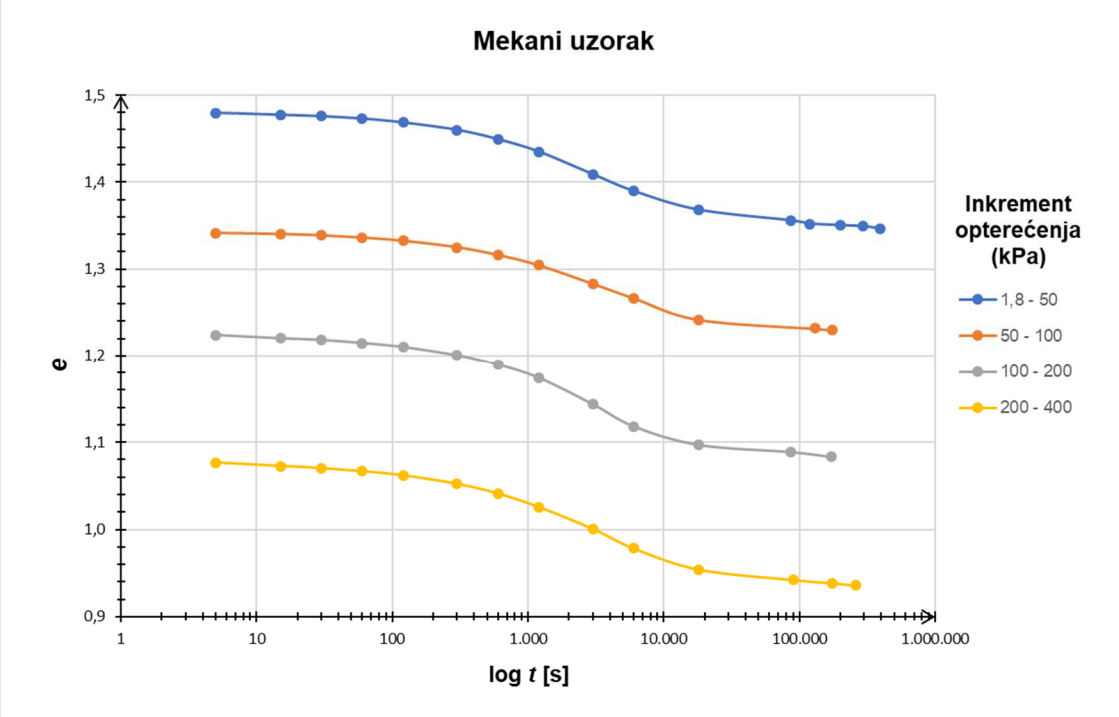
Tablica 8. Iznosi geostatičkih i prekonsolidacijskih naprezanja te OCR

	Geostatičko naprezanje [kPa]	Prekonsolidacijsko naprezanje [kPa]	Stupanj prekonsolidacije OCR
Mekani uzorak	61,2	≈ 60	≈ 0,98
Tvrdi uzorak	84,2	OCR nije bilo moguće valjano odrediti zbog bubrenja uzorka i premalog završnog vertikalnog naprezanja	

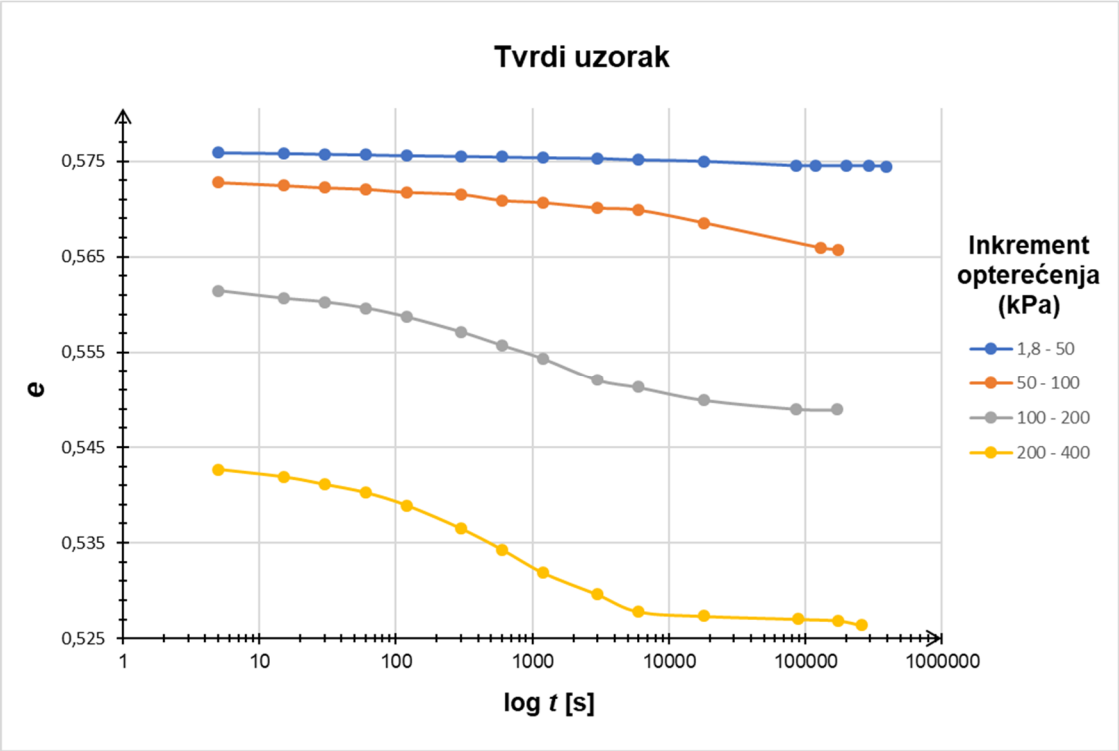
Prema teoretskim pretpostavkama, može se zaključiti da je mekani uzorak normalno konsolidiran do „malo“ podkonsolidiran.

4.3.2. Krivulje vremenskog toka slijeganja

Sada ćemo za oba promatrana uzorka prikazati krivulje vremenskog toka slijeganja, odnosno promjene koeficijenta pora u vremenu pod pojedinim inkrementom vertikalnog opterećenja. Na os apscisa bit će vrijednost vremena u logaritamskom mjerilu. Zbog toga što se na os ordinata nalazi promjena koeficijenta pora, omogućen nam je pregled krivulja za sva 4 inkrementa opterećenja na jednom dijagramu (slika 9. i slika 10.).



Slika 8. Konsolidacijske krivulje ovisnosti koeficijenta pora u vremenu – mekani uzorak



Slika 9. Konsolidacijske krivulje ovisnosti koeficijenta pora u vremenu – tvrdi uzorak

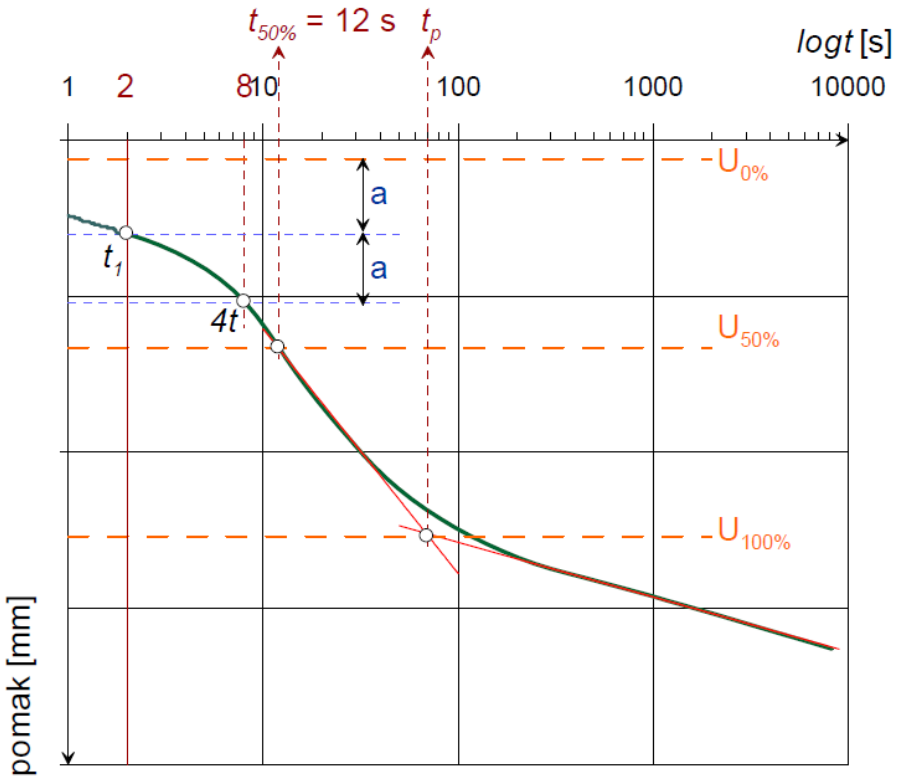
Na temelju krivulja vremenskog toka slijeganja može se odrediti koeficijent konsolidacije c_v. On je svojstvo materijala i moguće ga je odrediti na temelju ispitivanja uzoraka u laboratoriju. Može se izračunati ako su poznati koeficijenti vodopropusnosti k i edometarski modul stišljivosti M_s. Koeficijent konsolidacije definiran je izrazom: [2]

$$c_v = \frac{k \cdot M_s}{\gamma_w}$$

Česta se koriste još dva načina izravnog određivanja c_v, prema Casagrandeu i Tayloru, na temelju pokusa u edometru. [2]

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 2 s i 8 s, ili 4 s i

16 s). 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 1.0 cm. Koeficijent konsolidacije se tada odredi kao što je prikazano primjerom na slici 11.



Slika 10. Prilagodba dijagrama mjerenja vremenskog toka slijeganja u edometru i određivanje c_v prema Casagrandeu. [2]

$$T_v = c_v \frac{t_{50}}{h^2} \longrightarrow c_v = \frac{0{,}197 \cdot h^2}{t_{50}} \text{ (cm}^2\text{/s)} \qquad (32)$$

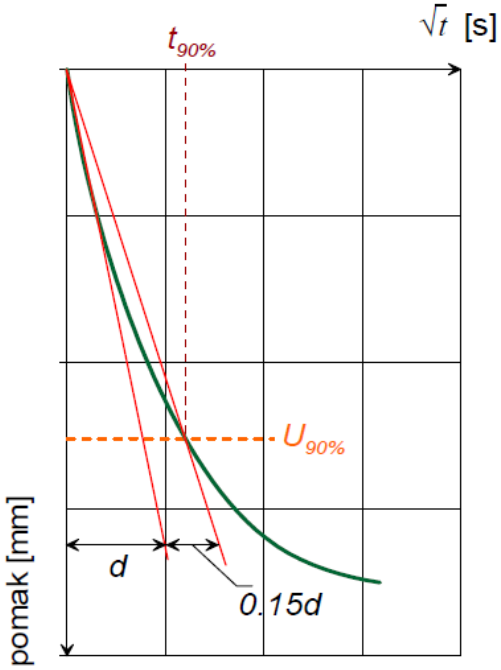
gdje je: c_v – koeficijent konsolidacije

T_v=*0,197* – bezdimenzionalna veličina

h^2 – put dreniranja vode kroz uzorak u promatranom inkrementu vertikalnog opterećenja

t_{50} – vrijeme 50-postotne konsolidacije

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 11. Prilagodba dijagrama mjerenja vremenskog toka slijeganja u edometru i određivanje c_v prema Tayloru [2].

$$T_v = c_v \frac{t_{90}}{h^2} \longrightarrow c_v = \frac{0{,}848 \cdot h^2}{t_{90}} \qquad (33)$$

gdje je: c_v – koeficijent konsolidacije

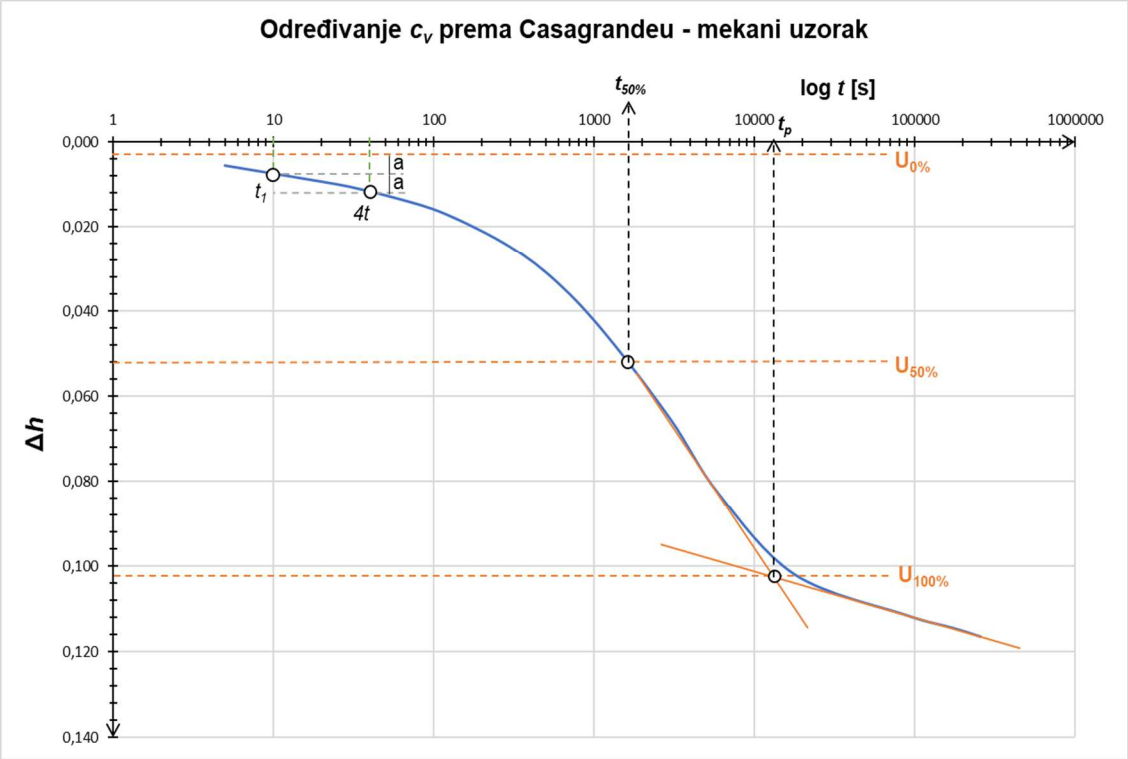
$Tv=0{,}848$ – bezdimenzionalna veličina

h^2 – duljina drenažnog puta vode kroz uzorak u promatranom inkrementu vertikalnog opterećenja

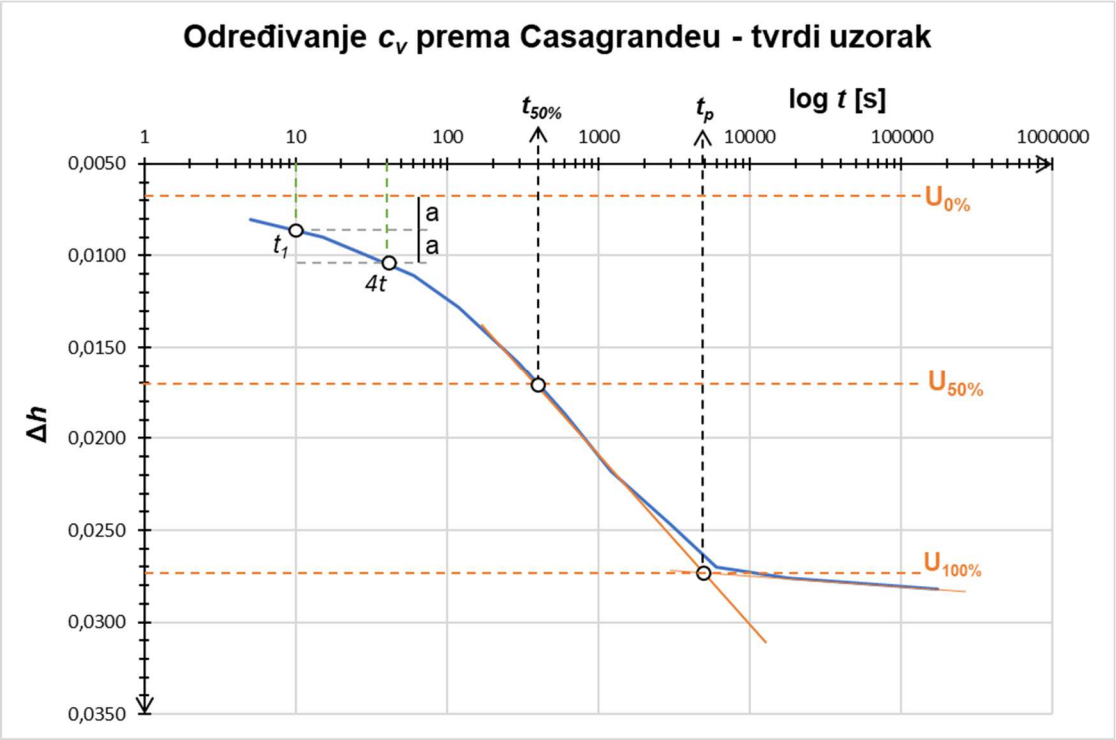
t_{90} – vrijeme 90-postotne primarne konsolidacije

4.3.2.1. Određivanje c_v ispitivanih uzoraka prema Casagrandeovoj metodi

Koeficijent konsolidacije promatrat će se na krivulji inkrementa opterećenja 200 – 400 kPa za oba uzorka.



Slika 12. Određivanje koeficijenta konsolidacije prema Casagrandeovoj metodi za mekani uzorak (inkrement opterećenja 200 – 400 kPa)



Slika 13. Određivanje koeficijenta konsolidacije prema Casagrandeovoj metodi za tvrdi uzorak (inkrement opterećenja 200 – 400 kPa)

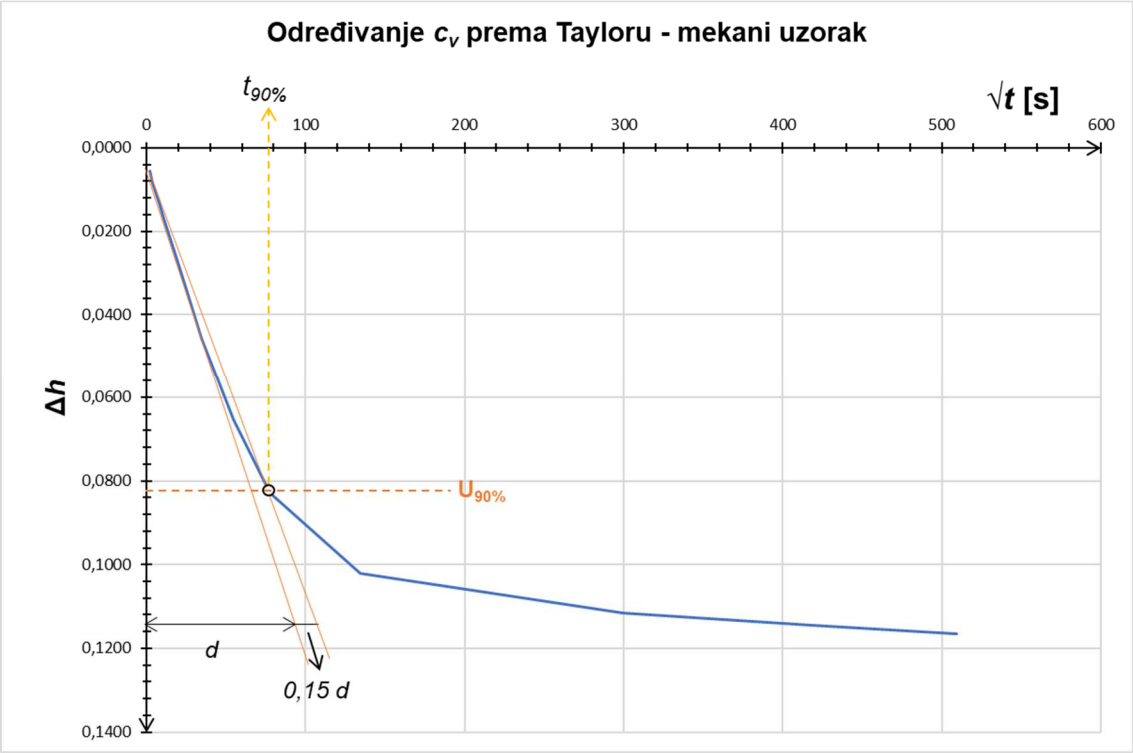
Iz krivulja vidimo da je vrijeme 50-postotne primarne konsolidacije za mekani uzorak jednako 1700 sekundi, a za tvrdi uzorak jednako je 400 sekundi. Izračunom dobivamo da je:

- koeficijent konsolidacije mekanog uzorka: $c_v = 7{,}3*10^{-5}\ cm^2/s$

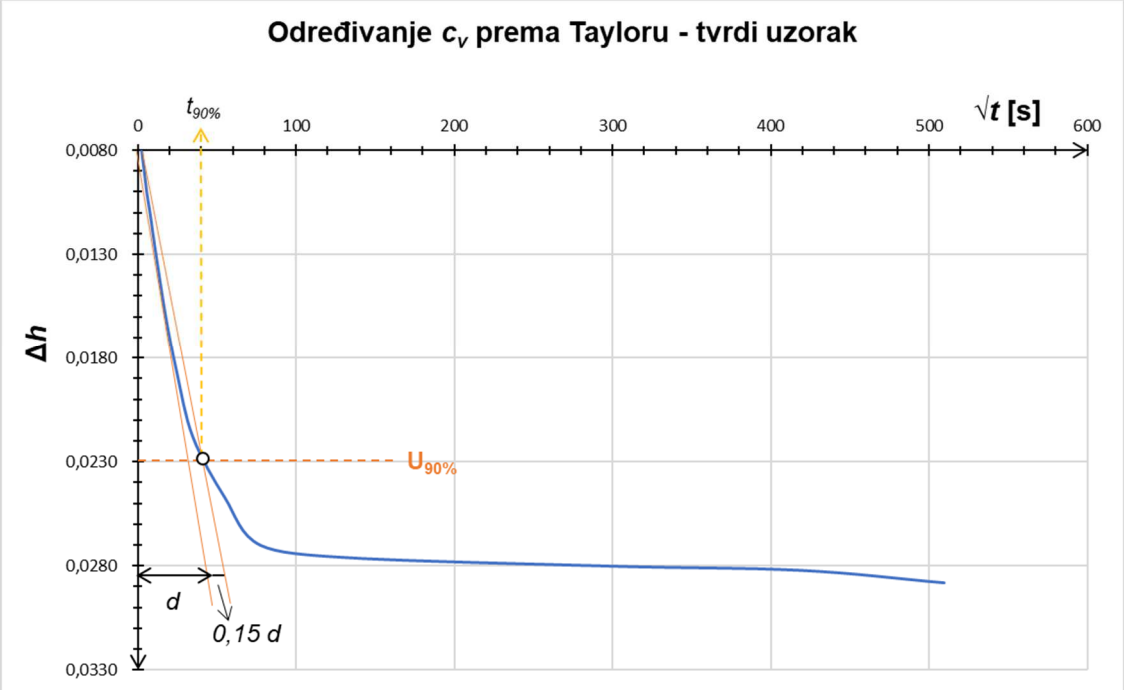
- koeficijent konsolidacije tvrdog uzorka: $c_v = 4{,}8*10^{-4}\ cm^2/s$

4.3.2.2. Određivanje c_v ispitivanih uzoraka prema Taylorovoj metodi

Isto kao i kod Casagrandeove metode, koeficijent konsolidacije promatrat će se za inkrement opterećenja 200 – 400 kPa za oba uzorka.



Slika 14. Određivanje koeficijenta konsolidacije prema Taylorovoj metodi za mekani uzorak (inkrement opterećenja 200 – 400 kPa)



Slika 15. Određivanje koeficijenta konsolidacije prema Taylorovoj metodi za tvrdi uzorak (inkrement opterećenja 200 – 400 kPa)

Iz prikazanih krivulja može se iščitati da je vrijeme 90-postotne primarne konsolidacije za mekani uzorak jednako 6084 sekunde, a za tvrdi uzorak jednako je 1600 sekundi. Izračunom dobivamo da je:

- koeficijent konsolidacije mekanog uzorka: $c_v = 8{,}8*10^{-5}\ cm^2/s$

- koeficijent konsolidacije tvrdog uzorka: $c_v = 5{,}1*10^{-4}\ cm^2/s$

5. ZAKLJUČAK

Deformabilnost odnosno stišljivost i slijeganje su jedni od najvažnijih parametara tla pri temeljenju građevina. Ti se parametri određuju u edometrima u koje se ugrađuju manji uzorci tla. Laboratorijska ispitivanja opisana u ovom radu imaju izrazitu važnost u samom dobivanju potpune slike o fizičko-mehaničkim svojstvima tla. Cilj završnog rada je bio prikazati deformabilna svojstva za dvije vrste koherentnog tla različitog stupnja zbijenosti i konzistentnog stanja, na temelju rezultata provedenih edometarskih pokusa.

Iz dobivenih rezultata mogu se uočiti velike razlike u deformabilnosti i slijeganju između dva ispitivana uzorka tla. Ukupna vertikalna relativna deformacija ε_v mekanog uzorka je 7 puta veća nego ukupna vertikalna relativna deformacija tvrdog uzorka. Mekani uzorak tla ima puno veću stišljivost od tvrdog uzorka. Za razliku od mekanog uzorka, tvrdi uzorak daje puno veći otpor promjeni volumena kod iste vrijednosti dodatnog vertikalnog naprezanja. To pokazuju razlike u modulima stišljivosti M_s za pojedine inkremente vertikalnog opterećenja. Na tvrđem uzorku se nakon preplavljivanja vodom na početku pokusa čak i povećala visina zbog bubrenja, što je posljedica mineraloškog sastava tla. Zbog toga i premalog završnog vertikalnog naprezanja od 400 kPa, na tvrdom uzorku se nije moglo valjano procijeniti naprezanje prekonsolidacije. Iz konsolidacijskih krivulja može se vidjeti da je tvrdom uzorku primarna konsolidacija završila puno prije nego mekanom uzorku. Iz toga proizlaze i velike razlike u koeficijentima konsolidacije između uzoraka. Na tvrdom uzorku je sekundarna konsolidacija znatno manje izražena nego na mekanom uzorku.

Razlike u deformabilnosti i slijeganju ispitivanih uzoraka tla sumarno su prikazane u tablici 9.

Tablica 9. Razlike u deformabilnosti i slijeganju ispitivanih uzoraka tla

Parametar tla		Mekani uzorak	Tvrdi uzorak
Vlažnost w	[%]	54,88	19,84
Gustoća ρ	[g/cm^3]	1,649	2,069
Početni koeficijent pora e	[1]	1,53530	0,56408
Visina čvrstih čestica h_s	[cm]	0,78886	1,27871
Ukupno slijeganje uzorka Δh	[cm]	0,4375	0,0634
Ukupna vertikalna deformacija ϵ_v	[%]	22,27	3,15
Koeficijent konsolidacije $c_{v\ srednje}$	[cm^2/s]	$8{,}1\times10^{-5}$	$5{,}0\times10^{-4}$

Pri projektiranju temelja i izgradnji nekog objekta neophodna je analiza i ispitivanje tla, bez obzira na troškove. Naime, poznavanje strukture tla uvelike pomaže kod daljnjih proračuna i gradnje. Treba spomenuti da je vrlo bitan i način uzimanja uzorka na terenu te kako se s njim postupa tijekom vađenja i transportiranja. Da bi rezultati ispitivanja bili što vjerodostojniji, uzorak je potrebno dopremiti u laboratorij u neporemećenom stanju, sa svojstvima što bližim onima „in situ“.

6. LITERATURA

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

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

[3] Szavits – Nosan, V. Konsolidacija tla, Interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

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

Popis slika

Slika 1. Fazni dijagram tla i oznake volumena i masa [3]

Slika 2. Konzistentna stanja koherentnog tla sa povećanjem vlažnosti [2]

Slika 3. Shema edometra [1]

Slika 4. Promjena visine edometarskog uzorka za prvi stupanj opterećenja [2]

Slika 4. Uzorci nakon pokusa u edometru (lijevo – mekani uzorak, desno – tvrdi uzorak)

Slika 5. Edometarska krivulja mekanog uzorka

Slika 6. Edometarska krivulja tvrdog uzorka

Slika 7. Konstrukcija točke naprezanja prekonsolidacije za mekani uzorak

Slika 8. Konsolidacijske krivulje ovisnosti koeficijenta pora u vremenu – mekani uzorak

Slika 9. Konsolidacijske krivulje ovisnosti koeficijenta pora u vremenu – tvrdi uzorak

Slika 10. Prilagodba dijagrama mjerenja vremenskog toka slijeganja u edometru i određivanje c_v prema Casagrandeu. [2]

Slika 11. Prilagodba dijagrama mjerenja vremenskog toka slijeganja u edometru i određivanje c_v prema Tayloru [2]

Slika 12. Određivanje koeficijenta konsolidacije prema Casagrandeovoj metodi za mekani uzorak (inkrement opterećenja 200 – 400 kPa)

Slika 13. Određivanje koeficijenta konsolidacije prema Casagrandeovoj metodi za tvrdi uzorak (inkrement opterećenja 200 – 400 kPa)

Slika 14. Određivanje koeficijenta konsolidacije prema Taylorovoj metodi za mekani uzorak (inkrement opterećenja 200 – 400 kPa)

Slika 15. Određivanje koeficijenta konsolidacije prema Taylorovoj metodi za tvrdi uzorak (inkrement opterećenja 200 – 400 kPa)

Popis tablica

Tablica 1. USCS klasifikacija [3]

Tablica 2. Klasificiranje koherentnih materijala prema plastičnosti [2]

Tablica 3. Dobiveni rezultati zatečene vlažnosti uzoraka

Tablica 4. Podaci i svojstva za mekani uzorak tla

Tablica 5. Podaci i svojstva za tvrdi uzorak tla

Tablica 6. Izračunate promjene visine, koeficijenta pora te moduli stišljivosti po Δe i Δh za mekani uzorak

Tablica 7. Izračunate promjene visine, koeficijenta pora te moduli stišljivosti po Δe i Δh za tvrdi uzorka

Tablica 8. Iznosi geostatičkih i prekonsolidacijskih naprezanja te OCR

Tablica 9. Razlike u deformabilnosti i slijeganju ispitivanih uzoraka tla