

# Utjecaj veličine inkrementa naprezanja na konsolidacijska svojstva tla

---

Gavrić, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:318543>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

**UTJECAJ VELIČINE INKREMENTA NAPREZANJA NA KONSOLIDACIJSKA  
SVOJSTVA TLA**

Diplomski rad

Martina Gavrić

R 317

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/92  
URBROJ: 251-70-11-23-2  
U Zagrebu, 11.09.2023.

**Martina Gavrić, studentica**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/92, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 27.06.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### UTJECAJ VELIČINE INKREMENTA NAPREZANJA NA KONSOLIDACIJSKA SVOJSTVA TLA

Za voditeljicu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Biljana Kovačević Zelić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Biljana Kovačević  
Zelić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)

## UTJECAJ VELIČINE INKREMENTA NAPREZANJA NA KONSOLIDACIJSKA SVOJSTVA TLA

Martina Gavrić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Cilj ovog rada bio je ispitati utjecaj veličine inkrementa naprezanja na konsolidacijska svojstva tla. U tu svrhu provedeno je laboratorijsko ispitivanje jednodimenzionalne konsolidacije u klasičnom edometarskom uređaju. Prikazani su temeljni principi teorije jednodimenzionalne konsolidacije te interpretacija parametara koji se koriste u procjeni slijeganja. Ispitivanje tla je provedeno na dva uzorka s različitim rasporedom opterećenja. Jedan uzorak opterećen je u inkrementima koji su definirani u normi i uobičajeno se primjenjuju u praksi, a drugi je opterećen ciklusom s manjim inkrementima. Opažano je kakav će to utjecaj imati na parametre stišljivosti i konsolidacijska svojstva tla. Indeks kompresije i rekompresije, kao i naprezanje prethodne konsolidacije nisu se značajnije razlikovali. Međutim, kod analize dijagrama vremenskog tijeka slijeganja, za uzorak s malim inkrementima, krivulje konsolidacije su odstupale od teorijskih zbog čega interpretacija koeficijenta konsolidacije nije bila moguća. U nekoliko drugih studija o sličnoj problematici pokazalo se da veličina inkrementa naprezanja značajno utječe na komponente ukupnog slijeganja zbog čega krivulja gubi karakterističan oblik. Zaključeno je kako ispitivanje s malim inkrementima može biti praktično za preciznije određivanje naprezanja prethodne konsolidacije i parametara stišljivosti, ali može onemogućiti interpretaciju vremenskog tijeka slijeganja.

Ključne riječi: geotehničko inženjerstvo, slijeganje, konsolidacija, stišljivost, koeficijent konsolidacije, edometar

Završni rad sadrži: 51 stranica, 12 tablica, 32 slike i 17 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF

Pomagao pri izradi/komentor: Mag. ing. Evelina Oršulić, RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF

Dr. sc. Helena Vučenović, docentica RGNF

Dr. sc. Dubravko Domitrović, izvanredni profesor RGNF

## INFLUENCE OF LOAD INCREMENT RATIO ON SOIL CONSOLIDATION PROPERTIES

Martina Gavrić

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

The aim of this study was to investigate the influence of the load increment ratio on the soil consolidation properties. For this purpose, a laboratory test of one-dimensional consolidation was carried out using a conventional oedometer. In this work, the fundamental principles of the one-dimensional consolidation theory were presented and the parameters used for the settlement calculation were defined. Two soil samples were subjected to a constant total axial stress with different load increment ratios. One test was carried out with the standard loading sequence commonly used in practise, the other with an alternative loading scheme consisting of small load increments. The effects on the consolidation behaviour of the soil were investigated by observing the compressibility parameters and the consolidation properties. The results for the compression index, swell index and pre-consolidation pressure showed no significant differences. However, in the tests with alternative loading sequence, the time–displacement curves show a different shape than the one based on the one-dimensional consolidation theory. For this reason, it was not possible to correctly estimate the coefficient of consolidation. Several other studies have shown that the magnitude of the load increment ratio strongly influences the shape of the time–displacement curve, which can be explained by the change in the primary consolidation ratio of the total settlement. It was concluded that although small increments are desirable to determine the preconsolidation stress and compressibility parameters with greater accuracy, they may hinder the evaluation of the coefficient of consolidation and time settlement interpretation.

Keywords: geotechnical engineering, settlement, consolidation, compressibility, consolidation coefficient, oedometer

Thesis contains: 51 pages, 12 tables, 32 figures and 17 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Full Professor Biljana Kovačević Zelić, PhD

Tech. assistance: Research Assistant Evelina Oršulić, Sc. ing.

Reviewers: Full Professor Biljana Kovačević Zelić, PhD  
Assistant Professor Helena Vučenović, PhD  
Associate Professor Dubravko Domitrović, PhD

Defence date: September 14, 2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. SLIJEGANJE I KONSOLIDACIJA .....	2
2.1. Fazni karakter tla .....	2
2.2. Općenito o slijeganju .....	3
2.3. Načelo efektivnih napreznja .....	5
2.4. Analogija procesa konsolidacije .....	5
2.5. Teorija primarne konsolidacije .....	7
2.6. Laboratorijski model jednodimenzionalne konsolidacije .....	12
3. KONSOLIDACIJSKA SVOJSTVA TLA .....	14
3.1. Modul stišljivosti tla .....	14
3.2. Napreznje prethodne konsolidacije.....	17
3.3. Indeks kompresije i rekompresije .....	19
3.4. Koeficijent konsolidacije .....	20
3.5. Utjecaji na interpretaciju rezultata edometarskog pokusa .....	23
4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA .....	25
4.1. Opis uzoraka .....	25
4.2. Ispitivanje tla u edometru .....	26
4.3. Određivanje osnovnih svojstava.....	31
5. REZULTATI I RASPRAVA .....	32
5.1. Klasifikacija uzoraka tla .....	32
5.2. Rezultati edometarskog pokusa.....	33
5.3. Interpretacija edometarskog dijagrama.....	37
5.4. Interpretacija dijagrama vremenskog tijeka slijeganja.....	39
5.5. Rasprava .....	41
6. ZAKLJUČAK.....	48
LITERATURA .....	50

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Model tla .....	3
Slika 2-2. Analogija klipa i opruge.....	6
Slika 2-3. Model za rješavanje jednadžbe konsolidacije.....	10
Slika 2-4. Grafički prikaz rješenja jednadžbe konsolidacije .....	11
Slika 2-5. Odnos prosječnog stupnja konsolidacije i bezdimenzionalnog vremenskog faktora .....	12
Slika 2-6. Edometar .....	13
Slika 3-1. Edometarski model .....	14
Slika 3-2. Primjer edometarskog dijagrama .....	16
Slika 3-3. Odnos koeficijenta pora i efektivnog naprezanja za NK i PK .....	17
Slika 3-4. Grafička metoda konstrukcije točke prethodne konsolidacije .....	18
Slika 3-5. Casagrandeova metoda prilagođavanja dijagrama vremenskog tijeka slijeganja .....	21
Slika 3-6. Taylorova metoda prilagođavanja dijagrama vremenskog tijeka slijeganja.....	22
Slika 3-7. Utjecaj poremećenosti uzorka za normalno konsolidiranu glinu (a) i edometarske krivulje s promjenom veličine inkrementa opterećenja (b).....	23
Slika 3-8. Dijagram za korekciju izračuna koeficijenta konsolidacije zbog promjene temperature .....	24
Slika 4-1. Uzorak A .....	26
Slika 4-2. Edometarski uređaji .....	26
Slika 4-3. Edometarska ćelija za uzorak.....	27
Slika 4-4. Utezi .....	28
Slika 4-5. Priprema uzorka za ispitivanje u edometru.....	28
Slika 4-6. Uzorci nakon ispitivanja u edometru .....	29
Slika 5-1. Kumulativna granulometrijska krivulja .....	32
Slika 5-2. Dijagram plastičnosti .....	33
Slika 5-3. Edometarski dijagram i interpretacija $C_c$ , $C_r$ s procjenom $\sigma'_c$ za male inkremente naprezanja.....	37
Slika 5-4. Edometarski dijagram i interpretacija $C_c$ , $C_r$ s procjenom $\sigma'_c$ za velike inkremente naprezanja.....	38
Slika 5-5. Dijagrami vremenskog tijeka slijeganja za uzorke A1 i A2 .....	39

Slika 5-6. Interpretacija koeficijenta konsolidacije za uzorak A1 prilagodbom dijagrama vremenskog tijeka slijeganja prema Tayloru – mali inkrementi .....	40
Slika 5-7. Interpretacija koeficijenta konsolidacije za uzorak A2 prilagodbom dijagrama vremenskog tijeka slijeganja prema Tayloru – veliki inkrementi .....	40
Slika 5-8. Usporedba teorijske i eksperimentalne krivulje vremenskog tijeka slijeganja ...	41
Slika 5-9. Usporedba edometarskih dijagrama s malim i velikim inkrementima naprezanja .....	42
Slika 5-10. Usporedba krivulja vremenskog tijeka slijeganja: (a) 800 kPa, (b) 1600 kPa ..	44
Slika 5-11. Utjecaj $\Delta\sigma'/\sigma'$ na odnos vrijeme-slijeganje.....	45
Slika 5-12. Usporedba krivulja vremenskog tijeka slijeganja s vremenskom osi u mjerilu drugog korijena za inkrement naprezanja 800-1600 kPa .....	47



## POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Osnovni podaci o uzorcima.....	25
Tablica 4-2. Raspored opterećenja s malim inkrementima .....	30
Tablica 4-3. Raspored opterećenja s velikim inkrementima .....	31
Tablica 5-1. Rezultati laboratorijskog određivanja osnovnih svojstava.....	32
Tablica 5-2. Osnovne informacije o uzorku A1 i rezultati proračuna s malim inkrementima .....	35
Tablica 5-3. Osnovne informacije o uzorku A2 i rezultati proračuna s velikim inkrementima .....	36
Tablica 5-4. Proračun koeficijenta konsolidacije prema Tayloru.....	41
Tablica 5-5. Osnovna svojstva uzoraka prije i poslije ispitivanja u edometru .....	42
Tablica 5-6. Indeks kompresije i rekompresije te naprezanje prethodne konsolidacije.....	43
Tablica 5-7. Usporedba vrijednosti edometarskog modula za inkrement 800-1600 kPa....	43
Tablica 5-8. Korigirane vrijednosti koeficijenta konsolidacije zbog promjene temperature za inkrement opterećenja 800-1600 kPa .....	46
Tablica 5-9. Proračun koeficijenta propusnosti .....	46

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$\text{cm}^2$	površina poprečnog presjeka uzorka
$C_c$	-	indeks kompresije
$C_r$	-	indeks rekompresije
$C_v$	$\text{cm}^2/\text{s}$	koeficijent konsolidacije
$D$	mm	ekvivalentni promjer čestica
$D_0$	cm	promjer uzorka
$e$	-	koeficijent pora
$e_0$	-	početni koeficijent pora
$e_1$	-	koeficijent pora nakon jednog inkrementa opterećenja
$E_{oed}$	kPa	edometerski modul ili modul stišljivosti
$H$	m	najveći put dreniranja
$h_0$	mm	početna visina uzorka
$h_1$	mm	ukupna visina uzorka nakon jednog inkrementa opterećenja
$H_{50}$	mm	visina uzorka koja odgovara vremenu $t_{50}$
$H_{90}$	mm	visina uzorka koja odgovara vremenu $t_{90}$
$h_s$	mm	ekvivalentna visina čvrstih čestica
$h_v$	mm	ekvivalentna visina pornog prostora
$h_{v1}$	mm	visina pornog prostora nakon jednog inkrementa opterećenja
$I_P$	%	indeks plastičnosti
$k$	m/s	koeficijent propusnosti
$LIR$	-	indeks povećanja opterećenja
$m$	g	ukupna masa uzorka
$m_g$	g	masa plina
$m_s$	g	masa čvrstih čestica
$m_v$	$\text{m}^2/\text{kPa}$	modul promjene volumena ili koeficijent stišljivosti
$m_w$	g	masa vode
$OCR$	-	stupanj prekonsolidacije
$p$	Pa	opterećenje
$R_T$	-	korekcijski faktor radi promjene temperature
$S_c$	m	konačno slijeganje
$S_c$	m	primarno konsolidacijsko slijeganje

$S_c$	m	sekundarno konsolidacijsko slijeganje
$S_{c(t)}$	m	trenutno slijeganje
$S_e$	m	trenutno ili elastično slijeganje
$S_r$	%	stupanj saturacije
$S_t$	m	ukupno slijeganje
$T$	°C	temperatura
$t$	s	vrijeme
$t_{50}$	s	vrijeme koje odgovara 50 % primarne konsolidacije
$t_{90}$	s	vrijeme koje odgovara 90 % primarne konsolidacije
$T_v$	-	vremenski faktor
$U$	%	prosječni stupanj konsolidacije
$u$	Pa	porni tlak
$u_0$	Pa	početni porni tlak
$u_e$	Pa	porast pornog tlaka uslijed opterećenja
$U_v$	%	stupanj konsolidacije
$V$	m <sup>3</sup>	ukupni volumen uzorka
$V_0$	cm <sup>3</sup>	početni volumen uzorka
$V_g$	m <sup>3</sup>	volumen plina (zraka)
$V_v$	m <sup>3</sup>	volumen pora
$V_w$	m <sup>3</sup>	volumen vode
$w_0$	%	početna vlažnost
$w_L$	%	granica tečenja
$w_P$	%	granica plastičnosti
$Z$	-	bezdimezionalna dubina
$z$	m	promatrana dubina sloja
$\Delta h$	mm	ukupna promjena visine uzorka
$\Delta u$	Pa	promjena pornog tlaka
$\Delta \sigma'$	Pa	promjena efektivnog naprezanja, prirast opterećenja
$\gamma_w$	kN/m <sup>3</sup>	jedinična težina vode
$\varepsilon$	-	relativna deformacija
$\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	suha gustoća tla
$\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća čvrstih čestica
$\sigma'$	Pa	efektivno naprezanje
$\sigma$	Pa	ukupno naprezanje

$\sigma'_c$	Pa	naprezanje prethodne konsolidacije
$\sigma'_v$	Pa	vertikalno efektivno naprezanje

## 1. UVOD

Stišljivost i konsolidacijska svojstva tla najčešće se ispituju u laboratoriju u uređaju koji se zove edometar. Pomoću njega se dobivaju parametri za procjenu veličine slijeganja i vremena potrebnog da se određeno slijeganje ostvari. Ispitivanja se u pravilu provode na sitnozrnatim tlima, za koje je karakteristično da nakon opterećenja razvijaju slijeganja tijekom duljeg vremenskog perioda. Ispitivanjem u edometru se opaža slijeganje uzorka pod različitim vertikalnim opterećenjima. Opterećenja se nanose u inkrementima, uobičajeno takvim da je svaki sljedeći dvostruko veći od prethodnog. Rezultati se interpretiraju u skladu s Terzaghi-Fröhlichovom teorijom jednodimenzionalne konsolidacije.

Zadatak ovog diplomskog rada je ispitati utjecaj veličine inkrementa naprezanja na konsolidacijska svojstva tla. Usporedno su ispitana dva uzorka od istog izvornog materijala, za koje se pretpostavilo da će imati jednaka početna svojstva. Jedan uzorak opterećen je u inkrementima, takvim da je svaki sljedeći dvostruko veći od prethodnog i za koji vrijedi odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' = 1$ . Drugi uzorak je opterećen različitim inkrementima, a u pravilu vrijedi da je  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$ . Cilj je utvrditi utječe li veličina inkrementa naprezanja na interpretaciju rezultata.

Rad se sastoji od teorijskog i praktičnog dijela te interpretacije rezultata s raspravom. U drugom poglavlju dane su osnovne teorijske postavke bitne za razumijevanje procesa slijeganja i konsolidacije. Opisano je načelo efektivnih naprezanja, analogija procesa konsolidacije, teorija primarne konsolidacije i laboratorijski model jednodimenzionalne konsolidacije. U sklopu trećeg poglavlja prikazani su parametri koji se određuju iz rezultata edometarskog pokusa, njihova interpretacija i utjecaji na istu. U četvrtom poglavlju dan je opis uzoraka, postupak ispitivanja u edometru i kratak opis ostalih laboratorijskih ispitivanja. Peto poglavlje posvećeno je interpretaciji rezultata na temelju koje se raspravljalo o utjecaju veličine inkrementa naprezanja na konsolidacijska svojstva tla.

Pregledom dostupne literature naišlo se na različite zaključke. Razlike su posljedica vrste tla i uvjeta u kojima se ono ispituje. Više autora ističe da omjer  $\Delta\sigma'/\sigma'$  utječe na odnos pojedinih komponenti ukupnog slijeganja tj. na veličinu primarne i sekundarne konsolidacije, zbog čega krivulje konsolidacije imaju različit oblik od teorijskih (Leonards i Altschaefl, 1964; Tanaka i Tsutsumi, 2016, Yoshidomi i sur., 2018). Stoga se očekuje da će veličina inkrementa naprezanja imati utjecaj na interpretaciju rezultata edometarskog pokusa.

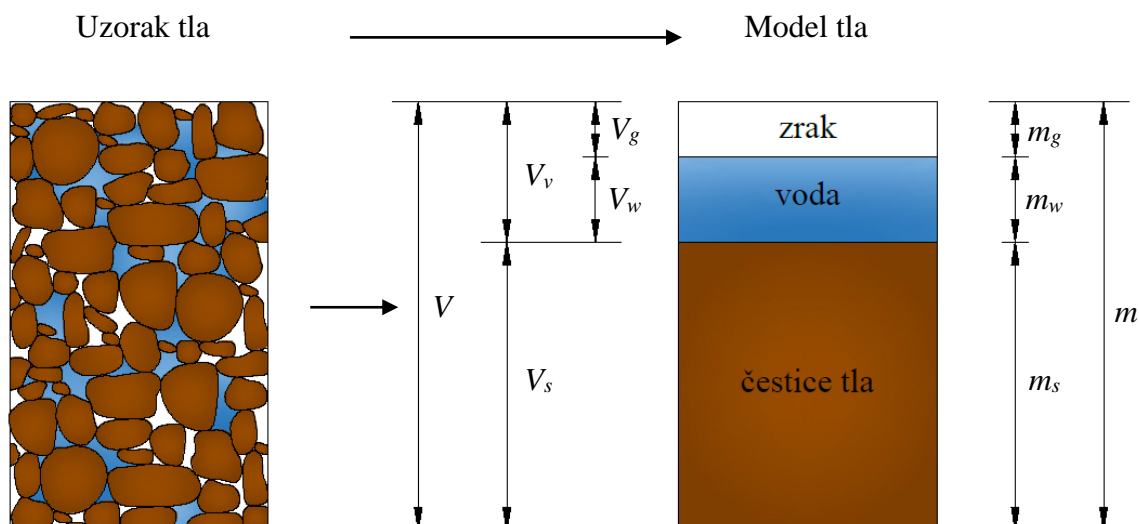
## **2. SLIJEGANJE I KONSOLIDACIJA**

Tlo ispod građevina sliježe se pod naprezanjima izazvanim njezinom težinom što se očituje kao vertikalni pomak građevine ili površine tla. Kako bi građevina zadovoljila kriterije sigurnosti i stabilnosti, slijeganja moraju biti unutar dopuštenih granica. Provjera kriterija svodi se na analize i proračune, za koje je potrebno poznavati stišljivost tla pri djelovanju očekivanih naprezanja (Mulabdić, 2018). U analizi slijeganja posebna važnost pridaje se zasićenim koherentnim tlima, primjerice glini. Kod takvih tala slijeganja se ne razvijaju trenutno, već tijekom duljeg vremenskog perioda. Zbog stalnog opterećenja, dolazi do postupne promjene volumena tla radi istjecanja vode iz pora, što u konačnici rezultira slijeganjem. Proces se naziva vremenski tok slijeganja ili konsolidacija.

Analiza slijeganja uključuje dva aspekta. Prvi se odnosi na analizu promjene volumena tla koja rezultira ukupnim slijeganjem, a drugi se odnosi na vrijeme koje je potrebno da se određena slijeganja ostvare. Slijeganje je vrlo složen proces. Osim vrste tla, uvjeta u tlu i njegovih svojstava ono ovisi o povijesti naprezanja u tlu, stoga je važno poznavati prirodu raspodjele naprezanja i vezu između naprezanja i deformacija. Konsolidacijska svojstva tla najčešće se ispituju u laboratoriju u uređaju koji se zove edometar. Edometarskim pokusom određuju se deformacijski parametri potrebni za interpretaciju pojave slijeganja u vremenu (Mulabdić, 2018). U sklopu ovog rada analiziran je utjecaj veličine inkrementa naprezanja na konsolidacijska svojstva tla. Ovo poglavlje posvećeno je osnovnim teorijskim postavkama procesa slijeganja i konsolidacije.

### **2.1. Fazni karakter tla**

Tlo je sveprisutan prirodni materijal, sastavljen od nevezanih ili slabo vezanih čestica mineralnog podrijetla, organske tvari, vode i zraka. Čvrste čestice čine skelet tla, a u porama između njih nalazi se tekuća i/ili plinovita faza, najčešće voda i zrak. Ovisno o ispunjenosti pora vodom, tlo može biti suho, djelomično ili potpuno saturirano. U prirodnom stanju u pravilu je djelomično saturirano i sastoji se od sve tri komponente: čvrstih čestica, vode i zraka. Svaka od komponenti i njihova interakcija utječe na ponašanje tla, pa se stoga kaže da ono ima trokomponentni karakter. Mehaničko ponašanje tla analizira se pod djelovanja vanjskog opterećenja, kroz promjenu u njegovim svojstvima, strukturi, zbijenosti, odnosu naprezanja i deformacija i sl. Za analizu njegova ponašanja definiraju se osnovna svojstva preko masenih i volumnih odnosa između pojedinih komponenti. Uvodi se tzv. modela tla u kojem je ukupan volumen uzorka podijeljen na tri dijela, kako je prikazano na slici 2-1.



**Slika 2-1.** Model tla (prema Craig, 2004)

Gdje su:

- $V$  – ukupni volumen uzorka ( $\text{m}^3$ ),
- $V_v$  – volumen pora ( $\text{m}^3$ ),
- $V_s$  – volumen čvrstih čestica ( $\text{m}^3$ ),
- $V_g$  – volumen plina (zraka) ( $\text{m}^3$ ),
- $V_w$  – volumen vode ( $\text{m}^3$ ),
- $m$  – ukupna masa uzorka (g),
- $m_g$  – masa plina (g),
- $m_w$  – masa vode (g),
- $m_s$  – masa čvrstih čestica (g).

Pod djelovanjem vanjskog opterećenja dolazi do promjene, odnosno smanjenja volumena tla. Čestice tla i voda su nestišljivi, pa promjene volumena u tlu nastaju zbog promjene volumena pora. Kod potpuno zasićenog tla, smanjenje volumena događa se samo ako dio vode može izaći iz pora, a kod suhog ili djelomično zasićenog smanjenje volumena nastaje zbog kompresije zraka u porama (Craig, 2004).

## 2.2. Općenito o slijeganju

Najčešći uzrok slijeganja je opterećenje, ali ono se može javiti i kao posljedica drugih procesa. To mogu biti prirodne pojave poput snižavanja razine podzemne vode, raspadanja organske tvari, potresa i slično ili ljudska djelatnost što uključuje izgradnju različitih

objekata, iskop tla, rudarske radove i dr. Prema Murthyju (2002) slijeganje tla nastaje kao posljedica jednog ili kombinacije više čimbenika: preraspodjele čestica tla, elastičnih naprezanja u česticama te istiskivanja vode ili zraka iz pora. Ukupno se slijeganje može podijeliti na tri komponente (Das, 2009):

$$S_t = S_e + S_c + S_s \quad (2-1)$$

Gdje su:  $S_t$  - ukupno slijeganje (m),  
 $S_e$  - trenutno ili elastično slijeganje (m),  
 $S_c$  - primarno konsolidacijsko slijeganje (m),  
 $S_s$  - sekundarno konsolidacijsko slijeganje (m).

Trenutno ili elastično slijeganje odvija se neposredno nakon opterećenja. Karakteristično je za propusne krupnozrnate materijale kod kojih je i najizraženija komponenta slijeganja. Kod sitnozrnatih zasićenih tala, primjerice glina, uslijed opterećenja voda nema mogućnost brzog istjecanja zbog slabe propusnosti. Sadržaj vode može ostati gotovo nepromijenjen i takvo stanje naziva se nedreniranim. Kod takvih tala dolazi do promjene oblika bez promjene volumena. Prema Barnesu (1995) do promjene oblika površine tla dolazi zbog smičnih deformacija unutar tla za koje se pretpostavlja da su elastične. Procjena trenutnog slijeganja uobičajeno se provodi na temelju teorije elastičnosti. Pretpostavlja se da je tlo homogen i izotropan, linearno elastičan materijal, koji će se nakon uklanjanja opterećenja vratiti u prvobitno stanje.

Primarno konsolidacijsko slijeganje javlja se kao posljedica istjecanja vode iz pora uslijed opterećenja. Ono podrazumijeva promjenu oblika i volumena tla u dreniranim uvjetima. Konsolidacija je karakteristična za slabopropusna zasićena tla poput gline i praha. Istjecanje vode iz pora odvija se vrlo sporo pa se često naziva i vremenskim tokom slijeganja. Za procjenu slijeganja ovisno o vremenu koristi se jednodimenzionalna teorija konsolidacije.

Treća komponenta slijeganja naziva se sekundarno konsolidacijsko slijeganje. Ono je izraženo uglavnom kod zasićenih koherentnih tala. Pretpostavlja se da započinje nakon prestanka primarne konsolidacije te da uslijed konstantnog efektivnog naprezanja dolazi do deformacije čestica i promjene volumena tla (Das, 2009).



### 2.3. Načelo efektivnih naprezanja

Načelo efektivnog naprezanja temeljni je koncept u mehanici tla i geotehničkom inženjerstvu. Predložio ga je "otac mehanike tla" Karl von Terzaghi 1923. godine, a radi se o odnosu između ukupnog naprezanja u tlu, pornog tlaka i efektivnih naprezanja (Craig, 2004). Potpuno zasićeno tlo sastoji se od čvrstih čestica koje čine skelet tla i pora ispunjenih vodom. Načelom se definira dio ukupnih naprezanja koji se prenosi preko čvrstih čestica i dio koji se prenosi preko pornog tlaka vode. Za analizu mehaničkog ponašanja tla od praktičnog su značaja naprezanja koja se prenose preko čvrstih čestica, tzv. efektivna naprezanja. Prema Barnesu (1995) efektivno naprezanje predstavlja doprinos strukture ili skeleta tla ukupnom naprezanju. Ono je izvedena veličina jer se ne može izravno mjeriti, a određuje se kao razlika ukupnog naprezanja i pornog tlaka:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2-2)$$

Gdje su:  $\sigma$  - ukupno naprezanje (Pa),  
 $\sigma'$  - efektivno naprezanje (Pa),  
 $u$  - porni tlak (Pa).

Prema Das (2009) efektivna naprezanja uvjetuju promjenu volumena i čvrstoće tla. Povećanjem efektivnih naprezanja dolazi do preraspodjele čestica tla u stabilniju i gušću strukturu, što rezultira smanjenjem volumena i slijeganjem na površini (Holtz i Kovacs, 1981). Deformacije tla i slijeganje rezultat su isključivo promjene efektivnih naprezanja stoga je ono od temeljne važnosti za analizu tih fenomena.

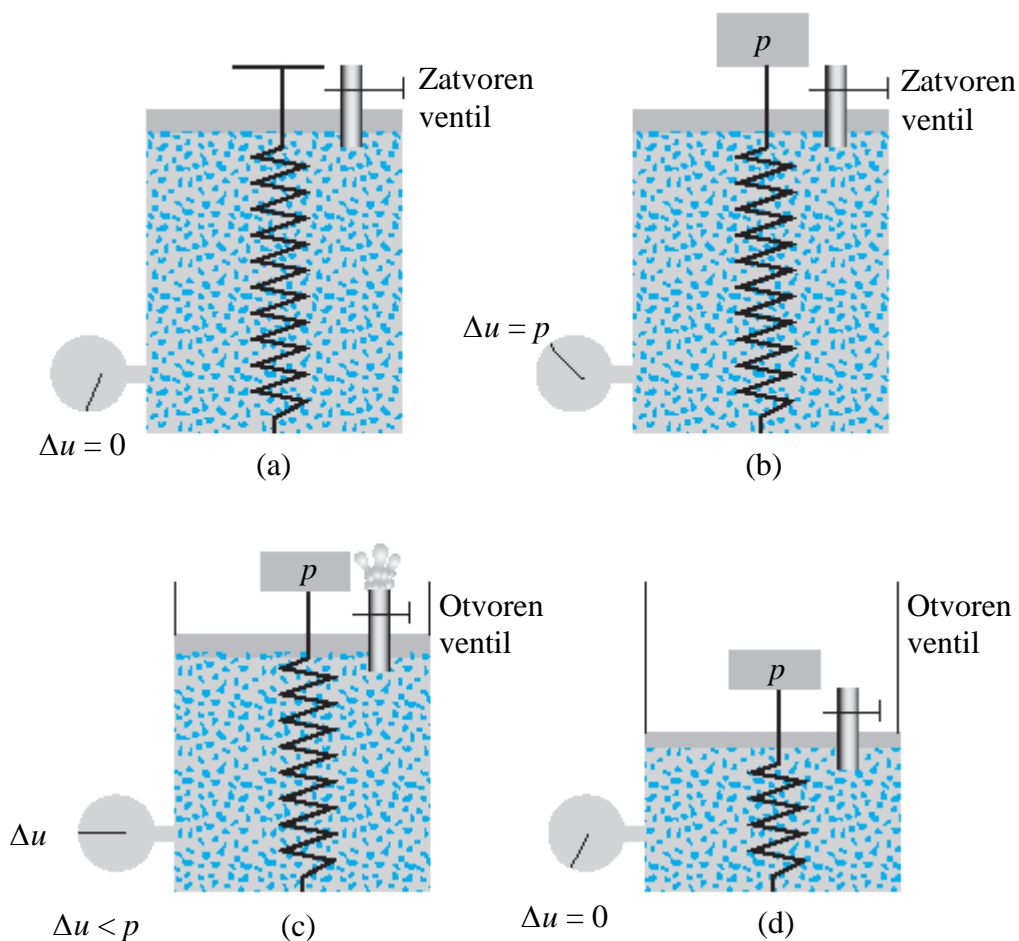
### 2.4. Analogija procesa konsolidacije

Primarno konsolidacijsko slijeganje podrazumijeva promjenu volumena tla zbog istiskivanja vode iz pora, uslijed čega dolazi do postupnog prijenosa opterećenja s porne vode na čestice tla (Budhu, 2010). Proces se može objasniti preko mehaničkog modela cilindra s klipom i oprugom kako je prikazano na slici 2-2. Klip je oslonjen na oprugu i ima ventil. Cijeli cilindar ispunjen je vodom kako je prikazano na slici 2-2. (a). Pretpostavlja se da između klipa i cilindra nema trenja. Opruga predstavlja skelet tla (čvrste čestice), voda u klipu pornu vodu, a ventil propusnost tla (Craig, 2004). Ako se na klip postavi opterećenje  $p$  u slučaju kada je ventil zatvoren kako je prikazano na slici 2-2. (b), pod pretpostavkom da

voda nije stišljiva, u zadanim uvjetima ona će preuzeti svo opterećenje. Navedena situacija odgovara nedreniranim uvjetima u tlu. Dok je ventil zatvoren, porni tlak raste i vrijedi:

$$\Delta u = p \quad \text{i} \quad \Delta \sigma' = 0 \quad (2-3)$$

Gdje su:  $\Delta u$ - promjena pornog tlaka (kPa),  
 $p$  - opterećenje (kPa),  
 $\Delta \sigma'$ - promjena efektivnog naprezanja (kPa).



**Slika 2-2.** Analogija klipa i opruge (Das, 2009)

U slučaju kada je ventil otvoren, kako je prikazano na slici 2-2. (c), voda će istjecati zbog čega će vrijednost pornog tlaka padati ( $\Delta u < p$ ). Dio dodatnog opterećenja preuzeti će voda, a dio opruge, odnosno čvrste čestice tla. U svakom trenutku povećanje opterećenja opruge odgovara smanjenju pornog tlaka (Craig, 2004) i vrijedi izraz:

$$p = \Delta u + \Delta \sigma' \quad (2-4)$$

Kako voda istječe klip se pomiče prema dolje i kretanje predstavlja promjenu volumena tla. Opterećenje se postupno prenosi na oprugu te rastu efektivna naprezanja ( $\Delta\sigma' > 0$ ). Nakon nekog vremena, kada višak vode isteče, sustav dolazi u stanje ravnoteže. Opterećenje u potpunosti preuzima opruga i vrijedi:

$$\Delta\sigma' = p \quad \text{i} \quad \Delta u = 0 \quad (2-5)$$

Otvor ventila simulira propusnost u dreniranim uvjetima (Murthy, 2002 i Craig, 2004). Vrijeme potrebno za postizanje ravnotežnog stanja ovisit će o konstanti elastičnosti opruge i promjeru otvora ventila. Opterećenje koje nosi opruga predstavlja vertikalno efektivno naprezanje u tlu, tlak vode u cilindru tlak vode u porama, a opterećenje na klipu ukupno vertikalno naprezanje (Craig, 2004).

## 2.5. Teorija primarne konsolidacije

Za procjenu vremenskog toka slijeganja Karl von Terzaghi je zajedno s matematičarem Otto Karl Fröhlichom razvio teoriju koja opisuje fenomen primarne konsolidacije. Razmatrana je brzina istiskivanja vode iz elementa tla uslijed opterećenja (Barnes, 1995). Deformacije se odvijaju u vertikalnom smjeru pa se teorija naziva jednodimenzionalnom teorijom konsolidacije. Odnosi se na horizontalno uslojeno tlo i zasniva na nekoliko pretpostavki (Craig, 2004):

1. Tlo je homogeno, izotropno i potpuno saturirano,
2. Voda i čestice tla nisu stišljive,
3. Deformacija i strujanje vode odvija se samo u vertikalnom smjeru (smjeru osi  $z$ ),
4. Deformacije su vrlo male,
5. Za sve hidrauličke gradijente vrijedi Darcyjev zakon,
6. Tijekom konsolidacije koeficijent propusnosti  $k$  i koeficijent stišljivosti  $m_v$  su konstantni,
7. Koeficijent pora i vertikalna efektivna naprezanja su u jedinstvenom odnosu koji nije vremenski ovisan.

Prema navedenim pretpostavkama izvodi se diferencijalna jednadžba jednodimenzionalne konsolidacije. Jednadžba se može zapisati kao (Craig, 2004):

$$m_v \frac{\partial u_e}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (2-6)$$

Gdje su:  $m_v$  - modul promjene volumena ili koeficijent stišljivosti ( $\text{m}^2/\text{kPa}$ ),  
 $u_e$  - porast poreznog tlaka uslijed opterećenja (kPa),  
 $t$  - vrijeme (s),  
 $k$  - koeficijent propusnosti (m/s),  
 $\gamma_w$  - jedinična težina vode ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ),  
 $z$  - promatrana dubina sloja (m).

Modul promjene volumena  $m_v$  obrnuto je proporcionalan modulu vertikalne deformacije koji se dobiva u edometarskom pokusu, pa se jednadžba 2-6. može zapisati kao:

$$\frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2-7)$$

Gdje je:  $E_{oed}$  - edometarski modul ili modul stišljivosti (kPa).

U izrazu 2-7. pretpostavka je da su koeficijent propusnosti, edometarski modul i jedinična težina vode konstantni (Budhu, 2010). Preko njih se definira parametar koji se naziva koeficijent konsolidacije:

$$C_v = \frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_w} \quad (2-8)$$

Gdje je:  $C_v$  - koeficijent konsolidacije ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Uvođenjem koeficijenta konsolidacije u izraz 2-7. jednadžba konsolidacije poprima tzv. opći oblik:

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2-9)$$

Navedena parcijalna diferencijalna jednačba rješava se uvođenjem bezdimenzionalnih varijabli: dubine i vremenskog faktora. Bezdimenzionalna dubina definirana je preko izraza:

$$Z = \frac{z}{H} \quad (2-10)$$

Gdje su:  $Z$  - bezdimenzionalna dubina (-),  
 $H$  - najveći put dreniranja (m).

Najveći put dreniranja predstavlja maksimalnu udaljenost koju voda mora prijeći do drenažnog lica (Barnes, 1995). U slučaju ako je gornja i donja granica sloja slobodno drenirajuća, tzv. otvoreni sloj, najveći put dreniranja jednak je polovici debljine promatranog sloja. Međutim, ako postoji samo jedno drenažno lice tzv. poluzatvoreni sloj, najveći put dreniranja jednak je debljini sloja. Vremenski faktor definiran je izrazom:

$$T_v = C_v \cdot \frac{t}{H^2} \quad (2-11)$$

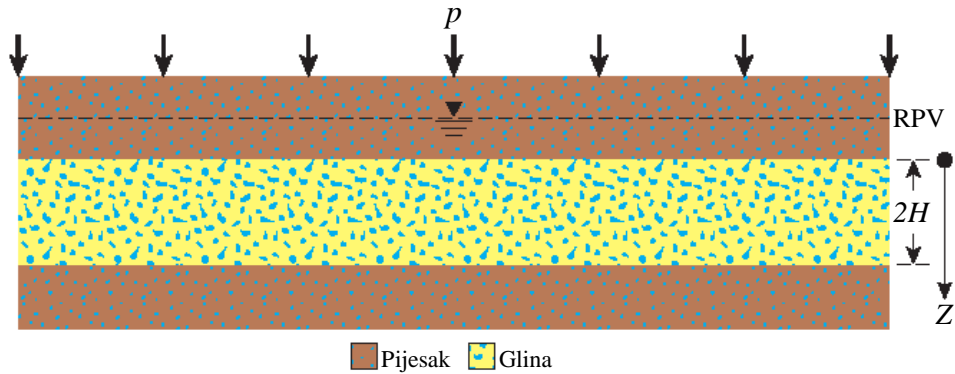
Gdje je:  $T_v$  – bezdimenzionalni vremenski faktor (-).

Jednačba 2-9. se onda može zapisati kao:

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial Z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial T_v} \quad (2-12)$$

Za rješavanje jednačbe konsolidacije potrebno je postaviti odgovarajuće rubne uvjete. Radi jednostavnosti rješenje će se promatrati na modelu u kojemu se sloj gline nalazi između dva sloja pijeska. Sloj gline debljine je  $2H$  i nalazi se ispod razine podzemne vode. U usporedbi s pijeskom ima manju propusnost. Na površini djeluje kontaktno opterećenje  $p$ , kako je prikazano na slici 2-3. Omogućeno je obostrano dreniranje pa će se uslijed opterećenja voda kretati prema gornjoj i donjoj granici s pijeskom. Put dreniranja jednak je polovici debljine sloja  $H$ . U prvom trenutku svo dodatno opterećenje, po cijeloj visini sloja, preuzet će voda (Craig, 2004). Početni uvjet u vremenu  $t = 0$  tada glasi:

$$u_e = u_0 \quad \text{za} \quad 0 \leq Z \leq 2H$$



**Slika 2-3.** Model za rješavanje jednačbe konsolidacije (modificirano prema Das, 2009)

Uz pretpostavku da su gornja i donja granica sloja gline slobodno drenirajuće, a propusnost tla uz granice s pijeskom velika, u bilo kojem trenutku  $t > 0$  vrijedi:

$$u_e = 0 \quad \text{za} \quad Z = 0$$

$$u_e = 0 \quad \text{za} \quad Z = 2H$$

Napredak konsolidacije, obzirom na disipaciju pornog tlaka izražava se tzv. stupnjem konsolidacije koji se prema Das (2009) definira kao:

$$U_v = \frac{u_0 - u_e}{u_0} \cdot 100 \quad (2-13)$$

Gdje je:  $U_v$  - stupanj konsolidacije (%),  
 $u_0$  - početni porni tlak (kPa),  
 $u_e$  - porast pornog tlaka u trenutku  $t$  (kPa).

Pa se rješenje diferencijalne jednačbe konsolidacije može se zapisati kao (Barnes, 1995):

$$U_v = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \cdot \sin(MZ) \cdot e^{-M^2 \cdot T_v} \quad (2-14)$$

gdje je:

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

Rješenje diferencijalne jednačbe konsolidacije dobiva se kao niz trigonometrijskih funkcija i uobičajeno se prikazuju dijagramom, kako je prikazano na slici 2-4. Krivulje se nazivaju

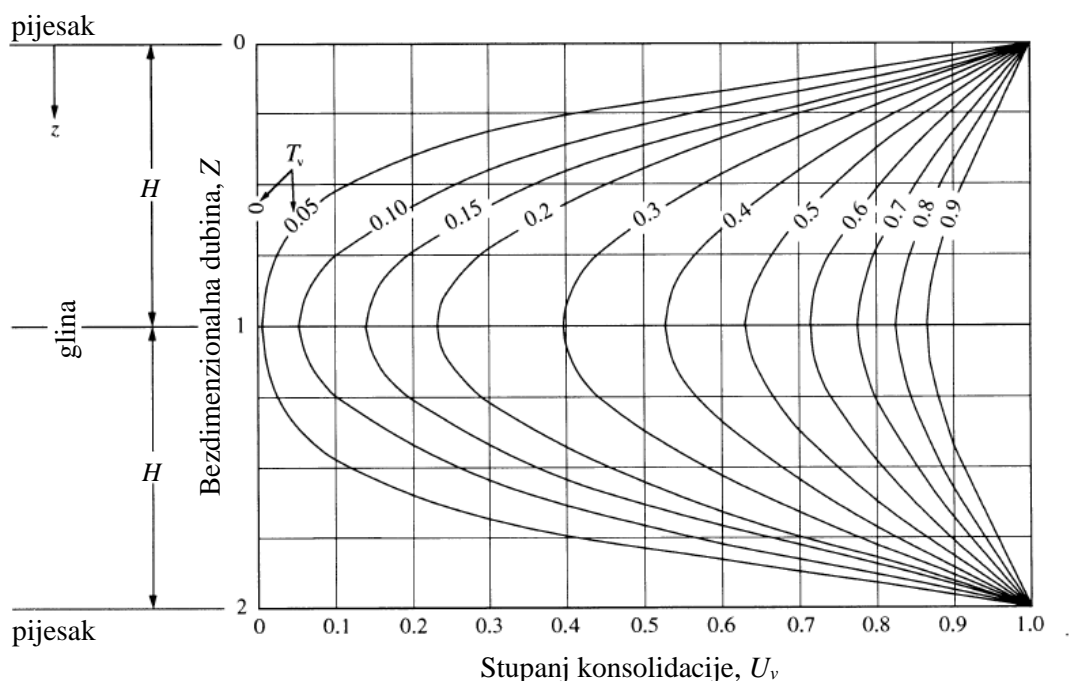
izokrone, a prikazuju promjenu stupnja konsolidacije  $U_v$  za različitu dubinu  $Z$ , kada je  $T_v$  konstantan (Barnes, 1995).

Stupanj konsolidacije vezan je za određenu dubinu promatranog sloja. Za razliku od njega tzv. prosječni stupanj konsolidacije odnosi se na cijelu debljinu sloja (Barnes, 1995) i stoga je od praktičnog značaja za analizu vremenskog tijeka slijeganja. Definira se kao omjer slijeganja koja su se već ostvarila (trenutna) i konačne veličine slijeganje (Murthy, 2002):

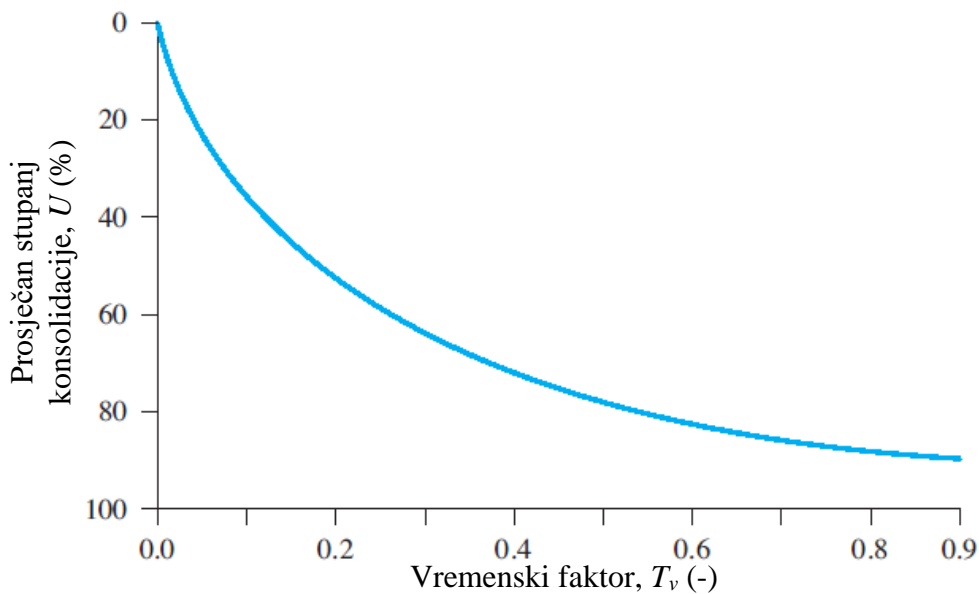
$$U = \frac{S_{c(t)}}{S_c} \cdot 100 \quad (2-15)$$

Gdje je:  $U$  - prosječni stupanj konsolidacije (%),  
 $S_{c(t)}$  - trenutno slijeganje (m),  
 $S_c$  - konačno slijeganje (m).

Prema tome u analizi vremenskog tijeka slijeganja ključni parametri su bezdimenzionalni vremenski faktor i prosječan stupanj konsolidacije. Za proračun je potrebno odrediti konačno slijeganje, a veličinu slijeganja u nekom vremenu preko odnosa  $U$  i  $T_v$ . Njihov odnos uobičajeno se prikazuje dijagramom kako je prikazano na slici 2-5., a vrijedi za slučaj kada je  $u_0$  jednak za cijelu visinu promatranog sloja (Das, 2009).



Slika 2-4. Grafički prikaz rješenja jednačbe konsolidacije (modificirano prema Barnes, 1995)



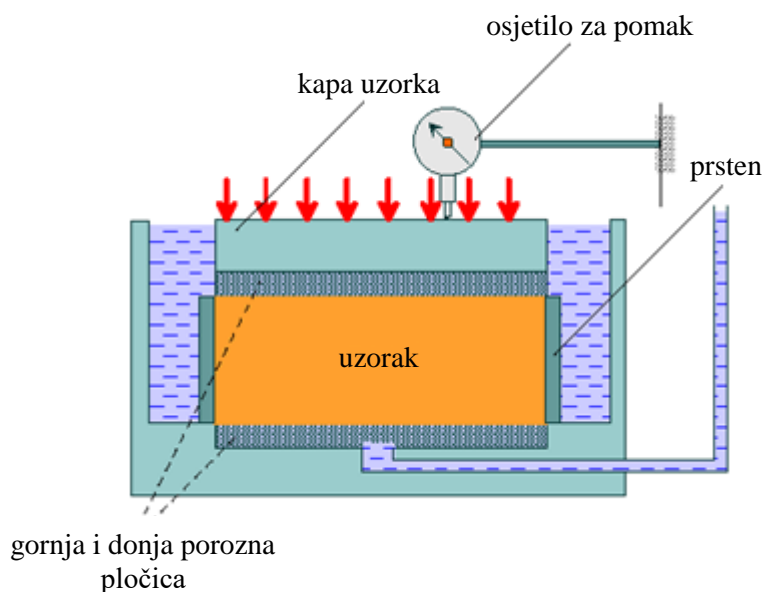
**Slika 2-5.** Odnos prosječnog stupnja konsolidacije i bezdimenzionalnog vremenskog faktora (modificirano prema Das, 2009)

## 2.6. Laboratorijski model jednodimenzionalne konsolidacije

Laboratorijsko ispitivanje jednodimenzionalne konsolidacije provodi se u uređaju koji se naziva edometar. Ispitivanjem se određuju parametri potrebni za analizu i procjenu slijeganja. Edometar je uređaj u kojem se uzorak tla ispituje pod vertikalnim opterećenjem uz spriječene bočne deformacije. U pravilu se ispituju neporemećeni uzorci koherentnih materijala. Ugrađuju se u tzv. edometarsku ćeliju u obliku diska. Oblikuju se metalnim prstenom standardnih dimenzije te stavljaju između dvije porozne pločice. Na gornjoj poroznoj pločici nalazi se kapa preko koje se prenosi opterećenje, a tijekom standardnog ispitivanja uzorak je cijelo vrijeme potopljen u vodi. Zbog poroznih pločica omogućeno je obostrano dreniranje, a prsten sprječava bočne deformacije. Uslijed opterećenja dolazi do istjecanja vode u prostor oko uzorka. Pretpostavlja se da se deformacije odvijaju samo u vertikalnom smjeru, odnosno da dolazi do jednodimenzionalne konsolidacije. Opterećenje se nanosi u inkrementima, a uobičajeno je da je svaki sljedeći dva puta veći od prethodnog. Princip se može predočiti analogijom klipa i opruge kako je opisano u potpoglavlju 2.4. U početku će svo opterećenje preuzeti voda i praktički neće biti promjene volumena. Nakon što se uzorak optereti, doći će do istjecanja vode iz pora, visina uzorka će se smanjiti, odnosno doći će do slijeganja. Kako voda postepeno istječe porni tlak se disipira. Dio



opterećenja preuzimaju čestice tla i rastu efektivna naprežanja. Kada sav višak vode izađe iz pora, smatra se da je porni tlak jednak nuli i da opterećenje u potpunosti preuzimaju čestice tla. Edometar nema mogućnost mjerenja pornog tlaka, pa se kod svakog inkrementa naprežanja čeka da se slijeganje umiri. Uobičajeno, svaki inkrement naprežanja traje 24 sata. Zabilježeni pomaci trebali bi pokazivati konstantnu vrijednost što znači da je istjecanje vode prestalo. Shematski prikaz edometarske ćelije s uzorkom dan je na slici 2-6.



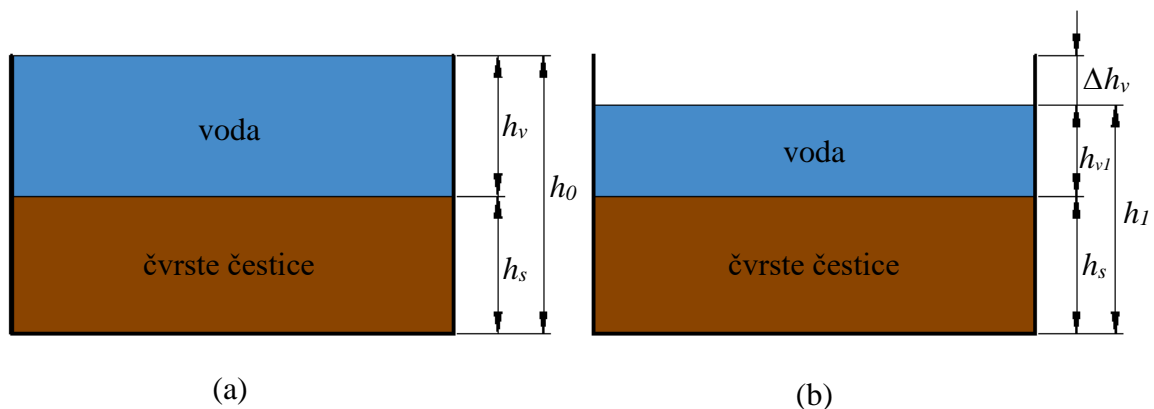
**Slika 2-6.** Edometar (modificirano prema Kvasnička i Domitrović, 2007)

Rezultati pokusa u edometru interpretiraju se prema Terzaghijevoj teoriji jednodimenzionalne konsolidacije jer je pretpostavka da se konsolidacije sloja tla i uzorka odvija prema istim postavkama (Mulabdić, 2018). U stvarnim uvjetima konsolidacija je vrlo spor i dugotrajan proces, dok se u edometru odvija relativno brzo jer su dimenzije uzorka male. Rezultati ispitivanja uobičajeno se prikazuju dijagramom koji povezuje naprežanje s koeficijentom pora ili relativnom deformacijom i dijagramom vremenskog tijeka slijeganja za opažane inkremente opterećenja. Rezultati pokusa ovise o velikom broju čimbenika: vrsti tla i poremećenosti uzorka, prethodnim naprežanjima, rasporedu i trajanju inkremenata opterećenja i sl. Pokusom se određuju parametri: modul stišljivosti, indeks kompresije i rekompresije, koeficijent konsolidacije, naprežanje prethodne konsolidacije i dr. o čemu više u nastavku.

### 3. KONSOLIDACIJSKA SVOJSTVA TLA

#### 3.1. Modul stišljivosti tla

U drugom poglavlju predstavljen je trokomponentni karakter tla prema kojem je ono sastavljeno od čvrstih čestica, vode i zraka. Istaknuto je i da su čestice tla i voda nestišljive, zbog čega će se uslijed opterećenja ukupni volumen smanjiti zbog smanjenja volumena pora. Uzorak tla u edometru je potpuno saturiran, bočne deformacije su spriječene pa je promjena koeficijenta pora izravno povezana s promjenom visine uzorka. Na slici 3-1. prikazan je model uzorka u edometru prije (a) i poslije (b) jednog inkrementa opterećenja.



Slika 3-1. Edometarski model (prema Murthy, 2002)

Gdje su:  $h_0$  - početna visina uzorka (mm),  
 $h_v$  - ekvivalentna visina pornog prostora (mm),  
 $h_s$  - ekvivalentna visina čvrstih čestica (mm),  
 $h_1$  - ukupna visina uzorka nakon jednog inkrementa opterećenja (mm),  
 $h_{v1}$  - ekvivalentna visina pornog prostora nakon jednog inkrementa opterećenja (mm),  
 $\Delta h$  - ukupna promjena visine uzorka koja odgovara promjeni visine pornog prostora  $\Delta h_v$  (mm).

Prema odnosima sa slike 3-1. definira se početni koeficijent  $e_0$  pora:

$$e_0 = \frac{h_v}{h_s} \quad (3-1)$$

Nakon slijeganja volumen čvrstih čestica ostaje konstantan, pa tako i visina  $h_s$ . Prema tome vrijedi da nakon jednog inkrementa opterećenja koeficijent pora iznosi:

$$e_l = \frac{h_{vl}}{h_s} \quad (3-2)$$

Deformacija uzorka tada je jednaka:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_v}{h_0} = \frac{h_v - h_{vl}}{h_v + h_s} \quad (3-3)$$

Dijeljenjem izraza 3-3. s visinom čvrstih čestica  $h_s$ , dobiva se izraz koji povezuje relativnu deformaciju i koeficijent pora:

$$\varepsilon = \frac{e_0 - e_l}{e_0 + 1} = \frac{\Delta e}{e_0 + 1} \quad (3-4)$$

Stišljivost tla iskazuje se preko modula vertikalne deformacije ili edometarskog modula. On se računa kao omjer promjene vertikalnog naprezanja i promjene deformacije unutar jednog inkrementa, za svaki inkrement opterećenja (Mulabdić, 2018):

$$E_{oed} = \frac{\sigma_f - \sigma_i}{\varepsilon_{v,f} - \varepsilon_{v,i}} \quad (3-5)$$

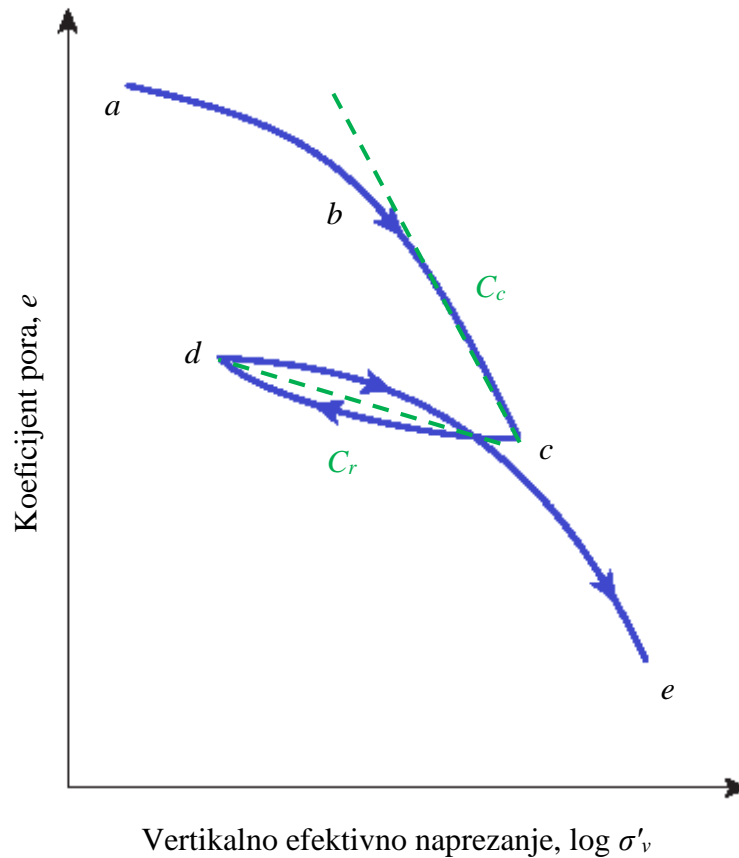
gdje su:  $E_{oed}$  - edometarski modul ili modul stišljivosti (kPa),  
 $\sigma_f$  - efektivno naprezanje nakon dodanog inkrementa opterećenja (kPa),  
 $\sigma_i$  - efektivno naprezanje prije dodanog inkrementa opterećenja (kPa),  
 $\varepsilon_{v,f}$  - relativna vertikalna deformacija uzorka u odnosu na početnu visinu, pri naprezanju  $\sigma_f$  (-),  
 $\varepsilon_{v,i}$  - relativna vertikalna deformacija uzorka u odnosu na početnu visinu, pri naprezanju  $\sigma_i$  (-).

Edometarski modul se u literaturi često naziva i modulom stišljivosti ( $M_v$ ). Može se izraziti i preko koeficijenta pora, korištenjem izraza 3-4. za relativnu deformaciju:

$$E_{oed} = \frac{\Delta \sigma' \cdot (1 + e_0)}{\Delta e} \quad (3-6)$$

Važno je istaknuti da edometarski modul nije konstantna za određenu vrstu tla. On ovisi o stanju naprezanja za koje se promatra promjena volumena, pa se tako se s promjenom opterećenja mijenja i njegova vrijednost (Craig, 2004). Određuje se isključivo za prirast ili inkrement naprezanja  $\Delta \sigma'$ .

Kako je smanjenje volumena uzorka povezano sa smanjenjem volumena pora, rezultati pokusa se najčešće prikazuju u obliku dijagrama koji povezuje naprezanje s koeficijentom pora tzv. edometarski dijagram. Primjer dijagrama za glineno tlo dan je na slici 3-2.

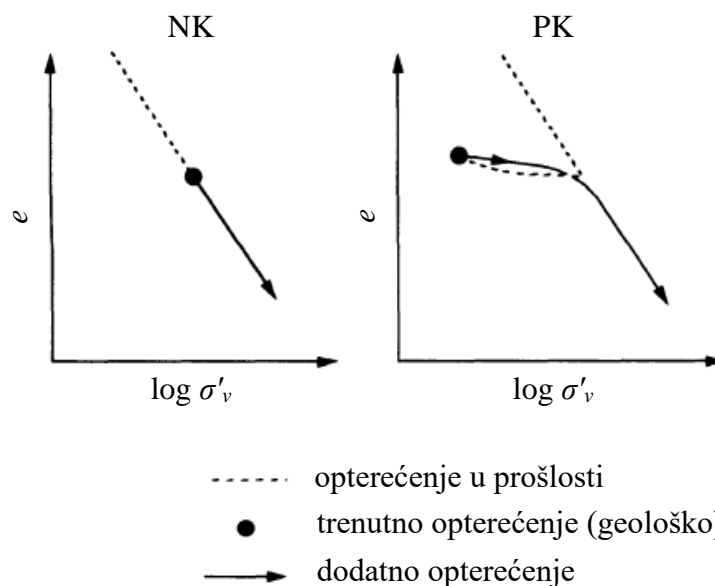


**Slika 3-2.** Primjer edometarskog dijagrama (izvor: Das, 2009., modificirano prema Budhu.)

Na apscisu se u logaritamskom mjerilu nanosi vertikalno efektivno naprezanje u inkrementima, a na ordinatu koeficijent pora za konačno stanje svakog inkrementa. Usljed opterećenja i rasterećenja tlo ima različitu deformabilnost, pa se tako edometarska krivulja sastoji se od nekoliko dijelova. Na slici 3-2. dio krivulje *abc* predstavlja početno opterećenje, dio *cd* rasterećenje, a dio *de* ponovno opterećenje. Na slici se može uočiti kako je početni dio krivulje *ab* zakrivljen, a dio *bc* ravna linija. Taj pravac ima nagib  $C_c$  koji se naziva indeks kompresije. Dio krivulje *cd* također se može aproksimirati pravcem čiji je nagib  $C_r$  koji se naziva indeks rekompresije. Općenito, oblik edometarske krivulje tj. odnos naprezanja i koeficijenta pora uslijed opterećenja, ovisi o naprezanjima kojima je tlo bilo izloženo u svojoj geološkoj prošlosti (Craig, 2004). Ta naprezanja nazivaju se naprezanjima prethodne konsolidacije (prekonsolidacije).

### 3.2. Naprezanje prethodne konsolidacije

Poznavanje povijesti naprezanja naročito je značajno kod glina, koja će se za iste cikluse opterećenja različito ponašati. Tlo kojemu je današnje stanje naprezanja ujedno i najveće prethodno naprezanje naziva se normalno konsolidirano tlo, a ono koje je u svojoj prošlosti bilo izloženo naprezanjima većim nego danas naziva se prekonsolidirano tlo. Za normalno konsolidiranu glinu odnos naprezanja i koeficijenta pora uslijed inicijalnog opterećenja biti će linearan ili približno takav (Craig, 2004). U takvim tlima, određena promjena u naprezanjima rezultirat će značajnom promjenom u koeficijentu pora i većim slijeganjima. Kod prekonsolidirane gline krivulja inicijalnog opterećenja započet će karakterističnim zakrivljenim dijelom kako je prikazano na slici 3-2. Takvo tlo je u nekom trenutku svoje povijesti bilo izloženo naprezanjima većim nego danas zbog čega ima određeni koeficijent pora. Stoga, za opterećenja manja od naprezanja prethodne konsolidacije promjena koeficijenta pora neće biti toliko izražena. Tlo će se ponašati približno kao elastični materijal, a slijeganja će biti mala (Budhu, 2010). Međutim, pri naprezanjima većim od naprezanja prethodne konsolidacije promjena u koeficijentu pora biti će izraženija (Das, 2009). Na krivulji inicijalnog opterećenja, na mjestu naprezanja prethodne konsolidacije uočiti će se lom, a naprezanje i koeficijent pora poprimiti će linearan odnos. Prekonsolidirano tlo ponašati će se u tom rasponu naprezanja slično normalno konsolidiranom tlu (Budhu, 2010). Primjer krivulja za normalno konsolidirano (NK) i prekonsolidirano tlo (PK) dan je na slici 3-3.



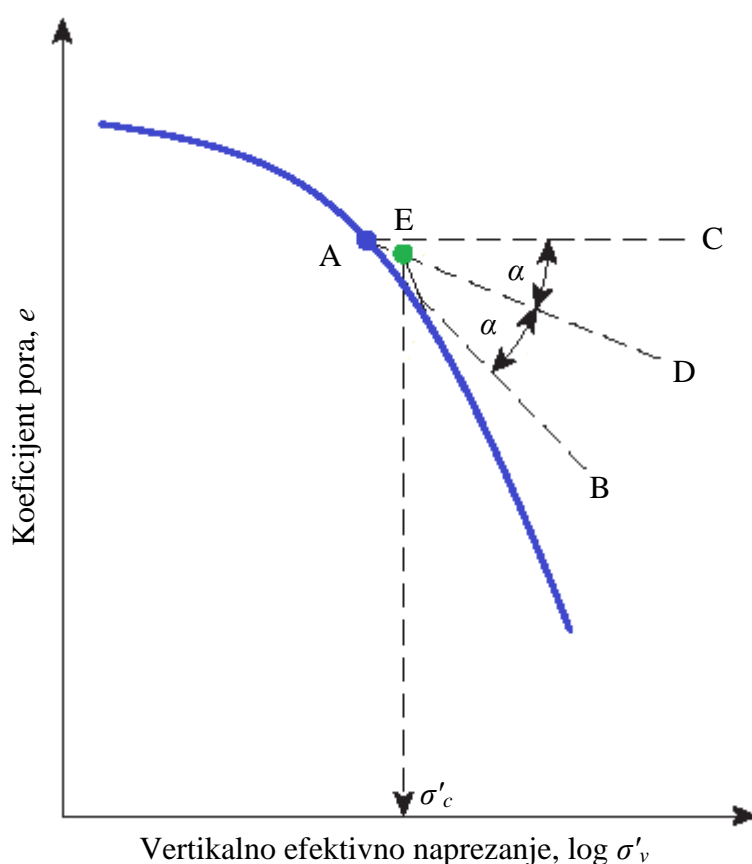
**Slika 3-3.** Odnos koeficijenta pora i efektivnog naprezanja za NK i PK (modificirano prema Barnes, 1995)

Odnos najvećeg napreznja kojemu je tlo bilo izloženo u povijesti i trenutnog stanja napreznja može se kvantitativno izraziti stupnjem prekonsolidacije. Za normalno konsolidirano tlo stupanj prekonsolidacije iznosi 1, a za prekonsolidirano tlo vrijednosti su veće od 1. Određuje se kao omjer:

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'} \quad (3-7)$$

Gdje su:  $OCR$  - stupanj prekonsolidacije, eng. *overconsolidation ratio* (-),  
 $\sigma'_c$  - napreznje prethodne konsolidacije (kPa),  
 $\sigma'$  - trenutno stanje napreznja (kPa).

Određivanje napreznja prethodne konsolidacije izvodi se u edometarskom dijagramu grafičkom metodom koju je predložio Arthur Casagrande. Za pouzdanu interpretaciju napreznja prethodne konsolidacije potrebno je na uzorak primijeniti opterećenje puno veće od trenutnog (geološkog), najčešće i do 800 ili 1600 kPa (Mulabdić, 2018). Metoda konstrukcije točke prethodne konsolidacije prikazana je na slici 3-4.



**Slika 3-4.** Grafička metoda konstrukcije točke prethodne konsolidacije (modificirano prema Das, 2009)

Postupak se sastoji od sljedećih koraka:

1. Na edometarskom dijagramu i krivulji inicijalnog opterećenja odredi se točka najveće zakrivljenosti A,
2. U toj točki crta se tangenta na krivulju AB i povlači horizontalan pravac AC,
3. Između horizontalnog pravca i tangente odredi se simetrala kuta te povuče pravac AD,
4. Na završnom dijelu krivulje povlači se asimptota tako da siječe pravac AD,
5. Na presjecištu asimptote i pravca AD nalazi se točka E, koja odgovara naprezanju prethodne konsolidacije,
6. Iznos naprezanja prethodne konsolidacije  $\sigma'_c$  očitava se na osi apscisa.

### 3.3. Indeks kompresije i rekompresije

Za procjenu primarnog konsolidacijskog slijeganja određuju se indeks kompresije  $C_c$  i indeks rekompresije  $C_r$ . Interpretacija parametara svodi se na određivanje nagiba edometarske krivulje u opterećenju i rasterećenju (Mulabdić, 2018) kako je prikazano na slici 3-2. Prema Budhu (2010) indeks kompresije definira se kao nagib linearnog dijela edometarske krivulje opterećenja, a indeks rekompresije kao prosječni nagib krivulje rasterećenja ili ponovnog opterećenja. Indeks kompresije naziva se i indeksom stišljivosti. Određuje se na dijelu krivulje koji odgovara ponašanju normalno konsolidiranog tla. Prema Craigu (2004) može se odrediti za bilo koje dvije točke preko izraza:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)} \quad (3-8)$$

Gdje su:  $C_c$  - indeks kompresije (-),  
 $e_1$  – koeficijent pora pri naprezanju  $\sigma'_1$  (-),  
 $e_2$  – koeficijent pora pri naprezanju  $\sigma'_2$  (-).

Prema Budhu (2010) dio krivulje rasterećenja može se aproksimirati ravnom linijom čiji je nagib tzv. indeks rekompresije ili indeks bujanja. Bujanje je proces obrnut od konsolidacije u kojem dolazi do povećanja volumena vodom zasićenog tla. Karakterističan je za glinovita tla kod kojih voda može ući između slojeva minerala glina i tako povećati njihov volumen. Kod takvih tala, u edometarskom pokusu uslijed opterećenja prvo dolazi do

smanjenja volumena uzorka tla zbog istjecanja vode, ali kada se uzorak rastereti voda ponovno ulazi između slojeva i volumen raste. Indeks rekompresije određuje se analogno kao indeks kompresije.

### 3.4. Koeficijent konsolidacije

Koeficijent konsolidacije je parametar koji povezuje stišljivost i propusnost materijala. Određuje se za opažane inkremente opterećenja, a predstavlja mjeru brzine konsolidacije (Mulabdić, 2018). Obzirom da se rezultati edometarskog pokusa interpretiraju u skladu s Terzaghijevom teorijom, koeficijent konsolidacije može se odrediti pomoću izraza 2-8. U praksi se taj izraz rijetko koristi jer je potrebno poznavati edometarski modul i koeficijent propusnosti, a za čije se određivanje trebaju provesti laboratorijska mjerenja. Jednostavniji način određivanja temelji se na rezultatima edometarskog pokusa i dijagramu vremenskog tijeka slijeganja. Najčešće se koriste dvije grafičke metode u kojima se uspoređuju teorijska i eksperimentalna krivulja, tzv. prilagođavanjem krivulja (eng. *curve fitting method*). Jedna je metoda logaritma vremena koju su predložili Casagrande i Fadum (1940), a druga je metoda kvadratnog korijena koju je predložio Taylor (Das, 2009). Prema Mulabdiću (2018) krivulja u dijagramu vremenskog tijeka slijeganja uobičajeno ima oblik položenog S. Međutim, ako je naprezanje pod kojim je izmjereno slijeganje manje od naprezanja prethodne konsolidacije taj se oblik gubi.

Casagrande je predložio da se interpretacija provodi u dijagramu na kojem se na apscisu nanosi vrijeme u logaritamskom mjerilu, a na ordinatu očitavanja pomaka u linearnom mjerilu. Na početku, za  $t = 0$ , logaritam je beskonačno velik pa krivulja ne počinje u nuli, stoga se početno slijeganje aproksimira. Aproksimacija se izvodi konstrukcijom parabole, na način da se odabere neko vrijeme  $t_1$  i četiri puta veće  $t_2 = 4 \cdot t_1$  (Mulabdić, 2018). Za navedena vremena odredi se odsječak na osi ordinata ( $x$ ), koji se prenese od vremena  $t_1$  prema gore. Na taj način određen je početak primarne konsolidacije ( $U_0\%$ ). Zatim se odredi završetak primarne konsolidacije, na način da se u točki infleksije (A) povuče tangenta i traži presjecište s tangentom na donji dio krivulje (Mulabdić, 2018). Presjecište tangenti (B) odgovara završetku primarne konsolidacije ( $U_{100\%}$ ). Obzirom da su početak i kraj primarne konsolidacije aproksimirani, za interpretaciju se kao mjerodavan uzima prosječni stupanj konsolidacije  $U_{50\%}$  i vrijeme  $t_{50\%}$ . Tom vremenu odgovara  $T_v = 0,197$ , a najdulji put dreniranja jednak je polovici visine uzorka jer je u edometarskom pokusu omogućeno

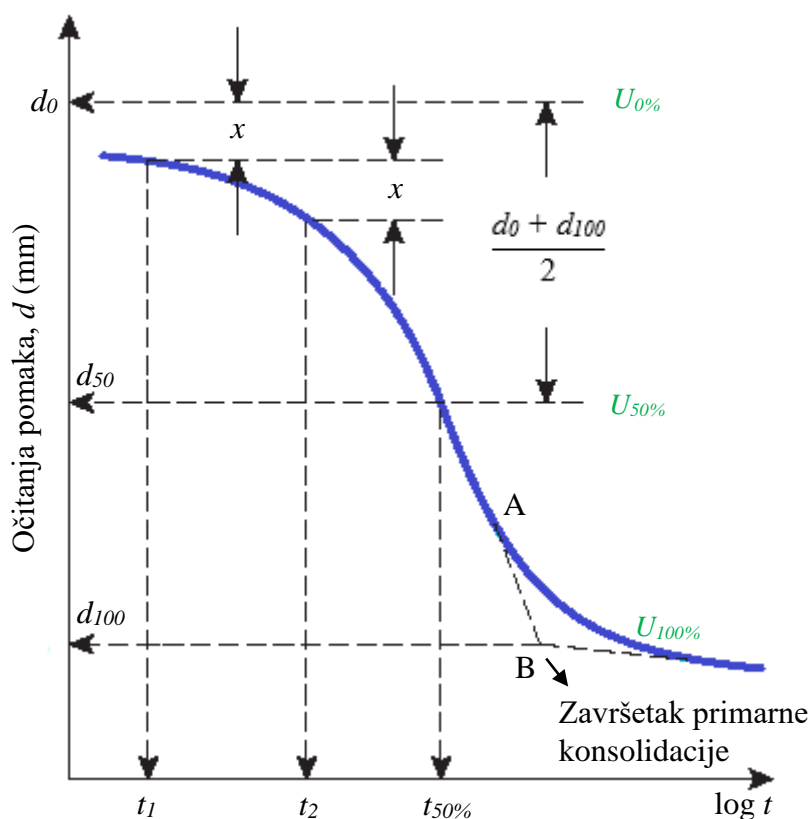


obostrano dreniranje. Koeficijent konsolidacije za uzorak u edometarskom pokusu određuje se kao (Mulabdić, 2018):

$$C_v = \frac{0,197 \cdot \left(\frac{H_{50}}{2}\right)^2}{t_{50}} \quad (3-9)$$

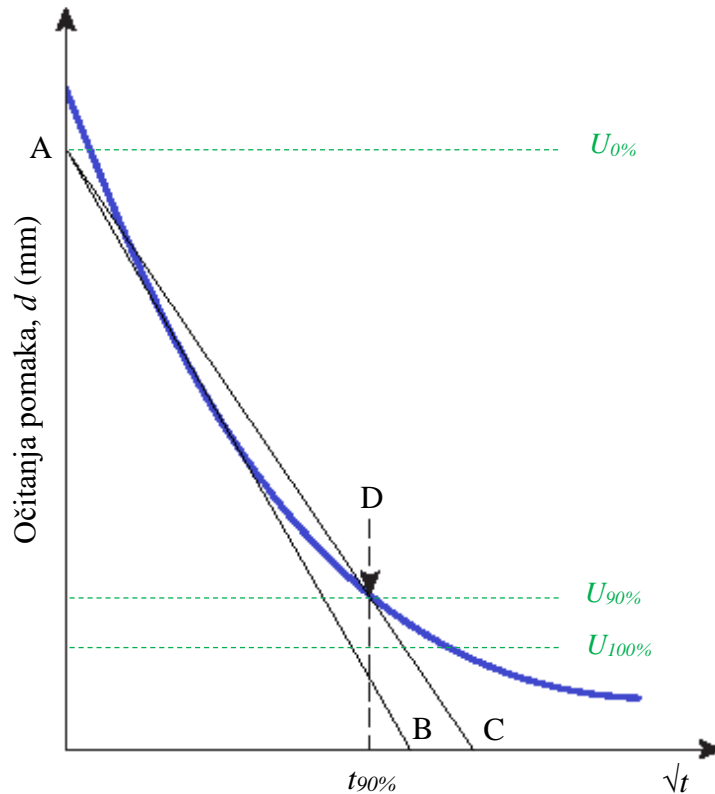
Gdje su:  $t_{50}$  - vrijeme koje odgovara 50 % primarne konsolidacije (s),  
 $H_{50}$  - visina uzorka u edometru koja odgovara vremenu  $t_{50\%}$  (mm).

Opisani postupak prikazan je na slici 3-5.



**Slika 3-5.** Casagrandeova metoda prilagođavanja dijagrama vremenskog tijeka slijeganja (modificirano prema Das, 2009)

Drugi način interpretacije koeficijenta konsolidacije je prema Tayloru u kojem se vremenska os crta u mjerilu drugog korijena. Prema Mulabdiću (2018) Taylorov postupak je pogodniji kada krivulja konsolidacije nema oblik položenog S zbog čega se Casagrandeova konstrukcija ne može pouzdano izvesti. Princip je sličan kao u prethodnoj metodi, a postupak prilagođavanja krivulje prikazan je na slici 3-6.



**Slika 3-6.** Taylorova metoda prilagođavanja dijagrama vremenskog tijeka slijeganja (modificirano prema Das, 2009)

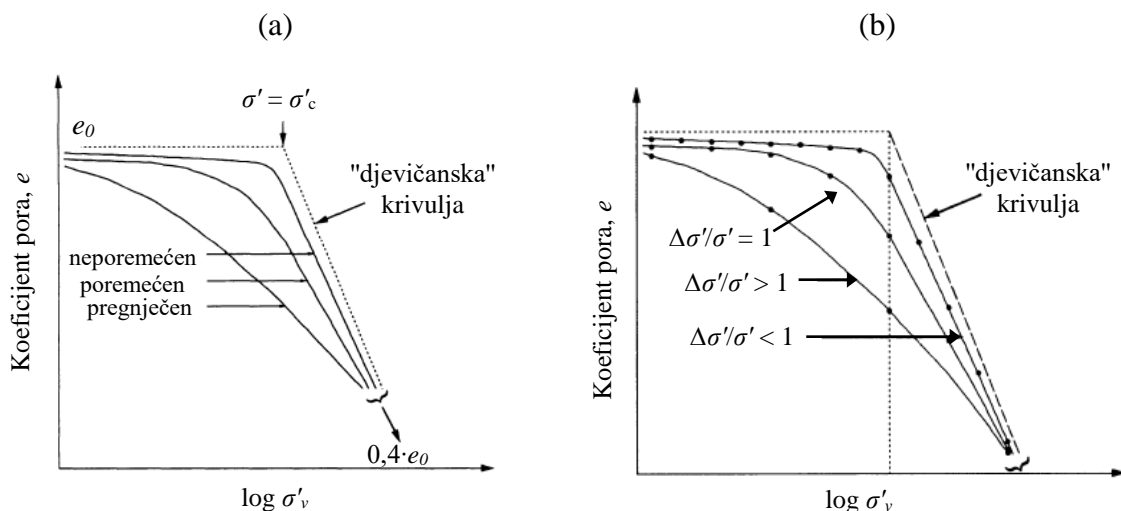
Za opažani inkrement opterećenja na krivulji vremenskog tijeka slijeganja povlači se pravac AB koji najbolje odgovara početnom dijelu. Odsječak tog pravca na osi apscisa iznosi  $x$ ,  $a$  na udaljenosti  $1,15 \cdot x$  nalazi se točka C. Pomoću te točke konstruira se pravac AC s 15 % većim nagibom od pravca AB. Na mjestu gdje pravac AC siječe krivulju nalazi se točka D koja odgovara vremenu u kojem je postignuto 90 % primarne konsolidacije. Upravo to vrijeme koristi se određivanje koeficijenta konsolidacije prema Tayloru. Vrijednost se očitava iz dijagrama kao  $t_{90}$  te za njega vrijedi  $T_v = 0,848$ . Prema tome koeficijent konsolidacije određuje se kao (Mulabdić, 2018):

$$C_v = \frac{0,848 \cdot \left(\frac{H_{90}}{2}\right)^2}{t_{90}} \quad (3-10)$$

Gdje su:  $t_{90}$  - vrijeme koje odgovara 90 % primarne konsolidacije (s),  
 $H_{90}$  - visina uzorka u edometru koja odgovara vremenu  $t_{90\%}$  (mm).

### 3.5. Utjecaji na interpretaciju rezultata edometarskog pokusa

Rezultati edometarskog pokusa, a to znači parametri stišljivosti i konsolidacije najviše ovise o uvjetima ispitivanja i poremećenosti uzorka. Prema Mulabdiću (2018) presudan utjecaj ima poremećenost uzorka. Obzirom da je tijekom vađenja, rukovanja i pripreme uzorka za pokus neizbježan utjecaj na njegova *in situ* svojstva, dobiveni rezultati odstupat će od stvarnog stanja. Istraživanja pokazuju da se s povećanjem poremećenosti uzorka vrijednost indeksa kompresije i koeficijenta konsolidacije smanjuje. Utjecaj poremećenosti uzorka na parametre tla vidljiv je na slici 3-7. (a).



**Slika 3-7.** Utjecaj poremećenosti uzorka za normalno konsolidiranu glinu (a) i edometarske krivulje s promjenom veličine inkrementa opterećenja (b) (modificirano prema Barnes, 1995)

Rezultati edometarskog pokusa ovise i o veličini inkrementa opterećenja te trajanju istog. Veličina inkrementa opterećenja može se izraziti indeksom povećanja opterećenja, tzv. *load increment ratio (LIR)* koji se definira kao:

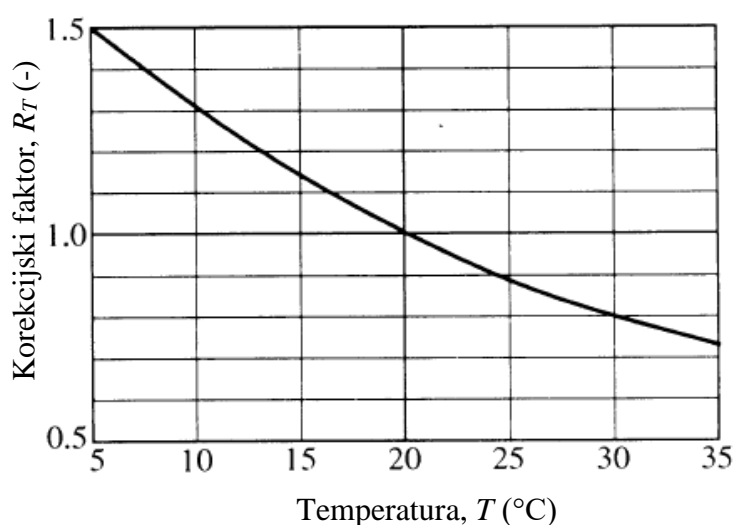
$$LIR = \frac{\Delta\sigma'}{\sigma'} \quad (3-11)$$

Gdje su:  $LIR$  – indeks povećanja opterećenja (-),  
 $\Delta\sigma'$  – ukupna promjena naprezanja (kPa),  
 $\sigma'$  – trenutno naprezanje (kPa).

Inkrement ili prirast opterećenja  $\Delta\sigma'$  predstavlja razliku u vertikalnom naprezanju, kojemu je uzorak izložen u dva uzastopna koraka opterećenja (Mulabdić, 2018). U standardnoj

geotehničkoj praksi, ako nije drugačije definirano, ispitivanja u edometru se provode na način da se uzorak opterećuje u inkrementima, takvim da je svaki sljedeći dvostruko veći od prethodnog. U tom slučaju omjer  $\Delta\sigma'/\sigma'$  iznosi 1. Primjena opterećenja u inkrementima čiji je *LIR* manji od uobičajenih 1 preporuča se za ispitivanje tala koja su vrlo osjetljiva (ASTM D2435/D2435M, 2011). Barnes (1995) navodi da se najreprezentativniji rezultati ispitivanja u edometru, posebno kod slabokonsolidiranih ili nekonsolidiranih glina, postižu opterećenjem u malim inkrementima, odnosno za koje vrijedi  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$ . Također, da povećanjem odnosa  $\Delta\sigma'/\sigma'$  krivulja  $e\text{-log}\sigma'_v$  pomiče se u lijevo, a smanjenjem u desno kako je prikazano na slici 3-7. (b).

Osim poremećenosti uzorka na rezultate edometarskog pokusa utječe i temperatura. Koeficijente konsolidacije dobivene metodama prema Casagrandeu i Tayloru stoga treba korigirati. Preporuča se dobivene vrijednosti koeficijenta konsolidacije pomnožiti s popravnim faktorom  $R_T$  ukoliko je ispitivanje provedeno na temperaturi različitoj od 20 °C (Mulabdić, 2018). Prema Barnesu (1995) korekcijski faktor određuje se preko dijagrama prikazanog na slici 3-8.



**Slika 3-8.** Dijagram za korekciju izračuna koeficijenta konsolidacije zbog promjene temperature (Barnes, 1995)

#### 4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

U svrhu određivanja utjecaja veličine inkrementa opterećenja na konsolidacijska svojstva tla provedeno je laboratorijsko određivanje osnovnih svojstava tla i ispitivanje deformabilnosti tla u edometru. Sva ispitivanja provedena su u Geomehaničkom laboratoriju u sklopu Odjela za mehaniku tla na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Nakon što su uzorci dopremljeni u laboratorij, pregledani su i napravljen je program laboratorijskih ispitivanja. Ispitivanja su provedena u skladu s važećim normama, a program ispitivanja sastojao se od:

- Ispitivanja jednodimenzionalne konsolidacije tla,
- Ispitivanja vlažnosti uzorka tla,
- Ispitivanja gustoće čvrstih čestica,
- Ispitivanja Atterbergovih granica,
- Ispitivanja granulometrijskog sastava tla.

##### 4.1. Opis uzoraka

Ispitivanja su provedena na neporemećenim uzorcima dobivenim istražnim bušenjem, koje je za potrebe ovog rada ustupio Geotehnički studio d.o.o. Uzorci su s lokacije Trtnik Glinski na kojoj je ustanovljeno klizište. U Geomehanički laboratorij RGNF-a dopremljeni su zaštićeni plastičnom folijom. Uz uvažavanje terenske klasifikacije, za ispitivanje deformabilnosti tla u edometru odabran je uzorak iz bušotine B-1 koji je klasificiran kao glina. Osnovni podaci dani su u tablici 4-1., a uzorak je prikazan na slici 4-1.

**Tablica 4-1.** Osnovni podaci o uzorcima (prema ustupljenim podacima, Geotehnički studio d.o.o.)

Oznaka uzorka	Bušotina	Dubina uzorkovanja (m)	Terenska klasifikacija - opis
A	B-1	5,00 – 5,35	GLINA prahovita; srednje do visoke plastičnosti; polučvrste konzistencije; sive boje prošarana smeđom, boja tamnija pri kraju intervala. Sadrži Fe i Mn okside.

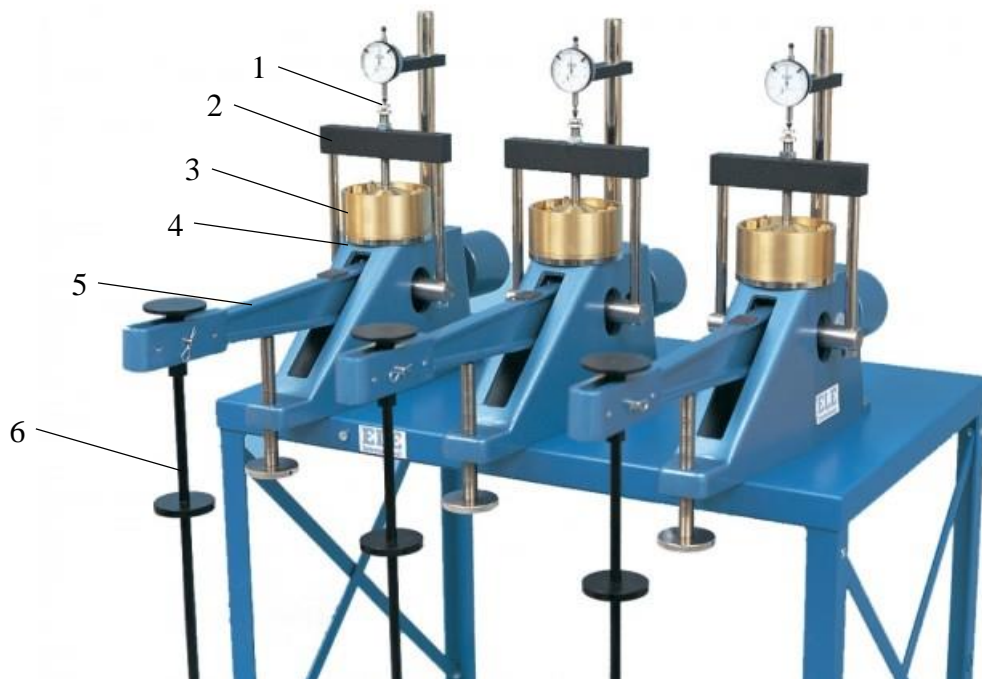


**Slika 4-1.** Uzorak A (fotografirala: E. Oršulić)

#### 4.2. Ispitivanje tla u edometru

Ispitivanja su provedena u edometarskim uređajima tvrtke ELE prema postupcima opisanim u normi ASTM D 2435/2435M (2011).

Glavni dio opreme za ispitivanje čini edometarski uređaj, edometarska ćelija, utezi, pribor za obradu uzorka, pomično mjerilo, vaga, sušionik i dr. Na slici 4-2. dan je prikaz edometarskih uređaja s naznačenim osnovnim dijelovima.



**Slika 4-2.** Edometarski uređaji (izvor: <https://www.ele.com/>)

Osnovni dijelovi edometarskog uređaja (Mulabdić, 2018):

- 1 – osjetilo za pomak,
- 2 – poluga,
- 3 – edometarska ćelija,
- 4 – postolje,
- 5 – sustav za prijenos opterećenja,
- 6 – nosač utega.

Tijekom ispitivanja uzorak se ugrađuje u ćeliju izrađenu od mjedi. Dijelovi edometarske ćelije prikazani su na slici 4-3.



**Slika 4-3.** Edometarska ćelija za uzorak (izvor: <https://www.ele.com/>)

Dijelovi edometarske ćelije su:

- 1 – ćelija,
- 2 – prsten za uzorak,
- 3 – kapa uzorka,
- 4 – gornja porozna pločica,
- 5 – donja porozna pločica,
- 6 – stezni prsten,
- 7 – matice.

Opterećenje se nanosi pomoću utega koji se postavljaju na nosač, a opterećenje se na uzorak ravnomjerno prenosi, mehanizmom poluge, preko kape uzorka. To je princip tzv. klasičnog edometra (Mulabdić, 2018). Utezi su prikazani na slici 4-4.



**Slika 4-4.** Utezi (izvor: <https://www.ele.com/>)

Prije ispitivanja uzorke je potrebno pripremiti za ugradnju u ćeliju. Priprema se sastoji od formiranja uzoraka u oblik diska. Oblikuju se utiskivanjem prstena s nožem u nabušenu jezgru. Prsten je prije toga potrebno izvagati i odrediti mu dimenzije. U sklopu ispitivanja korišten je prsten standardnih dimenzija, unutarnjeg promjera 75 mm i visine 20 mm. Nakon što se prsten utisne u jezgru, višak materijala se pažljivo odreže, a rubovi se poravnaju s krajevima prstena. Višak materijala koristi se za određivanje vlažnosti. Tako formiranom uzorku odredi se srednja početna visina i masa s prstenom. Visina se određuje na najmanje četiri ravnomjerno raspoređena mjesta pomoću pomičnog mjerila. Postupak pripreme uzorka prikazan je na slici 4-5.



**Slika 4-5.** Priprema uzorka za ispitivanje u edometru (fotografirala: M. Gavrić)



Pripremljen uzorak se zajedno s prstenom ugrađuje u edometarsku ćeliju. Postavlja se između dvije porozne pločice, a s jedne i druge strane stavlja se filter papir odgovarajućeg promjera. Ćelija s uzorkom i kapom stavlja se na postolje uređaja. Na uzorak se postavi poluga i osjetilo za pomak s početnom vrijednosti nula. Kad je uređaj spreman dodaje se masa utega koja odgovara prvom inkrementu opterećenja. Uslijed opterećenja osjetilo za pomak automatski bilježi pomake u zadanim vremenskim intervalima, a podaci se spremaju na računalo. Tijekom ispitivanja u edometru uzorci cijelo vrijeme moraju biti potopljeni vodom. Obzirom da se radi o glinovitim uzorcima, zbog moguće pojave bujanja, potapali su se nakon nanošenja prvog inkrementa opterećenja. Nakon što je uzorak potopljen praćene su vrijednosti pomaka. Općenito, pozitivna vrijednost pomaka i postupno povećanje uslijed opterećenja znači da se uzorak sliježe. Međutim, ako se uslijed opterećenja pomak smanjuje i/ili pokazuje negativne vrijednosti znači da je došlo do porasta volumena, odnosno bujanja. U tom slučaju mjerenje se prekida i započinje ponovno dodavanjem određene mase utega za sljedeći inkrement opterećenja. Uobičajeno, inkrement opterećenja djeluje kroz 24 sata, nakon čega se primjenjuje idući (Mulabdić, 2018). Za potrebe ovog rada ciklus opterećenja proveden je s inkrementima do maksimalnog opterećenja od 1600 kPa, nakon čega su uzorci postepeno rasterećeni. Rasterećenje se izvodi uklanjanjem utega određene mase, tako da se opterećenje na tlo prepolovi, kako je opisano u ASTM D 2435/2435M – 11. Nakon ciklusa opterećenja i rasterećenja, mjerenje se zaustavlja i uklanja se sustav opterećenja. Uzorak se zajedno s prstenom vadi iz ćelije, važe se i stavlja na sušenje. Nakon sušenja ponovno se važe za određivanje vlažnosti. Osušeni uzorci nakon ispitivanja u edometru prikazani su na slici 4-6.



**Slika 4-6.** Uzorci nakon ispitivanja u edometru (fotografirala: M. Gavrić)

U normi se navodi da rezultati ispitivanja u edometarskom pokusu ovise o primijenjenim inkrementima opterećenja. Cilj ovog rada bio je ispitati utjecaj veličine inkrementa opterećenja na konsolidacijska svojstva tla. Ispitivanja se uobičajeno, ako nije drugačije zadano, provode s omjerom  $\Delta\sigma'/\sigma'$  koji iznosi 1. To se postiže nanošenjem opterećenja, takvog da je svaki naredni inkrement dvostruko veći od prethodnog.

U svrhu proučavanja utjecaja veličine inkrementa opterećenja na rezultate edometarskog pokusa ispitana su ukupno dva uzorka. Za pojedino ispitivanje od izvornog uzorka izdvojena su dva uzorka i ugrađena u edometar na prethodno opisan način. Usporedno su podvrgnuta opterećenjima s različitim omjerom  $\Delta\sigma'/\sigma'$ , a rasterećenje se odvijalo prema jednakom rasporedu. Na jedan su primijenjeni inkrementi opterećenja takvi da je svaki naredni dvostruko veći od prethodnog, odnosno da vrijedi  $\Delta\sigma'/\sigma' = 1$  (u daljnjem tekstu veliki inkrementi). Na drugi uzorak primijenjeni inkrementi opterećenja su takvi da je odnos  $\Delta\sigma'/\sigma'$  u pravilu manji od 1, izuzev prva dva i zadnjeg inkrementa opterećenja (u daljnjem tekstu mali inkrementi). Rasporedi opterećenja i rasterećenja za male i velike inkremente dani su u tablicama 4-2. i 4-3.

**Tablica 4-2.** Raspored opterećenja s malim inkrementima

Broj inkrementa	Opterećenje, $\sigma'$ (kPa)	Prirast opterećenja, $\Delta\sigma'$ (kPa)	$\Delta\sigma'/\sigma'$
1	25	25	1
2	50	25	1
3	75	25	0,500
4	100	25	0,333
5	150	50	0,500
6	200	50	0,333
7	250	50	0,250
8	300	50	0,200
9	400	100	0,333
10	500	100	0,250
11	600	100	0,200
12	700	100	0,167
13	800	100	0,143
14	1600	800	1
15	400	-	-
16	100	-	-
17	25	-	-

**Tablica 4-3.** Raspored opterećenja s velikim inkrementima

Broj inkrementa	Opterećenje, $\sigma'$ (kPa)	Prirast opterećenja, $\Delta\sigma'$ (kPa)	$\Delta\sigma' / \sigma'$
1	25	25	1
2	50	25	1
3	100	50	1
4	200	100	1
5	400	200	1
6	800	400	1
7	1600	800	1
8	400	-	-
9	100	-	-
10	25	-	-

### 4.3. Određivanje osnovnih svojstava

Na višku materijala koji je ostao nakon obrade uzoraka za edometarski pokus provedena su standardna laboratorijska ispitivanja s ciljem određivanja vlažnosti i gustoće čvrstih čestica. Također, provedena su i ispitivanja granulometrijskog sastava tla i Atterbergovih granica. Rezultati su korišteni u obradi rezultata edometarskog pokusa i za klasifikaciju uzoraka.

Određivanje vlažnosti provedeno je u skladu s normom ASTM D2216 (1992) vaganjem uzorka prije i poslije sušenja. Ispitivanje gustoće čvrstih čestica provedeno je metodom s piknometrom prema postupku opisanom u normi ASTM D854 (2014). Napravljena su dva mjerenja, a gustoća čvrstih čestica određena je kao srednja vrijednosti. Ona se koristila u interpretaciji drugih fizikalnih svojstava poput granulometrijskog sastava, poroznosti, zasićenosti tla vodom i sl. Ispitivanje granulometrijskog sastava tla provedeno je kombiniranom analizom postupcima sijanja i areometriranja, prema normi ASTM D422 (2007). Određena je veličina, odnosno ekvivalentni promjer čestica  $D$  (mm) i njihova raspodjela u ukupnoj količini uzorka. Rezultati su dani u obliku kumulativnog granulometrijskog dijagrama, na temelju kojeg je određena dominantna veličina čestica. Atterbergove granice određene su prema postupcima opisanim u normi ASTM D 4318 (2017). Granica tečenja određena je pomoću Casagrandeovog uređaja iz odnosa vlažnosti i broja udaraca, koji se aproksimira pravcem. Određivanje granice plastičnosti provedeno je metodom valjčića koji se oblikuju dok se ne pojave pukotine na promjeru od 3 mm. Razlika između granice tečenja i granice plastičnosti iskazuje se tzv. indeksom plastičnosti. Dobiveni rezultati prikazuju se u dijagramu plastičnosti temeljem kojeg se provodi klasifikacija.

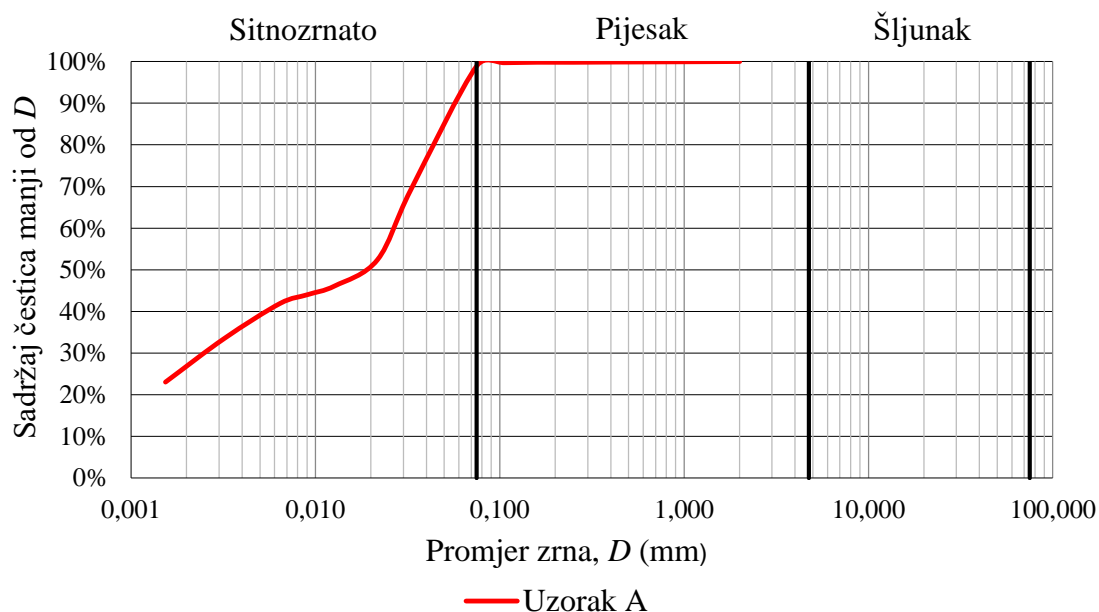
## 5. REZULTATI I RASPRAVA

### 5.1. Klasifikacija uzoraka tla

Klasifikacija podrazumijeva postupak kojim se različite ili iste vrste tala svrstavaju u pojedine grupe radi međusobnog razlikovanja i isticanja određenih svojstava (Mulabdić, 2018). U standardnoj geotehničkoj praksi nezaobilazna je klasifikacija prema granulometrijskom sastavu i granicama plastičnosti. Pregled rezultata laboratorijskih ispitivanja dan je u tablici 5-1., a rezultat granulometrijske analize prikazan je na slici 5-1.

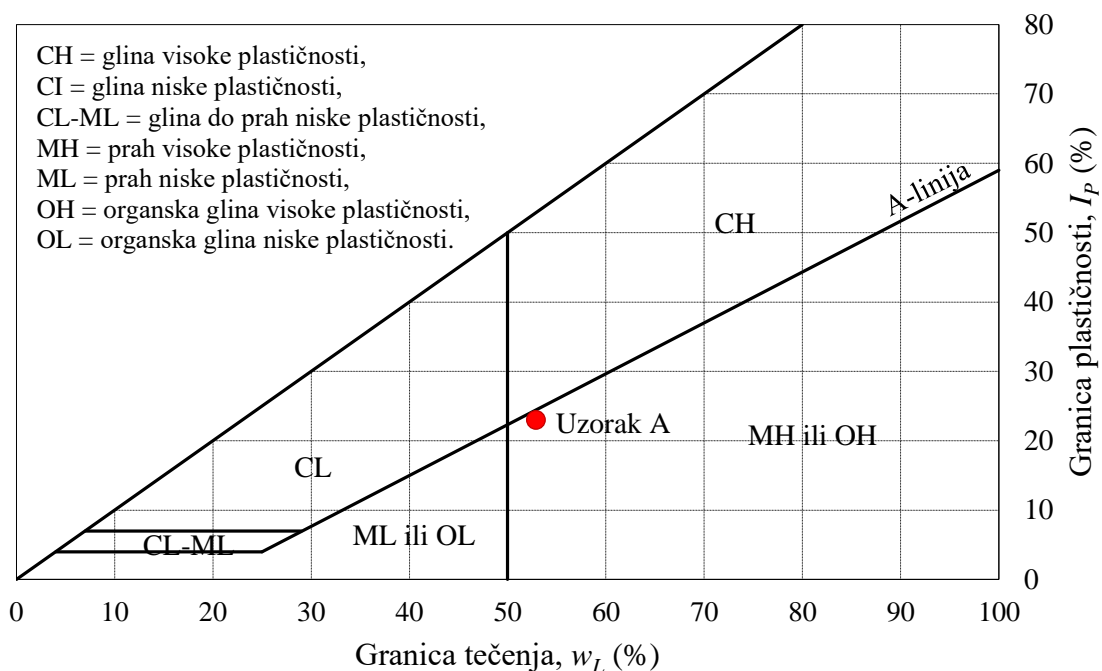
**Tablica 5-1.** Rezultati laboratorijskog određivanja osnovnih svojstava

Uzorak	A
Laboratorijska oznaka uzorka	23-005-002
Početna vlažnost, $w_0$ (%)	34
Granica tečenja, $w_L$ (%)	53
Granica plastičnosti, $w_P$ (%)	30
Indeks plastičnosti, $I_P$ (%)	23
Gustoća čvrstih čestica, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,692



**Slika 5-1.** Kumulativna granulometrijska krivulja

Prema rezultatima granulometrijske analize ustanovljeno je da uzorak A dominantno sadrži čestice veličine gline i praha (oko 99%). Klasifikacija je provedena na temelju dijagrama plastičnosti u kojem se rezultati grupiraju oko pravca nazvanog A-linija. Dijagram plastičnosti za ispitivani uzorak prikazan je na slici 5-2.



**Slika 5-2.** Dijagram plastičnosti (prema ASTM D4318, 2010)

Na dijagramu prema ASTM D2487 (2000) iznad A-linije grupiraju se anorganske gline, a ispod prahovi i organske gline. Tlo s granicom tečenja manjom od 50 % određuje se kao nisko plastično (L), a tlo s granicom tečenja većom od 50 % kao visoko plastično (H).

Ispitivani uzorak nalazi se neposredno uz A-liniju, pa je klasificiran kao prah do glina visoke plastičnosti i dodijeljen mu je simbol MH-CH.

## 5.2. Rezultati edometarskog pokusa

Ispitivanje tla u edometru provedeno je na dva uzorka, koji su ugrađeni u edometarske uređaje i usporedno podvrgnuti opterećenjima s različitim omjerom  $\Delta\sigma'/\sigma'$ . Radi jednostavnosti, uzorak opterećen s malim inkrementima označen je u nastavku kao A1, a uzorak s velikim inkrementima opterećenja oznakom A2.

Na pojedinom uzorku određena su osnovna svojstva potrebna za interpretaciju rezultata edometarskog pokusa. Ona uključuju početnu visinu i promjer uzorka, vlažnost prije i poslije ispitivanja, suhu gustoću tla i gustoću čvrstih čestica, početni koeficijent pora i stupanj saturacije. Visina i promjer određeni su mjerenjem, a na temelju njih određen je početni volumen uzorka kao:

$$V_0 = A \cdot h_0 \quad (5-1)$$

Gdje su:  $V_0$  – početni volumen uzorka ( $\text{cm}^3$ ),  
 $A$  – površina poprečnog presjeka uzorka ( $\text{cm}^2$ ),  
 $h_0$  – početna visina uzorka (cm).

Površina poprečnog presjeka računa se prema izrazu:

$$A = \frac{D_0^2}{4} \cdot \pi \quad (5-2)$$

Gdje je  $D_0$  početni promjer uzorka koji odgovara promjeru prstena. Suha gustoća tla određena je kao:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_0} \quad (5-3)$$

Gdje su:  $\rho_d$  – suha gustoća tla ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  
 $m_s$  – masa čvrstih čestica (g).

Početni koeficijent pora uzorka određen je iz odnosa gustoće čvrstih čestica i suhe gustoće tla (Mulabdić, 2018):

$$e_0 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (5-4)$$

Stupanj saturacije izražava ispunjenost pora vodom te je određen prije i poslije ispitivanja u edometru pomoću izraza:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad (5-5)$$

Gdje su:  $S_r$  – stupanj saturacije (%),  
 $V_w$  – volumen vode ( $\text{cm}^3$ )  
 $V_v$  – volumen pora ( $\text{cm}^3$ ).

Obrada rezultata sastoji se od izračuna promjene visine uzorka na kraju svakog inkrementa opterećenja, odgovarajuće relativne deformacije i koeficijenta pora. Za svaki inkrement opterećenja određen je i edometarski modul. Za proračun su korišteni izrazi od

3-1. do 3-6. Osnovne informacije o uzorcima i rezultati proračuna prikazani su u tablicama 5-2. i 5-3.

**Tablica 5-2.** Osnovne informacije o uzorku A1 i rezultati proračuna s malim inkrementima

<b>Oznaka uzorka</b>	A1	<b>Laboratorijski broj</b>	23-005-002
<b>Bušotina:</b>	B-1	<b>Dubina uzorka (m):</b>	5,00-5,35
<b>Datum ispitivanja:</b>	19.06.2023.	<b>Uređaj:</b>	Edometar 02
<b>Klasifikacija:</b>	Prah do glina visoke plastičnosti MH-CH		
<b>Uvjeti ispitivanja:</b>	Uzorak je tijekom ispitivanja potopljen u vodi		
<b>Osnovni podaci</b>		<b>Podaci o uzorku</b>	
Masa prstena (g)	108,11	Masa uzorka s prstenom (g)	267,90
Promjer prstena (mm)	75,00	Masa uzorka (g)	159,79
Visina prstena (mm)	20,00	Srednja visina uzorka (mm)	20,68
Površina pop. presjeka (cm <sup>2</sup> )	44,18	Visina čvrstih čestica (mm)	10,02
Početni volumen uzorka (cm <sup>3</sup> )	91,34	Gust. čvrstih čestica (g/cm <sup>3</sup> )	2,692
<b>Napomena: -</b>			
	<b>Prije ispitivanja</b>	<b>Poslije ispitivanja</b>	
<b>Vlažnost uzorka (%)</b>	34,06	35,10	
<b>Visina uzorka (mm)</b>	20,68	18,91	
<b>Gustoća suhog tla (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,30	1,41	
<b>Koeficijent pora (-)</b>	1,063	0,887	
<b>Stupanj saturacije (%)</b>	86,3	100,0	

Broj inkrementa	$\sigma'$ (kPa)	$\Delta\sigma' / \sigma'$	$\Delta h$ (mm)	$h$ (mm)	$\varepsilon$ (%)	$e$ (-)	$E_{oed}$ (MPa)
Početno	0	-	0,0000	20,6800	0,00	1,063	
1	25	1	0,4660	20,2090	2,25	1,016	1,11
2	50	1	0,7427	19,9323	3,59	0,989	1,83
3	75	0,500	0,8272	19,8478	4,00	0,980	5,90
4	100	0,333	0,8956	19,7794	4,33	0,974	7,25
5	150	0,500	1,0406	19,6344	5,03	0,959	6,82
6	200	0,333	1,1149	19,5601	5,39	0,952	13,21
7	250	0,250	1,1770	19,4980	5,69	0,945	15,75
8	300	0,200	1,2431	19,4319	6,01	0,939	14,75
9	400	0,333	1,3720	19,3030	6,64	0,926	15,08
10	500	0,250	1,4891	19,1859	7,20	0,914	16,48
11	600	0,200	1,5933	19,0817	7,71	0,904	18,41
12	700	0,167	1,7045	18,9705	8,24	0,893	17,16
13	800	0,143	1,8201	18,8549	8,80	0,881	16,41
14	1600	1	2,6148	18,0602	12,65	0,802	18,98
15	400	-	2,3948	18,2802	11,58	0,824	
16	100	-	2,0770	18,5980	10,05	0,856	
17	25	-	1,7668	18,9082	8,55	0,887	

**Tablica 5-3.** Osnovne informacije o uzorku A2 i rezultati proračuna s velikim inkrementima

<b>Oznaka uzorka</b>	A2	<b>Laboratorijski broj</b>	23-005-002
<b>Bušotina:</b>	B-1	<b>Dubina uzorka (m):</b>	5,00-5,35
<b>Datum ispitivanja:</b>	20.06.2023.	<b>Uređaj:</b>	Edometar 03
<b>Klasifikacija:</b>	Prah do glina visoke plastičnosti MH-CH		
<b>Uvjeti ispitivanja:</b>	Uzorak je tijekom ispitivanja potopljen u vodi		
<b>Osnovni podaci</b>		<b>Podaci o uzorku</b>	
Masa prstena (g)	109,56	Masa uzorka s prstenom (g)	274,15
Promjer prstena (mm)	75,00	Masa uzorka (g)	164,59
Visina prstena (mm)	20,00	Srednja visina uzorka (mm)	21,19
Površina pop. presjeka (cm <sup>2</sup> )	44,18	Visina čvrstih čestica (mm)	10,38
Početni volumen uzorka (cm <sup>3</sup> )	99,59	Gust. čvrstih čestica (g/cm <sup>3</sup> )	2,692
<b>Napomena:</b> U početku pokusa primijećeno je bujanje koje je spriječeno opterećenjem od 100 kPa.			
	<b>Prije ispitivanja</b>		<b>Poslije ispitivanja</b>
<b>Vlažnost uzorka (%)</b>	33,37		34,19
<b>Visina uzorka (mm)</b>	21,19		19,71
<b>Gustoća suhog tla (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,32		1,41
<b>Koeficijent pora (-)</b>	1,042		0,900
<b>Stupanj saturacije (%)</b>	86,2		100,0

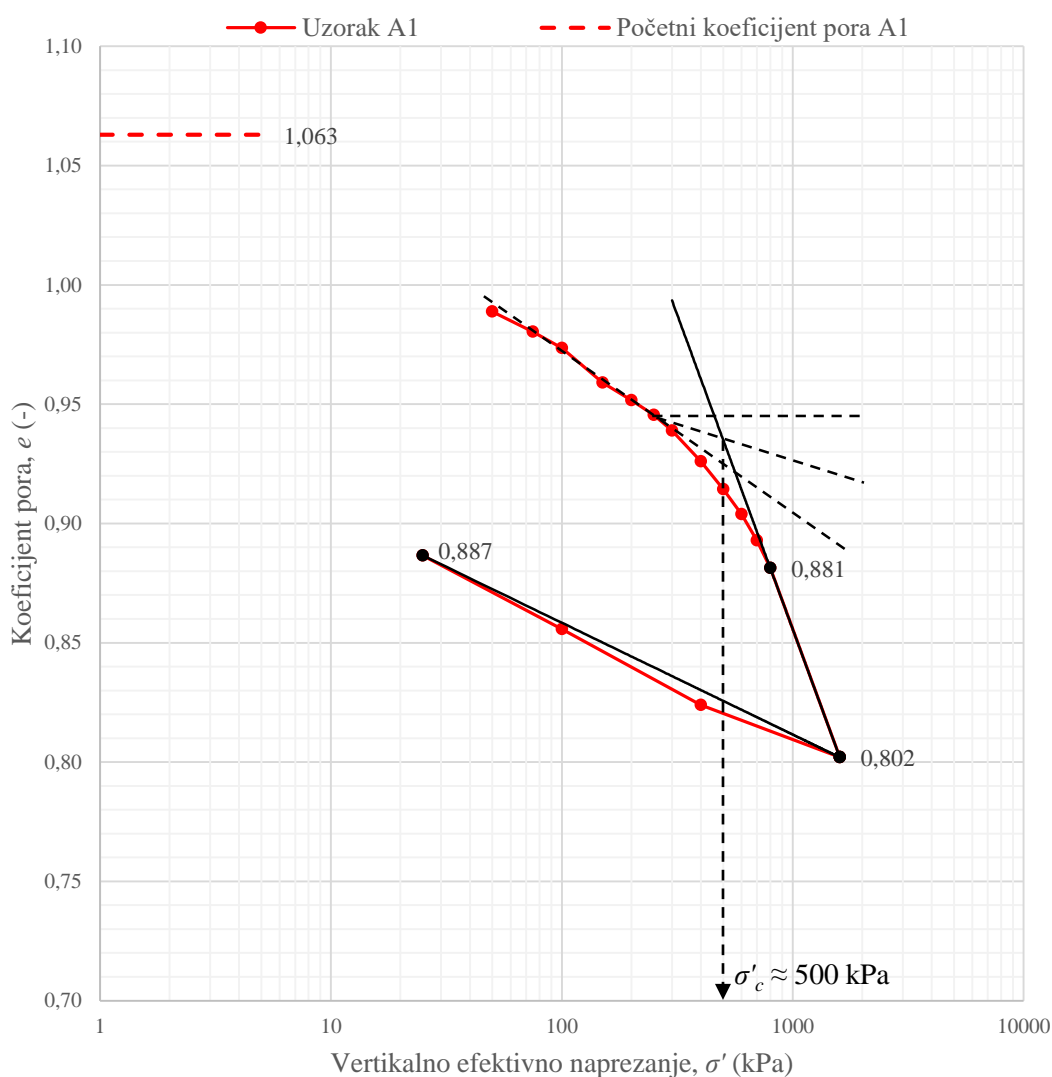
Broj inkrementa	$\sigma'$ (kPa)	$\Delta\sigma' / \sigma'$	$\Delta h$ (mm)	$h$ (mm)	$\varepsilon$ (%)	$e$ (-)	$E_{oed}$ (MPa)
Početno	0	-	0,0000	21,1900	0,00	1,042	
1*	25	1	0,2171	20,9679	1,02	1,021	-
2*	50	1	0,3010	20,8840	1,42	1,013	-
3	100	1	0,3880	20,7970	1,83	1,004	12,00
4	200	1	0,5574	20,6276	2,63	0,988	12,28
5	400	1	0,7988	20,3862	3,77	0,965	17,09
6	800	1	1,2651	19,9199	5,97	0,920	17,49
7	1600	1	2,1019	19,0831	9,92	0,839	19,04
8	400	-	1,8898	19,2952	8,92	0,859	
9	100	-	1,5986	19,5864	7,55	0,888	
10	50	-	1,4702	19,7148	6,94	0,900	

\*Napomena: Na početku ispitivanja za prvi inkrement opterećenja primijećeno je da uzorak buja. Bujanje je spriječeno opterećenjem od 50 kPa. Nakon nešto više od dva sata uočeno je da uzorak ponovno buja te je isto spriječeno opterećenjem od 100 kPa. Za prva dva inkrementa obzirom da je došlo do bujanja, te su inkrementi opterećenja trajali manje od 24 sata, smatra se da deformacija nije u potpunosti ostvarena pa se isti neće uzimati u obzir prilikom interpretacije.

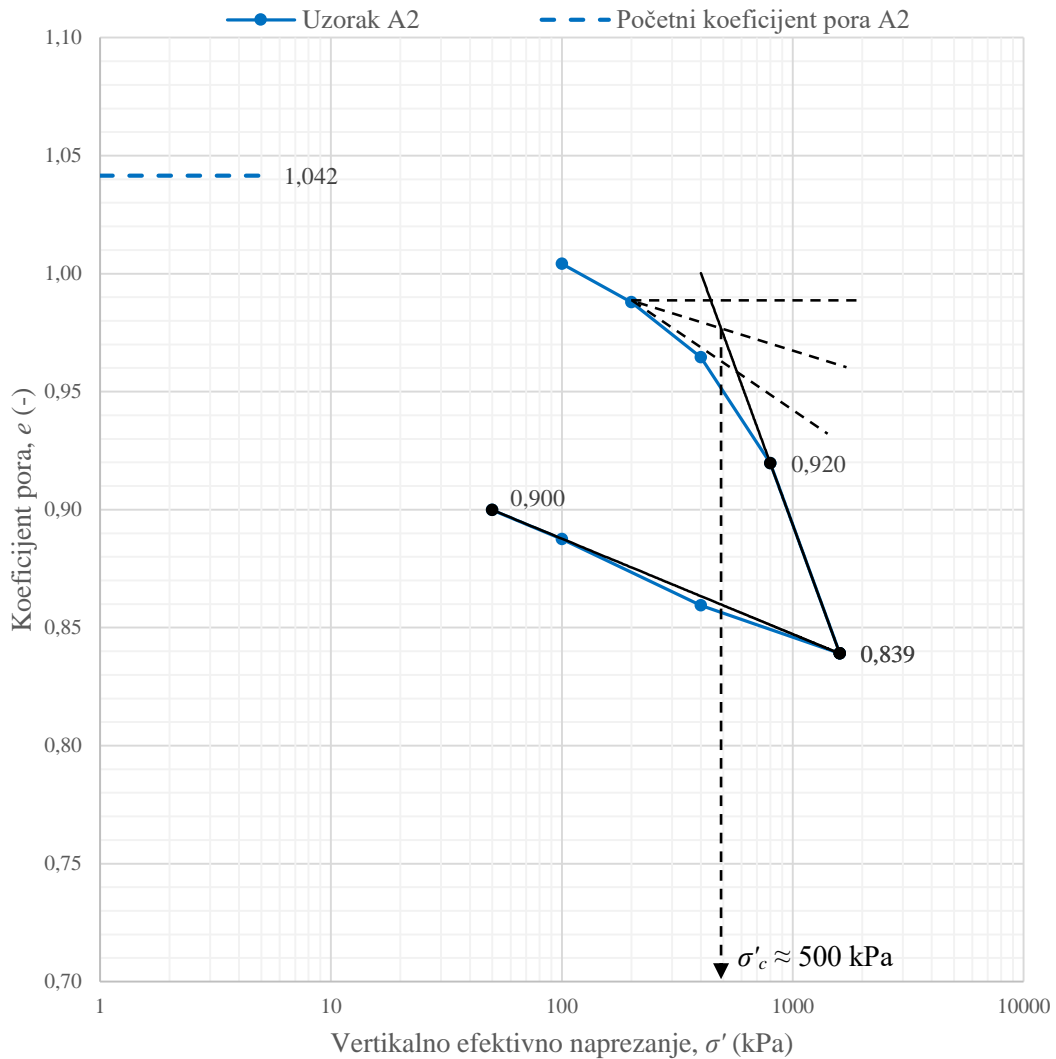


### 5.3. Interpretacija edometarskog dijagrama

Uslijed konsolidacije zbog disipacije poreznog tlaka rastu efektivna naprezanja i dolazi do smanjenja volumena pora. Zbog spriječenih bočnih deformacija, promjena volumena uzorka u edometru povezana je s promjenom koeficijenta pora. Promjena koeficijenta u odnosu na naprezanje može se pratiti u edometarskom dijagramu. Naprezanja se nanose u logaritamskom mjerilu, pa se stišljivost tla interpretira preko nagiba krivulje u opterećenju i rasterećenju, odnosno indeksom kompresije i rekompresije. Indeks kompresije i rekompresije za pojedini uzorak određeni su kako je opisano u potpoglavlju 3.3. Također, napravljena je i procjena naprezanja prethodne konsolidacije grafičkom metodom prema Casagrandeu kako je opisano u potpoglavlju 3.2. Postupci su prikazani na slikama 5-3. i 5-4.



Slika 5-3. Edometarski dijagram i interpretacija  $C_c$ ,  $C_r$  s procjenom  $\sigma'_c$  za male inkremente naprezanja

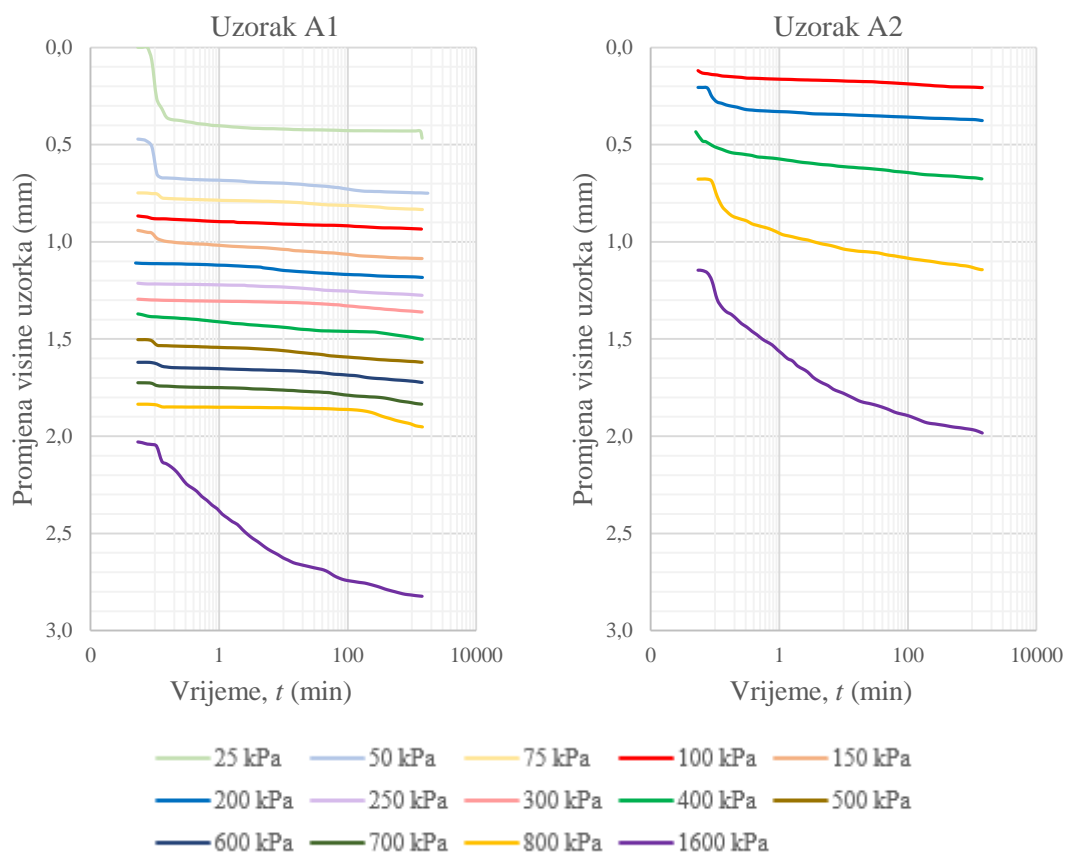


**Slika 5-4.** Edometarski dijagram i interpretacija  $C_c$ ,  $C_r$  s procjenom  $\sigma'_c$  za velike inkremente naprezanja

Prema dobivenim odnosima koeficijenta pora i naprezanja, zbog oblika krivulja i karakterističnog loma zaključuje se kako je ispitivani uzorak prekonsolidiran. Interpretacijom naprezanja prethodne konsolidacije, za male i velike inkremente naprezanja, uočeno je kako je procijenjena vrijednost jednaka te približno iznosi 500 kPa. Iako je dobivena ista vrijednost, za interpretaciju se preciznijom smatra krivulja s malim inkrementima naprezanja jer je konstruirana na temelju više točaka (ASTM D2435/D2435M, 2011). Zbog toga je i određivanje točke najveće zakrivljenosti za uzorak s malim inkrementima naprezanja bilo jednostavnije.

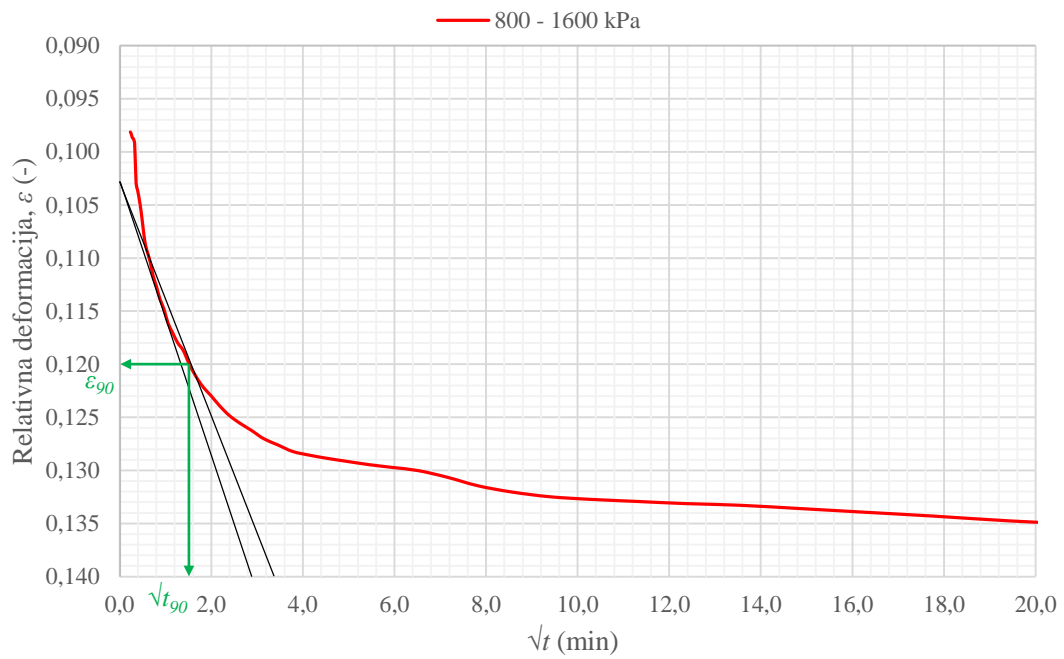
#### 5.4. Interpretacija dijagrama vremenskog tijeka slijeganja

Tijekom pokusa za svaki inkrement opterećenja su bilježeni pomaci u određenom vremenu. Krivulje vremenskog tijeka slijeganja prikazane su kao odnos promjene visine uzorka u određenom vremenu za pojedini inkrement opterećenja. Rezultati ispitivanja za uzorak A1 s malim inkrementima naprežanja i za uzorak A2 s velikim inkrementima naprežanja prikazani su na slici 5-5.

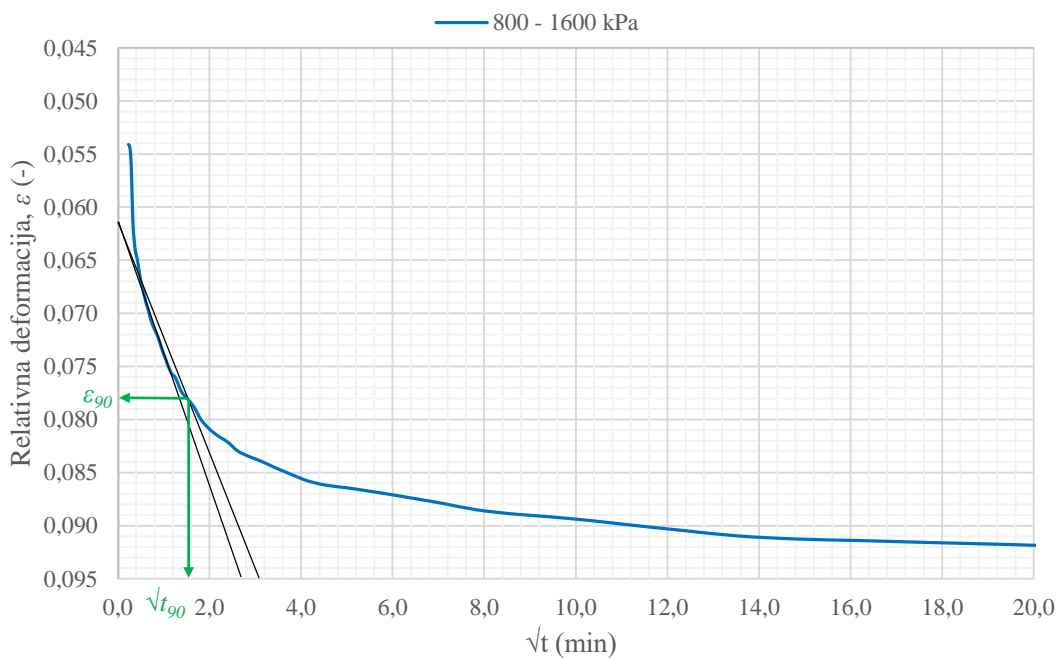


Slika 5-5. Dijagrami vremenskog tijeka slijeganja za uzorke A1 i A2

Na temelju krivulja vremenskog tijeka slijeganja uobičajeno se za svaki inkrement opterećenja određuje koeficijent konsolidacije. On objedinjuje stišljivost i propusnost tla te omogućuje interpretaciju slijeganja u vremenu. Za potrebe ovog rada u svrhu opažanja utjecaja inkrementa opterećenja na konsolidacijska svojstva tla odabran je inkrement opterećenja 800-1600 kPa jer su krivulje za taj inkrement bile najbliže teorijskom modelu Terzaghi- Fröhlich. Koeficijent konsolidacije interpretiran je prema Tayloru kako je opisano u potpoglavlju 3.4. Postupak interpretacije prikazan je na slikama 5-6. i 5-7., a rezultati su dani u tablici 5-4.

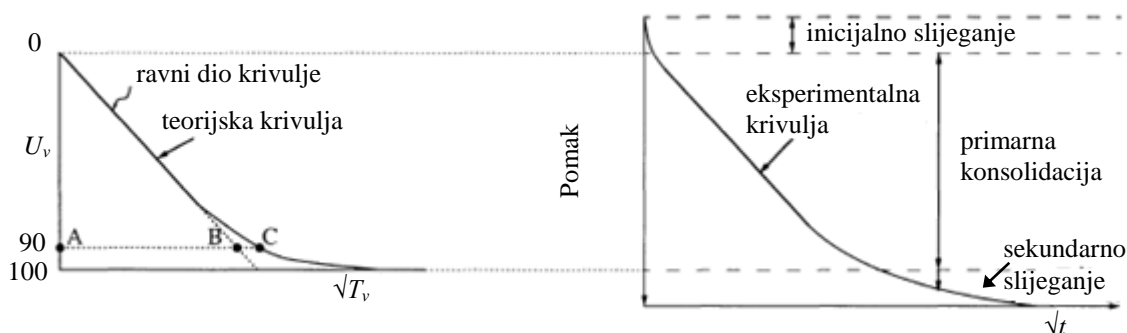


**Slika 5-6.** Interpretacija koeficijenta konsolidacije za uzorak A1 prilagodbom dijagrama vremenskog tijeka slijeganja prema Tayloru – mali inkrementi



**Slika 5-7.** Interpretacija koeficijenta konsolidacije za uzorak A2 prilagodbom dijagrama vremenskog tijeka slijeganja prema Tayloru – veliki inkrementi

Eksperimentalna krivulja vremenskog tijeka slijeganja s vremenskom osi u mjerilu drugog korijenja uobičajeno na početku mjerenja odstupa od teorijske. Barnes (1995) navodi da je to tzv. početno slijeganje koje je različito od primarnog konsolidacijskog slijeganja i događa se trenutno, zbog slijeganja opreme, kompresije zraka i sl. Stoga se taj početni dio krivulje ne uzima u obzir kod interpretacije, kako je prikazano na slici 5-8.



**Slika 5-8.** Usporedba teorijske i eksperimentalne krivulje vremenskog tijeka slijeganja (modificirano prema Barnes, 1995)

**Tablica 5-4.** Proračun koeficijenta konsolidacije prema Tayloru

Uzorak	A1 – mali inkrementi	A2 – veliki inkrementi
Promjena visine uzorka, $d_{90}$ (mm)	2,4810	1,6524
Deformacija, $\varepsilon_{90}$ (%)	12,00	7,80
Visina uzorka, $h_{50}$ (mm)	18,19	19,53
Koeficijent pora, $e_{90}$ (-)	0,815	0,882
Vrijeme 90 % kons., $t_{90}$ (s)	135	154
Koeficijent konsolidacije, $C_v$ (mm <sup>2</sup> /s)	0,52	0,53
Koeficijent konsolidacije, $C_v$ (m <sup>2</sup> /god)	16,39	16,61

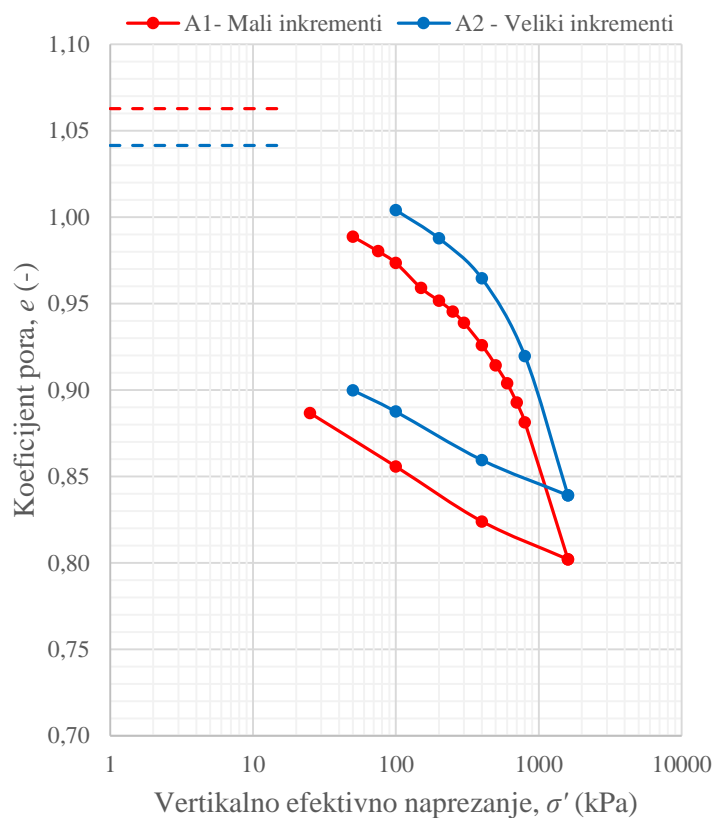
## 5.5. Rasprava

Prikazani rezultati su analizirani i napravljena je usporedba obzirom na male i velike inkremente naprezanja. Ispitivanja su provedena na uzorcima od istog materijala, ali treba napomenuti kako je na interpretaciju rezultata utjecala obrada uzorka. Prilikom ugradnje u edometarski uređaj nije bilo moguće na potpuno isti način utisnuti uzorak u prsten, što je rezultiralo razlikom u početnoj visini uzorka i koeficijentu pora. Osnovna svojstva uzoraka prije i poslije ispitivanja u edometru prikazana su u tablici 5-5.

**Tablica 5-5.** Osnovna svojstva uzoraka prije i poslije ispitivanja u edometru

Veličina	Tijek ispitivanja	A1 – mali inkrementi	A2 – veliki inkrementi
Visina uzorka (mm)	Početak	20,68	21,19
	Kraj	18,91	19,71
Vlažnost uzorka (%)	Početak	34,06	33,37
	Kraj	35,10	34,19
Gustoća suhog tla (g/cm <sup>3</sup> )	Početak	1,30	1,32
	Kraj	1,41	1,41
Koeficijent pora (-)	Početak	1,063	1,042
	Kraj	0,887	0,900
Ukupna razlika u visini (mm)		1,77	1,48
Ukupna razlika u koef. pora (-)		0,176	0,142
Ukupna relativna deformacija (%)		8,55	6,94

Interpretacijom edometarskog dijagrama za pojedino ispitivanje određen je indeks kompresije i rekompresije, te je procijenjeno naprezanje prethodne konsolidacije. Dijagrami su prikazani na slici 5-9., a rezultati su dani u tablici 5-6.



**Slika 5-9.** Usporedba edometarskih dijagrama s malim i velikim inkrementima naprezanja

**Tablica 5-6.** Indeks kompresije i rekompresije te naprezanje prethodne konsolidacije

Uzorak	A1 – mali inkrementi	A2 – veliki inkrementi
Indeks kompresije, $C_c$ (-)	0,26	0,27
Indeks rekompresije, $C_r$ (-)	0,05	0,04
Naprezanje prethodne konsolidacije, $\sigma'_c$ (kPa)	500	500

Bez obzira na veličinu inkrementa naprezanja, prema rezultatima ispitivanja u edometru nisu dobivene značajne razlike u indeksu kompresije i rekompresije. Krivulje su približno istog oblika pa su i nagibi približno jednaki. Skok između krivulja po osi  $e$  pripisuje se razlici u početnim svojstvima. Naprezanje prethodne konsolidacije također je jednako za oba uzorka. Sličan rezultat primijećen je i u istraživanju koje su proveli Yoshidomi i sur. (2018). U istraživanju je analiziran veći broj uzoraka i dobiveno je kako veličina inkrementa naprezanja nema značajan utjecaj na odnos  $e$ - $\log\sigma'$ . Međutim, primijećeno je da se za svaki inkrement brzina deformacija mijenja što je povezano s vremenskim tijekom slijeganja.

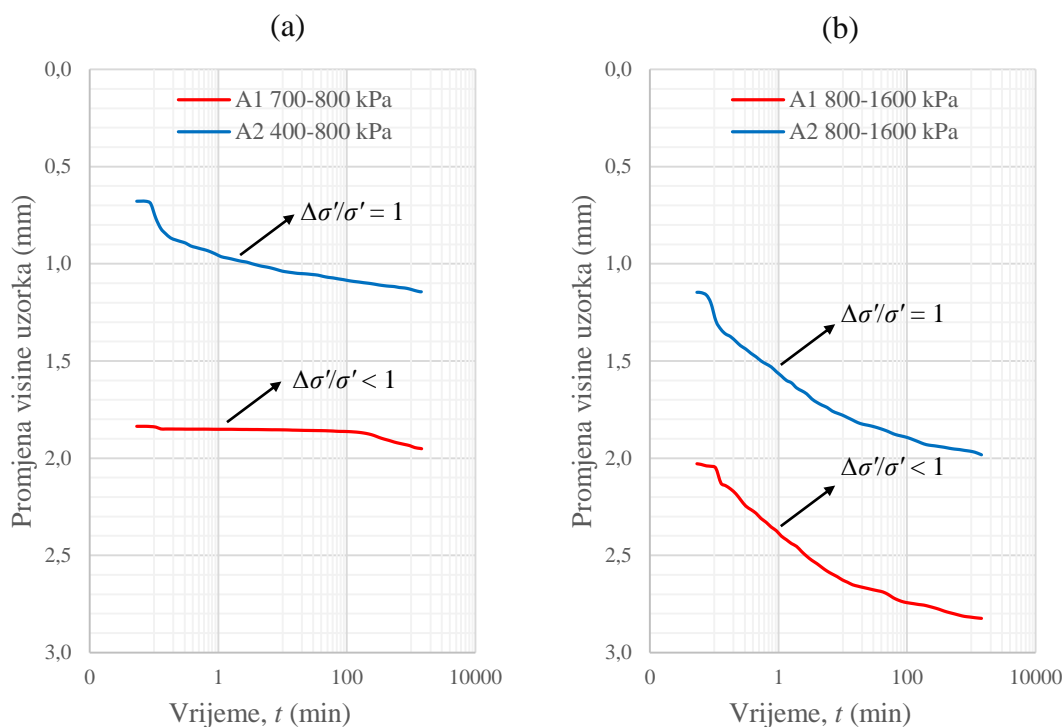
Obrada podataka uključivala je proračun edometarskog modula za svaki inkrement opterećenja. Već je ranije u radu istaknuto kako se njegova vrijednost mijenja s promjenom opterećenja, te se on određuje isključivo za inkrement opterećenja. Obzirom da tijekom ispitivanja na pojedini uzorak nisu primijenjeni jednaki inkrementi opterećenja, dobivene vrijednosti se ne mogu izravno usporediti. Izravna usporedba može se napraviti isključivo za zadnji inkrement opterećenja 800-1600 kPa, koji je jednak za oba ispitivana uzorka. Izračunati moduli stišljivosti prikazani su u tablici 5-7. te nema značajne razlike u vrijednostima.

**Tablica 5-7.** Usporedba vrijednosti edometarskog modula za inkrement 800-1600 kPa

Uzorak	A1 – mali inkrementi	A2 – veliki inkrementi
Edometarski modul, $E_{oed}$ (MPa)	18,98	19,04

U daljnjoj analizi promatrane su krivulje vremenskog tijeka slijeganja sa slike 5-5. Primijećeno je kako se oblik krivulja mijenja ovisno o ukupnim naprezanjima te veličini inkrementa naprezanja, odnosno  $\Delta\sigma'/\sigma'$ . Kod uzorka A1 s malim inkrementima naprezanja uočeno je kako sve krivulje kod kojih je odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$  nisu karakterističnog oblika položenog slova S koji se očekuje prema Terzaghijevoj teoriji. Za isti uzorak kod ukupnog

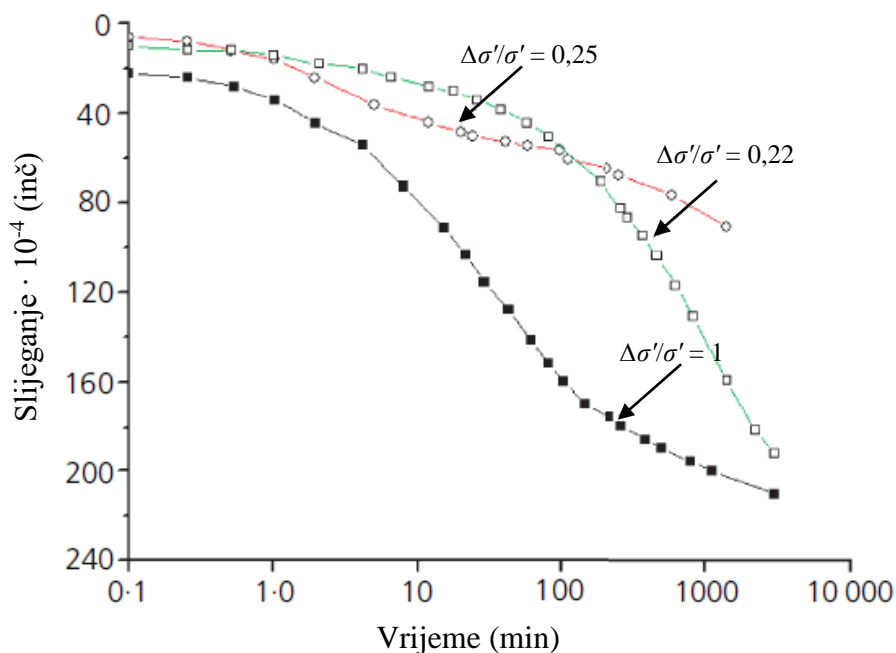
naprezanja od 25, 50 i 1600 kPa kod kojih je odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' = 1$  krivulje su očekivanog oblika. Za usporedbu su odabrane po dvije krivulje vremenskog tijeka slijeganja, jedna koja odgovara ukupnom opterećenju od 800 kPa i druga koja odgovara ukupnom opterećenju od 1600 kPa. Krivulje su prikazane na slici 5-10.



**Slika 5-10.** Usporedba krivulja vremenskog tijeka slijeganja: (a) 800 kPa, (b) 1600 kPa

Može se uočiti kako krivulja konsolidacije za uzorak A1 i mali inkrement 700-800 kPa s odnosom  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$  u potpunosti gubi oblik položenog S koji se očekuje prema Terzaghijevoj teoriji. Kod istog ukupnog opterećenja za uzorak A2 i veliki inkrement 400-800 kPa s odnosom  $\Delta\sigma'/\sigma' = 1$  krivulja je približno očekivanog oblika. Isto je uočeno i kod velikog inkrementa 800-1600 kPa za koji su kod oba uzorka krivulje očekivanog oblika. Slični rezultati dobiveni su i u drugim studijama. Yoshidomi i sur. (2018) uočili su kako sa smanjenjem omjera  $\Delta\sigma'/\sigma'$  krivulja konsolidacije sve više gubi karakterističan oblik položenog S te da zbog toga nije jasan kraj primarne konsolidacije. Srodnom tematikom bavili su se Tanaka i Tsutsumi (2016), koji navode da je vremenski razvoj deformacija uvjetovan veličinom inkrementa naprezanja te da se za inkremente s odnosom  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$ , veći dio slijeganja ostvaruje nakon završetka primarne konsolidacije. Na slici 5-11. je prikazan utjecaj  $\Delta\sigma'/\sigma'$  na vremenski tijek slijeganja.





**Slika 5-11.** Utjecaj  $\Delta\sigma'/\sigma'$  na odnos vrijeme-slijeganje (Tanaka i Tsutsumi, 2016. prema Leonards i Altschaefl, 1964)

Na slici su prikazana tri slučaja ovisno o omjeru  $\Delta\sigma'/\sigma'$ . Strelicama je označen kraj primarne konsolidacije. U prvom slučaju kada se primjenjuje uobičajen raspored opterećenja s odnosom  $\Delta\sigma'/\sigma' = 1$ , krivulja vremenskog tijeka slijeganja vrlo slična teoretskoj krivulji  $T_v-U$  sa slike 2-5. Prema njenom obliku i odnosu vrijeme-slijeganje vidljivo je kako se većina ukupnog slijeganja ostvaruje za vrijeme primarne konsolidacije zbog povećanja efektivnih naprezanja. U drugom i trećem slučaju odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$ , te se može uočiti kako se nakon završetka primarne konsolidacije ostvaruje značajno slijeganje.

Iz navedenog proizlazi da veličina inkrementa naprezanja utječe na komponente ukupnog slijeganja, tj. na veličinu primarnog i sekundarnog konsolidacijskog slijeganja. Također, oblik krivulja za  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$  ne podudara s oblikom koji se očekuje prema Terzaghijevoj teoriji jednodimenzionalne konsolidacije. Iz tog razloga interpretacija koeficijenta konsolidacije grafičkim metodama u kojima se uspoređuju teorijska i eksperimentalna krivulja tzv. prilagođavanjem krivulja se ne može pouzdano provesti. Opaska vezana uz to dana je i u normi ASTM D2435/D2435M (2011). Navedeno je da za inkremente opterećenja s odnosima  $\Delta\sigma'/\sigma' < 0,7$  procjena koeficijenta konsolidacije i kraj primarne konsolidacije grafičkim metodama mogu biti onemogućene.

U sklopu ovog rada interpretacija koeficijenta konsolidacije provedena je za inkrement 800-1600 kPa. Kod oba uzorka za taj inkrement vrijedi odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' = 1$ . Cilj je bio utvrditi

postoji li razlika obzirom na veličinu prethodno primijenjenih inkremenata. Određivanje koeficijenta konsolidacije provedeno je prema Tayloru. Izračunate vrijednosti iz tablice 5-4. korigirane su zbog promjene temperature pri kojoj se provodilo ispitivanje prema slici 4-8. Vrijednosti su pomnožene s popravnim koeficijentom za odgovarajuću temperaturu, a rezultati su prikazani u tablici 5-8.

**Tablica 5-8.** Korigirane vrijednosti koeficijenta konsolidacije zbog promjene temperature za inkrement opterećenja 800-1600 kPa

Uzorak	A1 – mali inkrementi	A2 – veliki inkrementi
Temperatura, $T$ (°C)	26,8	27,2
Korekcijski faktor, $R_T$ (-)	0,86	0,85
Koeficijent konsolidacije, $C_v'$ (mm <sup>2</sup> /s)	0,45	0,45
Koeficijent konsolidacije, $C_v'$ (m <sup>2</sup> /god)	13,93	14,12

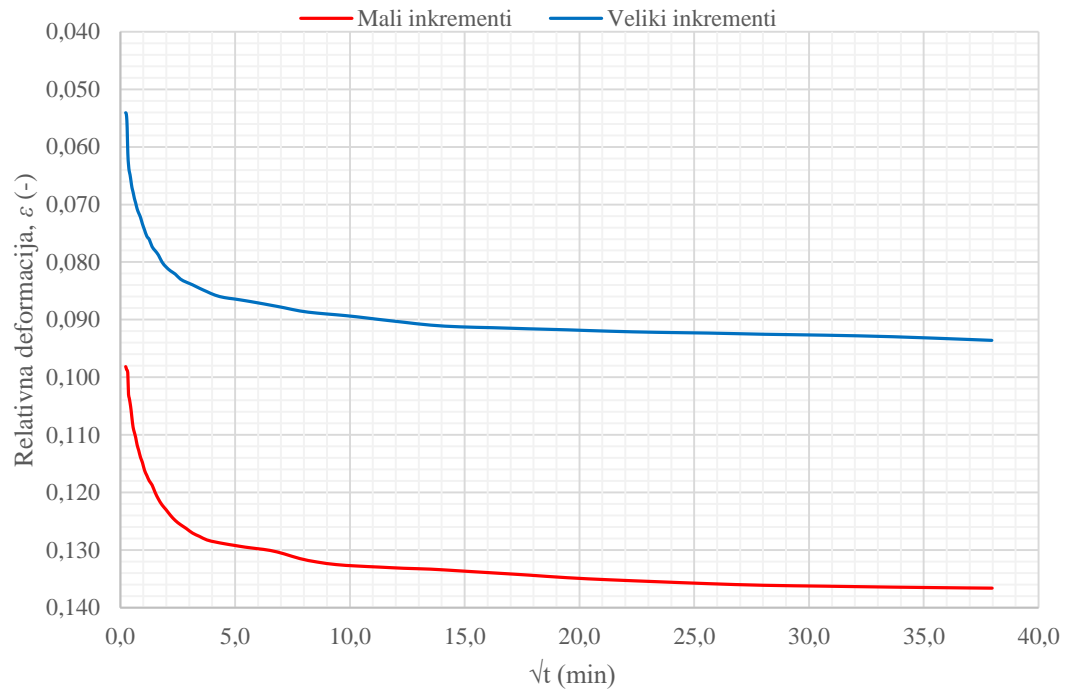
Utvrđeno je da za isti inkrement naprezanja 800-1600 kPa ne postoji značajna razlika u vrijednosti koeficijenta konsolidacije obzirom na prethodno primijenjene inkremente. Prema definiciji koeficijent konsolidacije ovisi o tri veličine: koeficijentu propusnosti, edometarskom modulu i jediničnoj težini vode. Za promatrani inkrement nisu dobivene značajne razlike u vrijednosti edometarskog modula i koeficijenta konsolidacije, pa se smatra da je i koeficijent propusnosti približno isti. Koeficijent propusnosti se može odrediti prema izrazu 5-6., a rezultati su dani u tablici 5-9.

$$k = \frac{C_v \cdot \gamma_w}{E_{oed}} \quad (5-6)$$

**Tablica 5-9.** Proračun koeficijenta propusnosti

Uzorak	A1 – mali inkrementi	A2 – veliki inkrementi
$C_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$4,47 \cdot 10^{-7}$	$4,48 \cdot 10^{-7}$
$E_{oed}$ (kPa)	18 980	19 040
$k$ (cm/s)	$2,36 \cdot 10^{-8}$	$2,35 \cdot 10^{-8}$

Na slici 5-12. su prikazane krivulje konsolidacije za oba uzorka iz čega je vidljivo kako su približno jednakih oblika te vrlo slične teoretskoj krivulji prema Terzaghijevoj teoriji pa su ovakvi rezultati bili očekivani.



**Slika 5-12.** Usporedba krivulja vremenskog tijeka slijeganja s vremenskom osi u mjerilu drugog korijena za inkrement naprezanja 800-1600 kPa

Zbog utjecaja veličine inkrementa naprezanja za inkremente s odnosom  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$  nije bila moguća interpretacija koeficijenta konsolidacije metodama niti prema Casagrandeu niti prema Tayloru kako je već prethodno opisano. Iz tog razloga se nije mogla napraviti usporedba kako bi se opazio utjecaj veličine inkrementa naprezanja. Treba napomenuti, da je koeficijent konsolidacije jednako kao i edometarski modul svojstvo tla koje se mijenja s inkrementom naprezanja.

## 6. ZAKLJUČAK

Konsolidacija je vrlo složen vremenski uvjetovan proces koji se odvija u zasićenim sitnozrnatim tlima male propusnosti. Kod takvih tala je poznato da se slijeganja razvijaju još dugo nakon završetka gradnje, odnosno promjene stanja naprezanja. Pod opterećenjem voda iz pora jako sporo istječe pa je procjena slijeganja kod takvih tala izazovna. Za procjenu slijeganja važno je poznavati sastav i svojstva tla te karakteristike vezane uz odnose naprezanja i deformacija. Podaci se prikupljaju istraživačkim radovima na terenu i laboratorijskim ispitivanjima. Laboratorijsko ispitivanje jednodimenzionalne konsolidacije provodi se u uređaju koji se naziva edometar. U sklopu ovog rada provedeno je ispitivanje na dva uzorka od istog izvornog materijala. Opažan je utjecaj veličine inkrementa naprezanja na konsolidacijska svojstva tla. Uzorci su vertikalno opterećeni različitim inkrementima. Na jedan su primijenjeni veliki inkrementi kojima odgovara odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' = 1$ , a na drugi mali inkrementi s odnosom  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$ .

Kod interpretacije edometarskih dijagrama nije uočena značajna razlika u rezultatima. Dobivene su približno jednake vrijednosti indeksa kompresije i rekompresije te naprezanja prethodne konsolidacije, pa se zaključuje da veličina inkrementa naprezanja ne utječe na parametre stišljivosti. Za svaki inkrement opterećenja određen je edometarski modul. Obzirom da on vrijedi isključivo za određeni inkrement, izravna usporedba je bila moguća jedino za inkrement 800-1600 kPa koji je kod oba uzorka isti. U dobivenim vrijednostima također nije opažena značajna razlika.

Kod dijagrama vremenskog tijeka slijeganja uočeno je kako sve krivulje kod kojih je odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$  nisu karakterističnog oblika položenog slova S koji se očekuje prema Terzaghijevoj teoriji. Iz tog razloga za inkremente  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$  nije bilo moguće odrediti koeficijent konsolidacije grafičkim metodama jer se iste temelje na usporedbi eksperimentalne krivulje s teorijskom. Usporedba je napravljena za inkrement 800-1600 kPa koji je jednak kod oba uzorka, a za koji vrijedi odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' = 1$ . Cilj je bio utvrditi hoće li se koeficijent konsolidacije razlikovati obzirom na prethodno primijenjene inkremente. Proračunom je pokazano da nema značajne razlike u vrijednostima.

Zaključuje se kako odnos  $\Delta\sigma'/\sigma'$  nema značajan utjecaj na indeks kompresije i rekompresije te naprezanje prethodne konsolidacije. Prema tome, neće biti značajne razlike niti u procjeni veličine slijeganja. Međutim, odnos  $\Delta\sigma'/\sigma'$  značajno utječe na interpretaciju vremenskog tijeka slijeganja. Za odnos  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$  krivulje gube uobičajeni oblik položenog S zbog čega se ne može provesti interpretacija u skladu s Terzaghijevom teorijom i pouzdano

odrediti koeficijent konsolidacije. Smatra se da što je odnos  $\Delta\sigma'/\sigma'$  manji, komponenta primarnog konsolidacijskog slijeganja u ukupnom slijeganju postaje manja. Zbog navedenog moguće su pogrešne procjene vremenskog tijeka slijeganja, pa se ne preporuča ispitivanja provoditi s inkrementima  $\Delta\sigma'/\sigma' < 1$ , odnosno  $\Delta\sigma'/\sigma' < 0,7$  kako je navedeno u normi. Unatoč tome ispitivanje s malim inkrementima može biti praktično za preciznije određivanje naprezanja prethodne konsolidacije i parametara stišljivosti.

Ispitivanje utjecaja veličine inkrementa naprezanja na konsolidacijska svojstva tla pokazala se zanimljivom za daljnju analizu. Rezultate dobivene u sklopu ovog rada valjalo bi usporediti s drugim ispitivanjima. Predlaže se ponoviti ispitivanja na uzorcima koji su pripremljeni kao normalno konsolidirani ili prethodno konsolidirani pod poznatim opterećenjem i opažati utjecaj veličine inkrementa naprezanja na konsolidacijska svojstva tla.

## LITERATURA

ASTM D2216 – 92, 1992. *Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D2435/D2435M – 11, 2011. *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D2487 – 00, 2000. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D422 – 63, 2007. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D4318 – 10, 2010 *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soil*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D854 – 14, 2014. *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

BARNES, G. E. 1995. *Soil Mechanics Principles and Practice*. London: Palgrave.

CRAIG, R. F., 2004. *Craig's Soil Mechanics*. Sedmo izdanje. New York: Spon Press.

DAS, B. M. 2009. *Principles of Geotechnical Engineering*. Sedmo izdanje. Stamford: Cengage Learning.

ELE INTERNATIONAL, URL: <https://www.ele.com/> (21.08.2023.)

HOLTZ, R. D., KOVACS W.D. 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.

KVASNIČKA P., DOMITROVIĆ D., 2007. *Mehanika tla: interna skripta*. Zagreb: Rudarsko-gološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

LEONARDS, G. A., ALTSCHAEFFL A. G. 1964 *Compressibility of clay*. Journal of Soil Mechanics (ASCE), 90(5), str. 133–155.

MULABDIĆ, M. 2018. *Ispitivanje tla u geotehničkom laboratoriju*. Osijek: Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

MURTHY, V. N. S. 2002. *Geotechnical Engineering: Principles and Practises of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Florida: CRC Press.

TANAKA, T., TSUTSUMI A. 2016. *Isotache model for consolidation with a small incremental load*. Geotechnical Research, 3(4), str. 180-191.

YOSHIDOMI, T., IINUMA, K., SUGIYAMA M. 2018. *Influence of load increment ratio on one-dimensional consolidation behaviour*. MATEC Web of Conferences, 192.