



Univerzitet u Beogradu – Građevinski  
fakultet [www.grf.bg.ac.rs](http://www.grf.bg.ac.rs)

Studijski program: **GRAĐEVINARSTVO**

Modul: **Zajedničke osnove**

Godina/Semestar: **2. godina / 4. semestar**

Naziv predmeta (šifra): **MEHANIKA TLA (B3O2MT)**

Asistent: **Doc. dr Miloš Marjanović**

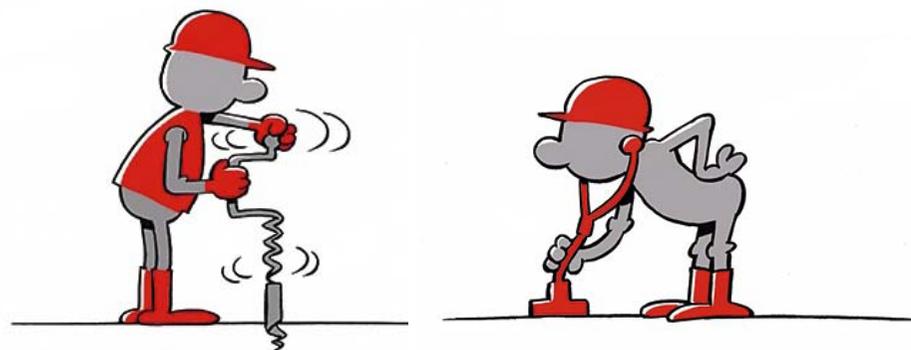
Naslov vežbi: **STIŠLJIVOST TLA**

Datum: **25-29.3.2024.**

*Beograd, 2024.*

*Sva autorska prava autora prezentacije i/ili video snimaka su zaštićena. Snimak ili prezentacija se mogu koristiti samo za nastavu na daljinu studenta Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu u školskoj 2023/2024. i ne mogu se koristiti za druge svrhe bez pismene saglasnosti autora materijala.*

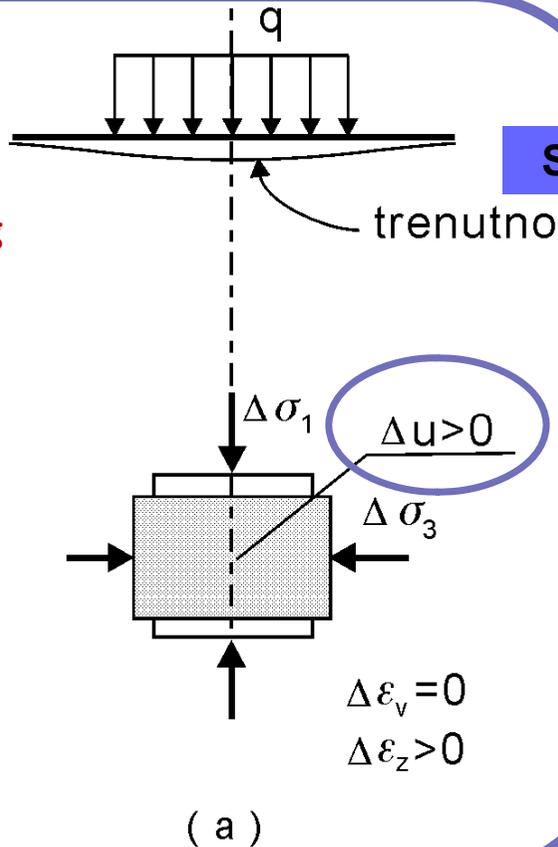
# STIŠLJIVOST TLA



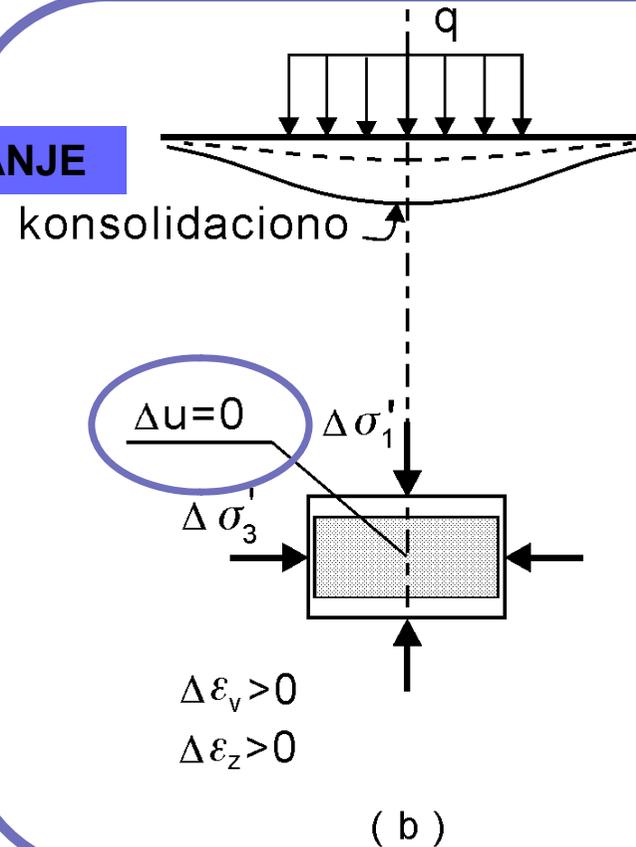
# STIŠLJIVOST TLA

- **Stišljivost** je osobina tla da smanjuje zapreminu pri povećavanju efektivnih napona.

- **Otporetimo tlo**
- **Dolazi do trenutnog sleganja usled promene oblika**
- **Nema promene zapremine**
- **Generišu se porni pritisci (porni natpritisci)**



Promena oblika



Promena zapremine

- **Tokom vremena, dolazi do opadanja pornih pritisaka**
- **Povećavaju se efektivni naponi**
- **Smanjuje se zapremina tla na račun istisnute vode iz pora**
- **Dolazi do sleganja tla kao posledice smanjenja zapremine**

## STIŠLJIVOST TLA

**Nakon opterećenja tla, tokom vremena, dolazi do:**

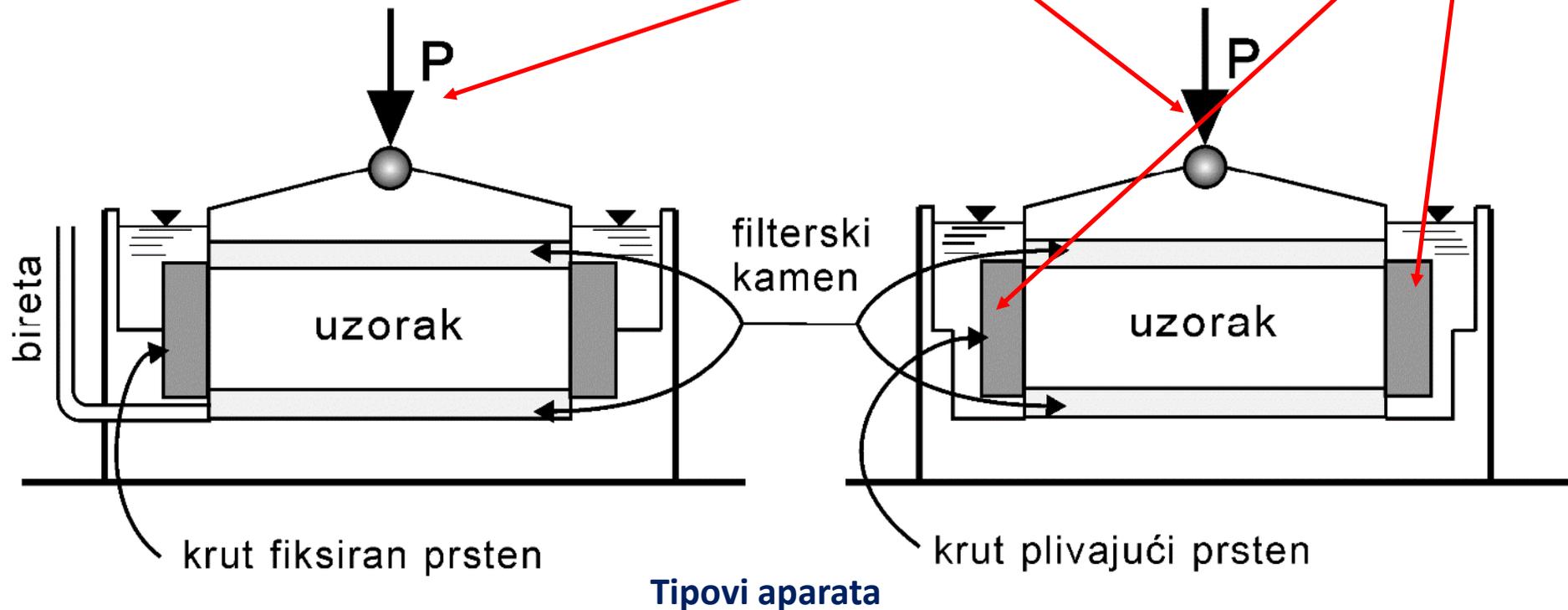
- Opadanja poroznih pritisaka
- Povećanja efektivnih napona
- Smanjenja zapremine tla – sleganje tla



**KONSOLIDACIJA TLA!!!**  
(vremenski proces)

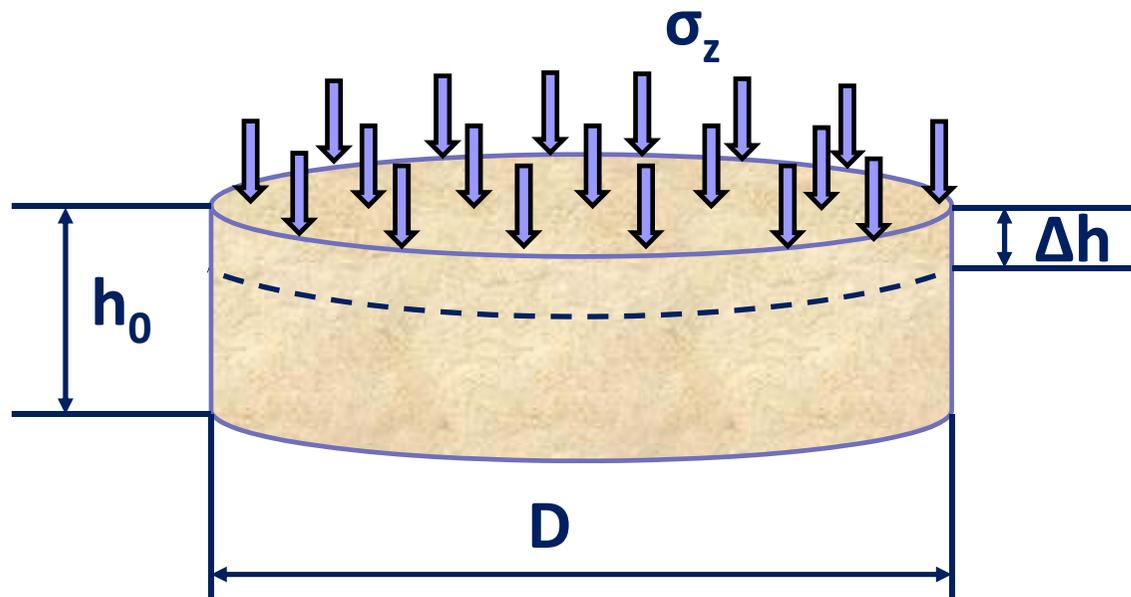
## EDOMETARSKI OPIT

- Opit stišljivosti izvodi se u aparatu koji se naziva **edometar** (edometerski opit)
- Cilindrični uzorak izlaže se kontrolisanim priraštajima vertikalnih napona, ali je krutim prstenom bočna deformacija sprečena.



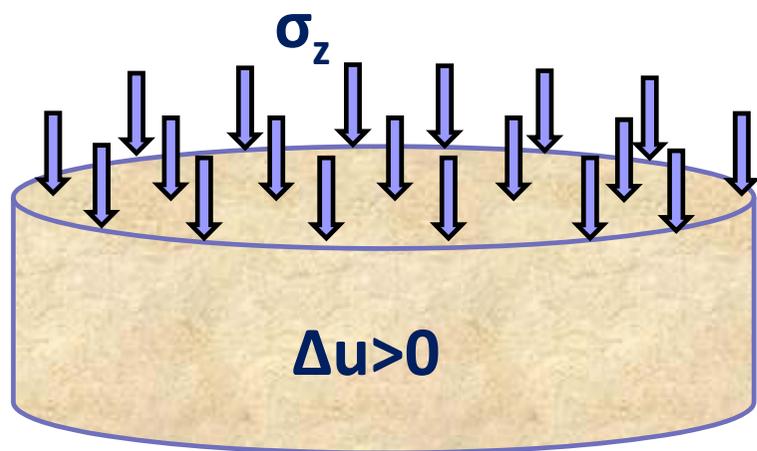
## EDOMETARSKI OPIT

- Cilindrični uzorak sa odnosom prečnika prema visini  $D/h_0$  u granicama od 2.5 do 5
- Meri se sleganje uzorka, tj. smanjenje njegove visine  $\Delta h$  sa povećanjem vertikalnih napona  $\sigma_z$

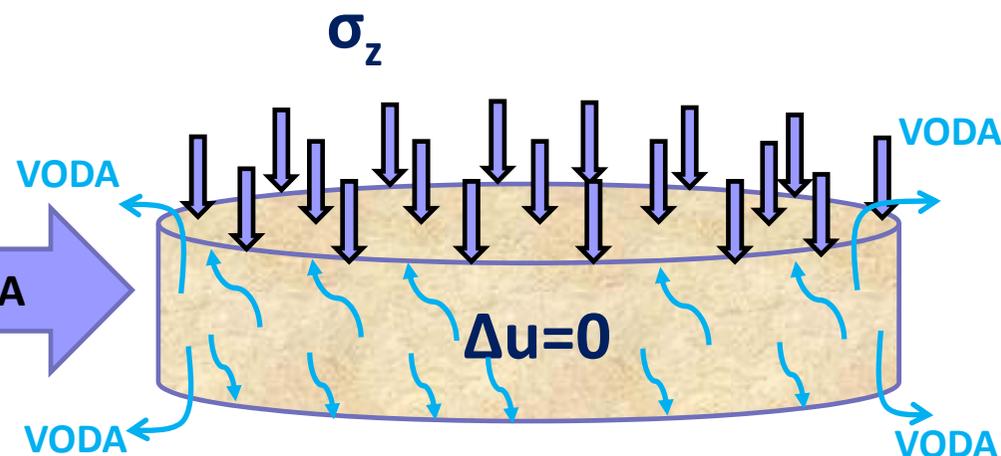


## EDOMETARSKI OPIT

- Na bazama uzorka se postavljaju porozne pločice koje omogućavaju **evakuaciju vode u procesu konsolidacije**, dok se promena zapremine registruje merenjem promene visine uzorka.



Nanošenjem opterećenja generišu se porni natpritisici



- Kada se izvrši potpuna disipacija pornih natpritisaka završila se **KONSOLIDACIJA TLA!!!**
- Smanjila se visina uzorka

## EDOMETARSKI OPIT



Edometar



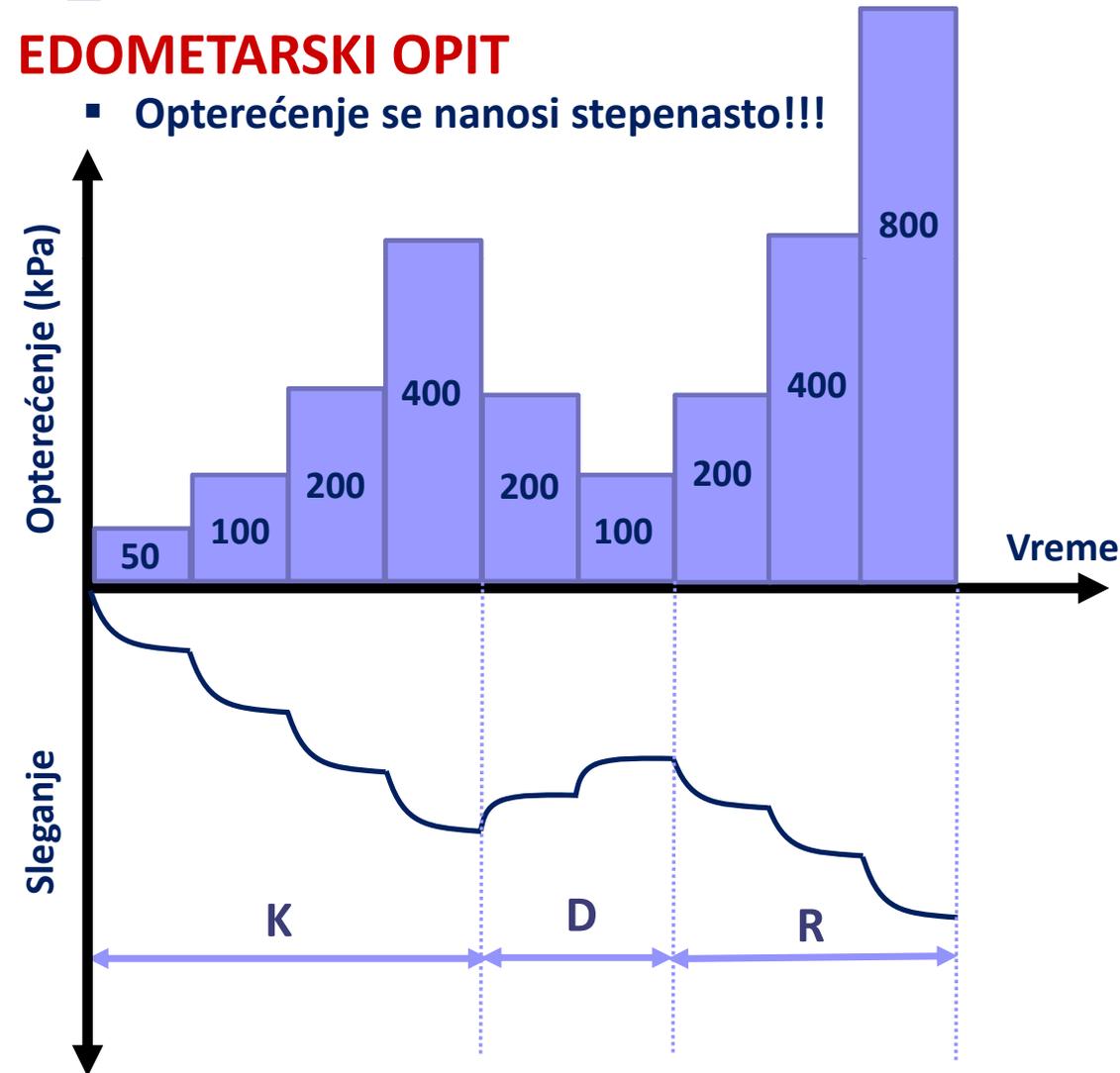
## EDOMETARSKI OPIT

Edometar – ćelija aparata



## EDOMETARSKI OPIT

- Opterećenje se nanosi stepenasto!!!



- 1 opterećenje **K**
- 2 rasterećenje **D**
- 3 ponovo opterećenje **R**

**K** kompresija (dolazi do sleganja)

**D** dekompresija (dolazi do bubrenja tla)

**R** rekompresija (dolazi do sleganja)

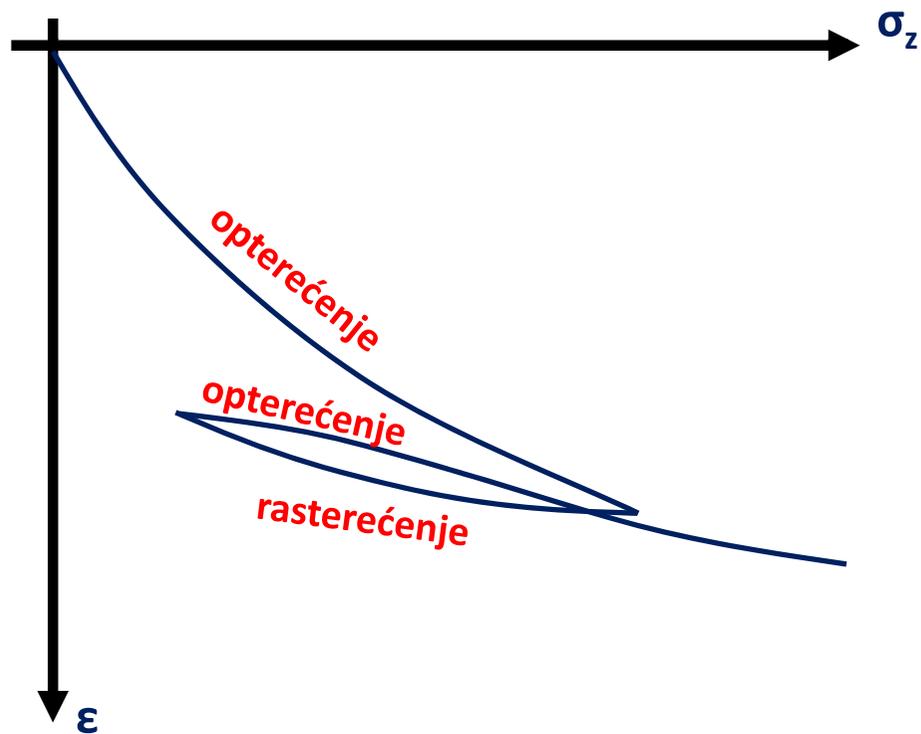
- Uobičajeno da je odnos veličina vertikalnih napona između dve susedne stepenice opterećenja oko 2 (25, 50, 100, 200, 400, 200, 100, 50, 100, 200, 400, 800 kPa ...)
- Kada se završi proces konsolidacije, stavlja se sledeća stepenica opterećenja

- Obično maksimalno opterećenje u edometru odgovara maksimalnom očekivanom vertikalnom naponu u tlu



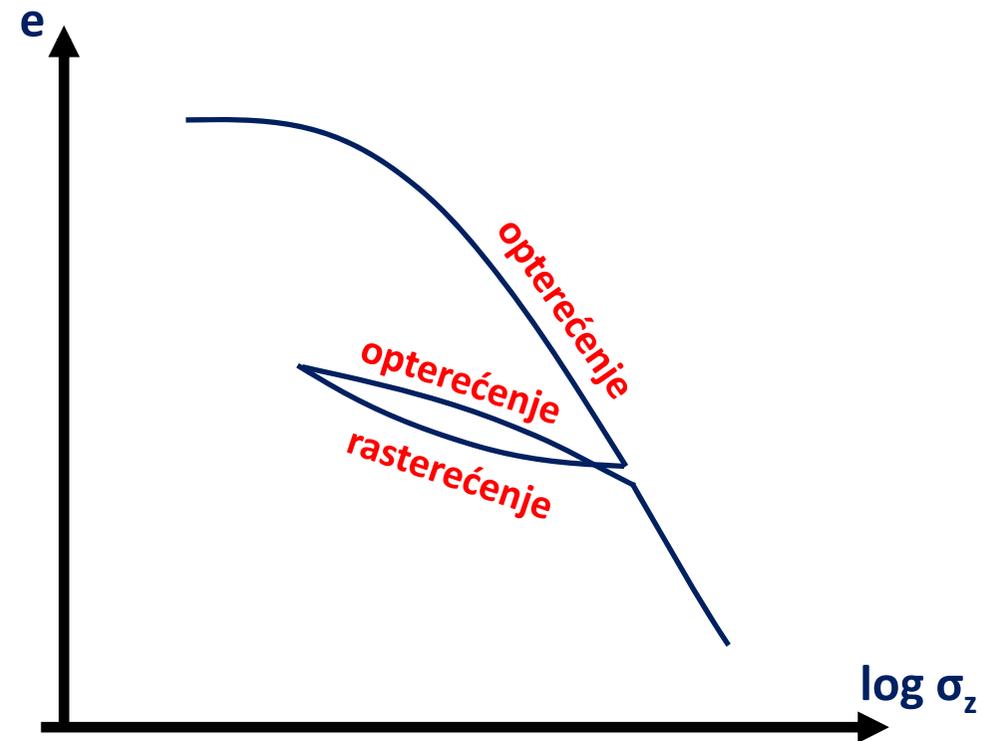
## EDOMETARSKI OPIT

- Rezultat edometarskog opita (naponsko-deformacijska kriva):



Zavisnost: vertikalni napon-vertikalna deformacija

ILI



Zavisnost: vertikalni napon (log razmera-koeficijent poroznosti)

## POKAZATELJI STIŠLJIVOSTI

- Računamo parametre (pokazatelje) stišljivosti (deformabilnosti):

1. MODUL STIŠLJIVOSTI  $M_v$

2. KOEFICIJENT ZAPREMINSKE STIŠLJIVOSTI  $m_v$

3. KONSTANTA STIŠLJIVOSTI  $C$

4. INDEKS STIŠLJIVOSTI  $C_c$

5. INDEKS BUBRENJA (INDEKS REKOMPRESIJE)  $C_r$

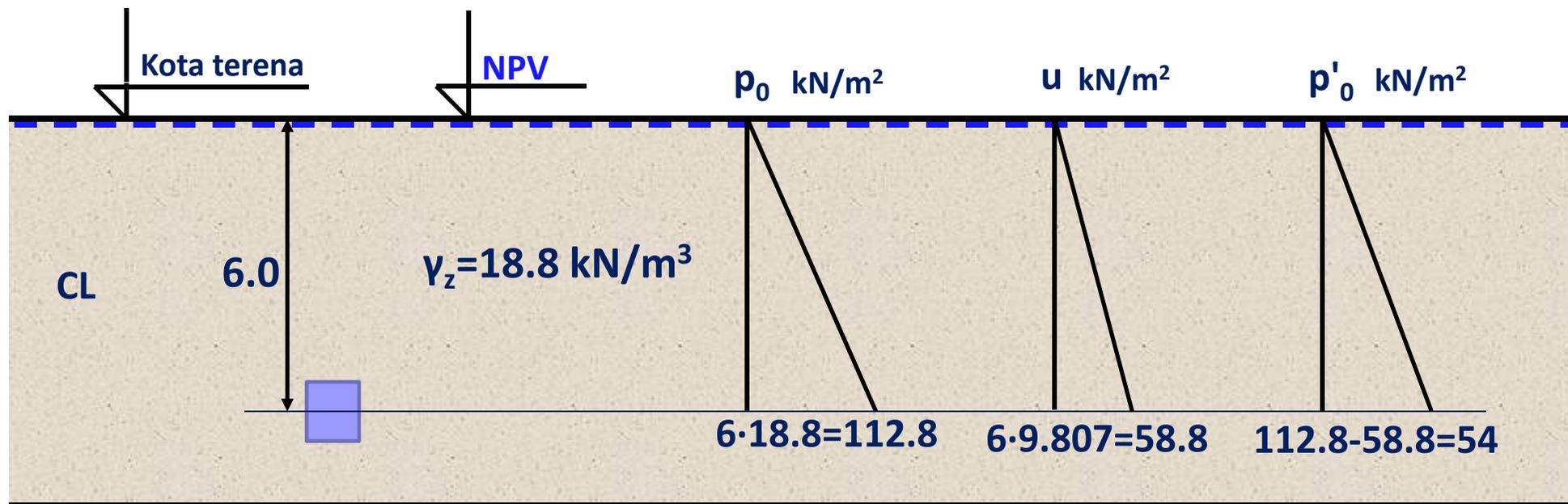


- Parametri deformabilnosti su nagibi naponsko-deformacijske (ili napon-koef. poroznosti) krive u određenom opsegu napona

**ZADATAK 1**

- Uzorak zasićene gline koji je izvađen sa dubine od 6.0 m ugrađen je u aparat za ispitivanje stišljivosti (edometar).
- Rezultati edometarskog opita prikazani su u tabeli.
- Nakon ispitivanja, neto suva masa uzorka je  $M_d=115.19$  g, prečnik uzorka je  $D=6.35$  cm, a visina uzorka je  $h_0=2.55$  cm
- Specifična težina gline je 2.72.
- Nivo podzemne vode je na površini terena.

a) Odrediti veličinu vertikalnog efektivnog napona kome je uzorak izložen "in situ"



**ZADATAK 1**

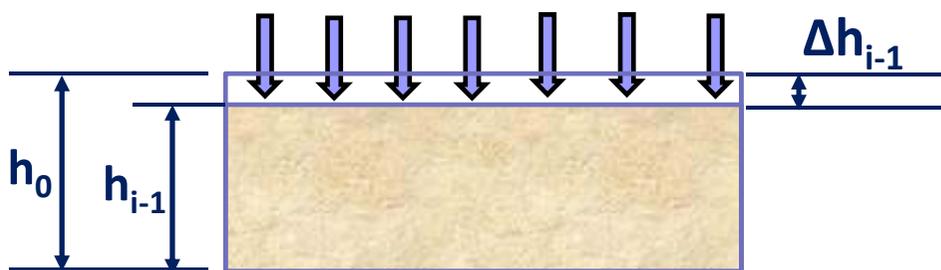
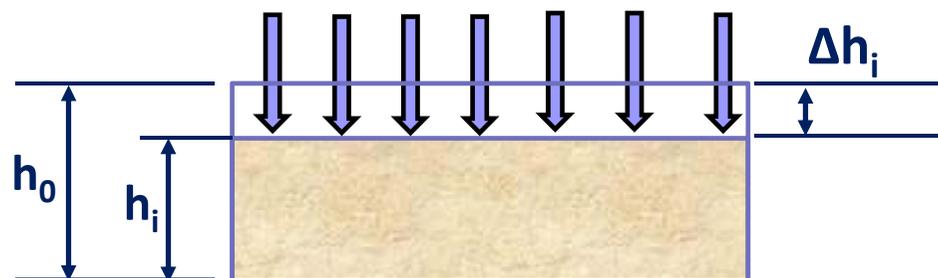
$A_0 = 31.65 \text{ cm}^2;$

$h_0 = 2.55 \text{ cm}$

$\gamma_s = G_s \cdot \gamma_w = 26.68 \text{ kN/m}^3;$

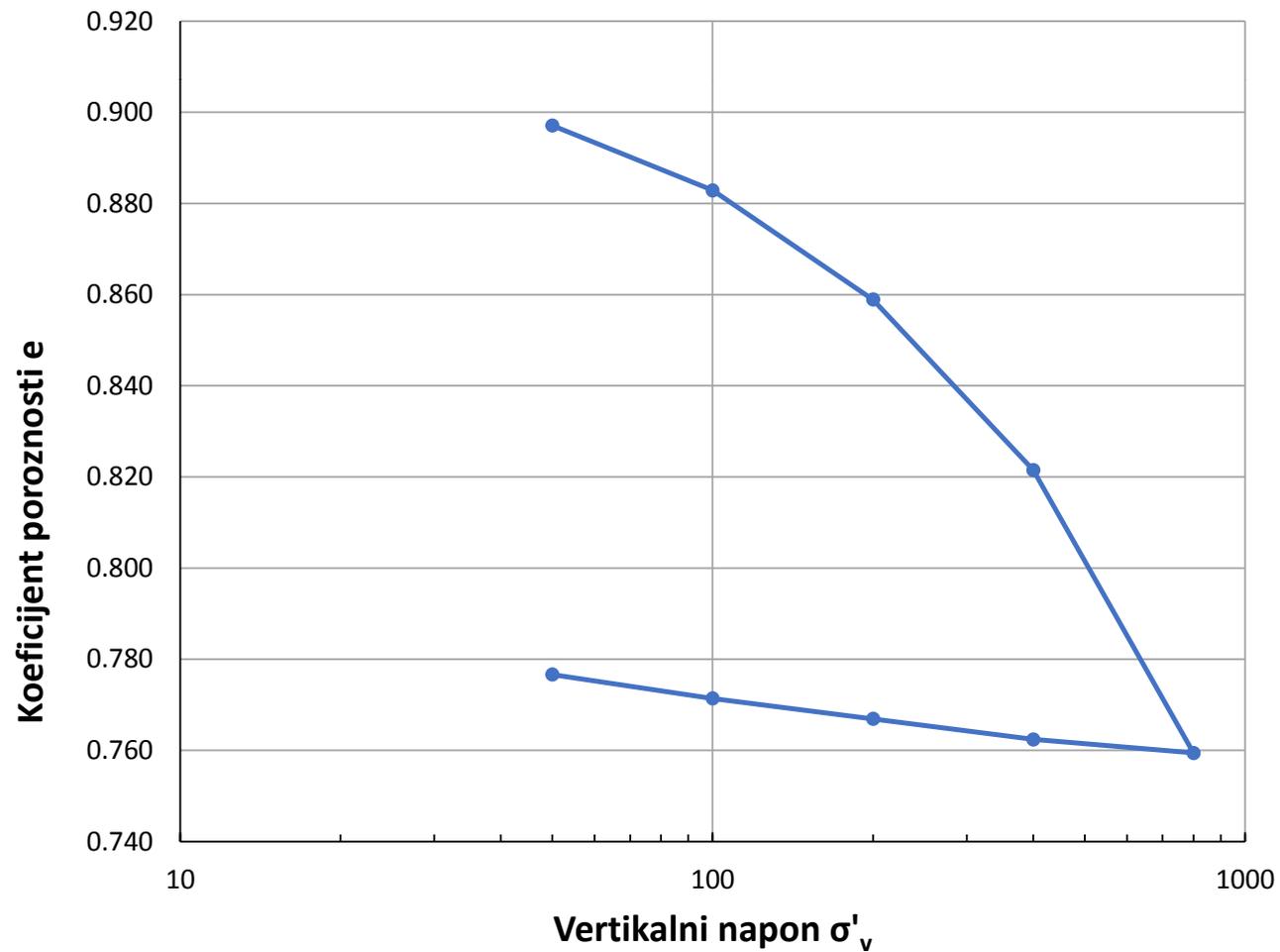
$M_d = 115.19 \text{ g}$

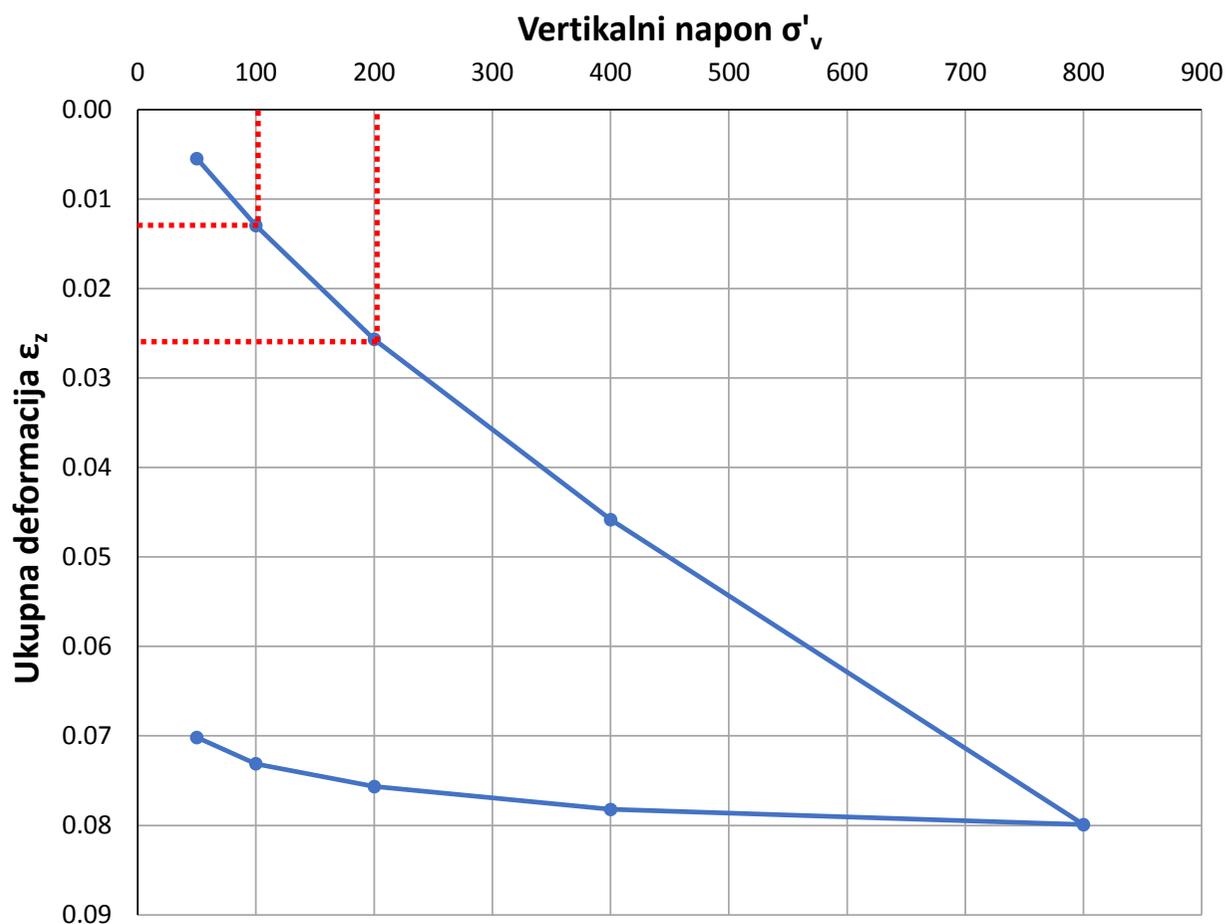
0	1	2	3	4	5	6	7
Korak i	Vertikalni efektivni napon $\sigma_v'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Visina uzorka <b>h</b> [mm]	Zapremina uzorka <b>V=h·A<sub>0</sub></b> [cm <sup>3</sup> ]	$\gamma_d = \frac{M_d}{V} 9.807$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$	Ukupno sleganje <b>Δh<sub>i</sub></b> [mm]	Specifična deformacija $\Delta \varepsilon_z = \frac{\Delta h_i - \Delta h_{i-1}}{h_0 - \Delta h_{i-1}}$
0	<b>0</b>	<b>25.500</b>	<b>80.71</b>	<b>14.00</b>	<b>0.908</b>	<b>0.000</b>	
1	<b>50</b>	<b>25.360</b>	<b>80.26</b>	<b>14.07</b>	<b>0.897</b>	<b>0.140</b>	<b>0.0055</b>
2	<b>100</b>	<b>25.170</b>	<b>79.66</b>	<b>14.18</b>	<b>0.883</b>	<b>0.330</b>	<b>0.0075</b>
3	<b>200</b>	<b>24.850</b>	<b>78.65</b>	<b>14.36</b>	<b>0.859</b>	<b>0.650</b>	<b>0.0127</b>
4	<b>400</b>	<b>24.350</b>	<b>77.07</b>	<b>14.66</b>	<b>0.822</b>	<b>1.150</b>	<b>0.0201</b>
5	<b>800</b>	<b>23.520</b>	<b>74.44</b>	<b>15.18</b>	<b>0.759</b>	<b>1.980</b>	<b>0.0341</b>
6	<b>400</b>	<b>23.560</b>	<b>74.57</b>	<b>15.15</b>	<b>0.762</b>	<b>1.940</b>	<b>-0.0017</b>
7	<b>200</b>	<b>23.620</b>	<b>74.76</b>	<b>15.11</b>	<b>0.767</b>	<b>1.880</b>	<b>-0.0025</b>
8	<b>100</b>	<b>23.680</b>	<b>74.95</b>	<b>15.07</b>	<b>0.771</b>	<b>1.820</b>	<b>-0.0025</b>
9	<b>50</b>	<b>23.750</b>	<b>75.17</b>	<b>15.03</b>	<b>0.777</b>	<b>1.750</b>	<b>-0.0030</b>

**ZADATAK 1****Proračun specifične deformacije (primer)****Opterećenje 200 kPa** $\sigma_{z,i-1}$ **Opterećenje 400 kPa** $\sigma_{z,i}$ 

Specifična deformacija za interval opterećenja 200-400 kPa:

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{\Delta h_i - \Delta h_{i-1}}{h_0 - \Delta h_{i-1}} = \frac{\Delta h_{400} - \Delta h_{200}}{h_0 - \Delta h_{200}}$$

**ZADATAK 1****b) Nacrtati zavisnost koeficijent poroznosti  $e$  od napona u polulogaritamskom dijagramu ( $e - \log \sigma$ )****1. i 5. kolona**

**ZADATAK 1**c) Odrediti  $M_v$  i  $m_v$  za interval napona 100-200 kN/m<sup>2</sup>**MODUL STIŠLJIVOSTI:**

$$M_v = \frac{\Delta \sigma'_z}{\Delta \varepsilon_z} \quad [\text{kPa}]$$

$$M_v = \frac{\Delta \sigma'_z}{\Delta \varepsilon_z} = \frac{200 - 100}{0.0127} = 7874 \text{ kPa}$$

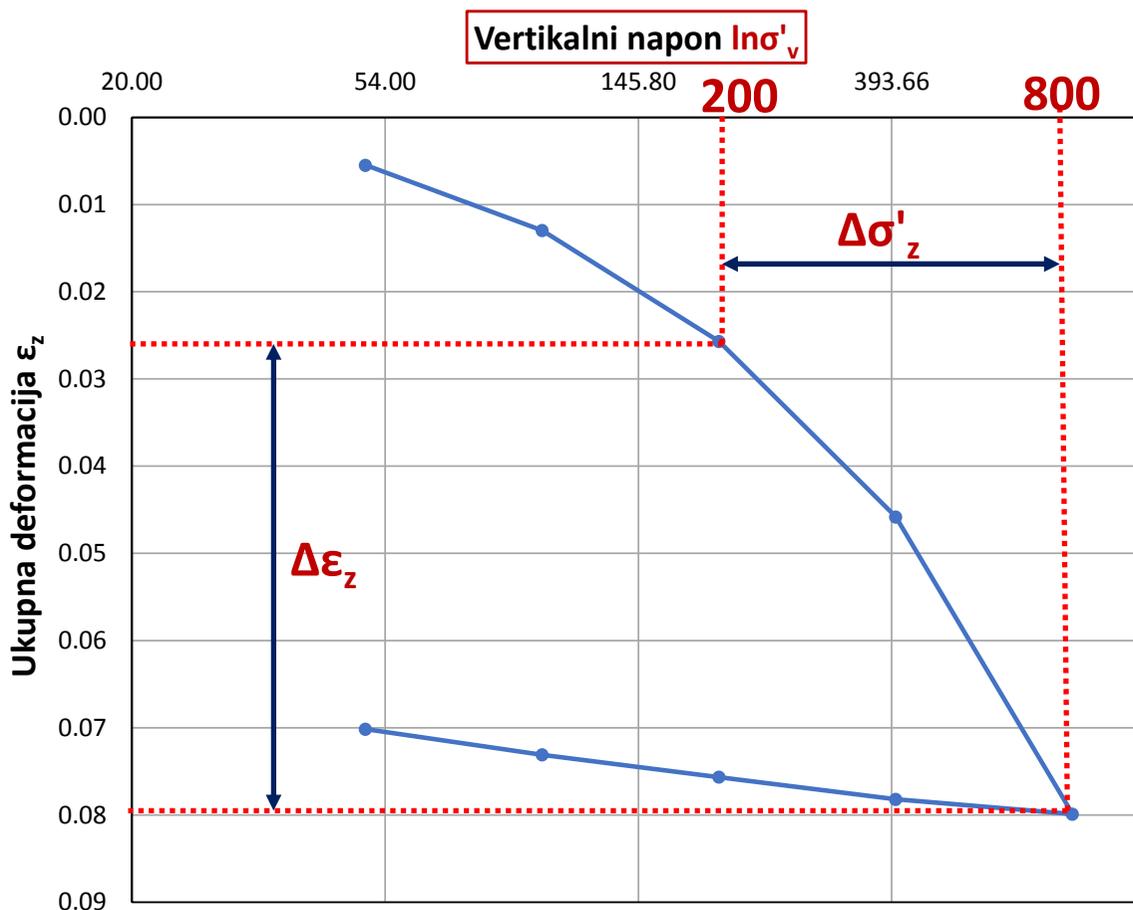
**KOEFICIJENT ZAPREMINSKE STIŠLJIVOSTI:**

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon_z}{\Delta \sigma'_z}$$

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon_z}{\Delta \sigma'_z} = \frac{1}{M_v} = 1.27 \cdot 10^{-4} \text{ 1/kPa}$$

## ZADATAK 1

d) Odrediti konstantu stišljivosti C za interval napona 200-800 kN/m<sup>2</sup>



KONSTANTA STIŠLJIVOSTI:

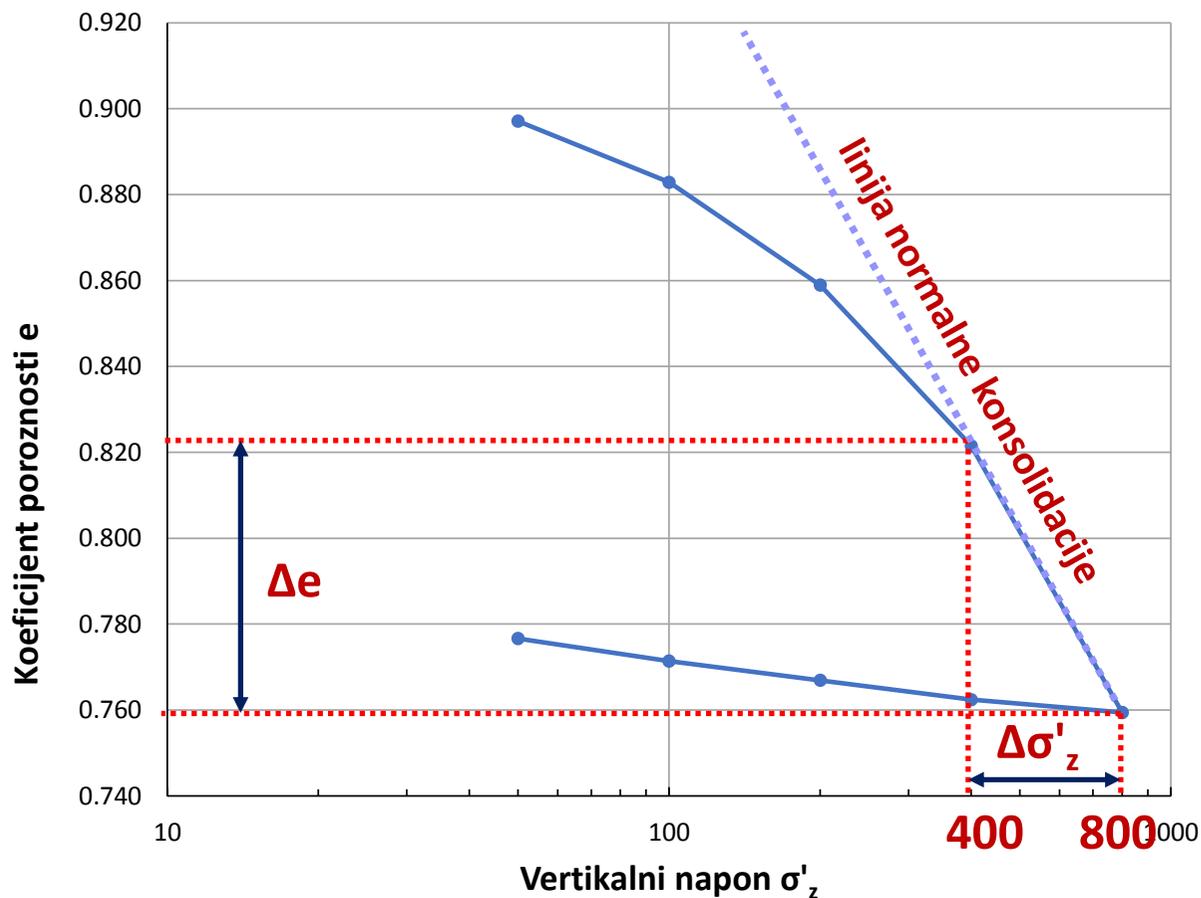
$$C = \frac{\Delta \sigma'_z}{\Delta \epsilon_z} = \frac{\ln \sigma'_{z(i)} - \ln \sigma'_{z(i-1)}}{\Delta \epsilon_z} = \frac{\ln \left( \frac{\sigma'_{z(i)}}{\sigma'_{z(i-1)}} \right)}{\Delta \epsilon_z}$$

$$\Delta \epsilon_z = \frac{\Delta h_i - \Delta h_{i-1}}{h_0 - \Delta h_{i-1}} = \frac{\Delta h_{800} - \Delta h_{200}}{h_0 - \Delta h_{200}} = \frac{1.98 - 0.65}{25.5 - 0.65} = 0.0535$$

$$C = \frac{\Delta \sigma'_z}{\Delta \epsilon_z} = \frac{\ln \left( \frac{800}{200} \right)}{0.0535} = 25.9$$

## ZADATAK 1

e) Odrediti indeks stišljivosti  $C_c$ , za interval napona 400-800 kN/m<sup>2</sup>



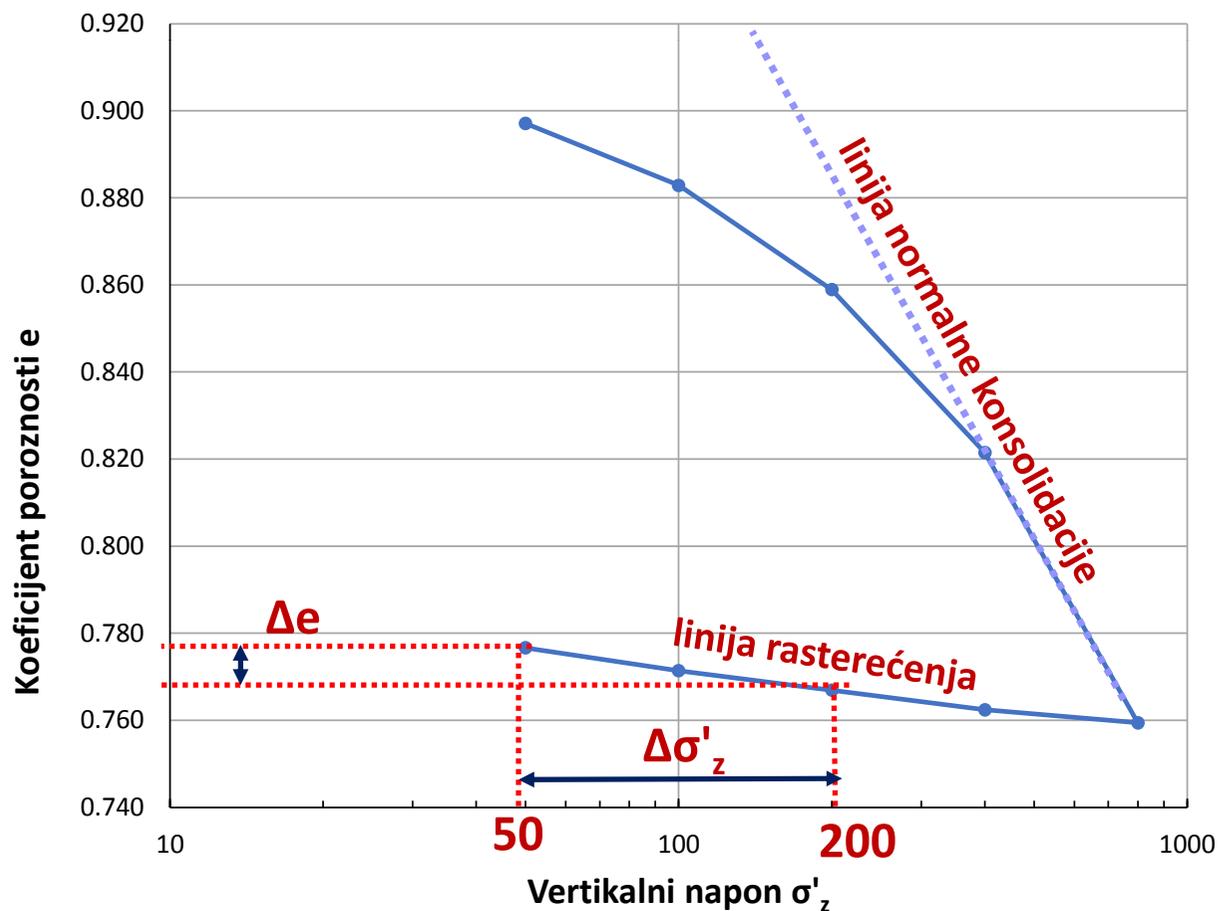
INDEKS STIŠLJIVOSTI (nagib linije normalne konsolidacije)

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_z} = \frac{\Delta e}{\log \sigma_{zB} - \log \sigma_{zA}} = \frac{\Delta e}{\log \left( \frac{\sigma_{zB}}{\sigma_{zA}} \right)}$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_z} = \frac{e_{800} - e_{400}}{\log \left( \frac{800}{400} \right)} = \frac{|0.822 - 0.759|}{\log 2} = 0.2093$$

## ZADATAK 1

f) Odrediti indeks bubrenja odnosno rekompresije  $C_r$ , za interval napona 200-50 kN/m<sup>2</sup>



INDEKS BUBRENJA (nagib linije rasterećenja)

$$C_r = - \frac{\Delta e}{\log \sigma_{zB} - \log \sigma_{zA}} = \frac{\Delta e}{\log \left( \frac{\sigma_{zB}}{\sigma_{zA}} \right)} \approx C_s$$

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_z} = \frac{e_{200} - e_{50}}{\log \left( \frac{200}{50} \right)} = \frac{|0.767 - 0.777|}{\log 4} = 0.0166$$

NAPOMENA: Nagib linije rasterećenja može da se računa i za interval napona 800-50 kPa.

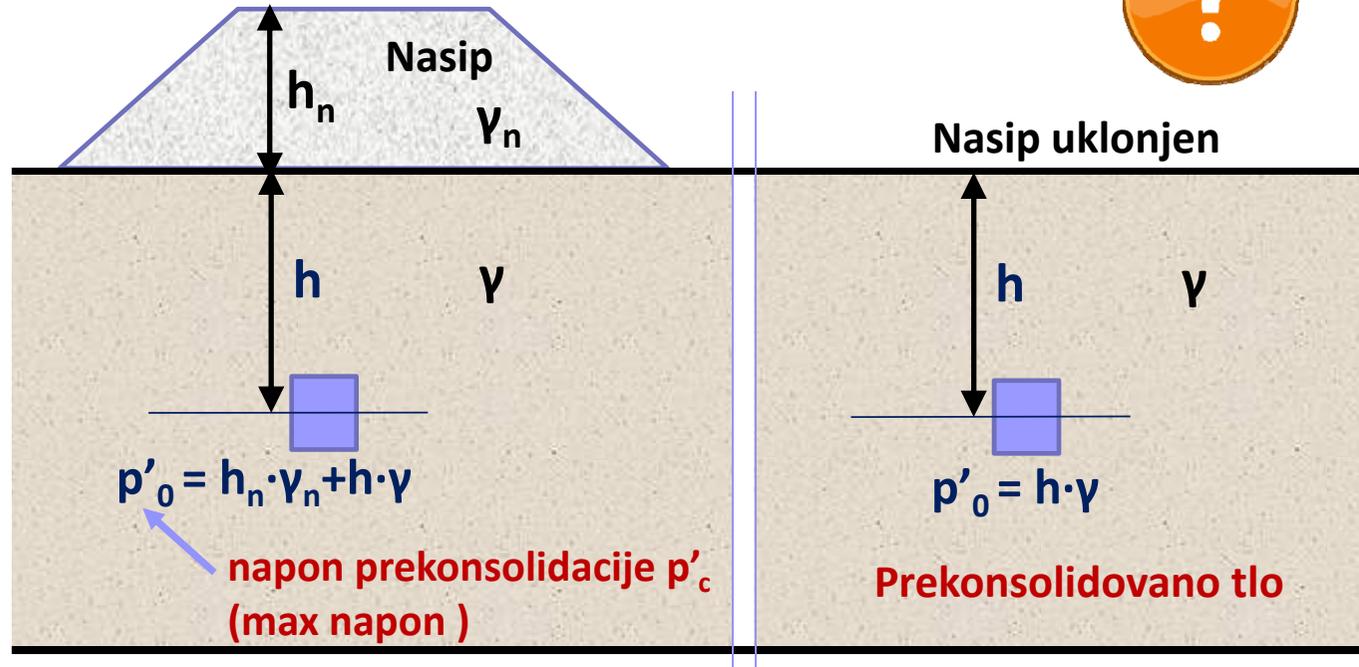
## NORMALNO KONSOLIDOVANO I PREKONSOLIDOVANO TLO

- Tlo je normalno konsolidovano ako od svog nastanka u prošlosti do vremena kada ga posmatramo nije bilo izloženo većem vertikalnom naponu od napona kome je sada izložen.
- Element tla je prekonsolidovan ako je u svojoj prošlosti bio opterećen vertikalnim efektivnim naponom, naponom prekonsolidacije  $p'_c$ , koji je veći od tekuće veličine vertikalnog efektivnog napona.
- Stepen prekonsolidacije:

$$OCR = \frac{p'_c}{p'_0}$$

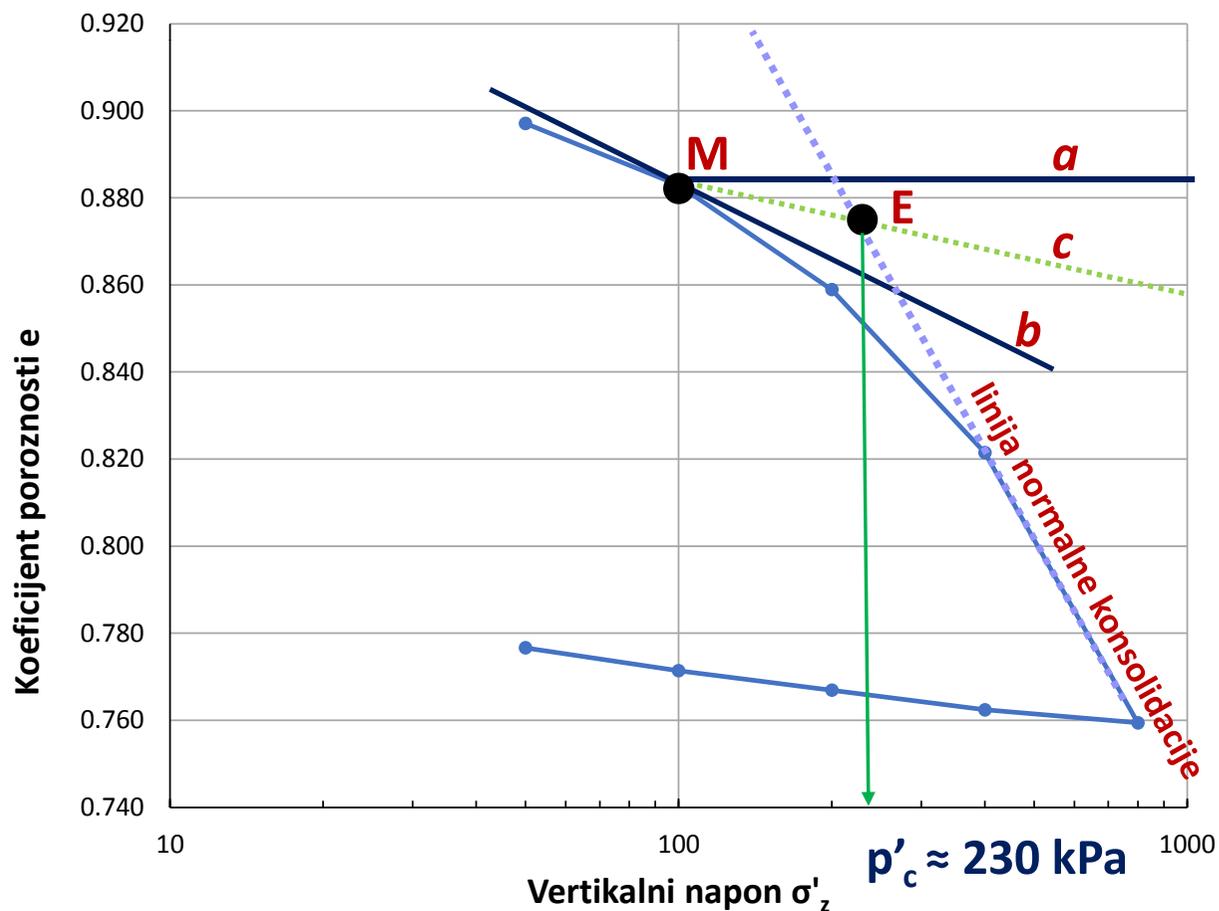
OCR = 1 normalno konsolidovano tlo

OCR > 1 prekonsolidovano tlo



## ZADATAK 1

g) Odrediti napon prekonsolidacije Casagrande ovom konstrukcijom ( $p'_c$ )



1. Izabrati tačku **M** na mestu maksimalne zakrivljenosti krive
2. Povuci horizontalnu liniju  $a$  u tački  $M$
3. Povuci tangentu  $b$  na krivu u tački  $M$
4. Nacrtati simetralu ugla  $\alpha$ , između pravih  $a$  i  $b$ , koja je označena sa  $c$
5. Produžiti liniju normalne konsolidacije (linearni segment krive) do preseka sa  $c$  u tački  $E$
6. Tačka  $E$  definiše napon prekonsolidacije  $p'_c$

## ZADATAK 1

f) Odrediti stepen prekonsolidacije (OCR)

$$p'_c \approx 230 \text{ kPa}$$

$$p'_0 = 54 \text{ kPa}$$

$$\text{OCR} = p'_c / p'_0$$

$$\text{OCR} = 4.3$$

## REKAPITULACIJA PARAMETARA STIŠLJIVOSTI

### 1. MODUL STIŠLJIVOSTI:

$$M_v = \frac{\Delta\sigma'_z}{\Delta\varepsilon_z}$$

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma'_z}{M_v}$$

### 2. KOEFICIJENT ZAPREMINSKE STIŠLJIVOSTI:

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon_z}{\Delta\sigma'_z} \quad \text{tako da je} \quad m_v = \frac{1}{M_v}$$

### 3. KONSTANTA STIŠLJIVOSTI:

$$C = \frac{\ln\left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma'_z}{p'_0}\right)}{\Delta\varepsilon_z}$$

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{1}{C} \ln\left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma'_z}{p'_0}\right)$$

### 4. INDEKS STIŠLJIVOSTI (NC tlo)

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\log\left[\left(p'_0 + \Delta\sigma'_z\right)/p'_0\right]}$$

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{C_c}{1 + e_0} \log\left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma'_z}{p'_0}\right)$$

### 5. INDEKS BUBRENJA (INDEKS REKOMPRESIJE)

$$C_r = -\frac{\Delta e}{\log(p'_c/p'_0)} \approx C_s$$

## REKAPITULACIJA

### OC tlo

Ako je:

$$p'_0 + \Delta\sigma'_z < p'_c$$

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{C_r}{1+e_0} \log \frac{p'_0 + \Delta\sigma'_z}{p'_0}$$

Ako je:

$$p'_0 + \Delta\sigma'_z > p'_c$$

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{C_r}{1+e_0} \log \frac{p'_c}{p'_0} + \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{p'_0 + \Delta\sigma'_z}{p'_c}$$



**HVALA NA PAŽNJI**