

# **MECHANIKA HORNIN** **A ZEMIN**

podklady k přednáškám

**doc. Ing. Kořínek Robert, CSc.**

**Místnost: C 314**

**Telefon: 597 321 942**

**E-mail: robert.korinek@vsb.cz**

**Internetové stránky: [fast10.vsb.cz/korinek](http://fast10.vsb.cz/korinek)**

# Přetvárné (deformační) charakteristiky zeminy

## Stlačitelnost zeminy

Zatížení základové půdy se mění stav napjatosti, vznikají deformace, které vyvolávají sedání základů. Deformační charakteristiky zemín se využívají při výpočtech deformace.

- \_\_\_\_\_ (sedání staveb, deformace podloží pod násypy)
- \_\_\_\_\_ (komunikační tělesa, hráze, přehrad)

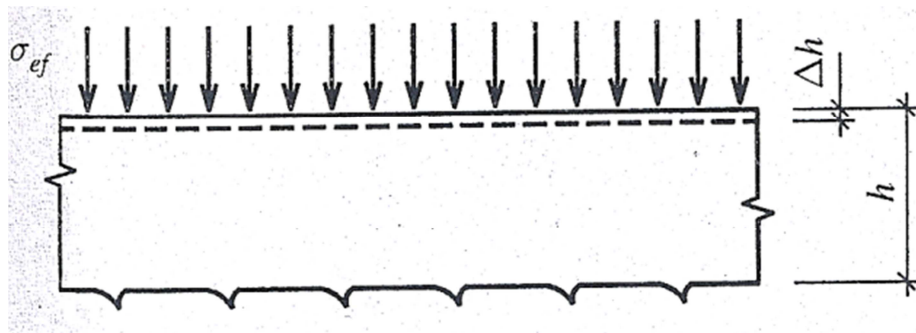
V praktické aplikaci mechaniky zemín lze uplatnit deformační charakteristiky teorie pružnosti:

- \_\_\_\_\_ **E**
- \_\_\_\_\_  **$\mu$  ( $\nu$ )**
- \_\_\_\_\_ **G**

Deformační charakteristiky lze definovat

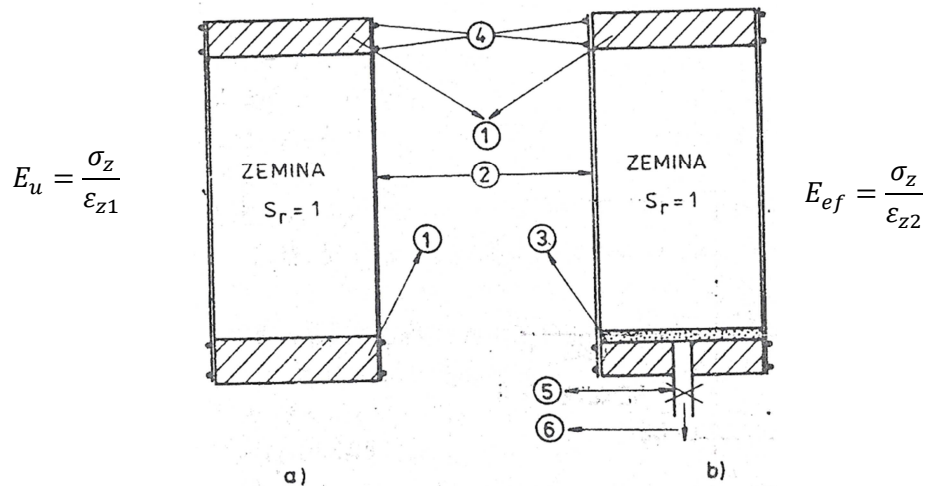
- \_\_\_\_\_ (neodvodněné podmínky),
- \_\_\_\_\_ (odvodněné podmínky).

Další specifika úloh mechaniky zemín je řešení úloh, při nichž se zemina může deformovat pouze v jednom směru (nejčastěji svislém). Při zatěžování zeminy na velké ploše se zemina nemůže rozšířit do stran. **Ke stlačení zeminy dochází zmenšením objemu pórů.**



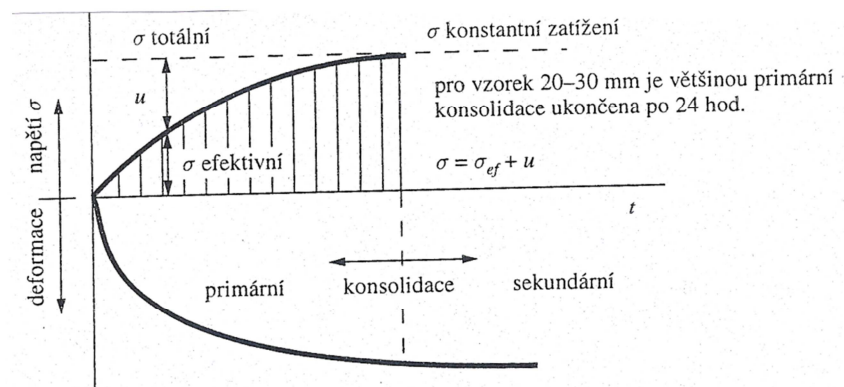
Zatížení na velké ploše

Podle principu efektivního napětí jsou deformační vlastnosti převážně funkcí efektivních napětí.



- 1 - nepropustná podložka, 2 - pryžová membrána, 3 - propustná podložka, 4 - těsnicí kroužky O, 5 - ventil, 6 - měřidlo objemových změn

Po otevření ventilu začne voda, která je ve vzorku pod tlakem odtékat. Získáme svislou deformaci (přetvoření).



Primární a sekundární konsolidace

Tato deformace probíhá v závislosti na čase, říkáme, že zemina konsoliduje. Uvažujeme pouze **primární konsolidaci**, tzv. tu část konsolidace, kdy dochází k vytlačení vody z pórů zeminy, k vymizení (rozptýlení, disipaci) pórových tlaků. Když pórový tlak  $u=0$ , je primární konsolidace ukončena. Při dalším zvětšujícím se napětí již dochází k přetváření zrn. Tuto

část konsolidace, při níž se dotvaruje vlastní skelet, označujeme jako \_\_\_\_\_

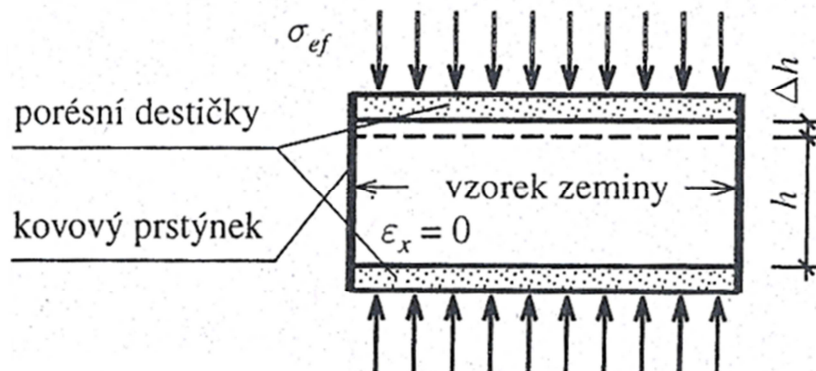
Ve většině úloh mechaniky zemin **vycházíme z deformačních charakteristik v efektivní napjatosti** pro výpočet celkové deformace.

**Modul za neodvodněných podmínek se uplatňuje:**

- při výpočtu sedání staveb na jílovitých zeminách, kdy lze celkové sedání, odpovídající deformačním charakteristikám v efektivních napětích rozdělit na dvě fáze. První se označuje jako počáteční deformace (deformace za neodvodněných podmínek) a druhá jako konsolidační sedání,
- při deformační analýze tělesa sypané přehrady po skončení výstavby, neboť fáze vytlačení vody z pórů trvá u málo propustných zemin velmi dlouho.

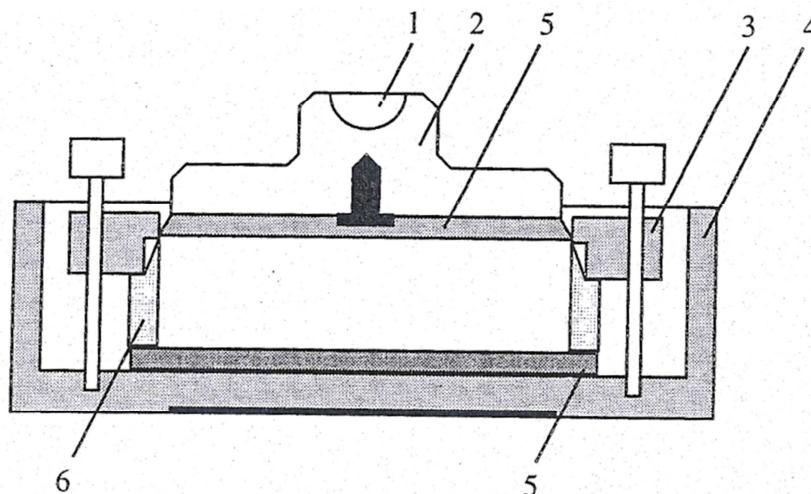
## Edometr

Přístroj pro stanovení deformačních charakteristik, výpočet deformace a přímé měření stlačitelnosti, kde boční přetvoření  $\varepsilon_x = 0$ .



Princip edometrické zkoušky

Základ edometru tvoří edometrické krabice, tuhý válcový prstýnek.



Edometrické krabice s pevným prstencem: 1 - ložisko, 2 - roznášecí píst, 3 - centrážní kroužek, 4 - tělo edometrické krabice, 5 - filtrační destičky, 6 - edometrický prstýnek

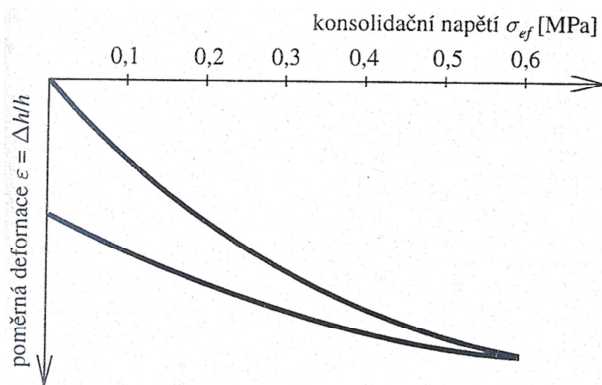
V edometru jsou boční deformace nulové, ke stlačení dochází v důsledku snižování pórového napětí vytlačením vody z pórů zeminy a zmenšením objemu pórů. Stlačení zeminy se realizuje pouze ve svislém směru, probíhá \_\_\_\_\_ (v edometru nemůže dojít k porušení zeminy). Tyto předpoklady se přibližují reálným podmínkám tím, čím je základ větší a čím je menší mocnost stlačitelného podloží.

## Zkouška s krokovým (stupňovým) zatěžováním

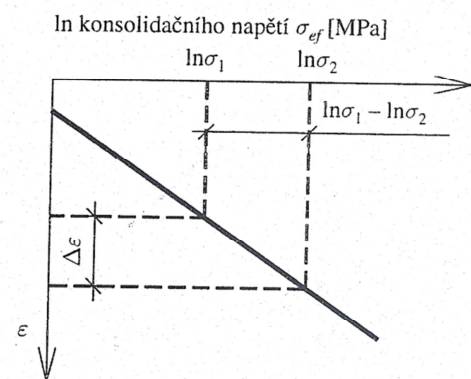
Od okamžiku zatížení se registruje deformace vzorku jako funkce času. V klasickém přístupu se stanovují smluvní hodnoty a postupy:

- celkový čas působení jednotka zatěžovacího stupně, např. 24 hodin,
- první zatěžovací stupeň odpovídá přibližně geostatickému napětí v hloubce odběru vzorku
- počet zatěžovacích stupňů 4 - 7,
- velikost konečné deformace pod působícím zatížením – rychlost stlačení je rovna nebo menší než 0,002 mm/hod pro písčité zeminy, nebo 0,005 mm/hod pro jíly (menší než 1% rozdíl deformace současné a deformace na konci předcházejících zatěžovacího stupně),
- poslední zatěžovací stupeň má vyvodit napětí asi o 20% vyšší než jakému bude zemina v budoucnu vystavena,
- pro zjištění velikostí trvalé a pružné deformace se provádí odlehčování ve stejných zatěžovacích stupních.

Grafickým znázorněním závislosti **konečných hodnot deformace** pro jednotlivé zvolené zatěžovací stupně je \_\_\_\_\_ . Pokud vynese konsolidační napětí  $\sigma_{ef}$  v logaritmickém měřítku, dostaneme přímku.

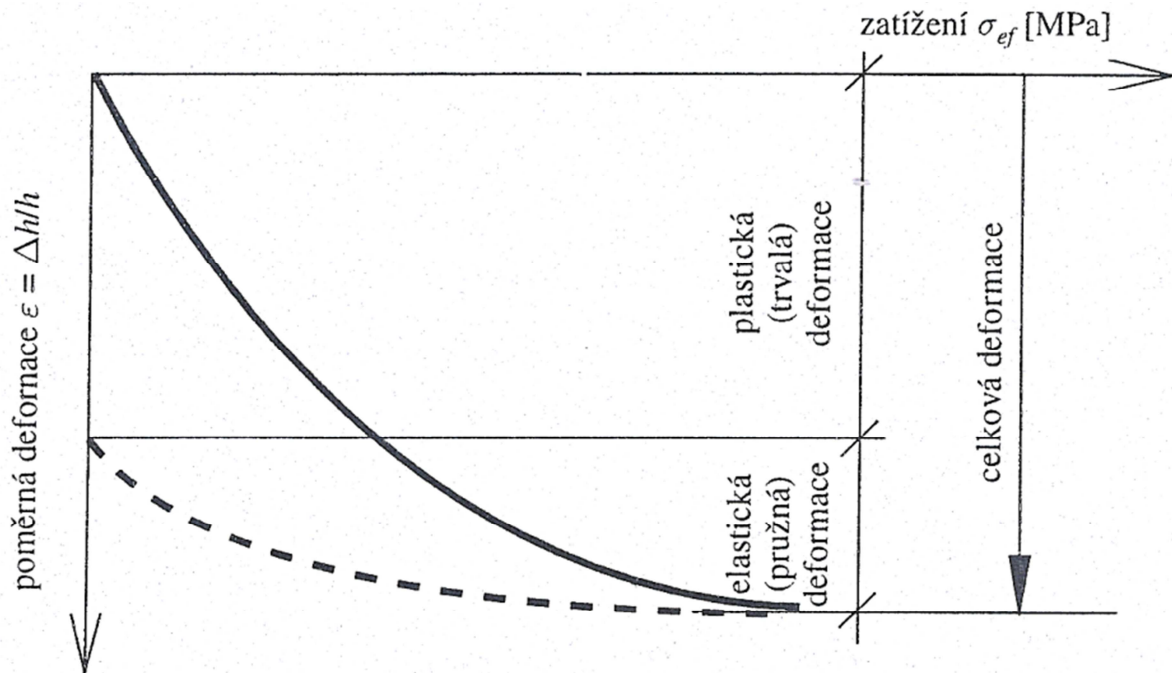


Křivka stlačitelnosti



křivka stlačitelnosti (efektivní napětí  $\sigma_{ef}$  v logaritmickém měřítku)

Zeminy se pod zatížením deformují trvale (plasticky) a pružně (elasticky). Nejčastěji se stanovují deformace celkové.



Elastická, plastická a celková deformace

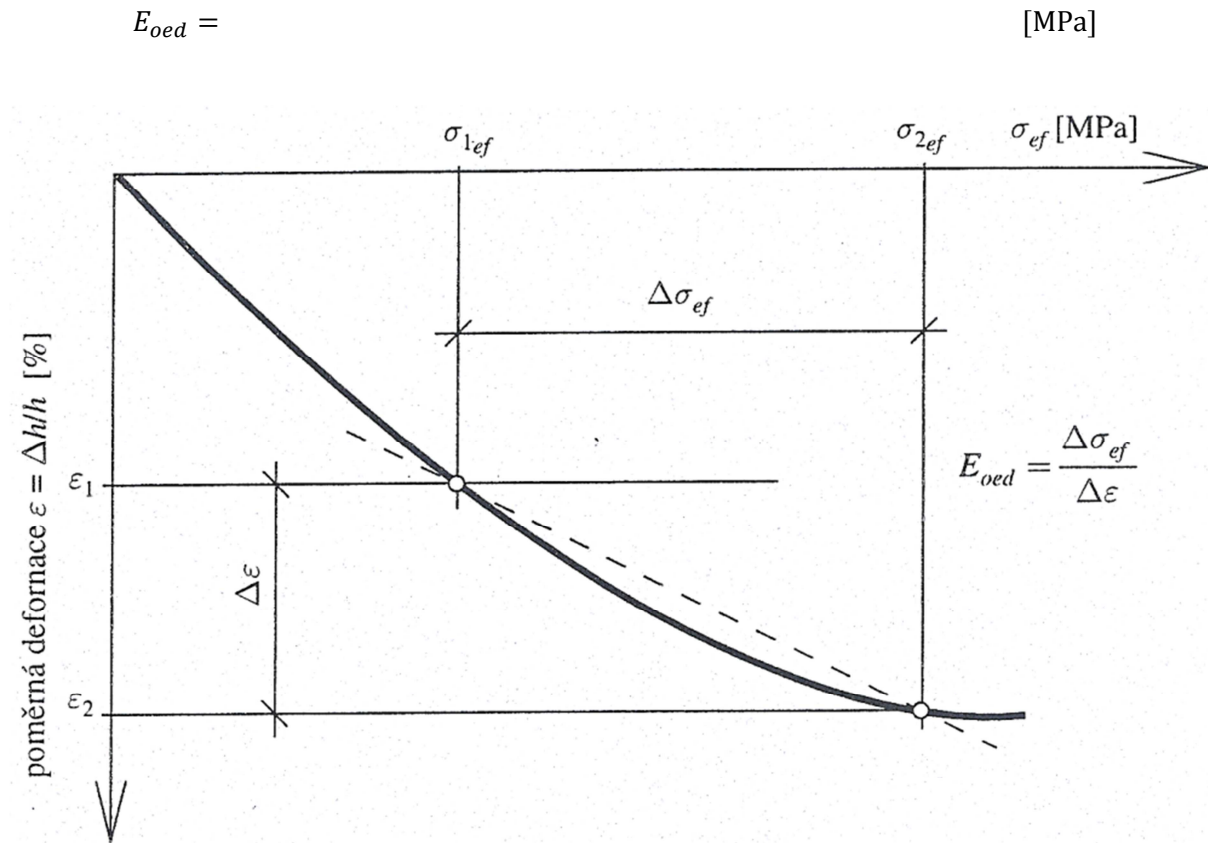
Z edometrické zkoušky můžeme určit tyto deformační charakteristiky zemin:

1. **Edometrický modul přetvárnosti  $E_{oed}$ .**
2. **Modul deformační  $E_{def}$ .**
3. **Součinitel stlačitelnosti  $C$ .**
4. **Součinitel konsolidace  $c_v$**  (potřebujeme znát pro časový průběh sedání).
5. Součinitel stlačitelnosti  $C_c$ .
6. Relativní koeficient stlačitelnosti  $a$ .

## Edometrický modul přetvárnosti $E_{oed}$

Edometrický modul přetvárnosti  $E_{oed}$  charakterizuje stav, při kterém se zemina vlivem svislého přitížení nemůže deformovat do stran – jednoosá deformace.

Edometrické moduly přetvárnosti  $E_{oed}$  **počítáme pro jednotlivé intervaly zatížení**. Se vzrůstajícím napětím většinou vzrůstá  $E_{oed}$ , musíme tedy vždy uvést rozsah napětí, pro který byl edometrický modul přetvárnosti  $E_{oed}$  stanoven.



Vyhodnocení edometrického modulu  $E_{oed}$  ze zkoušky krokovým zatěžováním

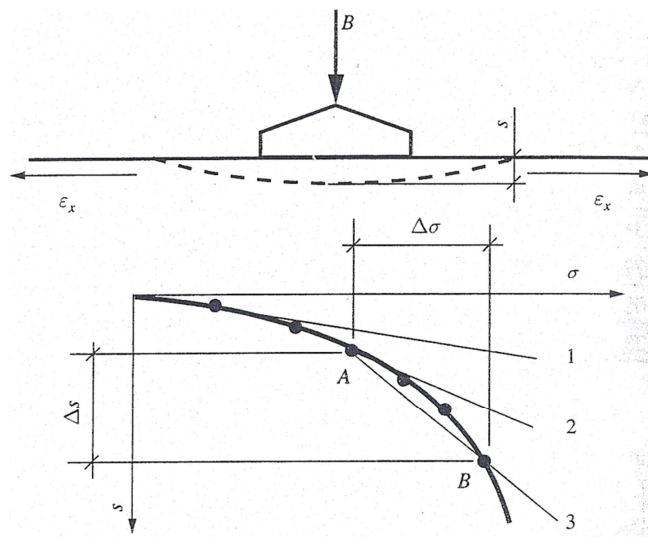


## Modul přetvárnosti $E_{def}$

Modul přetvárnosti  $E_{def}$  charakterizuje stav, při kterém se zemina vlivem svislého přetížení **může deformovat do stran**. Hodnoty modulu přetvárnosti se stanovují ze zkoušek in-situ, nejčastěji ze zatěžovacích zkoušek, příp. nepřímých metod, kdy v rámci geotechnického průzkumu se provádí presiometrické, případně penetrační zkoušky.

### Zatěžovací zkouška – zkouška in situ

Typickou zkouškou pro stanovení modulu přetvárnosti  $E_{def}$  je zatěžovací zkouška pomocí zatěžovací desky prováděná v terénu.



Zatěžovací zkouška – vyhodnocení

Zatěžování se provádí po stupních, každému zatížení  $\sigma$  odpovídá deformace – stlačení  $s$ . Hodnotu modulu přetvárnosti  $E_{def}$  můžeme určit pomocí vztahu odvozeného pro deformaci zatíženého povrchu pružného poloprostoru pro lineární část závislosti, získané pomocí zatěžovací desky

$$E_{def} = \frac{\Delta\sigma_i \cdot (1 - \mu^2) \cdot \alpha}{\Delta s_i},$$

- $d$  – průměr zatěžovací desky,
- $\nu$  – Poissonovo číslo
- $\Delta s_i$  – přírůstek sedání desky způsobený přírůstkem napětí  $\Delta\sigma_i$  po ukončení konsolidace zeminy,
- $\alpha$  – součinitel závislý na tvaru desky, pro dokonale tuhou desku  $\alpha = 0,79$

Protože závislost mezi zatížením a stlačením není lineární, můžeme rozlišovat tři hodnoty modulu přetvárnosti:

1. počáteční modul přetvárnosti,
2. tečnový modul v bodě A,
3. sečnový modul pro body A, B.

# Vztah mezi edometrickým modulem $E_{oed}$ a modulem přetvárnosti $E_{def}$

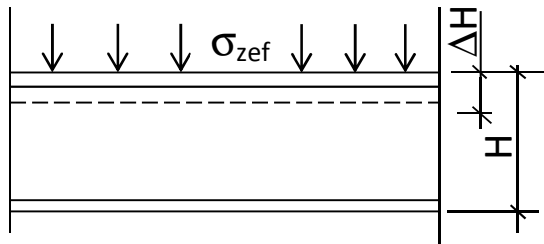
Mezi modulem edometrickým modulem přetvárnosti  $E_{oed}$  a modulem přetvárnosti  $E_{def}$  existuje vztah, který je uvažován rovnicí:

$$E_{oed} = \beta =$$

součinitel  $\beta$  charakterizuje pružné přetvoření a je funkcí Poissonova čísla  $\mu$ .

Směrné normové hodnoty součinitele  $\beta$  a Poissonova čísla  $\mu$  jsou pro jednotlivé třídy zemin uvedeny v tabulkách normy ČSN 73 1001.

## Odvození součinitele $\beta$ :



$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H}$$

Rozšířený Hookův zákon:

$$\varepsilon_{z,ef} =$$

Pro normálně konsolidované zeminy platí:

$$\sigma_{x,ef} = \sigma_{y,ef} = \sigma_{z,ef} \cdot K_r = \sigma_{z,ef} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu}$$

Po dosazení a úpravě:

$$\varepsilon_{z,ef} = \frac{1}{E} \cdot \sigma_{z,ef} \left( 1 - \frac{2 \cdot \mu^2}{1 - \mu} \right)$$

$$E = \frac{\sigma_{z,ef}}{\varepsilon_{z,ef}} \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot \mu^2}{1 - \mu} \right) = E_{oed} \cdot \beta$$

Kde:

$$E_{oed} = \frac{\sigma_{z,ef}}{\varepsilon_{z,ef}} \quad \text{– edometrický modul přetvárnosti}$$

$$E \quad \text{– modul přetvárnosti } E_{def}$$

$$\beta = 1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu} \quad \text{– součinitel vzájemného vztahu mezi } E_{oed} \text{ a } E_{def}$$

## Součinitel stlačitelnosti C

Stanovuje se ze závislosti mezi napětím  $\sigma_{ef}$  a přetvořením  $\varepsilon$  v semilogaritmickeém měřítku. Protože závislost je přímka, pak lze deformační charakteristiku vyjádřit pro celý interval zatížení jedním členem pomocí součinitele stlačitelnosti C.

$$C =$$

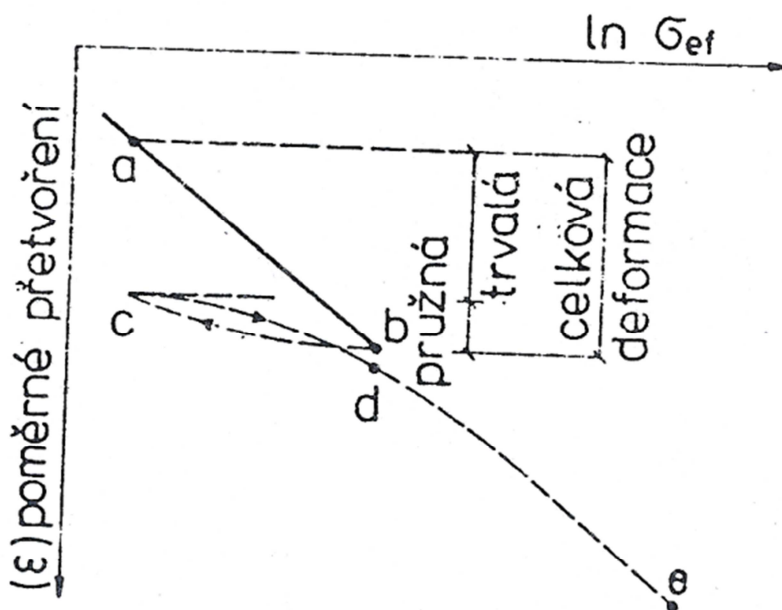
$\Delta\sigma_{ef}$  – přitížení z původní hodnoty  $\sigma_{ef}$

$\Delta h$  – stlačení vzorku vlivem přitížení  $\Delta\sigma_{ef}$

Orientační hodnoty součinitele stlačitelnosti C (bezrozměrná veličina)

| druh zeminy | C      | druh zeminy      | C       |
|-------------|--------|------------------|---------|
| hlíny       | 20-40  | kyprý písek      | 60-150  |
| jíl měkký   | 30-70  | ulehlý písek     | 150-200 |
| jíl tuhý    | 70-90  | písek se štěrkem | 250     |
| jíl pevný   | 90-120 | štěrk            | 300     |

Pokud je v edometru zkoušena zemina překonsolidovaná, potom vztah  $\ln.\sigma_{ef}$  a  $\Delta h$  není přímkový a deformační charakteristiky zeminy je vhodné vyjádřit pomocí E<sub>oed</sub>. Pro překonsolidované zeminy je typická deformační křivka reprezentovaná spojnici bodů c-d-e.

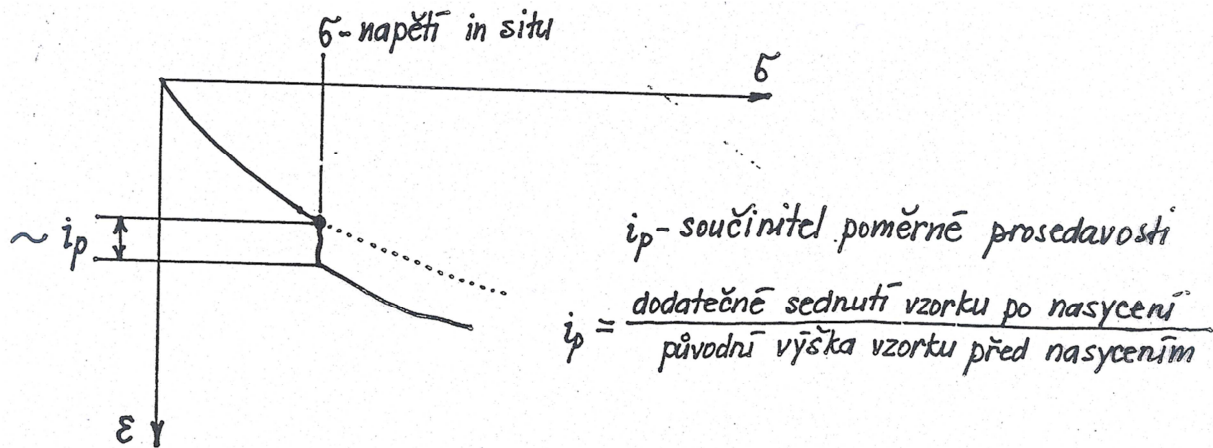


## Objemová nestálost zemin

Lze zjistit v laboratoři v edometru

- \_\_\_\_\_ – vykazují doplňkovou deformaci po prosycení vodou
- \_\_\_\_\_ – zvyšují po prosycení vodou svůj objem.

Obvykle se za zeminy prosedavé považují ty zeminy, které mají **součinitel prosedavosti** větší než 1%. Součinitel poměrné prosedavosti se stanoví zkouškou na neporušeném vzorku zeminy a to při zatížení, kterému byl vzorek vystaven in situ. Číselně se stanoví z poměru velikosti dodatečného sednutí vzorku po nasycení vodou k původní výšce vzorku před nasycením.



Bobtnání nastává tam, kde jílovitá zemina byla odlehčena a nyní může přijímat vodu. Odebraný vzorek zeminy osadíme do edometrické krabice – zatížíme a teprve dodatečně zalijeme vodou. Měříme poměrnou deformaci jako funkci času pro různé zatížení – čím menší zatížení, tím větších hodnot nabobtnání lze získat. Naopak při určitém zatížení nenaměříme žádné přetvoření, ať už v kladném či záporném smyslu. Toto zatížení označujeme jako **bobtnací tlak**.

## Cyklické a dynamické zatěžování

**Cyklické zatěžování** – u běžných staveb se nesetkáváme s cyklickým zatěžováním příliš často, neboť podíl nahodilého zatížení (sníh, vítr), ku stálému je poměrně malý. Výrazněji tento způsob zatěžování vystupuje do popředí u podloží dopravních staveb (střídavé pojezdy), velkých nádrží a sil (cyklus plnění a prázdnění) a nyní např. u základů těžních plošin v šelfovém moři (vlny). U cyklického zatěžování jde v principu o mnohonásobné opakování a odlehčení – opakování hysterezní smyčky. Tato se stále více zplošťuje a dodatečné dosednutí vlivem každého dalšího cyklu se snižuje a klesá s logaritmem počtu cyklů. Pokud však poměr změny napětí ku stálému zatížení je malý, deformace takto vyvolané budou prakticky nulové.

V některých případech může cyklické zatěžování nabýt charakteru **dynamického zatěžování**, jako je tomu například pod základy vibračních strojů. Zde je třeba upozornit na nebezpečí významné deformace sypkých zemin, nacházejících se v kyprém stavu vyvolané vibrací.

### Rekonsolidace vzorků v laboratoři

Rekonsolidací vzorků v laboratoři rozumíme uvedení vzorku do takového stavu, v jakém byla zemina před odběrem. To znamená nasimulovat zatížení nadložím a vyhovět nasycenosti vzorku vodou, aby bylo možno vypočítat jeho efektivní zatížení v terénu.

Pro výpočet původního efektivního napětí vzorku in situ  $\sigma_{or}$  lze uplatnit Bishopovu rovnici:

$$\sigma_{or} = \sigma - \chi[u_a - (u_a - u_w)]$$

Jelikož  $\chi = f(S_r)$ , je nutné zjistit stupeň nasycení vzorku vodou  $S_r$  (alespoň přibližně), který rozhodne o velikosti rekonsolidovaného napětí a o tom, zda vzorek v edometru bude zalit vodou.

Vzorek soudržné zeminy in situ se nacházel pod hladinou podzemní vody. Při dlouhodobém setrvání zeminy v tomto stavu  $S_r = 1$  a tedy  $\chi = 1$  a  $u_a = 0$ , tedy platí:

$$\sigma_{or} = \sigma - u_w = \sigma - \gamma_w h$$

Což je základní Terzaghiho rovnice efektivního napětí. V této rovnici  $h$  je hloubka odběru vzorku pod hladinou vody. Pro tento případ volíme zkoušku se zalitým vzorkem.

Vzorek soudržné zeminy in situ se nacházel nad hladinou vody. V tomto případě se mohou vyskytovat následující varianty ve stupni nasycení:

- $S_r = 1$ , jde o plně nasycené vzorky, volíme zkoušku se zalitým vzorkem. Tlak pórové vody je negativní. Efektivní rekonsolidační napětí  $\sigma_{or}$  bude v tomto případě větší než totální tíha nadloží místa odběru o účinek kapilárního tlaku.
- $S_r > 0,9$ , nenasyčenost se zanedbává, volí se metoda se zalitým vzorkem jako v předcházejícím případě.
- $S_r = 0,8$  až  $0,9$ , volíme zkoušku zalitého vzorku, i když se dopustíme určité nepřesnosti s pórovými tlaky. Rekonsolidační napětí  $\sigma_{or}$  spočítáme, dosadíme-li pro  $S_r=0,8$  hodnota  $\chi = 0,85$  a pro  $S_r = 0,9$  hodnotu  $\chi = 1$
- $S_r < 0,8$  zemina je spojitě průvzdušná, negativní tlak pórové vody při zatěžování v edometru nestoupá, předepisuje se zkouška zalitého vzorku.

Pro písky s malou příměsí jemné frakce, které jsou dostatečně propustné a mají malou kapilární výšku a zanedbatelné pórové tlaky, by teoreticky nemělo záležet na tom, zda volit zkoušku se zalitým nebo nezalitým vzorkem. S ohledem na to, že ba stlačitelnost mohla být ovlivněna kapilární soudržností, doporučuje se zkoušet vzorky nacházející se pod hladinou podzemní vody jako zalité a vzorky nad hladinou jako nezalité.

## Doplněk – Informativní

### Edometrická zkouška s plynulým zatěžováním

Dává plynulejší závislost mezi efektivním zatížením a deformací. Rozlišuje se zkouška:

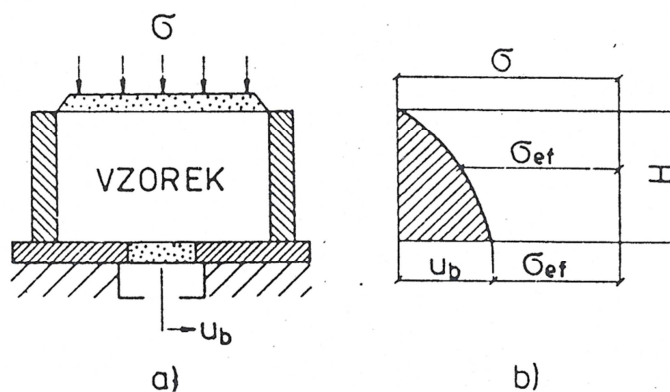
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_

Zkoušku s řízenou deformací je možno provést dvojím způsobem:

- \_\_\_\_\_ a rozptýleným pórovým tlakem;
- \_\_\_\_\_ a měřením pórového tlaku při nedrénované podstavě

Doporučené rychlosti deformací u zkoušky s řízenou deformací

| Zemina                                  | Rychlost přírůstku deformací [mm.s <sup>-1</sup> ] |
|---|--|
| Písek                                   | 1.10 <sup>-4</sup>                                 |
| Písek hlinitý, Hlína písčitá            | 4.10 <sup>-5</sup>                                 |
| Hlína, Jíl, Zemina s organickou příměsí | 2.10 <sup>-5</sup>                                 |



Zkoušky s měřením pórového tlaku při jedné podstavě umožňují nejlépe vyjádřit deformaci vzorku pro stav ukončení primární konsolidace. Schéma takové zkoušky je znázorněno na Obr. 7.4a, kde snímačem je měřen pórový tlak  $u_b$  u spodní podstavě. Průměrné efektivní napětí ve vzorku je možno počítat s dostatečnou přesností ze vztahu:

$$\sigma_{ef} = \sigma - \frac{2}{3}u_b$$