

# JEDNOOŠÁ STLAČITELNOST A KONSOLIDACE (EDOMETRICKÁ ZKOUŠKA)

## 1 VYSVĚTLENÍ/UJASNĚNÍ DŮLEŽITÝCH POJMŮ

**Stlačení (komprese)** zeminy je případ zatížení zeminy, při kterém dochází k redukci objemu zeminy vytlačení části vody z pórů zeminy za plně odvodněných podmínek zatížení. Působící efektivní napětí a objem pórů v zemině jsou v rovnovážném stavu, čas je irrelevantní.

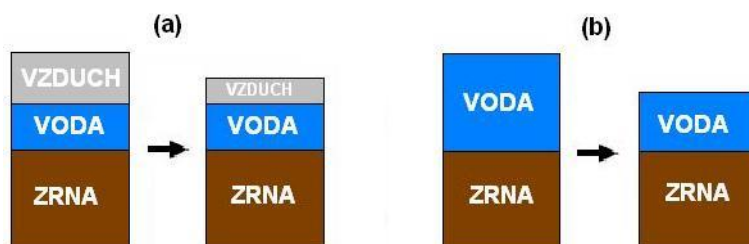
V případě, že k redukci objemu zeminy (stlačení zeminy) dojde pouze v jednom směru (zpravidla svislém), hovoříme o tzv. **jednoosém stlačení** (1D stlačení, 1D komprese). Praktickým příkladem 1D stlačení může být např. podloží pod středem rozsáhlého násypu, geologická sedimentace nebo eroze. V případě podloží pod plošnými základy se jeho reálné chování blíží více případu jednoosé stlačitelnosti, čím větší je půdorysná plocha základu a čím menší je mocnost stlačitelného podloží (resp. menší hloubka deformační zóny).

**Konsolidace** zeminy je proces spojující počáteční neodvodněné podmínky zatížení (nastanou-li) s koncovými odvodněnými podmínkami zatížení. (Předpokládá se  $S_r=1$ .) V průběhu konsolidace dochází k proudění vody v pórech zeminy z míst s vyšším nerovnovážným tlakem vody do míst s nižším nerovnovážným tlakem vody. V důsledku toho postupně dochází ke změně nerovnovážného pórového tlaku a současně ke změně objemu pórů zeminy. Konsolidace (primární) je ukončena ustálením pórového tlaku na rovnovážné hodnotě a ustálením objemových změn (ustálením objemu pórů) odpovídajících dané efektivní napjatosti. Jinak řečeno: v případě konsolidace jde o vztah mezi působícím efektivním napětím v zemině, objemem pórů v zemině a časem.

Vzhledem k tomu, že v průběhu konsolidace může voda vytékat z pórů nasycené zeminy v libovolném směru, je konsolidace obecně procesem trojrozměrným (prostorovým). Nicméně v řadě praktických aplikací nemůže pórová voda vytékat ze zeminy v horizontálním směru, ale pouze ve vertikálním směru (velká plocha a relativně malá hloubka). V tomto případě hovoříme o tzv. **jednoosé konsolidaci** (1D konsolidaci).

### Poznámka:

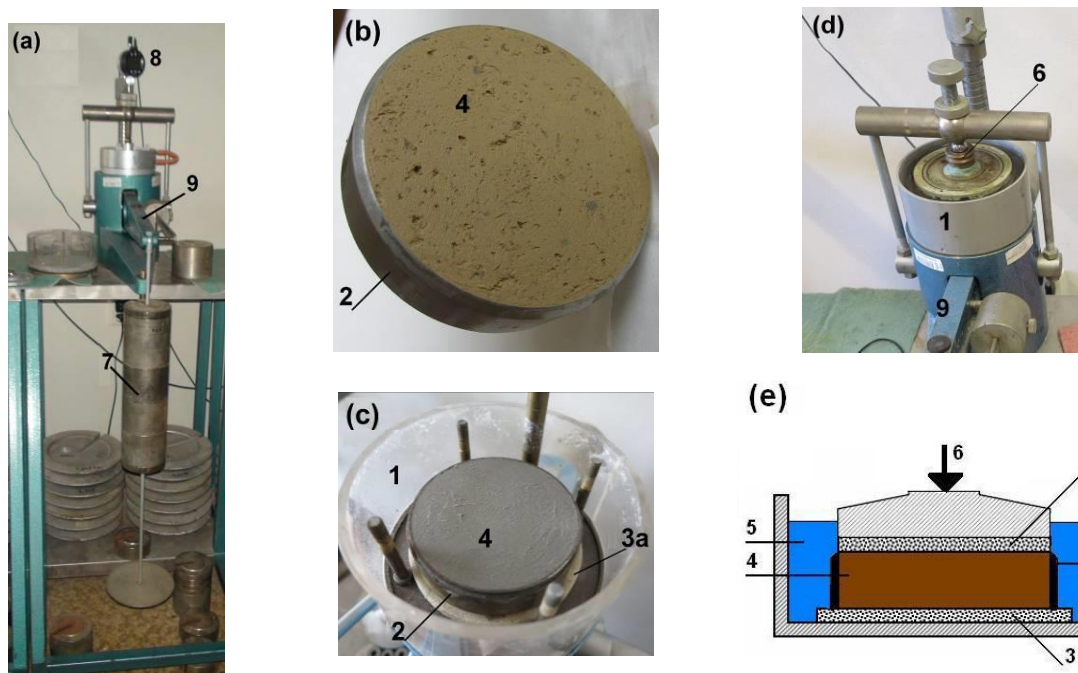
*Konsolidace je často zaměňována s hutněním. **Hutnění** je ale proces, při kterém dochází k redukci objemu zeminy částečně nasycené vodou ( $S_r < 1$ ) vytlačení vzduchu z pórů zeminy (obr. 1).*



Obr. 1 Třífázový model zeminy: hutnění (a) a konsolidace (b)

## 2 EDOMETRICKÁ ZKOUŠKA

Laboratorním modelem jednoosé stlačitelnosti a konsolidace je edometrická zkouška. Probíhá v přístroji označovaném jako **EDOMETR** (obr. 2). Podrobný popis přístroje, zkušebních postupů a jejich vyhodnocení uvádí např. ČSN CEN ISO/TS 17892-5. V tomto textu se omezíme pouze na popis základních částí přístroje, princip zkoušky a vyhodnocení vybraných parametrů stlačitelnosti a konsolidace zemin.



Obr. 2 Edometrický přístroj (a), edometrický prstenec se vzorkem (b), edometrická krabice se zkušební vzorkem (c, d), schématický řez edometrickou krabicí (e). Legenda: 1- edometrická krabice, 2- edometrický prstenec, 3- porézní destička, 4- vzorek zeminy, 5- voda, 6- svislé zatížení, 7- závaží, 8- měřidlo pro měření stlačení vzorku, 9- páka

Vzorek zeminy tvaru nízkého válce je umístěn v edometrickém prstenci, který zabraňuje radiální deformaci vzorku zeminy v průběhu zkoušky (radiální přetvoření vzorku  $\epsilon_r=0$ ). Průměr vzorku je běžně 50 až 100 mm, počáteční výška vzorku pak 20 nebo 30 mm. (Rozměry edometrického prstence používaného v naší laboratoři: průměr 100 mm, výška 30 mm.) Prstenec se vzorkem nasycené zeminy ( $S_r=1$ ) je umístěn do edometrické krabice na porézní destičku. Na horní plochu vzorku je též umístěna porézní destička. Tím je zajištěna v průběhu zkoušky drenáž vzorku (odtok vody ze vzorku) jak při jeho dolní, tak i při jeho horní podstavě. Vzorek zeminy je následně zalitý vodou a zatěžován ve směru své podélné osy (ve svislém směru). Zatížení může být vyvozováno např. závažím přes pákový mechanismus. Zatěžování vzorku probíhá po jednotlivých krocích (zatěžovacích stupních). Při normálním postupu je každé další napětí dvojnásobkem předchozího napětí (tzv. přitěžovací poměr je rovný 1), např. 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; ... kPa. Doba působení zatížení (perioda přitěžování) je normálně 24 hod. Mohou být ale použity časové intervaly delší nebo kratší než 24 hod. V závislosti na typu zeminy, resp. době potřebné pro ustálení svislé deformace vzorku.

Pro vyhodnocení primární konsolidace je dále třeba pro daný zatěžovací stupeň sledovat vývoj stlačení vzorku v čase. Návrhové intervaly čtení dle ČSN CEN ISO/TS 17892-5 jsou: 0, 10, 20, 30, 40, 50 s, 1, 2, 4, 8, 15, 30 min, 1, 2, 4, 8, 24 hod.

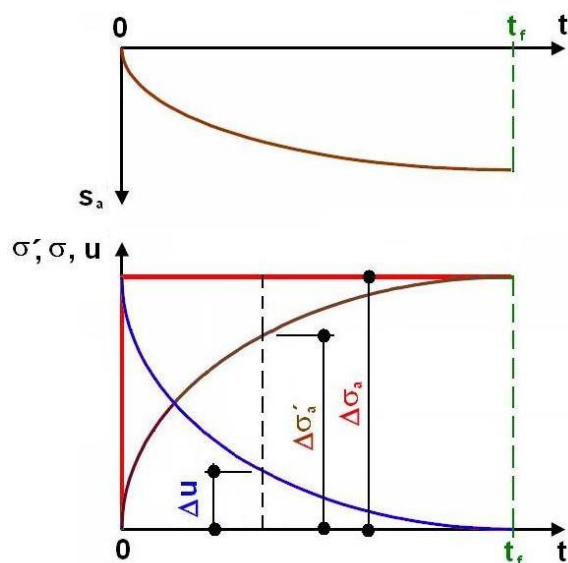
Po aplikaci posledního zatěžovacího stupně následuje "odtěžovací sled" a v případě potřeby další "zatěžovací" a "odtěžovací" cykly. Změna výšky edometrického vzorku se měří pomocí vhodného měřidla (např. digitální úchylkoměr).

#### Poznámky:

Na začátku zatěžovacího stupně se přírůstek svislého zatížení ( $\Delta\sigma_a$ ) aplikovaný na plně nasycený vzorek málo propustné zeminy projeví pouze ve zvýšení tlaku vody v pórech ( $\Delta u = \Delta\sigma_a$ ), přírůstek efektivního napětí je nulový ( $\Delta\sigma'_a = 0$ ). Jinak řečeno: jedná se o neodvodněné podmínky zatížení.

Následně (již několik vteřin po zatížení vzorku) začne voda vytékat z pórů vzorku. Následkem toho dochází k poklesu pórového tlaku ( $\Delta u < \Delta\sigma_a$ ) a k poklesu pórovitosti vzorku a k zvýšení efektivního napětí ( $\Delta\sigma'_a > 0$ ). V důsledku toho se vzorek zeminy stlačuje, viz obr. 3. Při plné disipaci přírůstku

pórového tlaku ( $\Delta u = 0$ ) v čase  $t_f$  se svislé zatížení aplikované na vzorek zeminy (v daném zatěžovacím stupni) projeví plně v nárůstu efektivního napětí ( $\Delta\sigma'_a = \Delta\sigma_a$ ) a je dosaženo konečné (ustálené) hodnoty stlačení vzorku. Jinak řečeno: jedná se o odvozněné podmínky zatížení, primární konsolidace je ukončena.



Obr. 3 Časový vývoj osového stlačení  $s_a$  (nahore) a napětí (dole) pro jeden zatěžovací stupeň ( $t_f$  – čas ukončení primární konsolidace)

## 2.1 PARAMETRY STLAČITELNOSTI

Z naměřené závislosti osového stlačení (resp. osového přetvoření) na efektivním napětí, která bývá někdy označována jako „edometrická křivka stlačitelnosti“ (obr. 4 vlevo), můžeme stanovit parametr stlačitelnosti, který označujeme jako **edometrický modul přetvárnosti**  $E_{oed}$  (resp. **součinitel objemové stlačitelnosti**  $m_v$ , což je převrácená hodnota edometrického modulu přetvárnosti):

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma'_a}{\Delta\varepsilon_a} = -\frac{(1+e_0)\Delta\sigma'_a}{\Delta e} \quad (1)$$

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon_a}{\Delta\sigma'_a} = -\frac{\Delta e}{(1+e_0)\Delta\sigma'_a} = \frac{1}{E_{oed}} \quad (2)$$

V rov. (1) a (2) značí:  $\Delta\varepsilon_a$  přírůstek osového přetvoření vyvolaný přírůstkem osového efektivního napětí  $\Delta\sigma'_a$ ,  $e_0$  číslo pórovitosti vzorku na počátku zkoušky,  $\Delta e$  přírůstek (resp. „úbytek“) čísla pórovitosti vyvolaný přírůstkem osového efektivního napětí  $\Delta\sigma'_a$

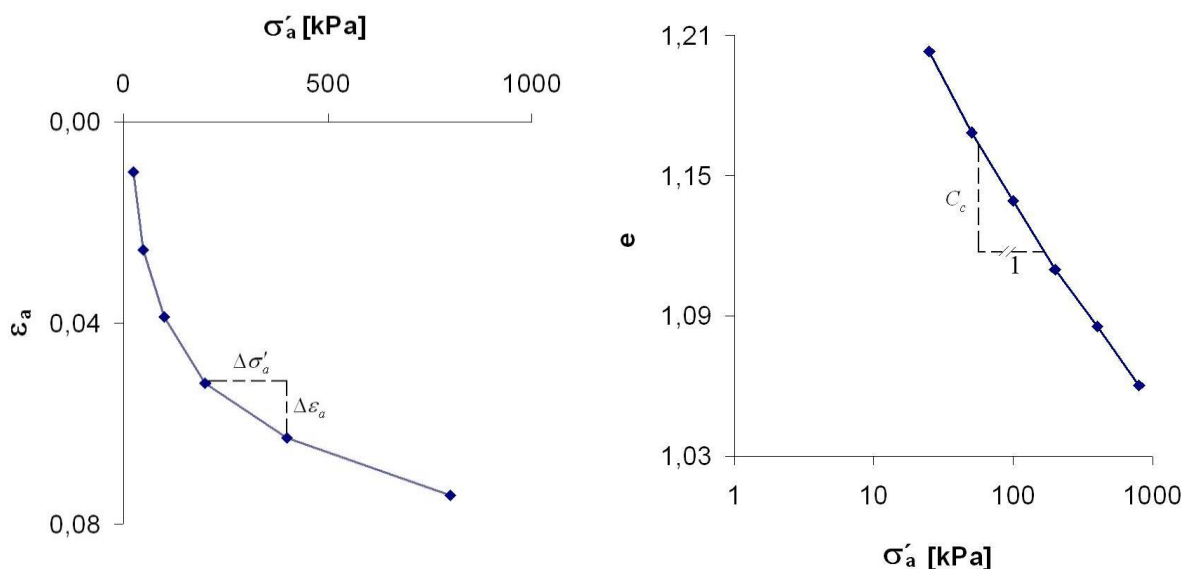
Z křivky stlačitelnosti a definice  $E_{oed}$  a  $m_v$  je zřejmé, že tyto parametry stlačitelnosti zeminy nejsou konstanty, ale jejich velikost závisí na úrovni napětí. Jinak řečeno: s klesajícím objemem pórů vzrůstá tuhost zeminy.

Ze závislosti čísla pórovitosti na logaritmu efektivního napětí (obr. 4 vpravo) můžeme stanovit parametr stlačitelnosti, který označujeme jako **číslo (index) stlačitelnosti**:

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_a} \quad (3)$$

V rov. (3) značí:  $\Delta e$  přírůstek (resp. „úbytek“) čísla pórovitosti vyvolaný přírůstkem osového efektivního napětí.

Na rozdíl od edometrického modulu přetvárnosti je index stlačitelnosti pro běžný rozsah napětí konstantní (body v grafu na obr. 4 vpravo formují přibližně přímku).



Obr. 4 Osové přetvoření vs. efektivní napětí (vlevo) a číslo pórovitosti vs. efektivní napětí (vpravo) v průběhu edometrické zkoušky (zatěžovací sled 25 až 800 kPa)

#### Poznámky:

V rov. (1-3) je negativní znaménko, neboť s rostoucím efektivním napětím se pórovitost (resp. číslo pórovitosti  $e$ ) snižuje.

Pro odlehčení nepoužíváme u přetvárných charakteristik (parametrů stlačitelnosti) negativní znaménko, i když by z definic těchto parametrů vyplývalo.

Označení  $C_c$  se používá pro případ prvotního přitížení. Pro případ odlehčení, resp. zpětného přitížení se používá označení  $C_{cr}$ , viz dále.

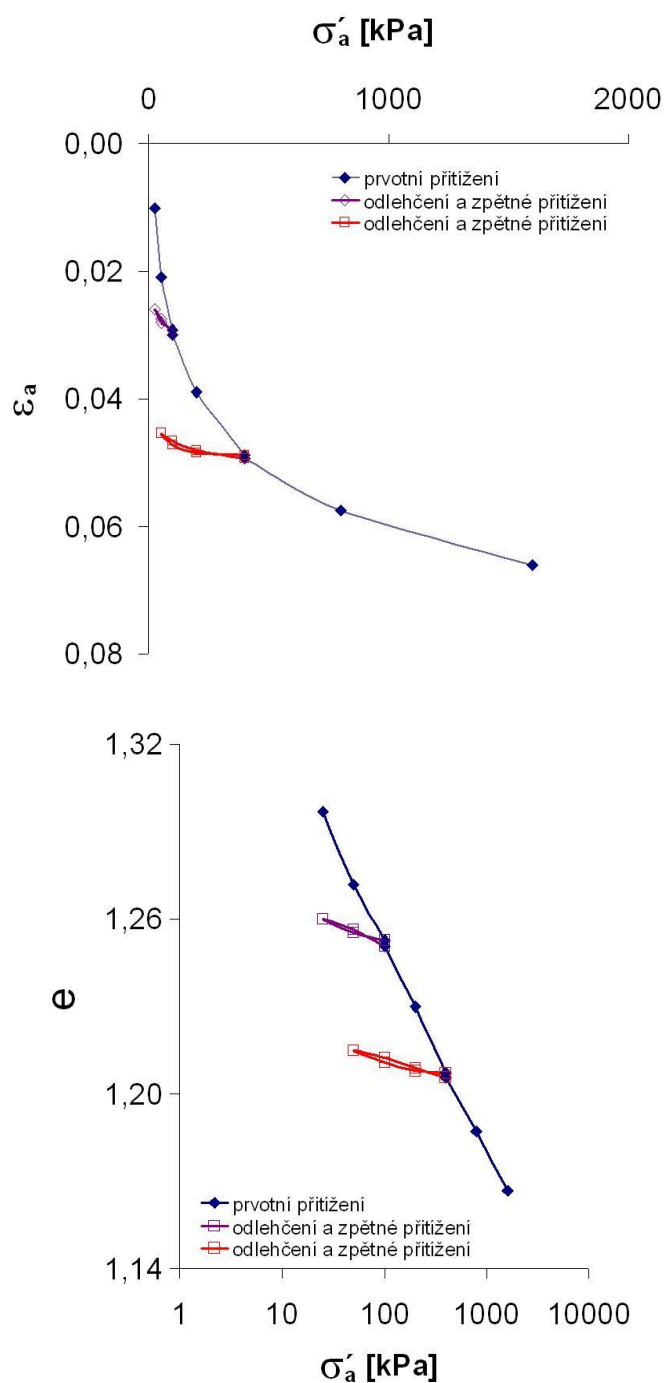
Křivka „prvotního přitížení“ je pro danou zeminu jedinečná. Při „odlehčení“ (odtížení) a „zpětném přitížení“ vykazuje zemina tužší chování než při „prvotním přitížení“. Zemina si přitom „pamatuje“ předchozí maximální zatížení, kterému byla vystavena, a po jeho opětovném dosažení pokračuje po křivce „prvotního přitížení“ (viz obr. 5).

Křivka „prvotního přitížení“ se označuje jako čára normálního stlačení (NCL - Normal Compression Line). Stav zeminy nad NCL je nemožný, stav pod NCL je překonsolidovaný. Tzn., že stav zeminy ležící na křivce „odlehčení“ je překonsolidovaný a podél křivky „odlehčení“ směrem od NCL roste míra překonsolidace.

**Koeficient překonsolidace OCR** (pro 1D stlačitelnost) je definován jako poměr maximálního svislého efektivního napětí ( $\sigma'_{v,max}$ ), kterému byla zemina v minulosti vystavena, k svislému efektivnímu napětí ( $\sigma'_v$ ), kterému je zemina vystavena v současnosti (obr. 6):

$$OCR = \frac{\sigma'_{v,max}}{\sigma'_v} \quad (4)$$

Maximální svislé efektivní napětí, kterému byla zemina v minulosti vystavena, je někdy označováno jako „překonsolidační napětí“  $\sigma'_c$  (obr. 6).

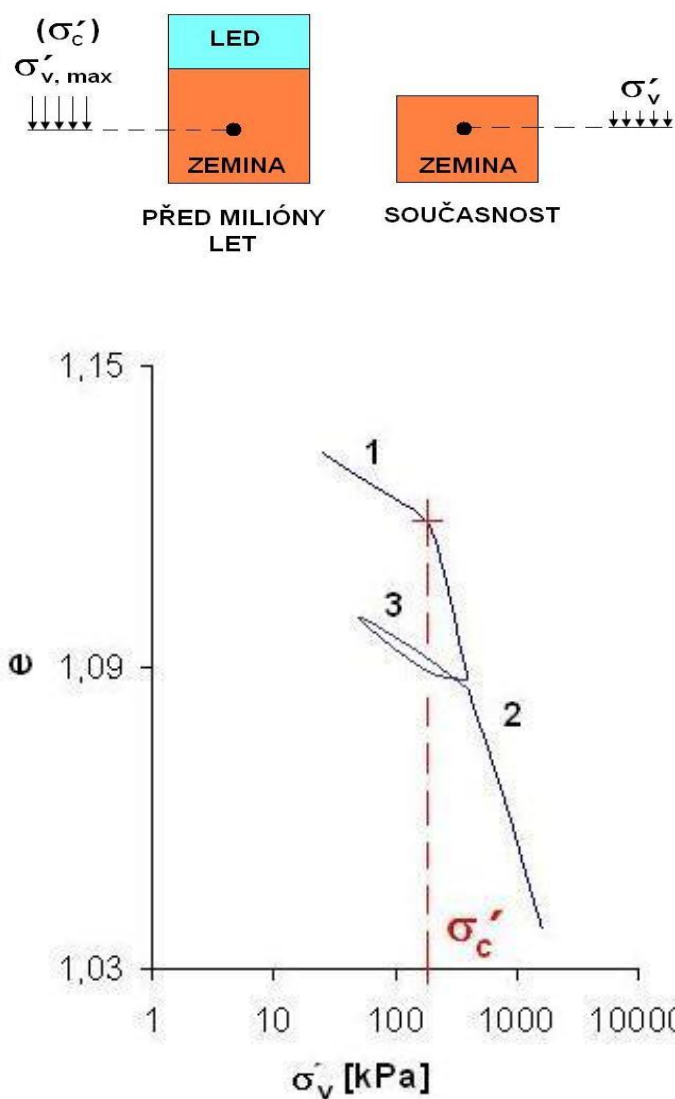


Obr. 5: Osové přetvoření vs. efektivní napětí (nahore) a číslo pórovitosti vs. efektivní napětí (dole) v průběhu edometrické zkoušky (zatěžovací sled 25 až 1600 kPa + odlehčení a zpětné přitížení 100 ↔ 25 + odlehčení a zpětné přitížení 400 ↔ 50)

Zemina, která nebyla nikdy vystavena vyššímu efektivnímu napětí, než kterému je vystavena v současnosti, se označuje jako **normálně konsolidovaná zemina** (OCR=1). Zemina, která byla někdy vystavena vyššímu efektivnímu napětí, než kterému je vystavena v současnosti, se označuje jako **překonsolidovaná zemina** (OCR>1).

Poznámka:

Překonsolidovaná zemina vykazuje pro stejný interval napětí výrazně vyšší tuhost než normálně konsolidovaná zemina.



Obr. 6 Koeficient překonsolidace a překonsolidační napětí (1- zpětné přitížení na předchozí maximální zatížení, 2- čára normálního stlačení, 3- odlehčení a zpětné přitížení)

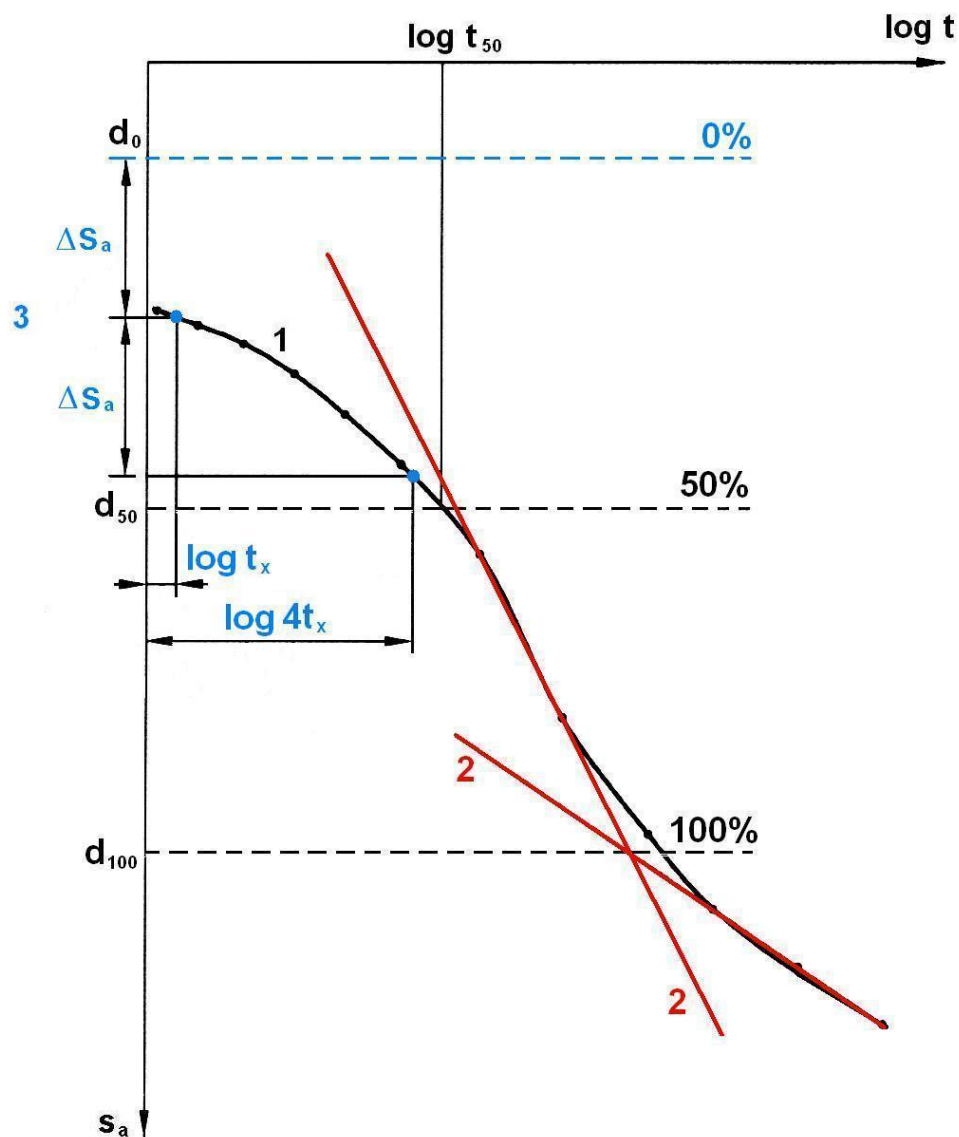
## 2.2 SOUČINITEL KONSOLIDACE

Pro stanovení součinitele konsolidace se pro daný zatěžovací stupeň vychází z naměřeného vývoje stlačení vzorku v čase. **Součinitel konsolidace**  $c_v$  se stanoví logaritmickou nebo odmocninovou metodou.

### Logaritmická metoda (Casagrande)

Pro daný zatěžovací stupeň se vykreslí graf  $s_a$  vs.  $\log t$  a stanoví se čas odpovídající 50% primární konsolidaci vzorku ( $t_{50}$ ), viz obr. 7. Součinitel konsolidace se vypočte z rovnice

$$c_v = \frac{0,197L^2}{t_{50}} f_T \quad (5)$$



Obr. 7 Logaritmická metoda. Legenda: 1- naměřená křivka, 2- prodloužení lineárních úseků naměřené křivky (tečna k naměřené křivce v inflexním bodu a tečna k naměřené křivce v úseku sekundární stlačitelnosti), jejichž průsečík určuje bod 100% primární konsolidace ( $d_{100}$ ), 3- opravený počátek konsolidace ( $d_0$ )

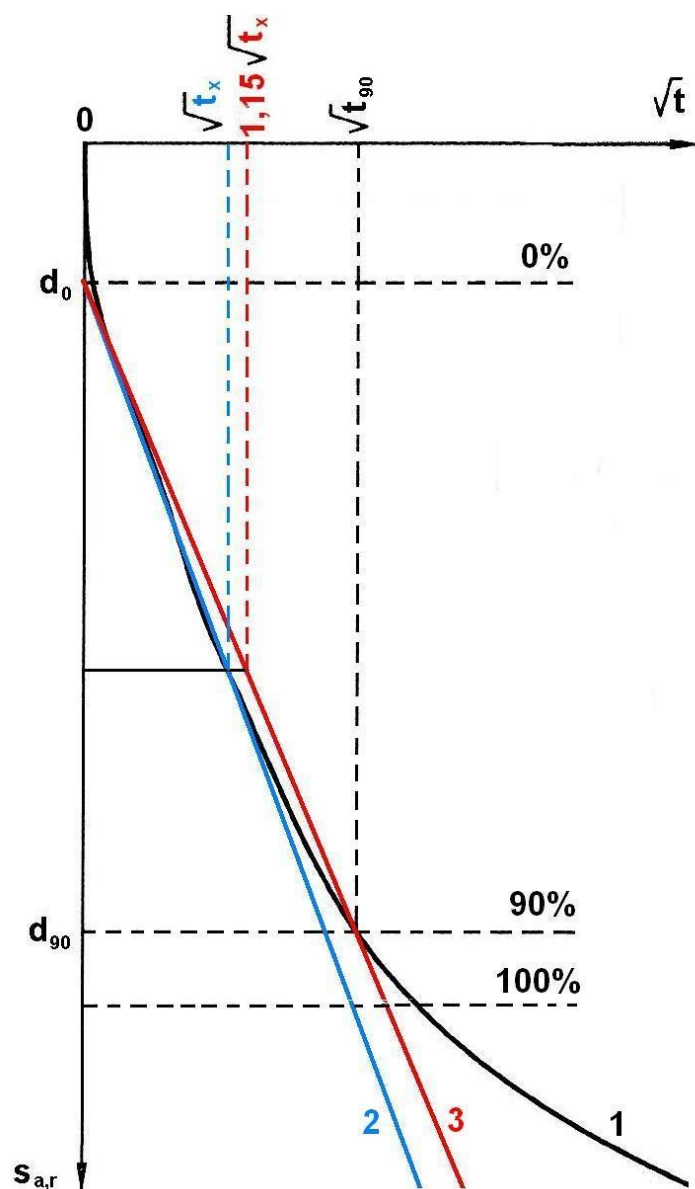
### Odmocninová metoda (Taylor)

Pro daný zatěžovací stupeň se vykreslí graf  $s_a$  vs.  $\sqrt{t}$  a stanoví se čas odpovídající 90% primární konsolidaci vzorku ( $t_{90}$ ), viz obr. 8. Součinitel konsolidace se vypočte z rovnice

$$c_v = \frac{0,848L^2}{t_{90}} f_T \quad (6)$$

V rov. (5) a (6) je  $L$  délka drenážní dráhy umožňující změnu výšky zkušební vzorku a  $f_T$  je teplotní opravný faktor (pro  $T = 20^\circ\text{C}$  je  $f_T = 1$ ).





Obr. 8 Odmocninová metoda. Legenda: 1- naměřená křivka, 2- přímka aproximující počáteční úsek naměřené křivky (většinou v rozsahu prvních 50 % stlačení) a určující bod opraveného počátku primární konsolidace ( $d_0$ ; 0), 3- přímka, jejíž průsečík s naměřenou křivkou určuje bod 90% primární konsolidace ( $d_{90}$ ;  $t_{90}^{1/2}$ )

### 3 VZOROVÝ PŘÍKLAD VYHODNOCENÍ EDOMETRICKÉ ZKOUŠKY

Vzorek plně nasyceného jílu má průměr  $d = 100$  mm a počáteční výšku  $h_0 = 20$  mm. Naměřené konečné osové stlačení vzorku  $s_a$  pro aplikovaný sled napětí  $\sigma'_a$  je uvedeno v tab. 1. Hustota pevných částic zeminy stanovená před edometrickou zkouškou byla  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Vlhkost vzorku zeminy stanovená po provedení edometrické zkoušky byla 45 %.

Pro zatěžovací stupeň 200 kPa byl dále zaznamenán časový vývoj stlačení vzorku, viz tab. 2.

Tab. 1 Naměřené osové stlačení vzorku zeminy v edometru pro použitý sled napětí

| $\sigma'_a$ [kPa] | 25    | 50    | 100   | 200   | 100   | 50    | 25    | 50    | 100   | 200   | 400   | 800   |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $s_a$ [mm]        | 0,200 | 0,510 | 0,775 | 1,040 | 0,987 | 0,917 | 0,844 | 0,912 | 0,996 | 1,050 | 1,258 | 1,486 |



Tab. 2 Naměřené osově stlačení vzorku zeminy pro zatěžovací stupeň 200 kPa

|            |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t$ [s]    | 0     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    |
| $s_a$ [mm] | 0,775 | 0,787 | 0,792 | 0,794 | 0,797 | 0,800 |
| $t$ [min]  | 1     | 2     | 4     | 8     | 15    | 30    |
| $s_a$ [mm] | 0,803 | 0,812 | 0,826 | 0,847 | 0,872 | 0,915 |
| $t$ [hod]  | 1     | 2     | 4     | 8     | 24    |       |
| $s_a$ [mm] | 0,973 | 1,006 | 1,020 | 1,028 | 1,040 |       |

### Řešení – vyhodnocení stlačitelnosti

Spočítáme osově přetvoření vzorku  $\varepsilon_a$

$$\varepsilon_a = \frac{s_a}{h_0} \quad (7)$$

Tab. 3 Osově přetvoření vzorku zeminy

|                   |        |        |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\sigma'_a$ [kPa] | 25     | 50     | 100    | 200    | 100    | 50     |
| $\varepsilon_a$   | 0,0100 | 0,0255 | 0,0388 | 0,0520 | 0,0494 | 0,0459 |
| $\sigma'_a$ [kPa] | 25     | 50     | 100    | 200    | 400    | 800    |
| $\varepsilon_a$   | 0,0422 | 0,0456 | 0,0498 | 0,0525 | 0,0629 | 0,0743 |

Vykreslíme závislost  $\varepsilon_a$  vs.  $\sigma'_a$  (obr. 9) a pro každý zatěžovací (odlehčovací) stupeň spočteme dle rov. (1) a (2) edometrický modul přetvárnosti  $E_{oed}$  a součinitel objemové stlačitelnosti  $m_v$ . Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4 a 5. Pro případ „odlehčení a zpětného přitížení“ (tab. 5) jsou tyto parametry stlačitelnosti spočteny z průměrné hodnoty stlačení vzorku  $s_a$ .

Tab. 4  $E_{oed}$  a  $m_v$  pro křivku „prvotního přitížení“

|                            |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| Zatěžovací stupeň [kPa]    | 50   | 100  | 200  | 400  | 800  |
| $E_{oed}$ [MPa]            | 1,6  | 3,8  | 7,6  | 19,2 | 35,1 |
| $m_v$ [MPa <sup>-1</sup> ] | 0,63 | 0,26 | 0,13 | 0,05 | 0,03 |

Tab. 5  $E_{oed}$  a  $m_v$  pro křivku „odlehčení a zpětného přitížení“

|                            |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|
| Zatěžovací stupeň [kPa]    | 50   | 100  | 200  |
| $E_{oed}$ [MPa]            | 7,0  | 13,0 | 37,0 |
| $m_v$ [MPa <sup>-1</sup> ] | 0,14 | 0,08 | 0,03 |

Např. výpočet pro křivku „prvotního přitížení“ (zatěžovací stupeň 200 kPa):

$$\text{osově přetvoření pro } \sigma'_a = 200 \text{ kPa je } \varepsilon_{a,200} = \frac{1,040}{20} = 0,0520$$

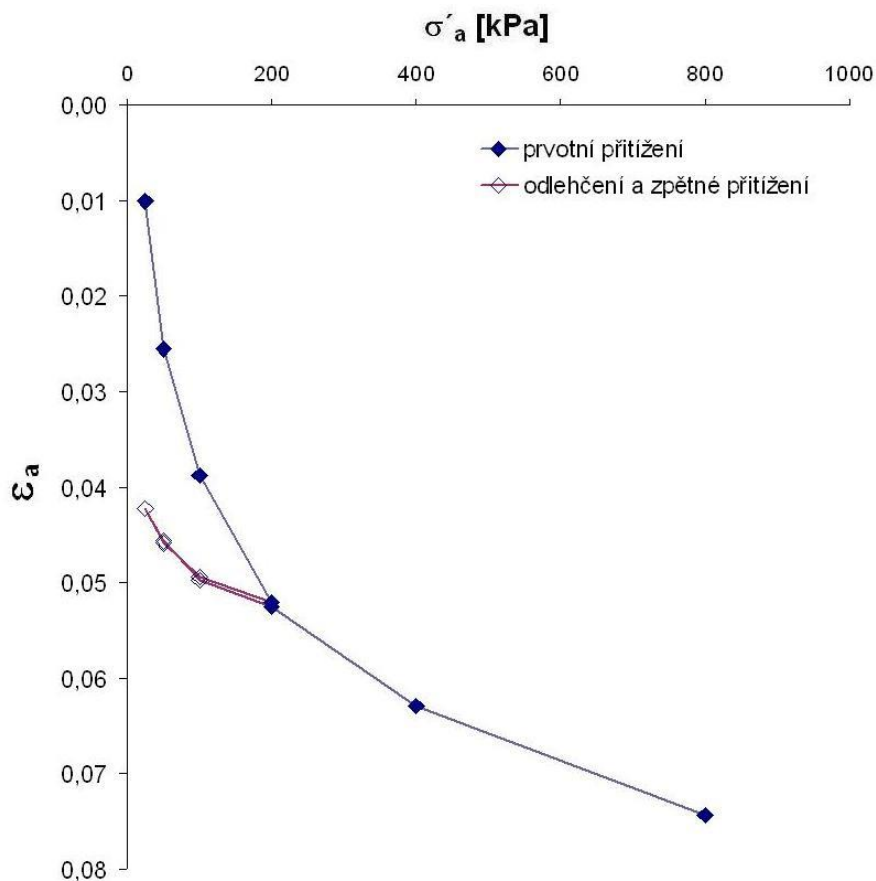
$$\text{osově přetvoření pro } \sigma'_a = 100 \text{ kPa je } \varepsilon_{a,100} = \frac{0,775}{20} = 0,0388$$

$$\text{přírůstek osového přetvoření } \Delta\varepsilon_a = \varepsilon_{a,200} - \varepsilon_{a,100} = 0,0520 - 0,0388 = 0,0132$$

$$\text{přírůstek osového napětí } \Delta\sigma'_a = \sigma'_{a,200} - \sigma'_{a,100} = 200 - 100 = 100 \text{ kPa}$$

$$\text{edometrický modul přetvárnosti } E_{oed} = \frac{\Delta \sigma'_a}{\Delta \varepsilon_a} = \frac{100}{0,0132} = 7576 \text{ kPa} = 7,6 \text{ MPa}$$

$$\text{součinitel objemové stlačitelnosti } m_v = \frac{\Delta \varepsilon_a}{\Delta \sigma'_a} = \frac{0,0132}{100} = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ kPa}^{-1} = 0,13 \text{ MPa}^{-1}$$



Obr. 9 Graf  $\varepsilon_a : \sigma'_a$

Nebo příklad výpočtu pro křivku „odlehčení a zpětného přitížení“ (zatěžovací stupeň 200 kPa):

$$\text{osové přetvoření pro } \sigma'_a = 200 \text{ kPa je } \varepsilon_{a,200} = \frac{0,5 \cdot (1,040 + 1,050)}{20} = 0,0523$$

$$\text{osové přetvoření pro } \sigma'_a = 100 \text{ kPa je } \varepsilon_{a,100} = \frac{0,5 \cdot (0,987 + 0,996)}{20} = 0,0496$$

$$\text{přírůstek osového přetvoření } \Delta \varepsilon_a = \varepsilon_{a,200} - \varepsilon_{a,100} = 0,0523 - 0,0496 = 0,0027$$

$$\text{přírůstek osového napětí } \Delta \sigma'_a = \sigma'_{a,200} - \sigma'_{a,100} = 200 - 100 = 100 \text{ kPa}$$

$$\text{edometrický modul přetvárnosti } E_{oed} = \frac{\Delta \sigma'_a}{\Delta \varepsilon_a} = \frac{100}{0,0027} = 37037 \text{ kPa} = 37,0 \text{ MPa}$$

$$\text{součinitel objemové stlačitelnosti } m_v = \frac{\Delta \varepsilon_a}{\Delta \sigma'_a} = \frac{0,0027}{100} = 2,70 \cdot 10^{-5} \text{ kPa}^{-1} = 0,03 \text{ MPa}^{-1}$$

Dále z hustoty pevných částí zeminy  $\rho_s$  (resp. ze specifické hmotnosti pevné fáze zeminy  $G_s = \rho_s/\rho_w$ ) a vlhkosti vzorku zeminy na konci edometrické zkoušky  $w_f$  vypočteme číslo pórovitosti zeminy na konci zkoušky  $e_f$

$$e_f = w_f G_s \quad (8)$$

Specifický objem zeminy na konci zkoušky  $v_f$  (je-li číslo pórovitosti vzorku na konci zkoušky  $e_f$ )

$$v_f = 1 + e_f \quad (9)$$

Objem vzorku na konci zkoušky  $V_f$  (je-li stlačení vzorku na konci zkoušky  $s_{a,f}$ )

$$V_f = \frac{\pi d^2}{4} (h_0 - s_{a,f}) \quad (10)$$

Objem pevné fáze zeminy ve vzorku na konci zkoušky  $V_s$

$$V_s = \frac{V_f}{v_f} \quad (11)$$

Následuje výpočet změny objemu zkušebního vzorku zeminy a změny čísla pórovitosti v průběhu edometrické zkoušky.

Objem vzorku v průběhu zkoušky  $V$  (tj. při stlačení vzorku  $s_a$ )

$$V = \frac{\pi d^2}{4} (h_0 - s_a) \quad (12)$$

Specifický objem v průběhu zkoušky  $v$  (tj. při stlačení vzorku  $s_a$ )

$$v = \frac{V}{V_s} \quad (13)$$

Číslo pórovitosti v průběhu zkoušky  $e$  (tj. při stlačení vzorku  $s_a$ )

$$e = v - 1 \quad (14)$$

Konkrétně pro řešený příklad:

$$G_s = \frac{2700}{1000} = 2,7$$

$$e_f = 0,45 \cdot 2,7 = 1,215$$

$$v_f = 1 + 1,215 = 2,215$$

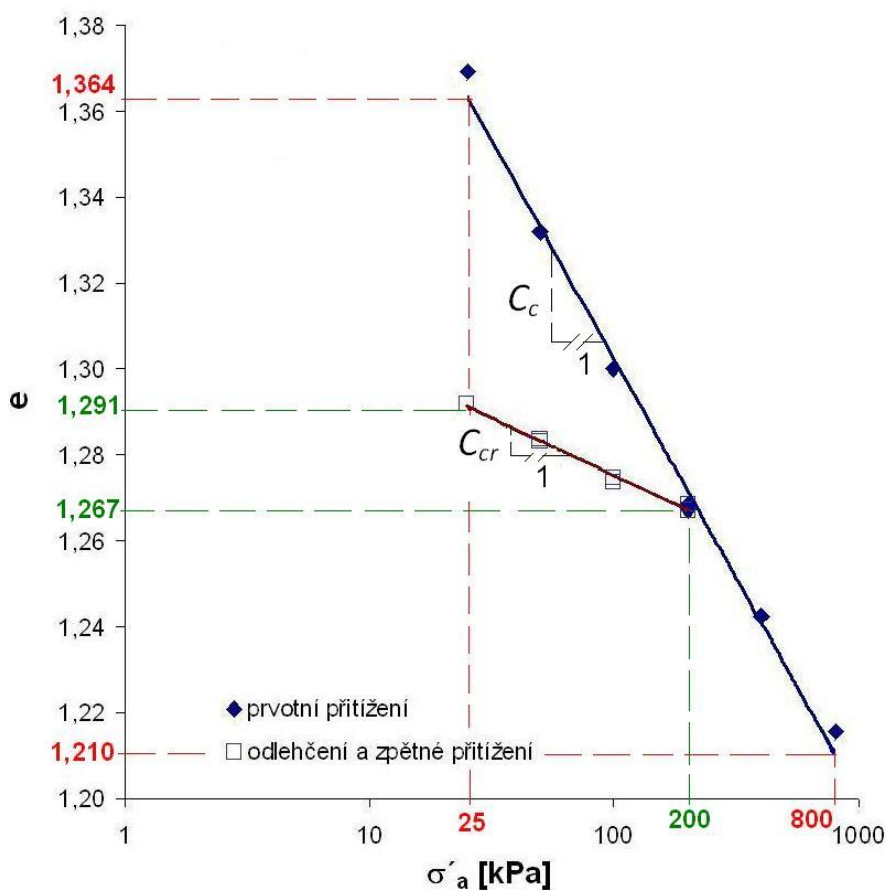
$$V_f = \frac{\pi \cdot 100^2}{4} (20 - 1,486) = 145409 \text{ mm}^3$$

$$V_s = \frac{145409}{2,215} = 65647 \text{ mm}^3$$

Tab. 6 Změna objemu, specifického objemu a čísla pórovitosti  
zkušební vzorku zeminy

|                        |         |         |         |         |         |         |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma'_a$ [kPa]      | 25      | 50      | 100     | 200     | 100     | 50      |
| $V$ [mm <sup>3</sup> ] | 155 509 | 153 074 | 150 993 | 148 911 | 149 328 | 149 878 |
| $v$                    | 2,369   | 2,332   | 2,300   | 2,268   | 2,275   | 2,283   |
| $e$                    | 1,369   | 1,332   | 1,300   | 1,268   | 1,275   | 1,283   |
| $\sigma'_a$ [kPa]      | 25      | 50      | 100     | 200     | 400     | 800     |
| $V$ [mm <sup>3</sup> ] | 150 451 | 149 917 | 149 257 | 148 833 | 147 199 | 145 409 |
| $v$                    | 2,292   | 2,284   | 2,274   | 2,267   | 2,242   | 2,215   |
| $e$                    | 1,292   | 1,284   | 1,274   | 1,267   | 1,242   | 1,215   |

Vykreslíme graf  $e$  vs.  $\log \sigma'_a$  (obr. 10). Body přibližně formují dvě přímky. První z nich je čára prvotního přitížení (NCL). Druhá představuje čáru odlehčení (zpětného přitížení na předchozí maximální zatížení).



Obr. 10 Graf  $e$ :  $\log \sigma'_a$

Směrnice těchto přímek představují další parametry stlačitelnosti: čísla (indexy) stlačitelnosti  $C_c$  (prvotní přitížení) a  $C_{cr}$  (odlehčení, resp. zpětné přitížení). Stanovíme je z rov. (3), přitom vyjdeme z aproximace naměřených hodnot přímkou:

### Čára prvotního přetížení

$$e_{25} = 1,364, \quad e_{800} = 1,210$$

$$\Delta e = e_{800} - e_{25} = 1,210 - 1,364 = -0,154$$

$$\sigma'_a = 25 \text{ kPa} \Rightarrow \log \sigma'_a = 1,398, \quad \sigma'_a = 800 \text{ kPa} \Rightarrow \log \sigma'_a = 2,903$$

$$\Delta \log \sigma'_a = 2,903 - 1,398 = 1,505$$

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_a} = -\frac{-0,154}{1,505} = 0,102$$

### Čára odlehčení/zpětného přetížení

$$e_{25} = 1,291, \quad e_{200} = 1,267$$

$$\Delta e = e_{200} - e_{25} = 1,267 - 1,291 = -0,024$$

$$\sigma'_a = 25 \text{ kPa} \Rightarrow \log \sigma'_a = 1,398, \quad \sigma'_a = 200 \text{ kPa} \Rightarrow \log \sigma'_a = 2,301$$

$$\Delta \log \sigma'_a = 2,301 - 1,398 = 0,903$$

$$C_{cr} = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_a} = -\frac{-0,024}{0,903} = 0,027$$

### Řešení – vyhodnocení konsolidace

Součinitel konsolidace (tj. parametr konsolidace) můžeme vyhodnotit pro zatěžovací stupeň 200 kPa, pro který byl zaznamenán průběh stlačení vzorku v čase. Vyhodnocení je provedeno odmocninovou metodou (Taylor).

Spočteme osově stlačení vzorku v daném zatěžovacím stupni  $s_{a,r}$  a vykreslíme graf  $s_{a,r}$  vs.  $\sqrt{t}$  (viz tab. 7 a obr. 11):

$$s_{a,r} = s_a - s_{a,t=0} = s_a - 0,775 \quad (15)$$

Dále do tohoto grafu zakreslíme přímku, která co nejlépe aproximuje počáteční úsek naměřené křivky a přímku protáhneme tak, aby protнула svislou osu grafu (modrá přímka na obr. 12). V tomto případě prochází přímka počátkem a opravený počátek konsolidace  $d_0 = 0$  mm. Po té vedeme bodem  $d_0$  přímku, jejíž směrnice je 1,15 krát menší (červená přímka na obr. 12) než směrnice předchozí přímky. Průsečík této přímky s naměřenou křivkou  $s_{a,r}$  vs.  $\sqrt{t}$  je bod odpovídající 90 % konsolidace. Z grafu odečteme jeho vodorovnou souřadnici  $\sqrt{t}_{90} = 10,1 \text{ min}^{1/2}$  (svislá souřadnice  $d_{90} = 0,225$  mm) a z rov. (6) vypočteme součinitel konsolidace

$$c_v = \frac{0,848 L^2}{t_{90}} f_T = \frac{0,848 \cdot (9,6125 \cdot 10^{-3})^2}{6120,6} 1,0 = 1,28 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s} = 11 \text{ cm}^2 / \text{den}$$

Poznámky:

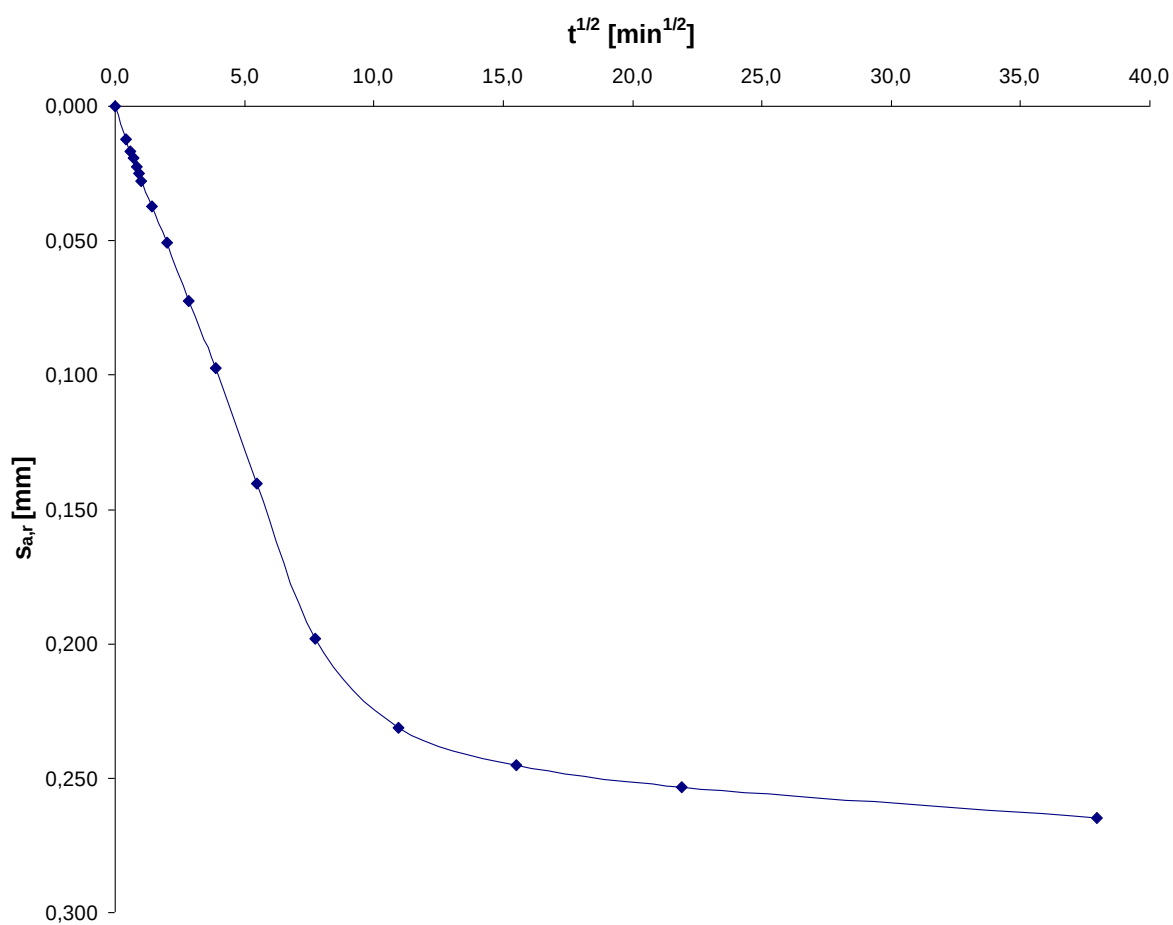
Neboť vzorek je při zkoušce drénován na spodní i horní podstavě odpovídá délka drenážní dráhy  $L$  polovině výšky zkušební vzorku na počátku zatěžovacího stupně, tedy

$$L = \frac{1}{2}(h_0 - s_{a,t=0}) = \frac{1}{2}(20 - 0,775) = 9,6125 \text{ mm} \quad (16)$$

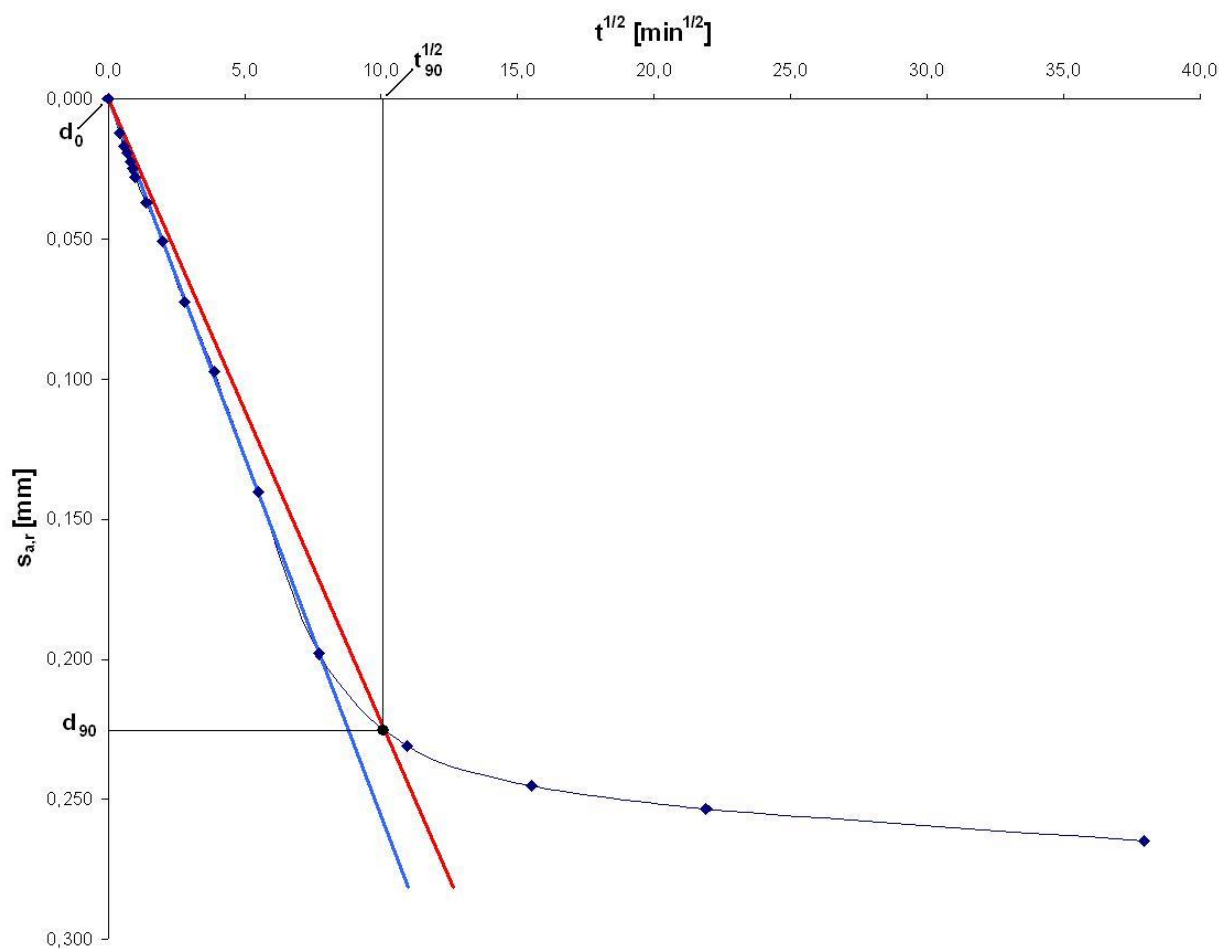
Zkouška probíhala při teplotě  $20^\circ\text{C}$ , a proto  $f_T = 1,0$ .

Tab. 7 Vypočtená hodnota  $s_{a,r}$  pro zatěžovací stupeň 200 kPa

|                |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t$ [s]        | 0     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    |
| $s_{a,r}$ [mm] | 0     | 0,012 | 0,017 | 0,019 | 0,022 | 0,025 |
| $t$ [min]      | 1     | 2     | 4     | 8     | 15    | 30    |
| $s_{a,r}$ [mm] | 0,028 | 0,037 | 0,051 | 0,072 | 0,097 | 0,140 |
| $t$ [hod]      | 1     | 2     | 4     | 8     | 24    |       |
| $s_{a,r}$ [mm] | 0,198 | 0,231 | 0,245 | 0,253 | 0,265 |       |



Obr. 11 Graf  $s_{a,r} : \sqrt{t}$



Obr. 12 Stanovení času  $t_{90}$

#### 4 POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY

|               |                                                                |
|---------------|----------------------------------------------------------------|
| $S_r$         | stupeň nasycení [-]                                            |
| $\varepsilon$ | přetvoření [-]                                                 |
| $s$           | stlačení [m]                                                   |
| $\sigma$      | totální napětí [Pa]                                            |
| $\sigma'$     | efektivní napětí [Pa]                                          |
| $u$           | pórový tlak (tlak vody v pórech zeminy) [Pa]                   |
| $t$           | čas [s]                                                        |
| $E_{oed}$     | edometrický modul přetvárnosti [Pa]                            |
| $m_v$         | součinitel objemové stlačitelnosti [ $\text{Pa}^{-1}$ ]        |
| $e$           | číslo pórovitosti [-]                                          |
| $\Delta$      | přírůstek (např. $\Delta\sigma$ je přírůstek totálního napětí) |
| $C_o, C_{cr}$ | číslo (index) stlačitelnosti [-]                               |
| NCL           | čára normálního stlačení (Normal Compression Line)             |
| $\sigma'_c$   | překonsolidační napětí [Pa]                                    |
| OCR           | koeficient překonsolidace (Overconsolidation Ratio)            |
| $c_v$         | součinitel konsolidace [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]               |
| $T$           | teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]                                 |
| $L$           | délka drenážní dráhy [m]                                       |
| $f_T$         | teplotní opravný faktor [-]                                    |
| $d$           | průměr vzorku [m]                                              |



|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| $h_0$    | počáteční výška vzorku [m]                        |
| $\rho_s$ | hustota pevných částic zeminy [ $\text{kg/m}^3$ ] |
| $\rho_w$ | hustota vody [ $\text{kg/m}^3$ ]                  |
| $G_s$    | specifická hmotnost pevné fáze zeminy [-]         |
| $w$      | vlhkost zeminy [%]                                |
| $v$      | specifický objem zeminy [-]                       |
| $V$      | objem zeminy [ $\text{m}^3$ ]                     |
| $V_s$    | objem pevné fáze zeminy [ $\text{m}^3$ ]          |

## **5 STUDIJNÍ LITERATURA**

ČSN CEN ISO/TS 17892-5 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin – Část 5: Stanovení stlačitelnosti zemin v edometru.

Atkinson, J. H. The mechanics of soils and foundations, Taylor & Francis, Oxon, 2<sup>nd</sup> edition, 2007.

Powrie, W. Soil mechanics : concepts and applications, Taylor & Francis, Oxon, 2<sup>nd</sup> edition, 2004.