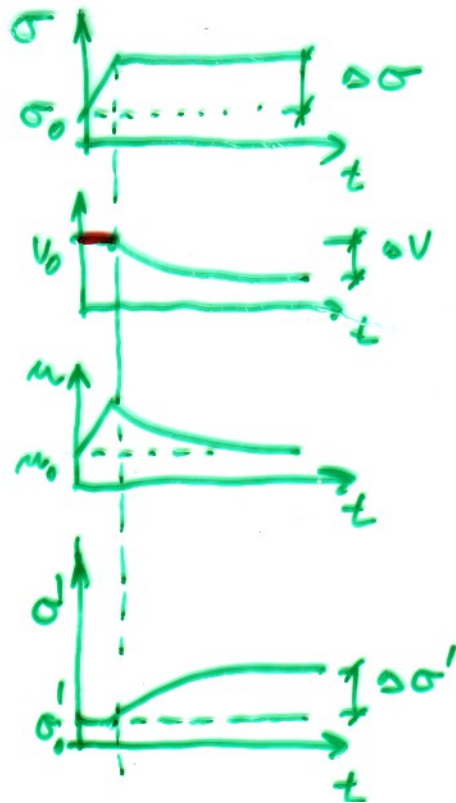

Mechanika zemin I

6 – Konsolidace

1. definice - konsolidace vs stlačení
2. teorie jednoosé konsolidace
3. součinitel konsolidace, stanovení
4. aplikace - sedání

Konsolidace



neodvodněné zatížení $\rightarrow \Delta u$

$$u = u_0 + \Delta u$$

\rightarrow hydraulický gradient

\rightarrow proudění

\rightarrow objemové změny

\rightarrow změna efektivního napětí $\Delta\sigma'$

v čase Δu klesá, klesá H.G., zpomaluje se objemová deformace...

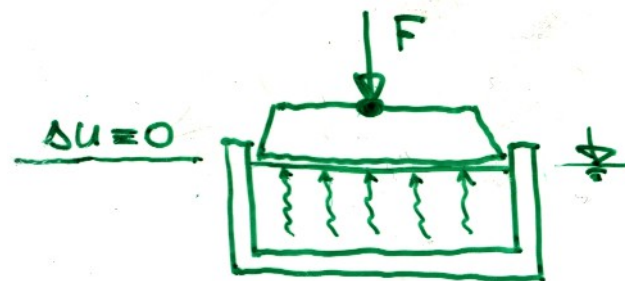
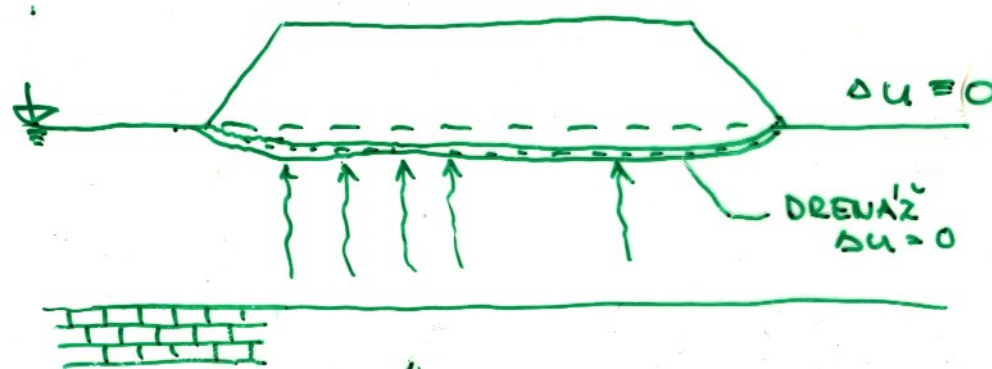
... $u = u_0 =$ konec konsolidace

(pozn.: ...průběh deformace v čase není lineární, jak ukáže terorie...)

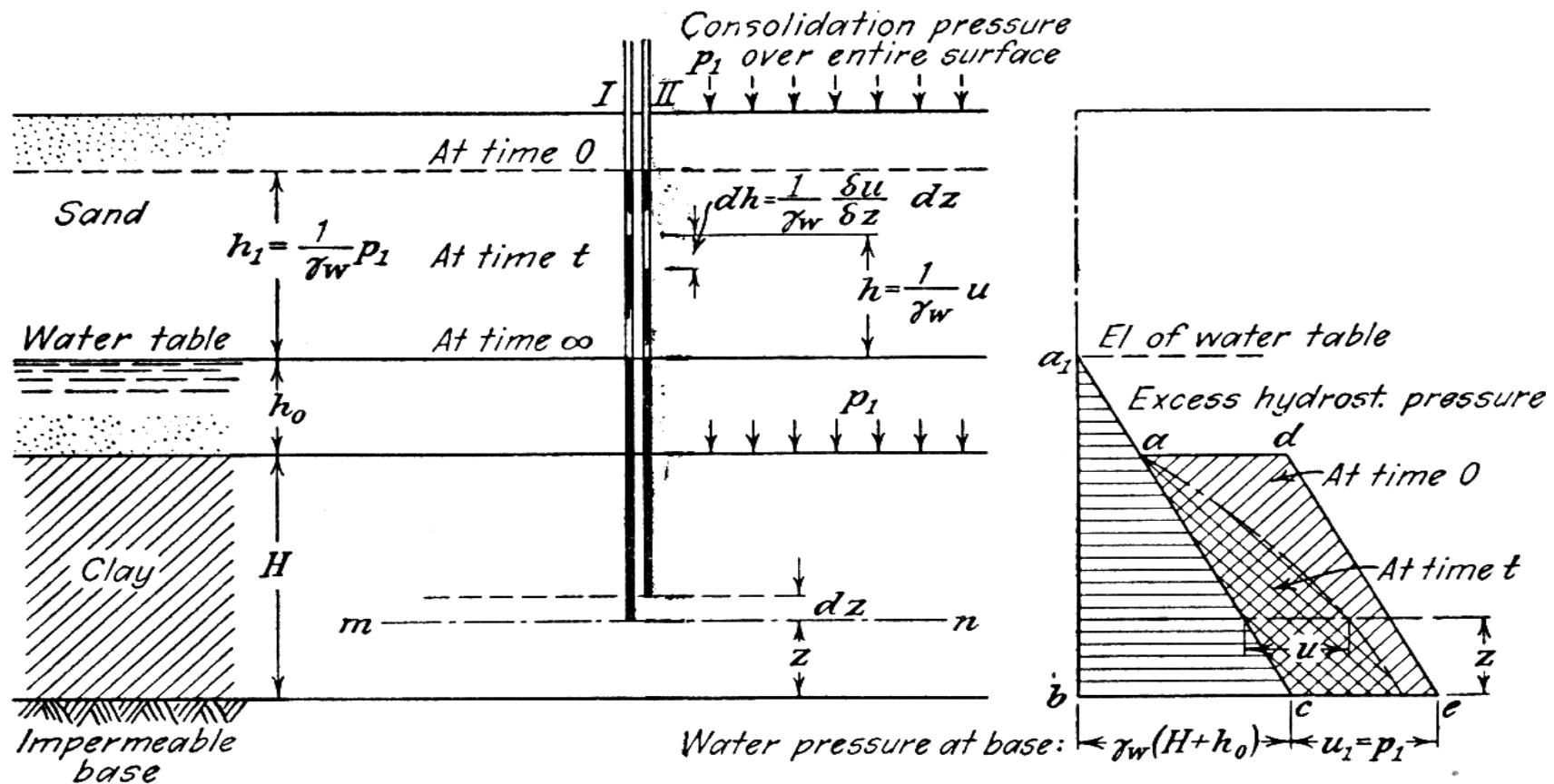
Konsolidace

obecně konsolidace v 3D

zvláštní případ – velká plocha, relativně malá hloubka → 1D:



Konsolidace



[2]

$\Delta u \rightarrow$ hydraulický gradient \rightarrow proudění \rightarrow objemové změny \rightarrow změna efektivního napětí

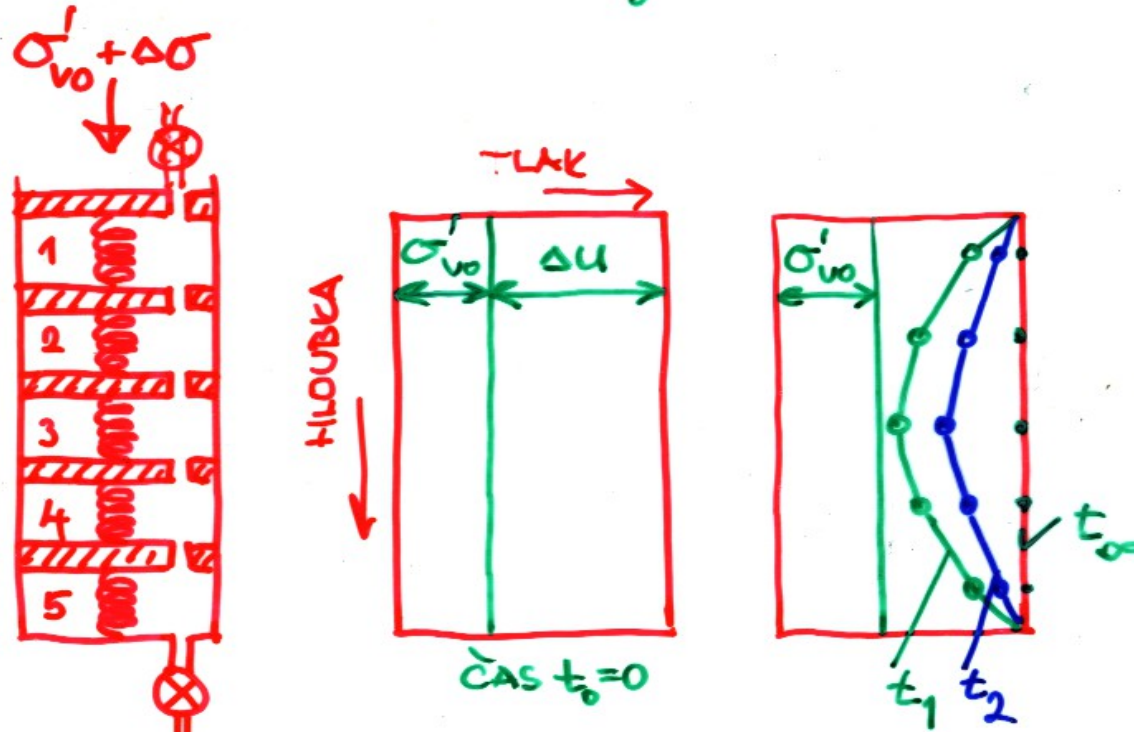
1. Konsolidace \equiv disipace pórových tlaků

2. Konsolidace je sdružený proces:

proudění + objemová změna ($\varepsilon_v \neq 0$; $\varepsilon_v > 0, < 0$)

Jednoosá konsolidace

1D konsolidace - analogie s pružinou – pro oboustrannou drenáž:



průběhy napětí (σ , u ...) v různých časech t_1 , t_2 ...: izochrony

Teorie 1D konsolidace – Terzaghi

Předpoklady:

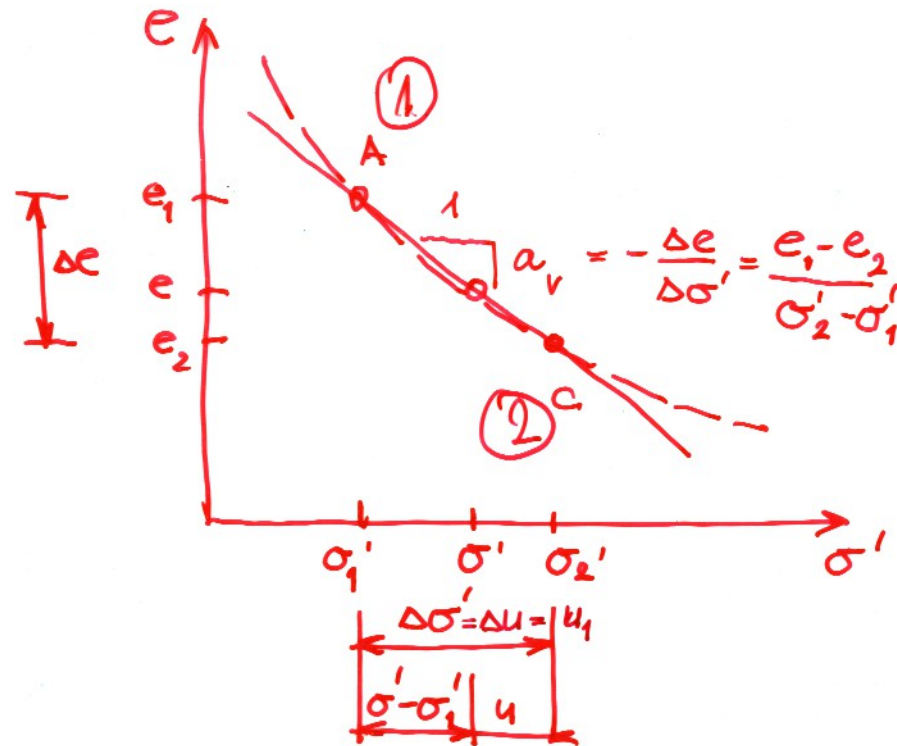
1. Zemina je nasycená ($S=1$)
2. Voda i zrna zeminy jsou nestlačitelné
 1. a 2.: platí princip efektivních napětí
3. Platí Darcyho zákon ($v = ki$, $k = \text{konst.}$)
4. Zemina je homogenní, lineárně pružná; deformace jsou malé
5. 1D stlačení i proudění
6. Zvláštní případ – oboustranná drenáž

Teorie 1D konsolidace - Terzaghi

Jak postoupila konsolidace ve vrstvě zeminy v různých hloubkách?

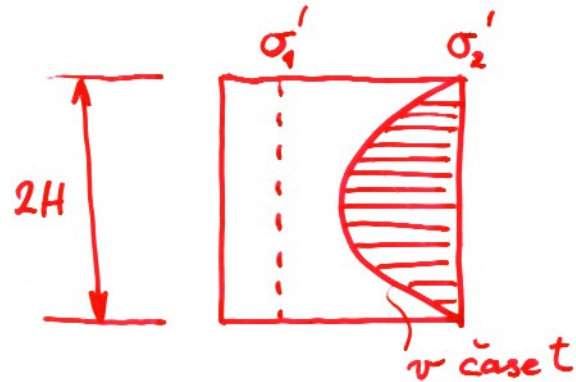
→ Stupeň konsolidace U_z

$U_z = (\text{objemová změna v hloubce } z \text{ v čase } t) / (\text{celková objemová změna v hloubce } z)$



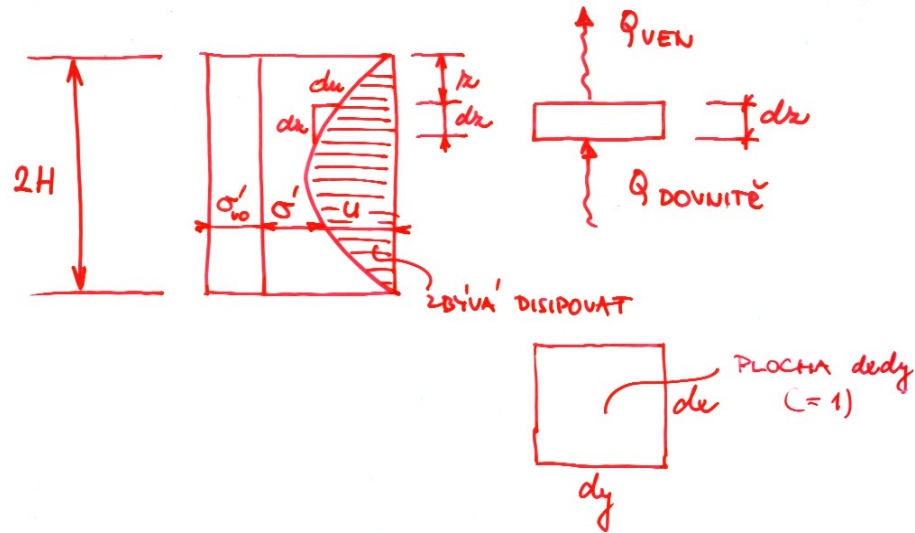
$$U_z = (e - e_1) / (e_2 - e_1) = (\sigma' - \sigma_1') / (\sigma_2' - \sigma_1') = (\sigma' - \sigma_1') / \Delta \sigma' = (u_1 - u) / u_1 = 1 - u / u_1$$

Jaký je průměrný stupeň konsolidace ve vrstvě U (U_{avg})?



$$U \equiv U_{avg} \% = \frac{\text{[Area of unconsolidated region]}}{\text{[Total area]}} \times 100 = \left(1 - \frac{\text{[Area of consolidated region]}}{\text{[Total area]}}\right) \times 100$$

Teorie 1D konsolidace - Terzaghi



hydraulický gradient v hloubce z :

$$i_z = \partial(u/\gamma_w) / \partial z = 1/\gamma_w \partial u / \partial z$$

hydraulický gradient v hloubce $z+dz$:

$$i_{z+dz} = 1/\gamma_w \partial u / \partial z + 1/\gamma_w \partial^2 u / \partial z^2 dz$$

Darcy:

$$dQ = k i dx dy dt$$

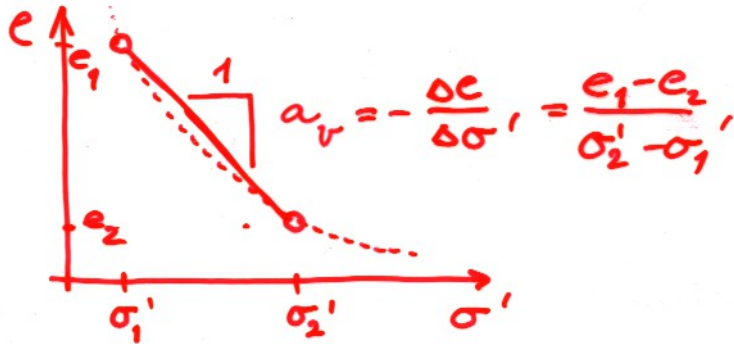
$$dQ_{VEN} = k 1/\gamma_w \partial u / \partial z dx dy dt$$

$$dQ_{DOVNITĚ} = k 1/\gamma_w (\partial u / \partial z + \partial^2 u / \partial z^2 dz) dx dy dt$$

Změna objemu:

$$dQ_{VEN} - dQ_{DOVNITĚ} = -k 1/\gamma_w \partial^2 u / \partial z^2 dz dt$$

$$(dx dy = 1)$$



Změnu objemu lze určit také ze stlačitelnosti:

např. z čísla stlačitelnosti: $a_v = -de / d\sigma' = -\Delta e / \Delta\sigma'$

sednutí: $s = \Delta\varepsilon H_1 = -\Delta e / (1+e_1) H_1$

$$s \equiv \Delta dz = -de / (1+e_1) dz = a_v d\sigma' / (1+e_1) dz = m_v d\sigma' dz = 1/E_{\text{oed}} d\sigma' dz$$

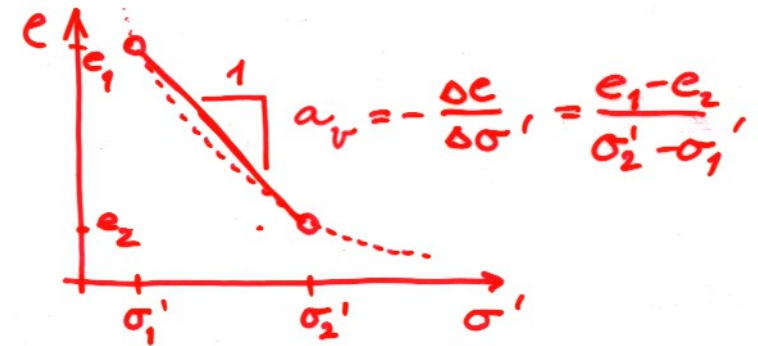
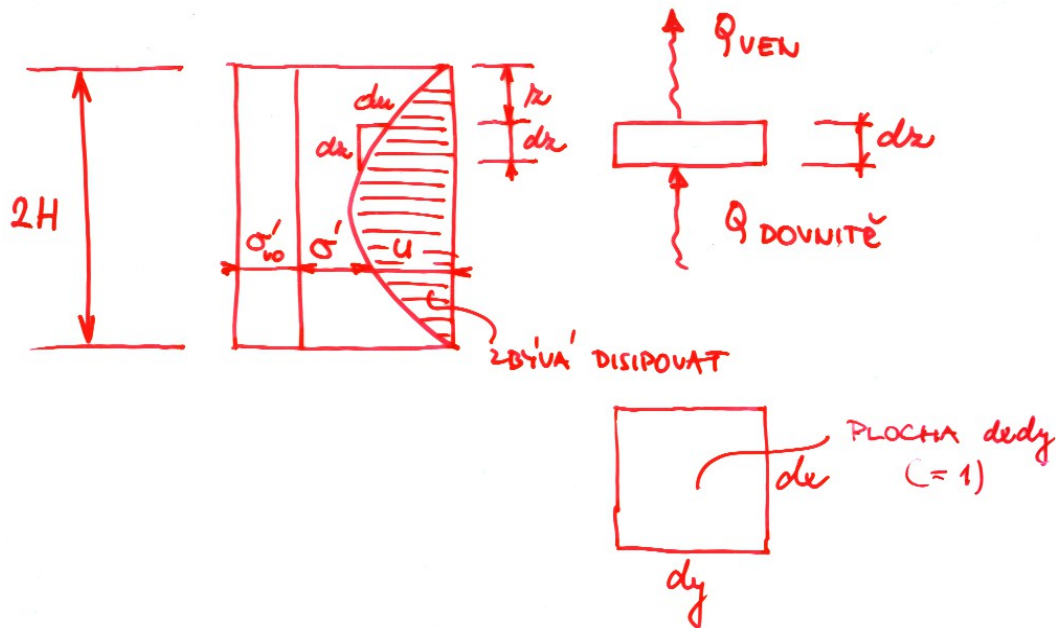
konstantní totální napětí ($\Delta\sigma = 0$): $\Delta\sigma' = -\Delta u$

sednutí $\Delta dz = -1/E_{\text{oed}} du dz$

$du = \partial u / \partial t dt$

$\Delta dz = -1/E_{\text{oed}} \partial u / \partial t dt dz$

Teorie 1D konsolidace - Terzaghi



$$dQ_{VEN} - dQ_{DOVNITR} = -k / \gamma_w \partial^2 u / \partial z^2 dz dt$$

$$\Delta z = -1 / E_{\text{oad}} \partial u / \partial t dt dz$$

↓

$$k E_{\text{oad}} / \gamma_w \partial^2 u / \partial z^2 = \partial u / \partial t$$

$c_v \partial^2 u / \partial z^2 = \partial u / \partial t$ rovnice 1D konsolidace, kde

$c_v = k E_{\text{oad}} / \gamma_w$ je součinitel konsolidace

$$\partial u / \partial t = c_v \partial^2 u / \partial z^2$$

Řešení rovnice řadou

Výsledek závisí na počátečních a okrajových podmínkách

Např.:

$$\text{pro } t = 0: \Delta u = u_1 = \Delta \sigma = \Delta \sigma' = \sigma_2' - \sigma_1';$$

$$\text{pro } z = 0 \text{ a } z = 2H: \Delta u = 0;$$

a zároveň u konstantní nebo lineárně proměnné s hloubkou

$$\rightarrow u = \Delta \sigma' \sum 4/(2(n+1)\pi) \sin((2n+1)/2 \pi z / H) \times \exp(-((2n+1)^2/4 \pi^2 c_v t / H^2))$$

Obecně řešení řadou ve tvaru $u = \Delta \sigma' \sum (f_1(Z) \times f_2(T))$

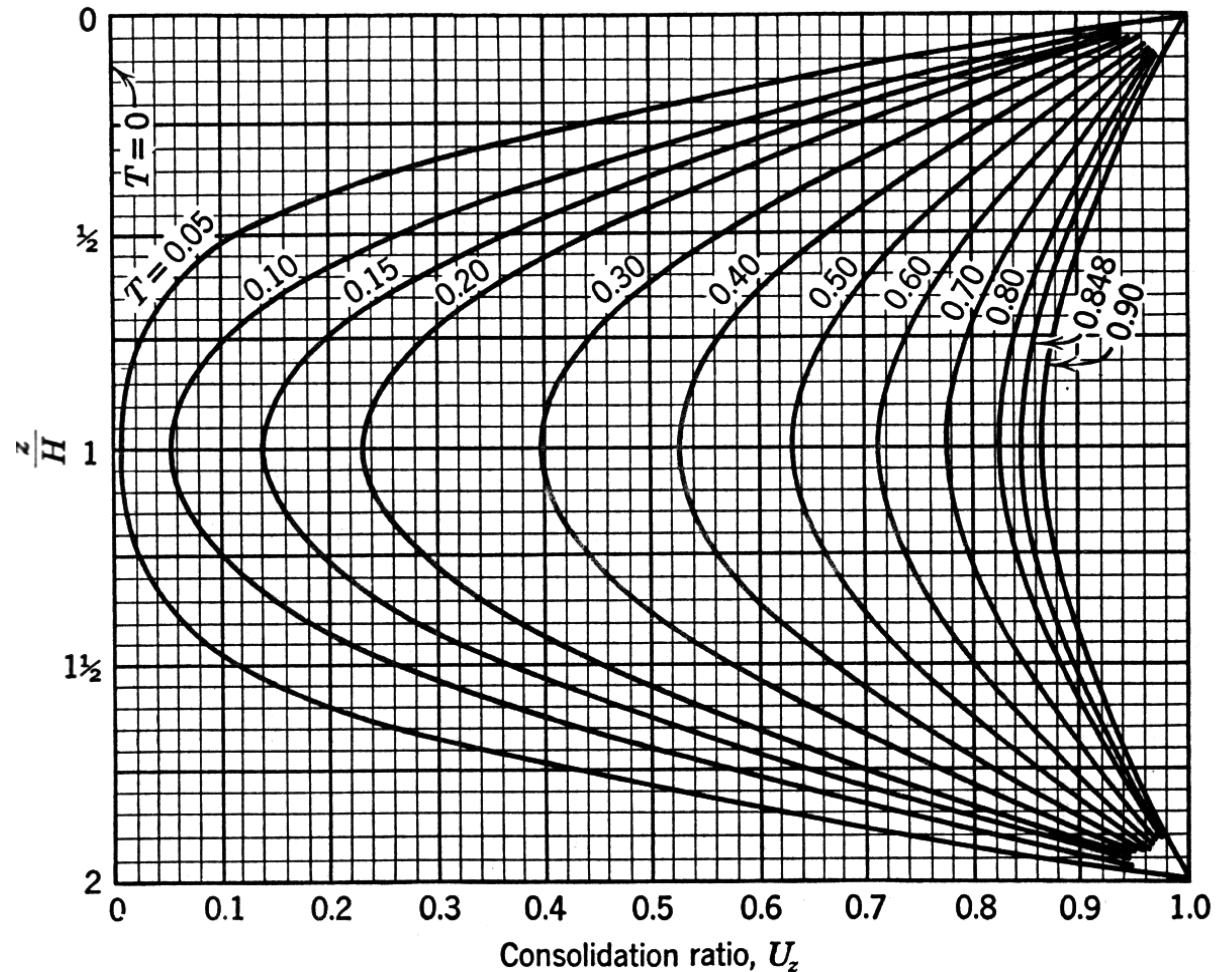
$$Z = z / H \text{ (bezrozměrná hloubka)}$$

$$T = c_v t / H^2 \text{ (bezrozměrný čas = časový faktor)}$$

\rightarrow pro stupeň konsolidace řadou: $U_z = 1 - u / u_1 = 1 - \sum (f_1(Z) \times f_2(T))$

$$U_z = 1 - u / u_1 = 1 - \sum(f_1(Z) \times f_2(T))$$

V praxi se pro U_z zpravidla řada nepočítá, ale používá se grafické zobrazení (podle Taylora, 1948):

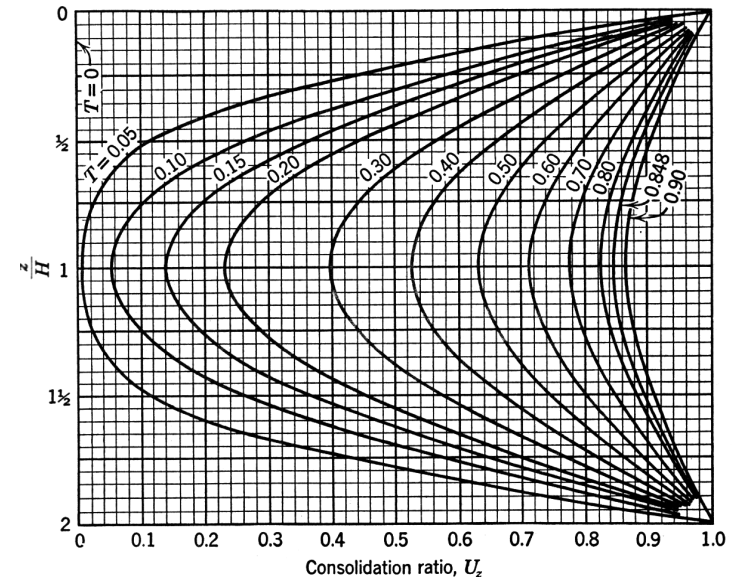


1D konsolidace

Příklad: vrstva jílu o mocnosti $h = 6\text{m}$ a $c_v = 6 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ je oboustranně drénována. Kolik je stupeň konsolidace 1 rok po (neodvodněném) zatížení vrstvy v $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{20}$ mocnosti?

$$T = c_v t / H^2 = 6 \times 10^{-8} \times 365 \times 24 \times 3600 / 9 = 0,21 \approx 0,2$$

$$(h = 2H)$$



v hloubce $\frac{1}{2} h$: $Z = z / H = H / H = 1$

$$U_z \approx 0,25 = 25\%$$

v hloubce $\frac{1}{4} h$: $Z = z / H = (\frac{1}{4} 2H) / H = 0,5$

$$U_z \approx 0,45 = 45\%$$

v hloubce $\frac{3}{4} h$: $Z = z / H = (\frac{3}{4} 2H) / H = 1,5$

$$U_z \approx 0,45 = 45\%$$

v hloubce $\frac{1}{20} h$: $Z = z / H = (\frac{1}{20} 2H) / H = 0,1$

$$U_z \approx 0,9 = 90\%$$

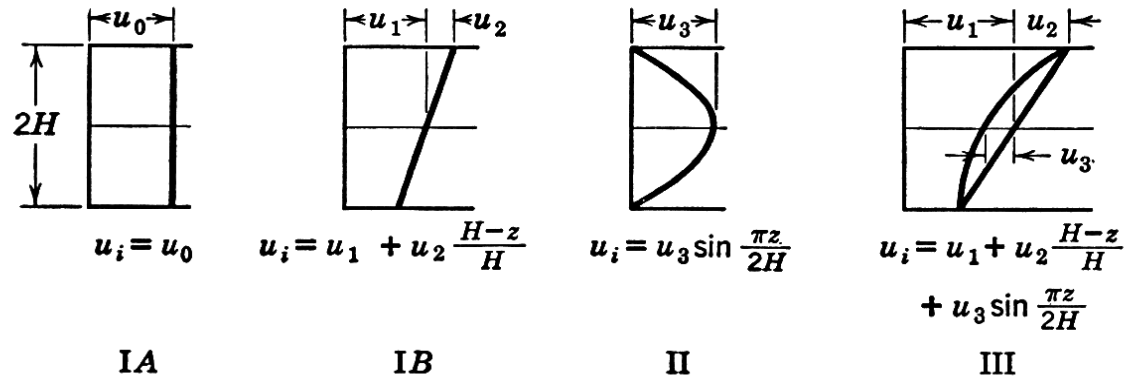
1D konsolidace

Pro průměrný stupeň konsolidace řadou:

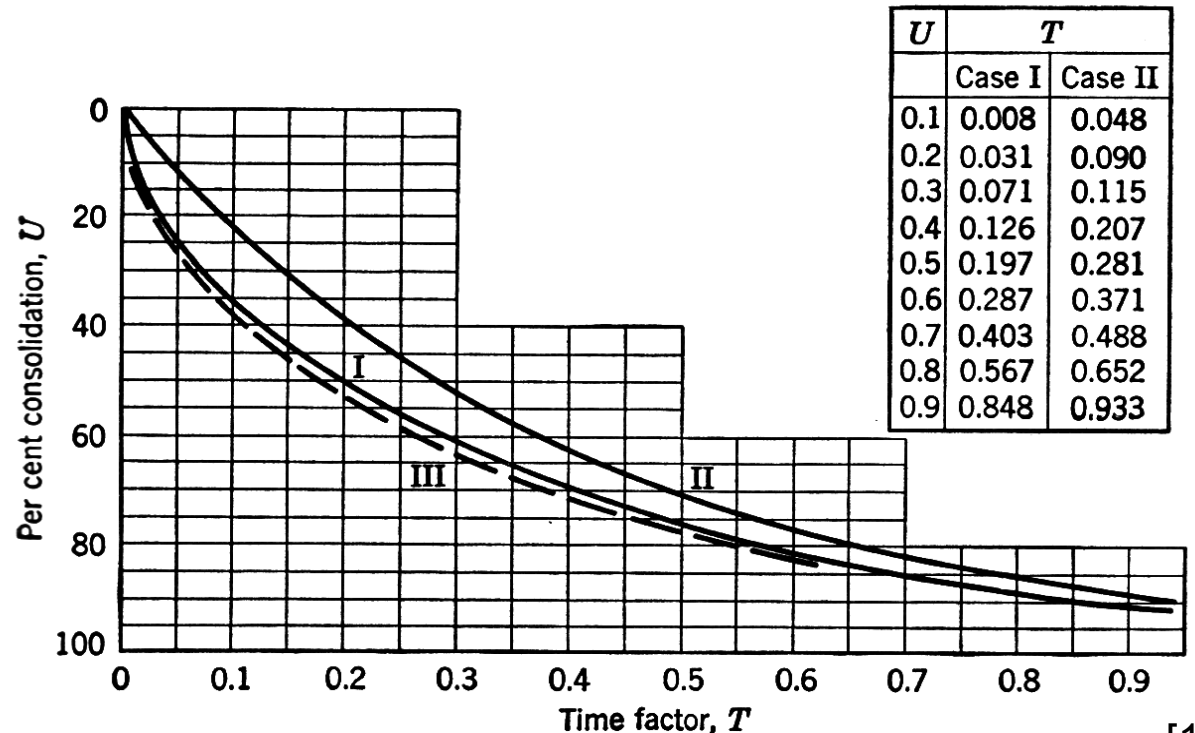
$$U \% = 100 (1 - \sum f(T))$$

řešení se v literatuře uvádí (a v praxi používá) ve formě tabulky nebo grafu

(v závislosti na okrajových a počátečních podmínkách...):



Pozn: pro $U < 60\%$ $T \approx \pi/4 \times U^2$ (parabola)

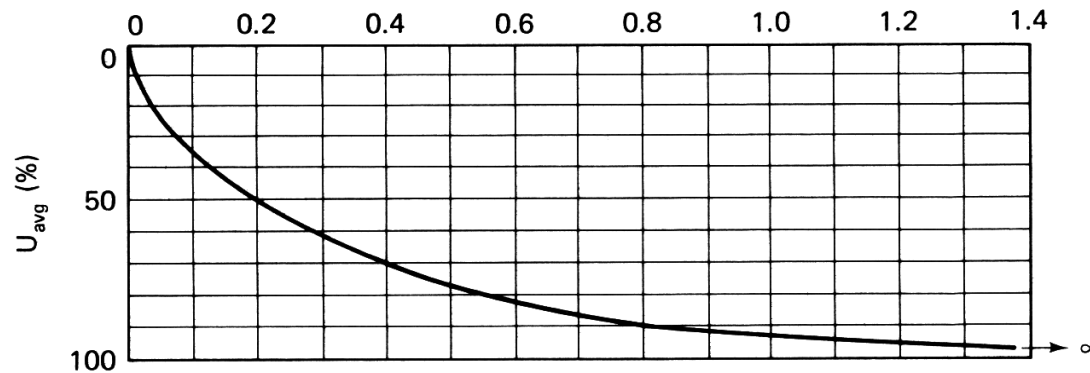


[1]

1D konsolidace

Příklad: vrstva jílu o mocnosti $h = 6\text{m}$ a $c_v = 6 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ je oboustranně drénována. Kolik je stupeň konsolidace 1 rok po (neodvodněném) zatížení vrstvy v $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$ $\frac{1}{20}$ mocnosti?

- Jaká část sednutí proběhla 1 rok po zatížení?
- Kdy dojde k 95% konečného sednutí?



[3]

- $T = 0,2 \rightarrow U = 50\%$ (viz graf pro U vs T), tj proběhlo 50% konsolidace

$$U = \text{objemová změna v čase} / \text{celková (konečná) objemová změna} = s(t) / s_{\text{celkové}}$$

Za 1 rok proběhlo 50% konečného sednutí

- $T = c_v t / H^2$

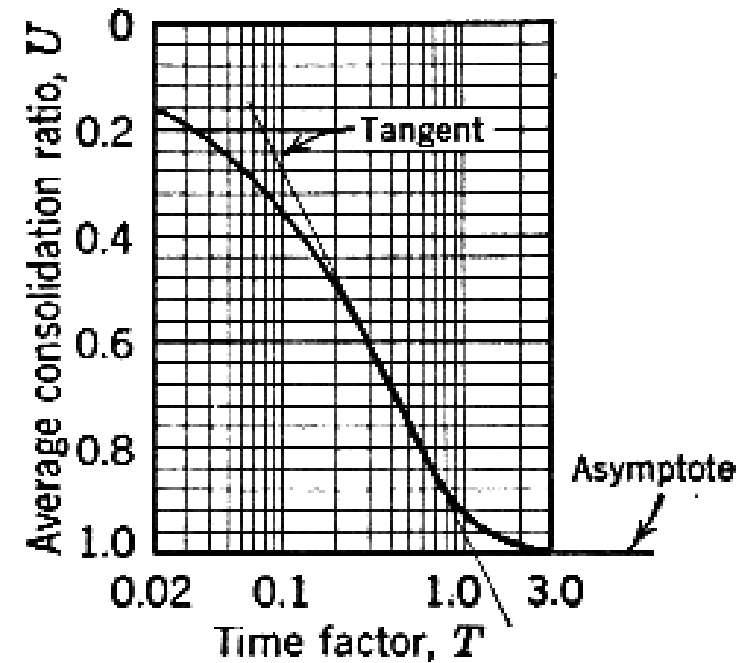
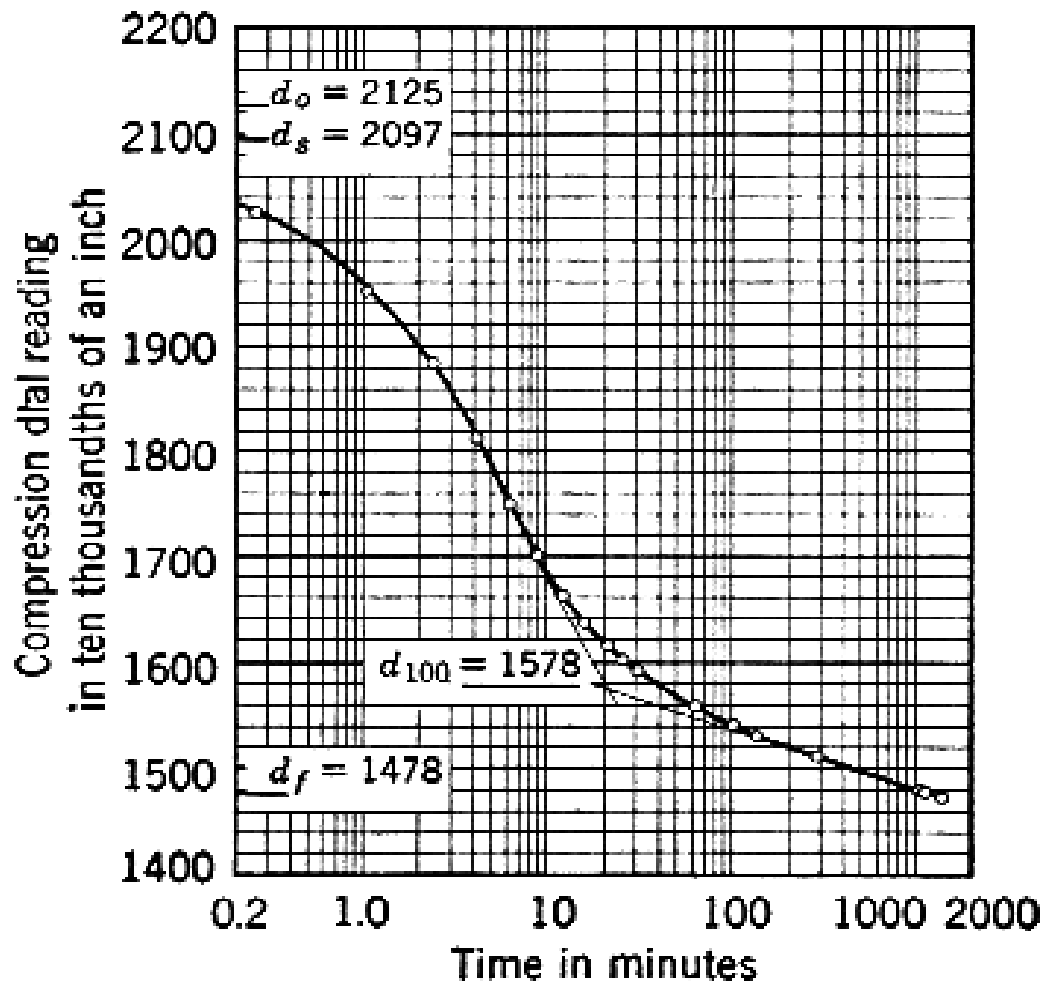
$$t = T H^2 / c_v$$

$$U = 0,95 \rightarrow T \approx 1,2$$

$$U = 0,95 \rightarrow t \approx 1,2 \times 3^2 / (6 \times 10^{-8}) = 1,8 \times 10^8 \text{ s} \approx 6 \text{ let}$$

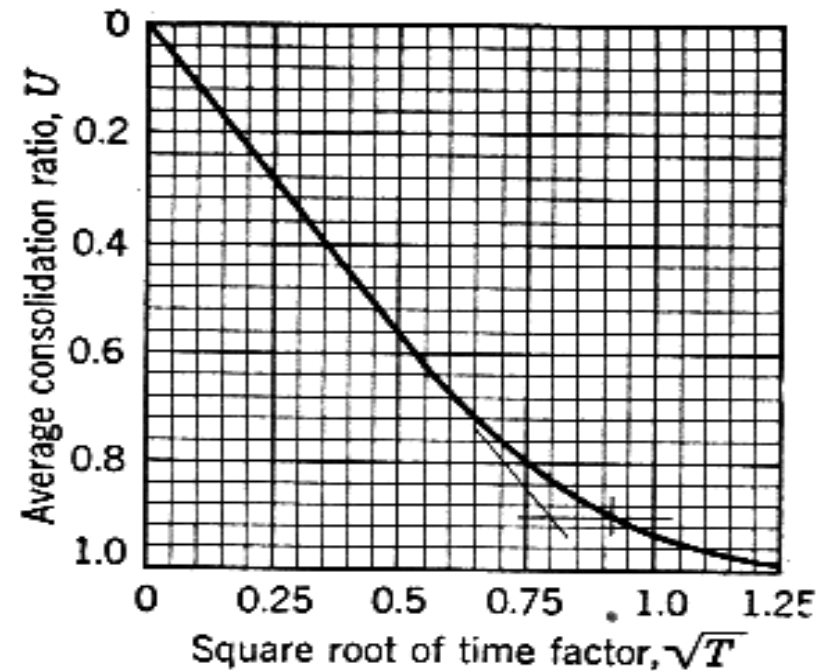
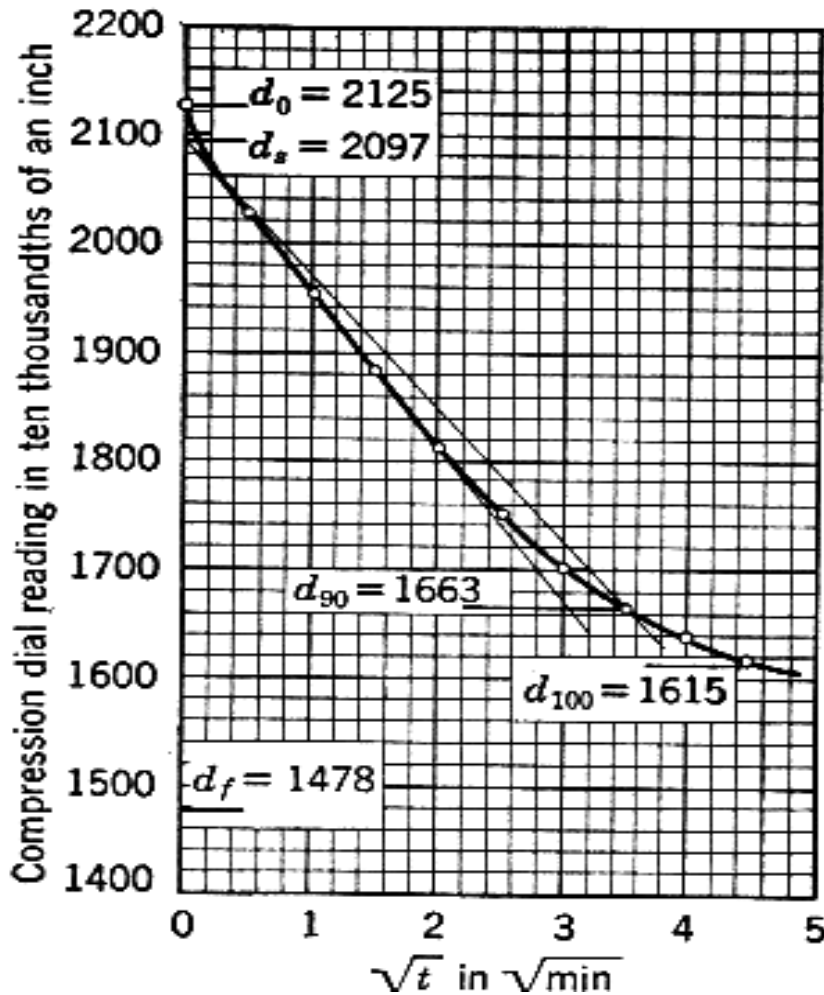
Stanovení c_v z experimentu – z oedometru: $\log t$ - Casagrande

v semilog. zobrazení se určí začátek sekundárního stlačení (creepu), tj. 100% konsolidace, z něj bod 50% konsolidace ($T_{50} = 0,197$)

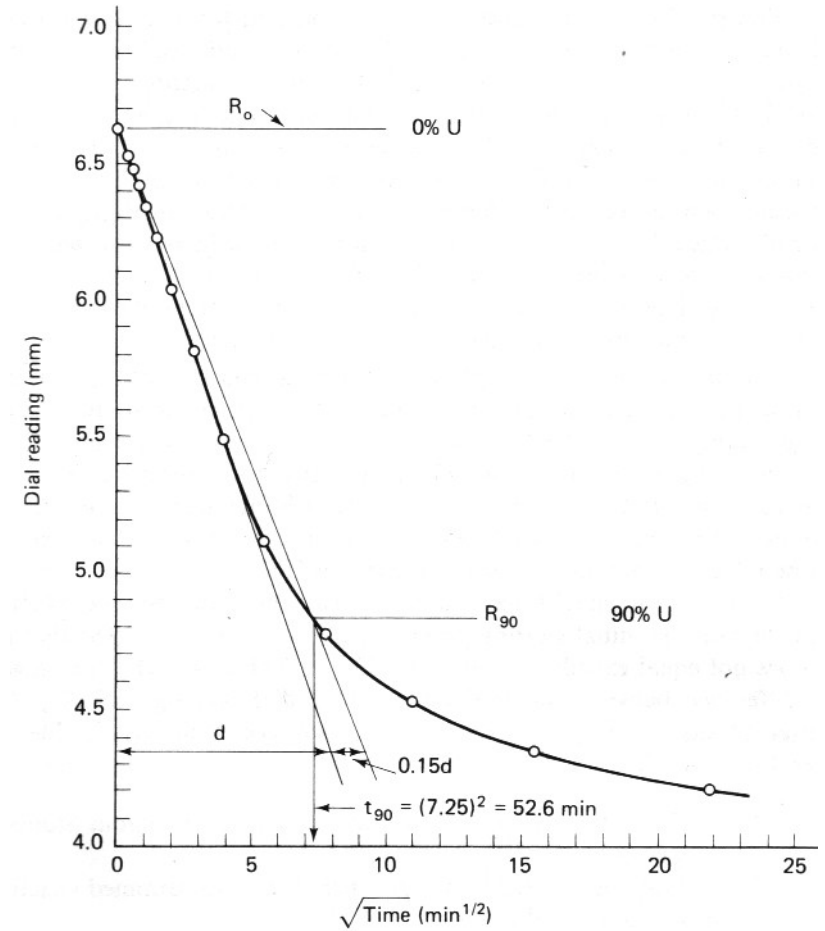
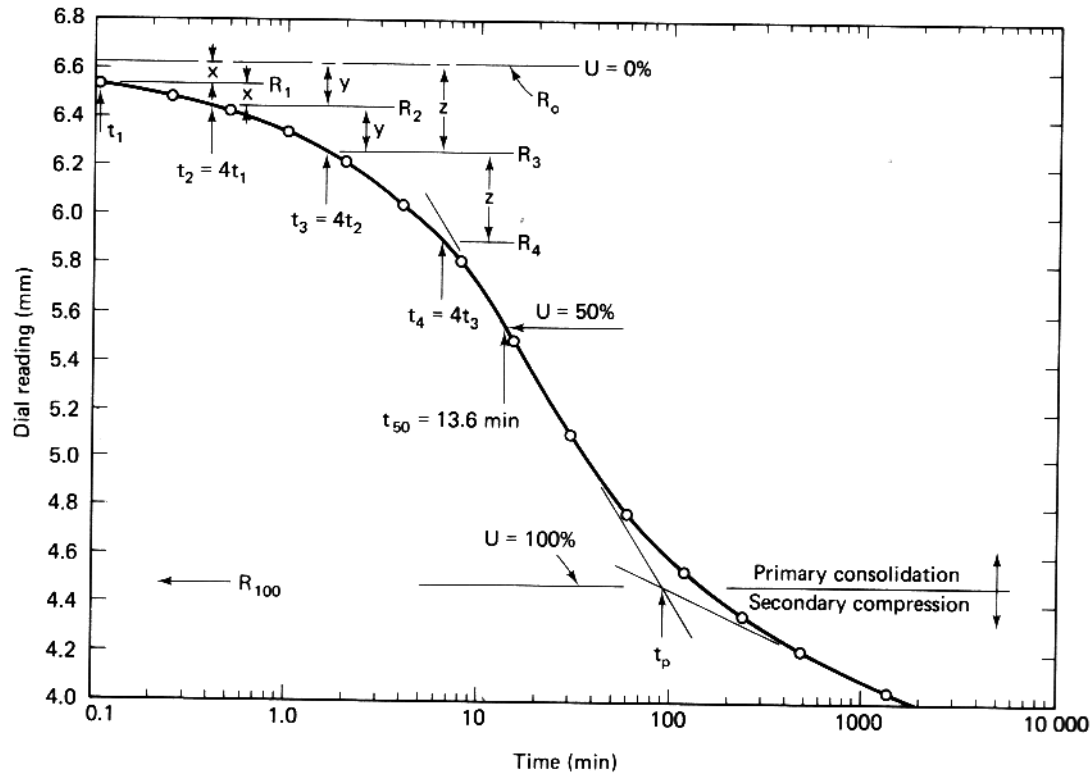


Stanovení c_v z experimentu – z oedometru: \sqrt{t} - Taylor

zobrazení sednutí : \sqrt{t} → parabola → přímka v počáteční části (do cca $U \approx 60\%$); bod 90% konsolidace lze na teoretickém řešení i na experimentálních datech stanovit z této přímky ($T_{90} = 0,848$)



Postup s tanovení c_v z experimentu:



[3]

Typické hodnoty c_v

Jíl

$$n \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

např tégl: $(20-40) \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

výsypkový jíl SHR: $(1-10) \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

Silt

$$n \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

popílky, spraš, ± kaolin při cvičení

$$1 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1} \approx 0,3 \text{ m}^2 / \text{rok}$$

Základní

<http://natur.cuni.cz/~bohac/>

Atkinson, J.H. (2007) The mechanics of soils and foundations. 2nd ed. Taylor & Francis (v knihovně geologické sekce je několik exemplářů)

Doporučená rozšiřující literatura (omezeně dostupná na oddělení IG)

Feda, J. (1977) Základy mechaniky partikulárních látek. Academia, Praha. (Případně anglická verze: Feda, J. (1982) Mechanics of particulate materials, Academia-Elsevier.)

Mitchell, J.K. and Soga, K (2005) Fundamentals of soil behaviour. J Wiley. (Případně starší vydání, bez druhého autora: 1973; 1993.)

Wood, D.M. (1990) Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge Univ.Press.

Bolton, M. (1979) A guide to soil mechanics. Macmillan Press, ISBN 0-33318931-0.

Craig, R.F. (2004; existují různá vydání, první 1974) Soil mechanics. Spon Press.

Holtz, R.D. and Kovacs, E.D. (1981) An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, ISBN 0-13-484394-0

Atkinson, J.H and Bransby, P.L. (1978) The mechanics of soils. McGraw-Hill, ISBN 0-07-084077-2.

Částečně lze použít:

Myslivec, A., Eichler, J. a Jesenák, J. (1970) Mechanika zemin. SNTL, Praha.

Šimek, J. et al. (1990) Mechanika zemin (1990). SNTL, Praha.

Vaníček, I. (2000; existují různá vydání) Mechanika zemin, skriptum FSv ČVUT

- [1] Taylor, D. W. (1948) The fundamentals of mechanics of soils. John Wiley & Sons .
- [2] Terzaghi, K. (1943) Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons.
- [3] Holtz, R.D. and Kovacs, E.D. (1981) An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, ISBN 0-13-484394-0