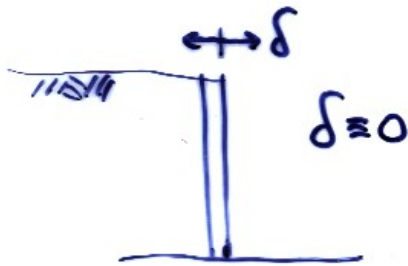

Mechanika zemin II

5 – Zemní tlaky, opěrné konstrukce

1. Vliv vody na stabilitu
2. Zemní tlaky – horizontální napětí v mezním stavu
3. Síly na opěrné konstrukce v mezním stavu
4. Parametry

(Horizontální) zemní tlak

TLAK V KLIDU



součinitel tlaku v klidu

$$\sigma_h' = K_0 \sigma_v'$$

Platí pouze pro efektivní napětí!

$$K_0 = 1 - \sin \varphi_{cr}' = \text{konst. pro NC zeminu} (\rightarrow \varphi_{cr}')$$

Pro OC zeminu vztah NEPLATÍ!

TLAK AKTIVNÍ



(horizontální) posun směrem ven → STAV PORUŠENÍ tzv. aktivním zemním tlakem

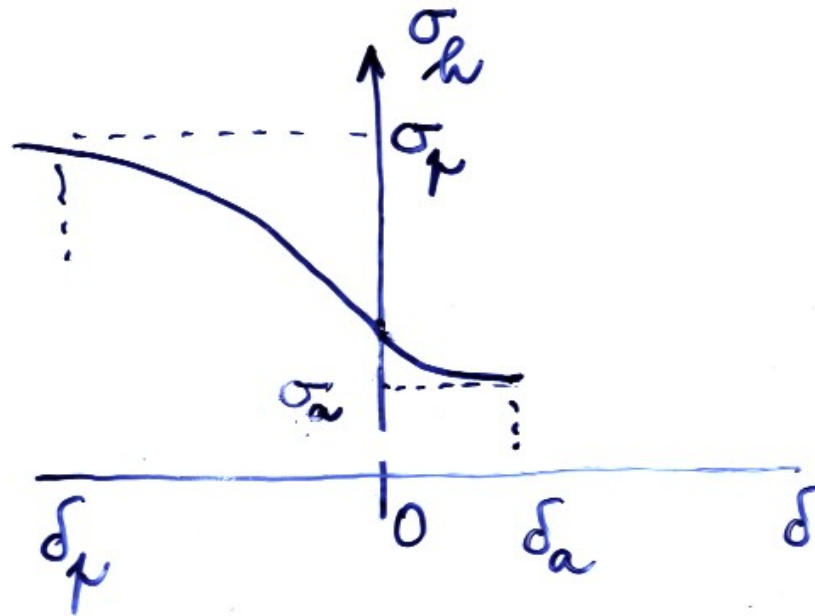
TLAK PASIVNÍ



(horizontální) posun dovnitř → STAV PORUŠENÍ tzv. pasivním zemním tlakem

(Horizontální) zemní tlak

Mobilizace mezního stavu při horizontálním posunu $\delta \rightarrow \delta_{\text{mezní}} (\delta_a \text{ nebo } \delta_p)$

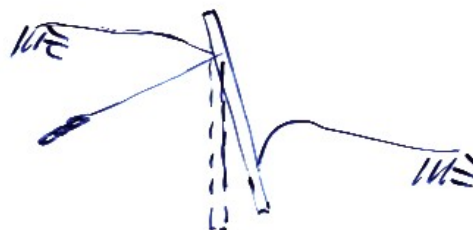
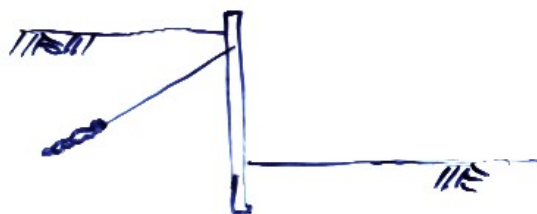


.....v mezním stavu: $\delta_a < \delta_p$

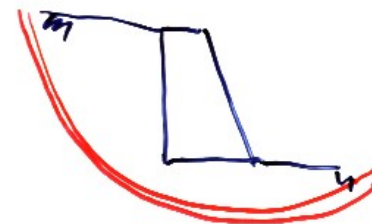
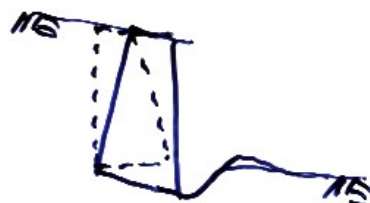
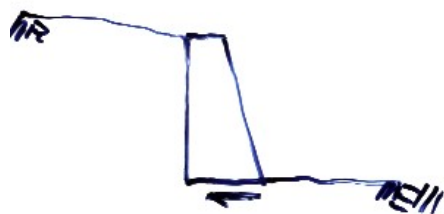
Příklady opěrných konstrukcí a jejich porušení



OPĚRNÁ STĚNA
ODPOR PASÍVNÍM TLAKEM



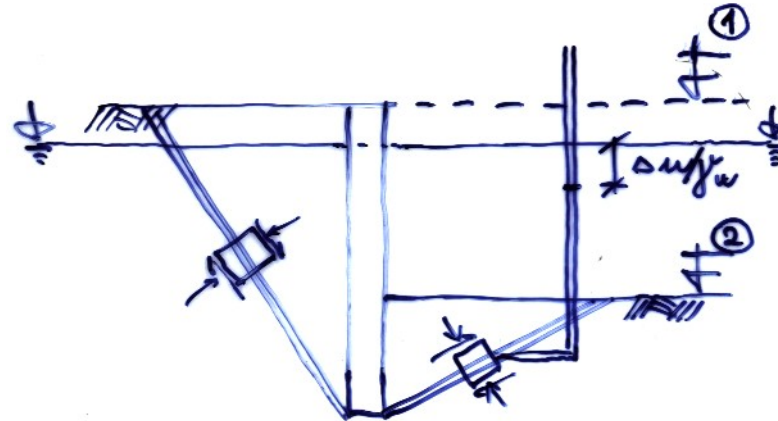
LOTVENA'



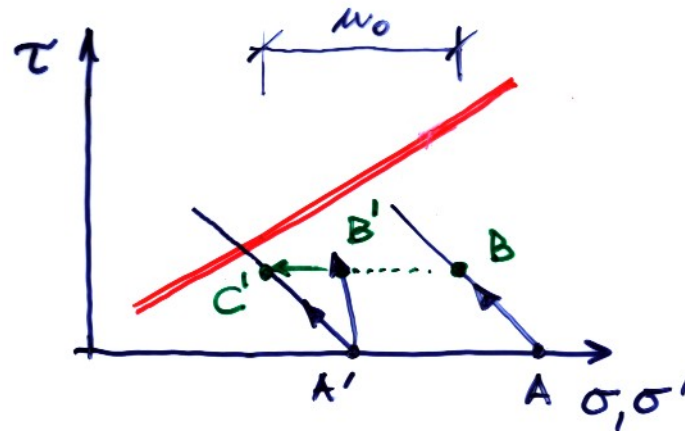
Vliv vody na stabilitu stěny

Je pro stabilitu opěrné stěny rozhodující odvodněné nebo neodvodněné zatížení?

1. Výkop



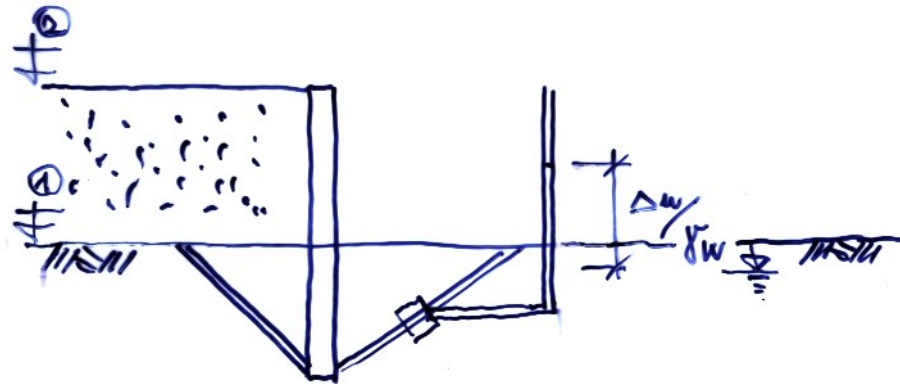
Smykové napětí se při výkopu zvyšuje při poklesu normálového $\rightarrow$ (přibližná) dráha napětí



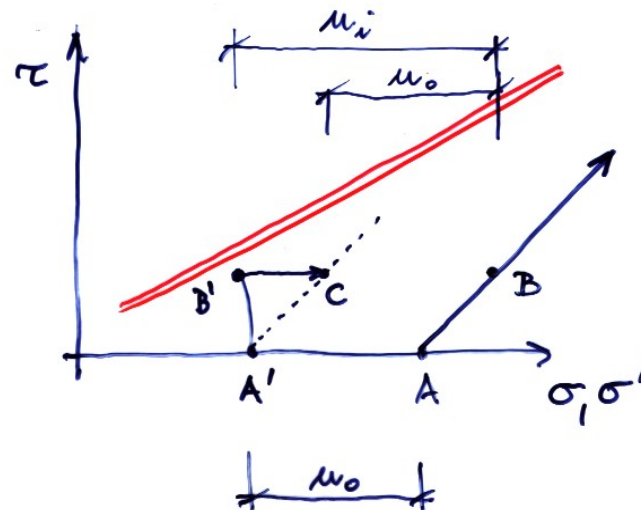
→ stabilita se s časem - PŘI DISIPACI NEGATIVNÍCH PÓROVÝCH TLAKŮ - SNIŽUJE

Je pro stabilitu opěrné stěny rozhodující odvodněné nebo neodvodněné zatížení?

2. Násyp

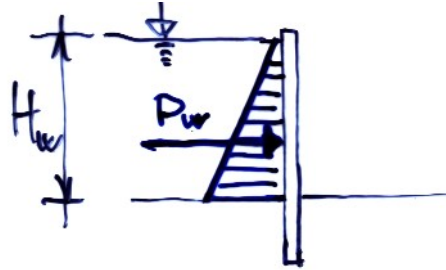


Smykové napětí se v podloží násypu zvyšuje při vzrůstu normálového → (přibližná) dráha napětí

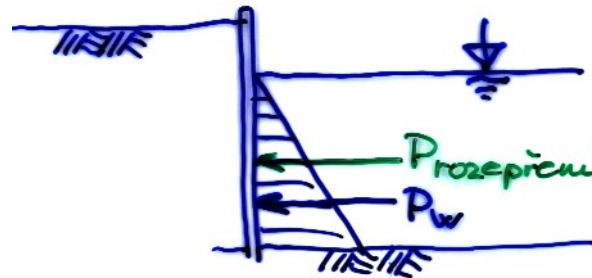


→ stabilita se s časem - PŘI DISIPACI POZITIVNÍCH PÓROVÝCH TLAKŮ V PODLOŽÍ NÁSYPU – ZVYŠUJE

1. Voda vyvozuje zatížení hydrostatickým tlakem

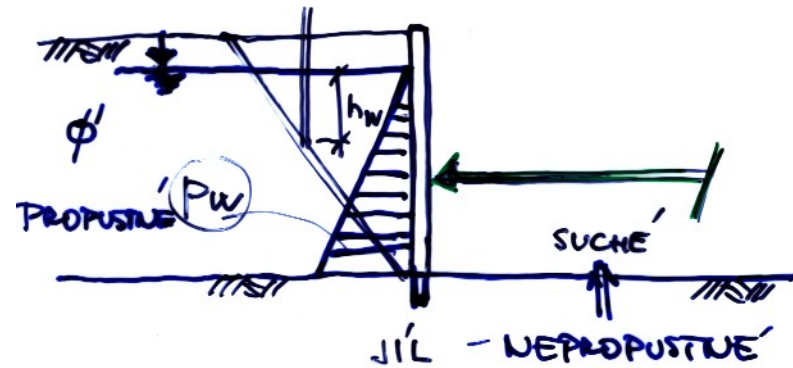


2. Voda stabilizuje stěnu



Bez ohledu na podmínky drenáže a ne/propustnost stěny – totální síly na zeminu od vody ve výkopu a od rozepření

3. Voda mění mobilizovatelnou pevnost - vliv pórových tlaků

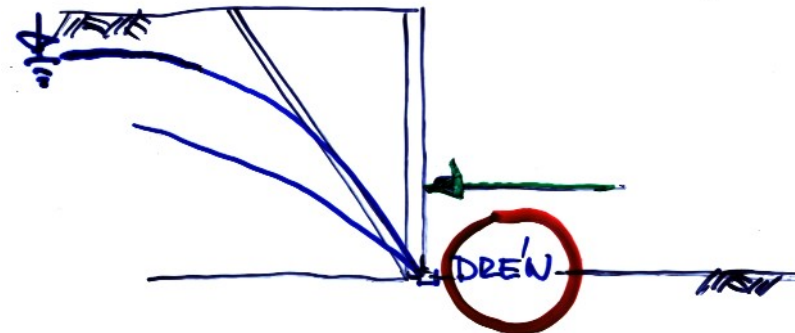


Voda za stěnou, drénovaná událost:

zatížení

zvýšení pórového tlaku (snížení efektivního napětí a tím mobilizovatelné pevnosti zeminy) za stěnou

Účinky drenáže u paty



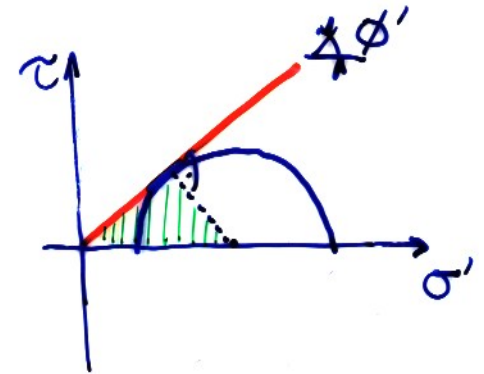
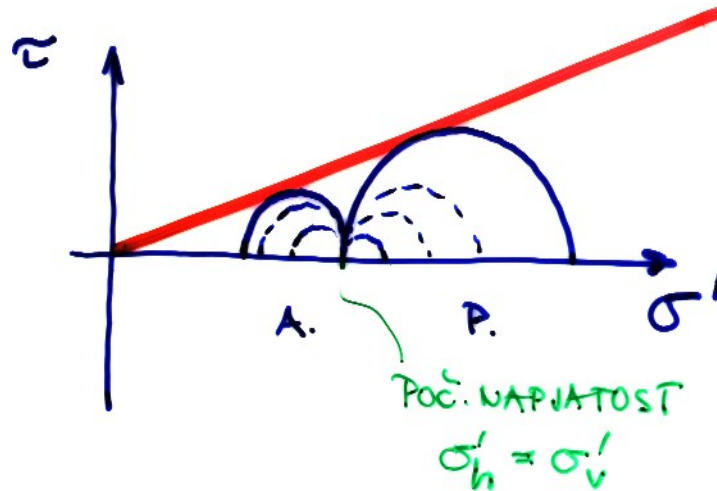
Nižší zatížení stěny, vyšší efektivní napětí a tím vyšší mobilizovatelná pevnost zeminy za stěnou!

Porušení změnou horizontálního napětí - mezní zemní tlak

Drénované zatížení

(předpoklad: lineární růst napětí s hloubkou)

Při pevnosti $c'=0$, $\varphi_{cr}' \neq 0$



Aktivní: $\sigma_h' < \sigma_v'$

$$\sin \varphi_{cr}' = (\sigma_v' - \sigma_h') / (\sigma_v' + \sigma_h')$$

$$\sigma_v' (\sin \varphi_{cr}' - 1) = \sigma_h' (-\sin \varphi_{cr}' - 1)$$

$$\sigma_h' / \sigma_v' = (1 - \sin \varphi_{cr}') / (1 + \sin \varphi_{cr}')$$

Porušení změnou horizontálního napětí - mezní zemní tlak

$$\frac{1 - \sin \alpha}{1 + \sin \alpha} =$$

$$\textcircled{1} \quad \sin 90^\circ \equiv 1$$

$$= \frac{\sin 90^\circ - \sin \alpha}{\sin 90^\circ + \sin \alpha} =$$

$$\textcircled{2} \quad \sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$= \frac{2 \cos \frac{90^\circ + \alpha}{2} \sin \frac{90^\circ - \alpha}{2}}{2 \sin \frac{90^\circ + \alpha}{2} \cos \frac{90^\circ - \alpha}{2}} =$$

$$\textcircled{3} \quad \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\operatorname{cotg} \alpha}$$

$$= \operatorname{cotg} \frac{90^\circ + \alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \alpha}{2}$$

$$= \operatorname{cotg} \left(45^\circ + \frac{\alpha}{2} \right) \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$\textcircled{4} \quad \operatorname{cotg} (45^\circ + \alpha) = \operatorname{tg} (45^\circ - \alpha)$$

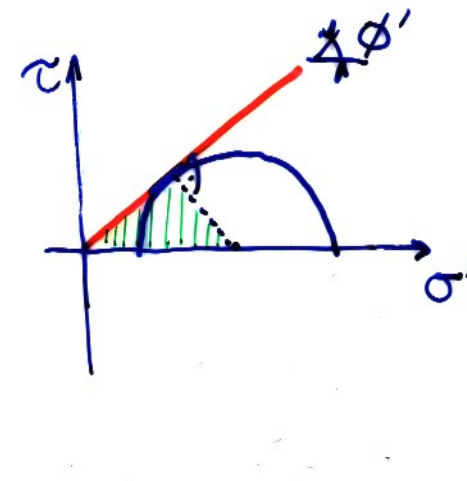
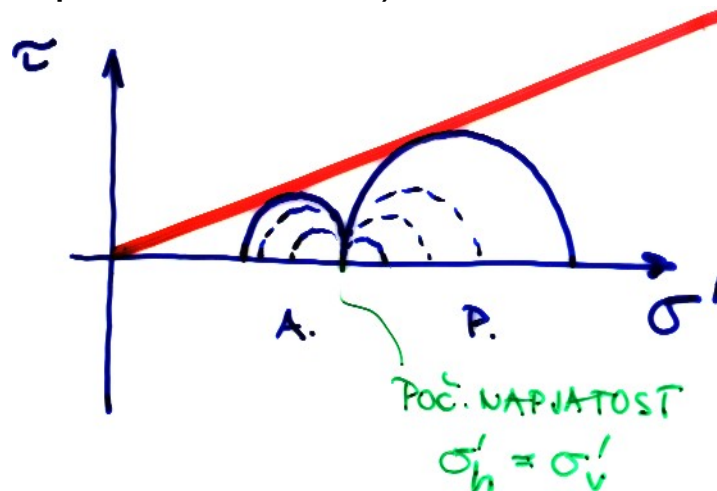
$$= \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right)$$

Porušení změnou horizontálního napětí - mezní zemní tlak

Drénované zatížení

(předpoklad: lineární růst napětí s hloubkou)

Při pevnosti $c'=0$, $\varphi_{cr}' \neq 0$



Aktivní: $\sigma_h' < \sigma_v'$

$$\sin \varphi_{cr}' = (\sigma_v' - \sigma_h') / (\sigma_v' + \sigma_h')$$

$$\sigma_v' (\sin \varphi_{cr}' - 1) = \sigma_h' (-\sin \varphi_{cr}' - 1)$$

$$\sigma_h' / \sigma_v' = (1 - \sin \varphi_{cr}') / (1 + \sin \varphi_{cr}')$$

$$\sigma_h' / \sigma_v' = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_{cr}')$$

Porušení při poměru napětí

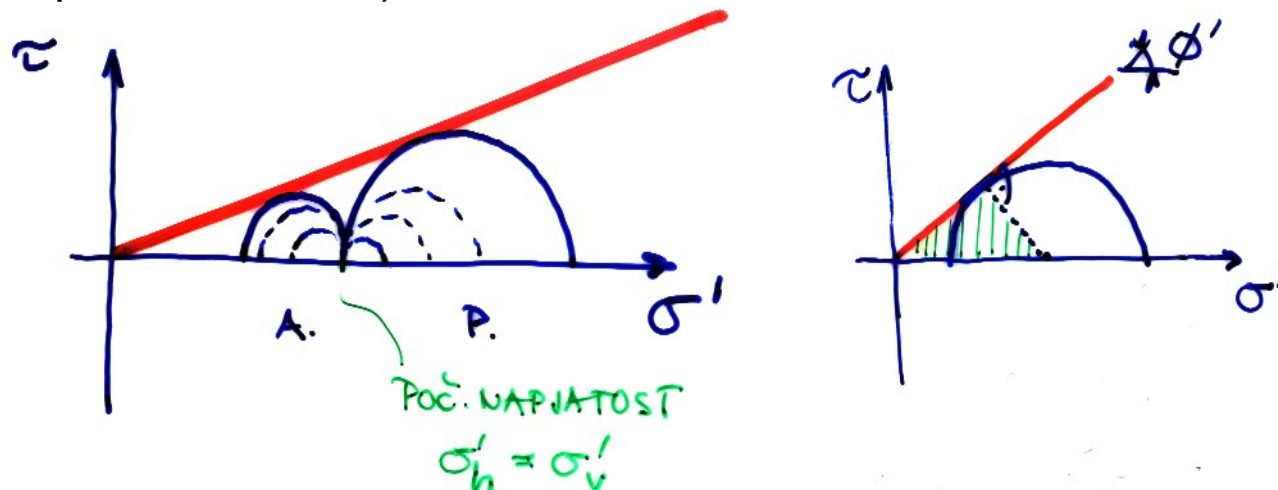
$$K_a = \sigma_h' / \sigma_v' = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_{cr}') = (1 - \sin \varphi_{cr}') / (1 + \sin \varphi_{cr}')$$

Porušení změnou horizontálního napětí - mezní zemní tlak

Drénované zatížení

(předpoklad: lineární růst napětí s hloubkou)

Při pevnosti $c'=0$, $\varphi_{cr}' \neq 0$



Aktivní: $\sigma_h' < \sigma_v'$

$$\sin \varphi_{cr}' = (\sigma_v' - \sigma_h') / (\sigma_v' + \sigma_h')$$

$$\sigma_v' (\sin \varphi_{cr}' - 1) = \sigma_h' (-\sin \varphi_{cr}' - 1)$$

$$\sigma_h' / \sigma_v' = (1 - \sin \varphi_{cr}') / (1 + \sin \varphi_{cr}')$$

$$\sigma_h' / \sigma_v' = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_{cr}')$$

Porušení při poměru napětí

$$K_a = \sigma_h' / \sigma_v' = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_{cr}')$$

Pasivní: $\sigma_v' < \sigma_h'$

$$\sin \varphi_{cr}' = (\sigma_h' - \sigma_v') / (\sigma_h' + \sigma_v')$$

$$\sigma_h' (\sin \varphi_{cr}' - 1) = \sigma_v' (-\sin \varphi_{cr}' - 1)$$

$$\sigma_h' / \sigma_v' = (1 + \sin \varphi_{cr}') / (1 - \sin \varphi_{cr}')$$

$$\sigma_h' / \sigma_v' = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{1}{2}\varphi_{cr}')$$

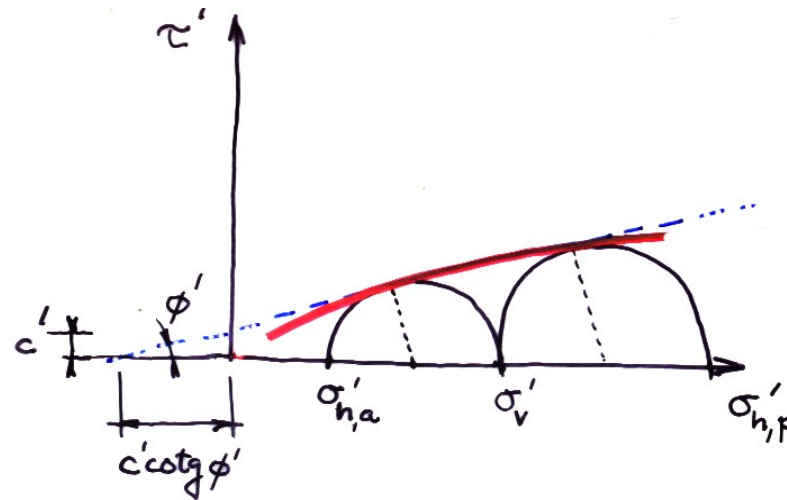
Porušení při poměru napětí

$$K_p = \sigma_h' / \sigma_v' = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{1}{2}\varphi_{cr}')$$

Drénované zatížení

(předpoklad: lineární růst napětí s hloubkou)

Při pevnosti $c' = c_p' \neq 0$, $\varphi' = \varphi_p' \neq 0$



Aktivní: $\sigma_h' < \sigma_v'$

$$\sin \varphi_p' = \frac{1}{2}(\sigma_v' - \sigma_h') / (\frac{1}{2}(\sigma_v' + \sigma_h') + c_p' \cot \varphi_p')$$

$$\sigma_h' = \sigma_v' (1 - \sin \varphi_p') / (1 + \sin \varphi_p') - 2c_p' \cos \varphi_p' / (1 + \sin \varphi_p')$$

$$\sigma_h' = \sigma_v' (1 - \sin \varphi_p') / (1 + \sin \varphi_p') - 2c_p' \sqrt{((1 - \sin \varphi_p') / (1 + \sin \varphi_p'))}$$

$$\sigma_h' = \sigma_v' \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_p') - 2c_p' \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_p')$$

Porušení při

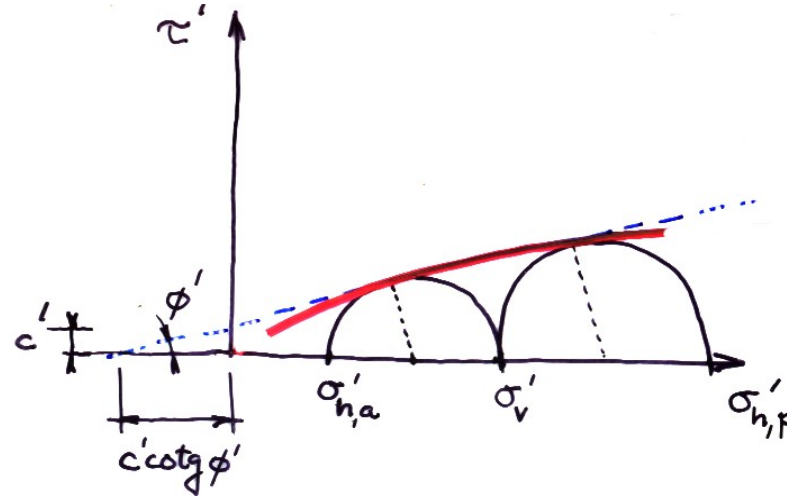
$$\sigma_h' = \sigma_v' K_a - 2c_p' \sqrt{K_a}$$

$$\text{kde } K_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_p') = (1 - \sin \varphi_p') / (1 + \sin \varphi_p')$$

Drénované zatížení

(předpoklad: lineární růst napětí s hloubkou)

Při pevnosti $c' = c_p' \neq 0$, $\varphi' = \varphi_p' \neq 0$



Aktivní: $\sigma_h' < \sigma_v'$

Pasivní: $\sigma_v' < \sigma_h'$

$$\sin \varphi_p' = \frac{1}{2}(\sigma_h' - \sigma_v') / (\frac{1}{2}(\sigma_h' + \sigma_v') + c_p' \cot \varphi_p')$$

....

....

Porušení při

$$\sigma_h' = \sigma_v' K_a - 2c_p' \sqrt{K_a}$$

$$\text{kde } K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_p')$$

Porušení při

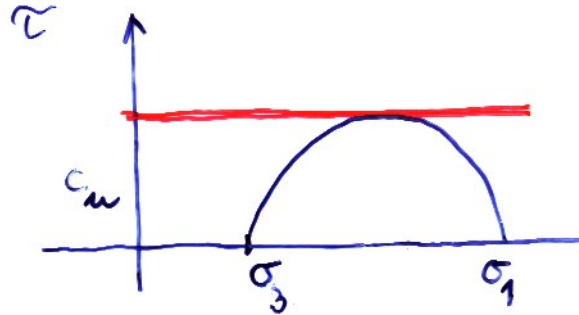
$$\sigma_h' = \sigma_v' K_p + 2c_p' \sqrt{K_p}$$

$$\text{kde } K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{1}{2}\varphi_p')$$

Nedrénované zatížení

(předpoklad: lineární růst napětí s hloubkou)

Pevnost s_u (c_u)



$$\sigma_3 < \sigma_1$$

Aktivní: $\sigma_3 = \sigma_h < \sigma_1 = \sigma_v$

$$s_u = \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h)$$

$$\sigma_h = \sigma_v - 2s_u$$

$$K_{au} = 2$$

Pasivní: $\sigma_3 = \sigma_v < \sigma_1 = \sigma_h$

$$s_u = \frac{1}{2} (\sigma_h - \sigma_v)$$

$$\sigma_h = \sigma_v + 2s_u$$

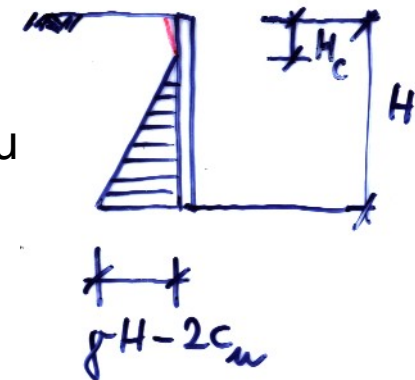
$$K_{pu} = 2$$

Pro $\sigma_v < 2s_u$

aktivní mezní $\sigma_{ha} < 0 \rightarrow$ otevřou se tahové trhliny za stěnou

$$H_c = 2s_u / \gamma \text{ pro trhlínu bez vody}$$

$$H_c = 2s_u / (\gamma - \gamma_w) \text{ pro trhlínu plnou vody}$$

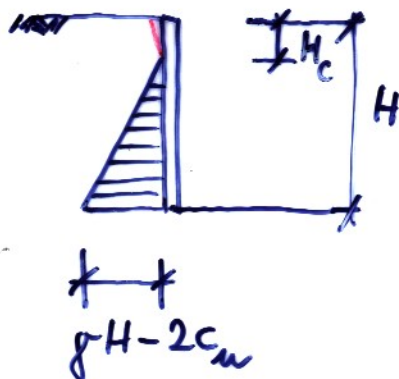


Mezní síla na hladkou opěrnou stěnu (nulové tření na rubu stěny)

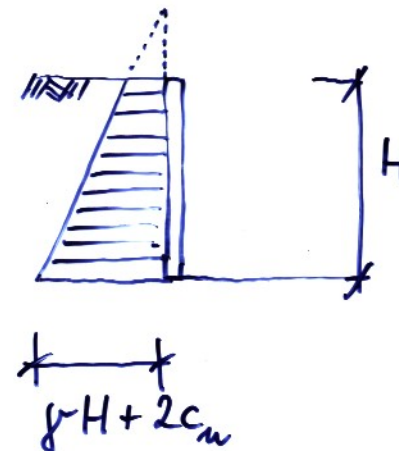
Neodvodněné zatížení

Pevnost s_u (c_u)

AKTIVNÍ



PASÍVNÍ



Vodorovná síla na 1 m délky hladké stěny

$$P_a = \frac{1}{2}(H - H_c) \times (\gamma H - 2s_u)$$

Trhlina bez vody $\rightarrow H_c = 2s_u / \gamma$

$$P_a = \frac{1}{2}H^2\gamma - \frac{1}{2}H^2s_u - \frac{1}{2}(2s_u/\gamma)\gamma H + \frac{1}{2}4s_u^2/\gamma$$

(zanedbání s_u^2/γ)

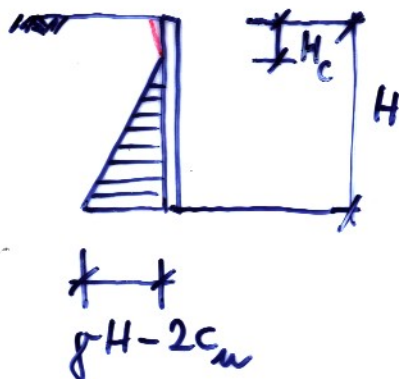
$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 - 2 s_u H$$

Mezní síla na hladkou opěrnou stěnu (nulové tření na rubu stěny)

Neodvodněné zatížení

Pevnost s_u (c_u)

AKTÍVNÍ



Vodorovná síla na 1 m délky hladké stěny

$$P_a = \frac{1}{2}(H - H_c) \times (\gamma H - 2s_u)$$

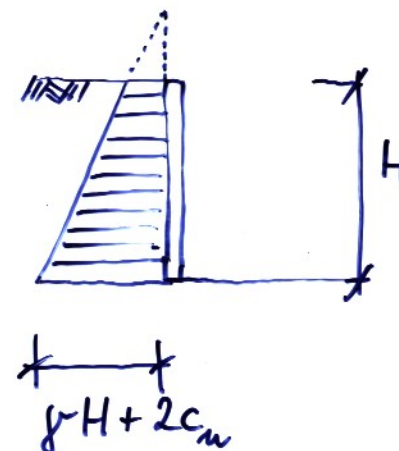
Trhlina bez vody $\rightarrow H_c = 2s_{II} / \gamma$

$$P_a = \frac{1}{2}H^2\gamma - \frac{1}{2}H2s_u - \frac{1}{2}(2s_u/\gamma)\gamma H + \frac{1}{2}4s_u^2/\gamma$$

(zanedbání $2s_u^2/\gamma$)

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 - 2 s_u H$$

PASÍVNI

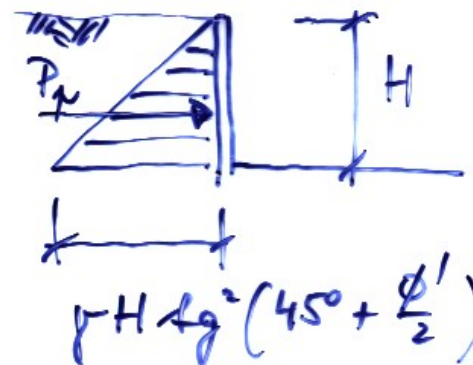
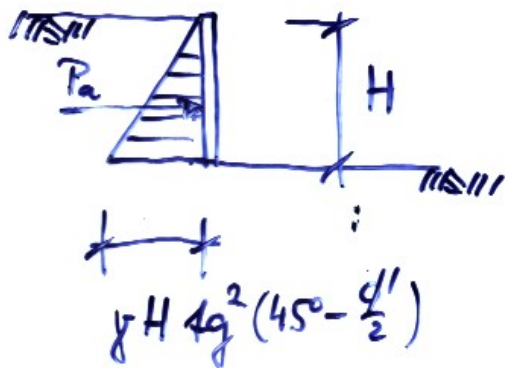


$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 + 2 s_u H$$

Mezní síla na hladkou opěrnou stěnu (nulové tření na rubu stěny)

Odvozněné zatížení

Pevnost: $c' = 0$, $\varphi' = \varphi_{cr}' \neq 0$



Síla na 1m délky hladké stěny

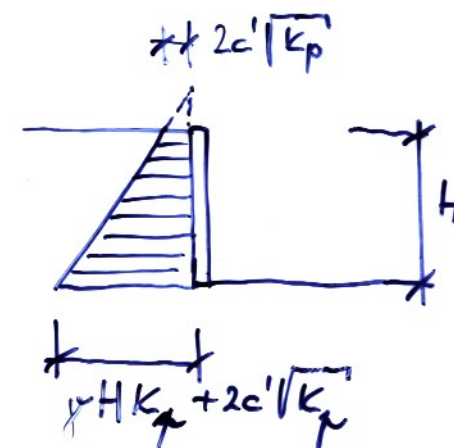
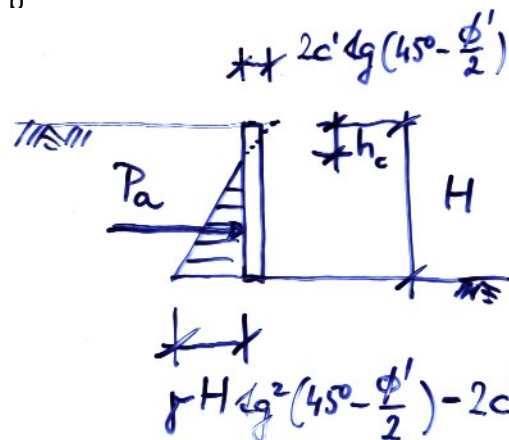
$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi_{cr}') = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a$$

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2(45^\circ + \frac{1}{2}\varphi_{cr}') = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p$$

Mezní síla na hladkou opěrnou stěnu (nulové tření na rubu stěny)

Odvozněné zatížení

Pevnost: $c' = c_p' \neq 0$, $\varphi' = \varphi_n' \neq 0$



Aktivní mezní stav:

$$H = H_c \text{ pro } \sigma_h' = 0$$

$$\gamma H_c K_a - 2c_p' \sqrt{K_a} = 0$$

$$H_c = 2c_p' / \gamma / \sqrt{K_a} \quad (= 2c_p' / \gamma \sqrt{K_p})$$

$$P_a = \frac{1}{2} (H - H_c) (\gamma H K_a - 2c_p' \sqrt{K_a})$$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - H c_p' \sqrt{K_a} - \frac{1}{2} \frac{2c_p'}{\gamma / \sqrt{K_a}} \gamma H K_a + \frac{1}{2} \frac{2c_p'}{\sqrt{K_a}} / \gamma \frac{2c_p'}{\sqrt{K_a}}$$

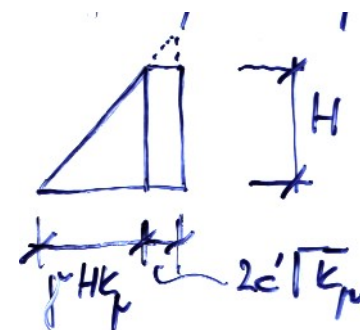
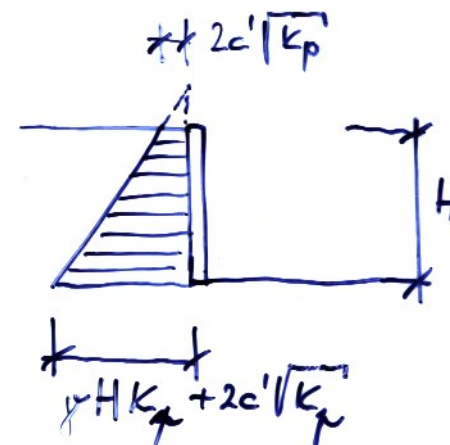
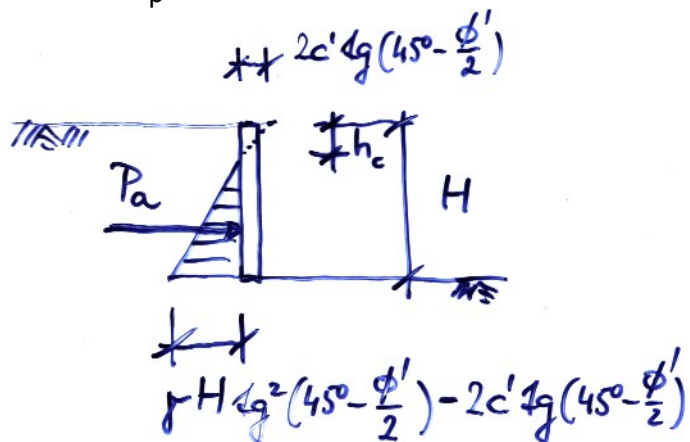
(zanedbání $2(c_p')^2/\gamma$)

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - 2 c_p' H \sqrt{K_a}$$

Mezní síla na hladkou opěrnou stěnu (nulové tření na rubu stěny)

Odvozněné zatížení

Pevnost: $c' = c_p' \neq 0$, $\varphi' = \varphi_p' \neq 0$



Vodorovná síla na 1 m délky hladké stěny

Aktivní mezní stav:

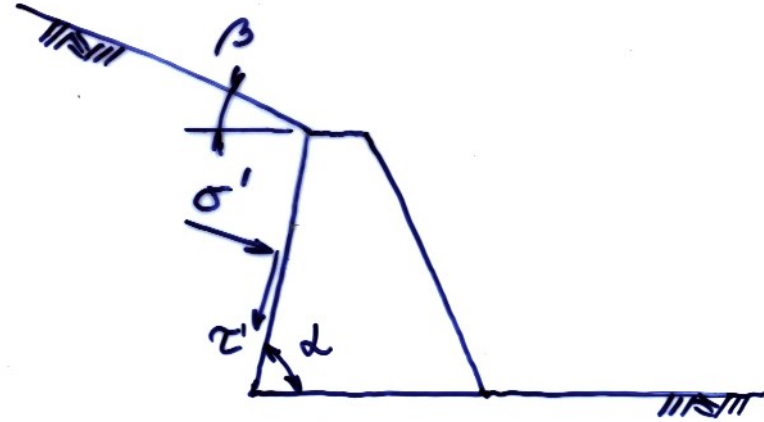
$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - 2 c_p' H \sqrt{K_a}$$

Pasivní mezní stav:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p + 2 c_p' H \sqrt{K_p}$$

Odvodněné zatížení

Pevnost φ_{cr}'



δ' tření na rubu zdi

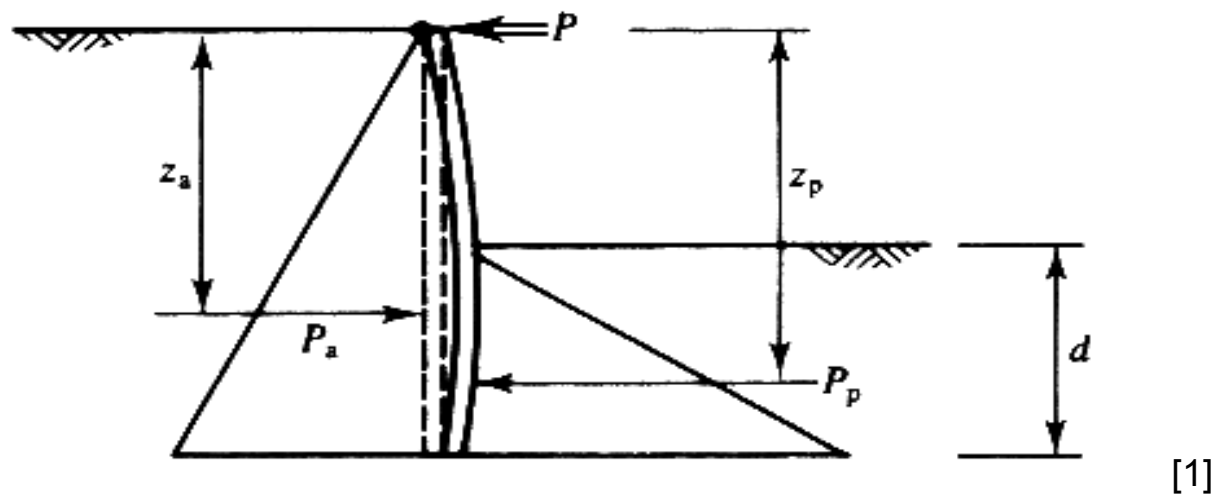
$$\delta' \approx \frac{2}{3} \varphi_{cr}'$$

sklon rubu α

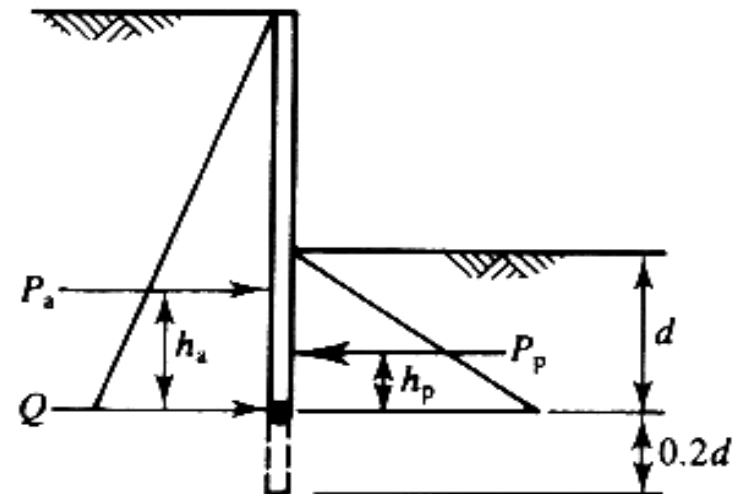
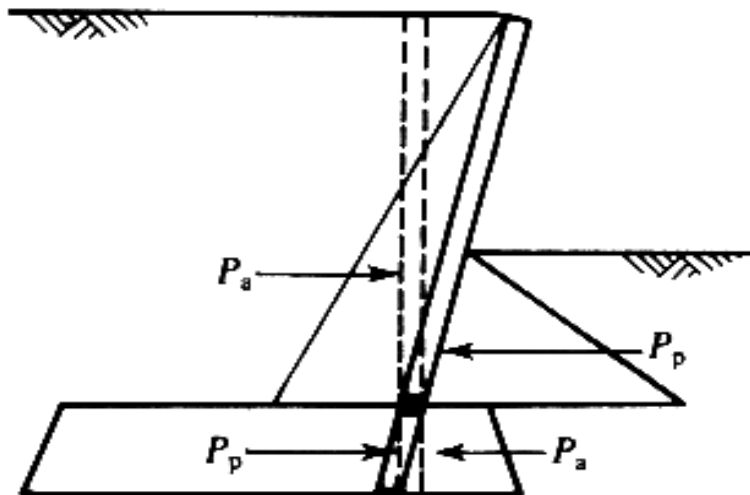
sklon terénu za zdí β

...tabulky K_a , K_p v závislosti na φ_{cr}' , α , β , δ' ...

Rozepřená stěna – zatížení zemním tlakem



Vetknutá stěna – zatížení zemním tlakem



[1]

1. Typ konstrukce:

konstrukce zajišťuje výkop – snížení stability s časem – odvodněné působení rozhodující (česká terminologie: zárubní zed')

konstrukce zajišťuje násep – zvýšení stability s časem – neodvodněné rozhodující (česká terminologie: opěrná zed')

2. Kterou pevnost použít?

neodvodněné (pro krátkodobou stabilitu nasycené zeminy): s_u

odvodněné (dlouhodobá stabilita)

vrcholová pevnost – „parametry“ φ_p' c_p'

pevnost v kritickém stavu – parametr φ_{cr}'

pevnost v reziduálním stavu – parametr φ_r'

Pro řešení odvozená za předpokladu plastického chování je teoreticky oprávněné použití pevnosti v kritickém stavu, nikoliv vrcholové

Pro analýzu globální stability při tuhé opěrné konstrukci se ale v praxi uvažují oba stavy zeminy – vrcholový φ_p' c_p' (s vyššími koeficienty (FS)) i kritický φ_{cr}' (nižší FS)

[1] Atkinson, J.H. (2007) The mechanics of soils and foundations. 2nd ed. Taylor & Francis.

Základní – povinná

Atkinson, J. H. (2007) The mechanics of soils and foundations. 2nd ed. Taylor & Francis.
(několik výtisků je v knihovně geologické sekce; první vydání (1993) lze najít na i-netu)
Odkaz na prezentace přednášek je na <http://natur.cuni.cz/~bohac/>

Rozšiřující (omezeně dostupná na oddělení IG)

Terzaghi, K, Peck, R.B. and Mesri, G. (1996) Soil mechanics in engineering practice. J. Wiley & Sons.

Tomlinson, M.J. (1995) Foundation design and construction. 6th ed, Longman/J. Wiley & Sons.

Fleming W.G.K., Weltman A.J., Randolph, M.F. and Elson, W.K. (1994) Piling engineering. 2nd ed. Blackie A&P.