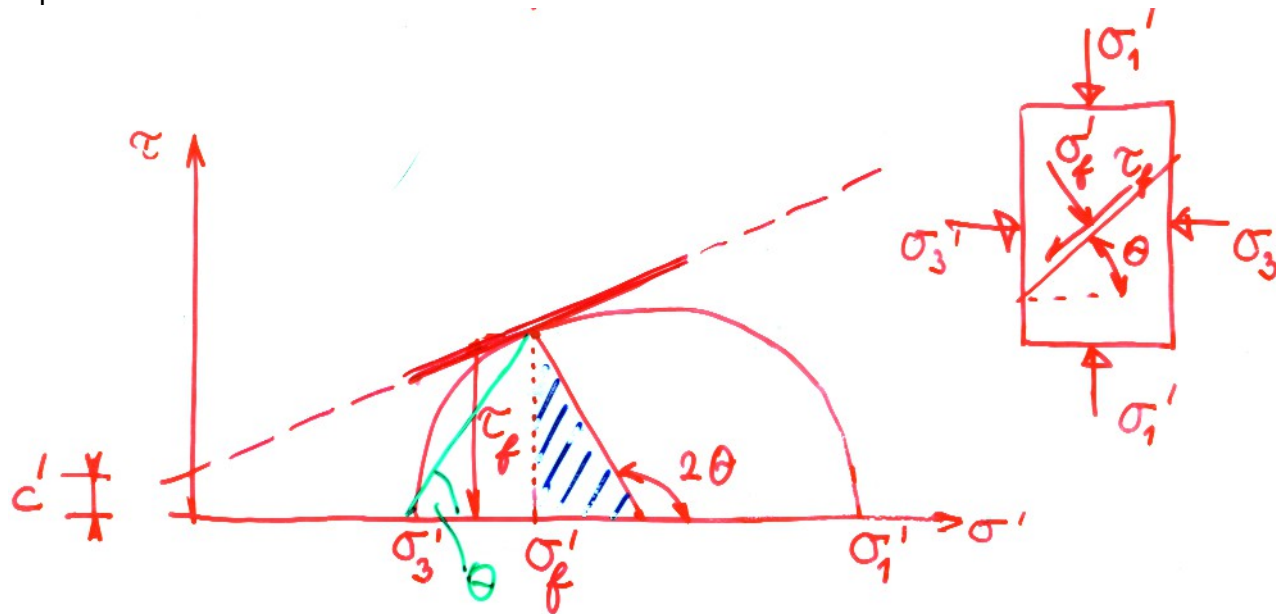

Mechanika zemin I

5 – Pevnost

1. Mohrova-Coulombova obálka pevnosti
2. Kritický stav – kritická pevnost
3. Reziduální pevnost
4. CSL v 3D
5. Neodvodněná pevnost
6. Vrcholová pevnost
7. Pevnost nenasycených zemin
8. Poznámky k interpretaci zkoušek

Mohr - Coulombova obálka

$$\tau_f = c' + \sigma_f' \operatorname{tg} \varphi'$$



$$\tau_f = \frac{1}{2} (\sigma_1' - \sigma_3') \sin 2\theta$$

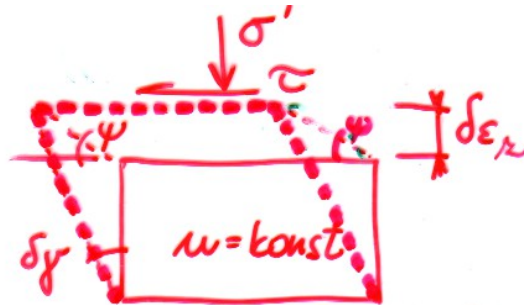
$$\sigma_f' = \frac{1}{2} (\sigma_1' + \sigma_3') + \frac{1}{2} (\sigma_1' - \sigma_3') \cos 2\theta$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{1}{2} \varphi'$$

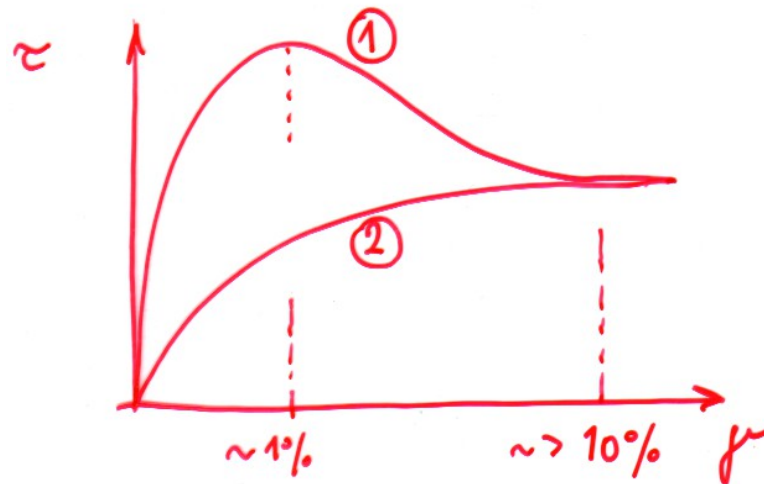
Pevnost

...chování zemin složitější:

1) dilatance

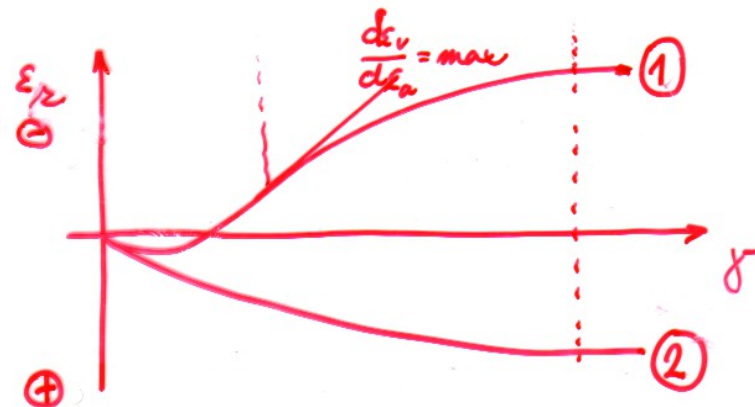


2) porušení = obecný pojem;
více možností, kdy
dochází k „porušení“



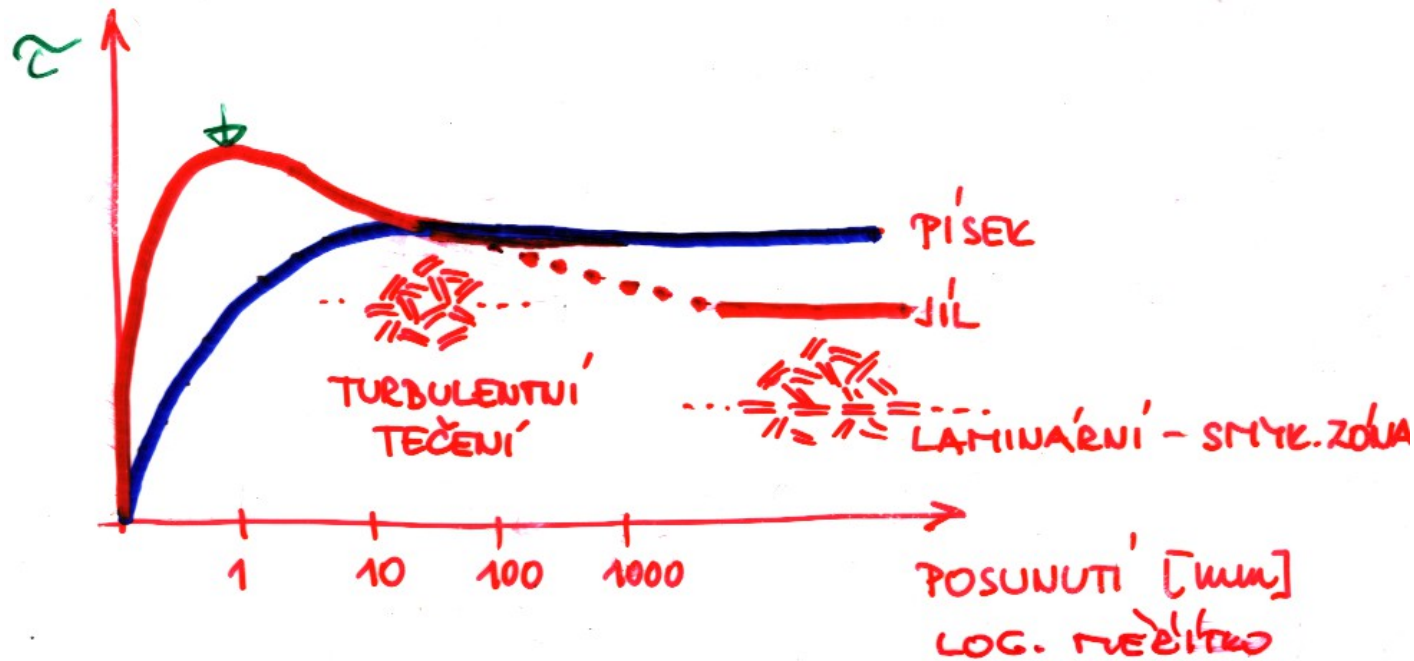
--- VRCHOLOVÁ P.
--- KONEČNÁ P.
(KRITICKÝ STAV)

3) Charakteristická je pro
zeminy (part. látky)
korespondence vrcholové
pevnosti a maximálních
objemových změn



Definice kritického stavu

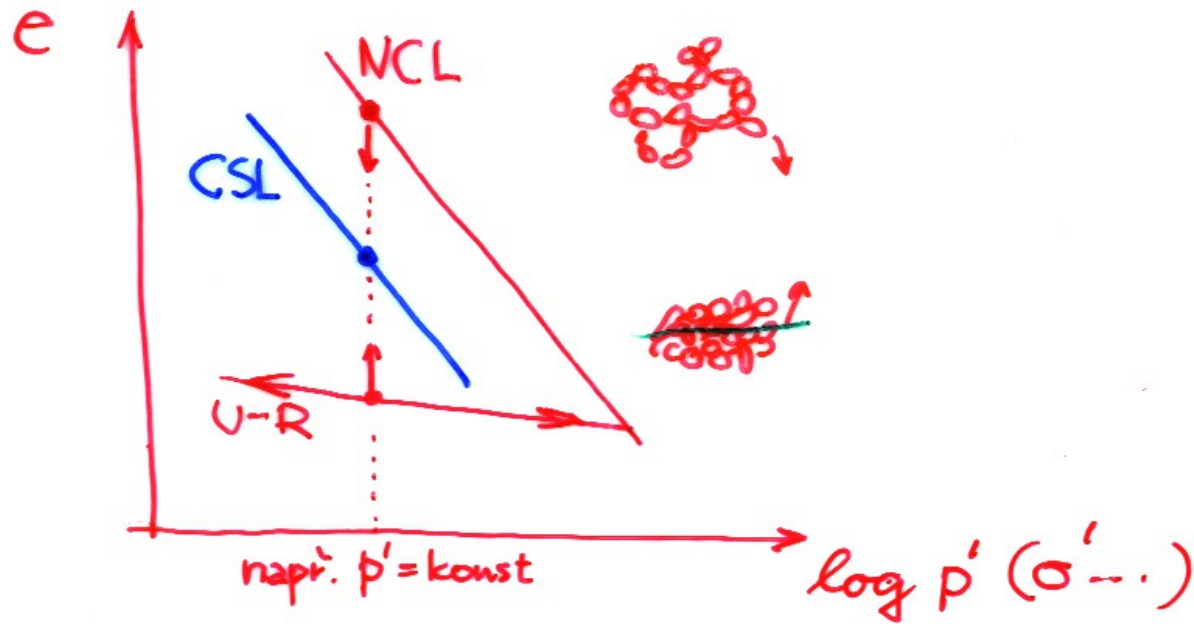
...při smykové deformaci se zemina nakonec (vždy) dostane do jednoznačně definovaného stavu, kdy dojde ke zplastizování \equiv tečení materiálu \equiv ideální plasticita \equiv **KRITICKÝ STAV**



Pozn k „vždy“: v praxi může být dosažení kritického stavu znemožněno podmínkami zatěžování – např. „lokalizace přetvoření“ při laboratorní zkoušce, kdy dojde k vytvoření smykové plochy oddělující dvě smykající se tuhá tělesa a zkoušený vzorek nedosáhne (přesně) kritického stavu.

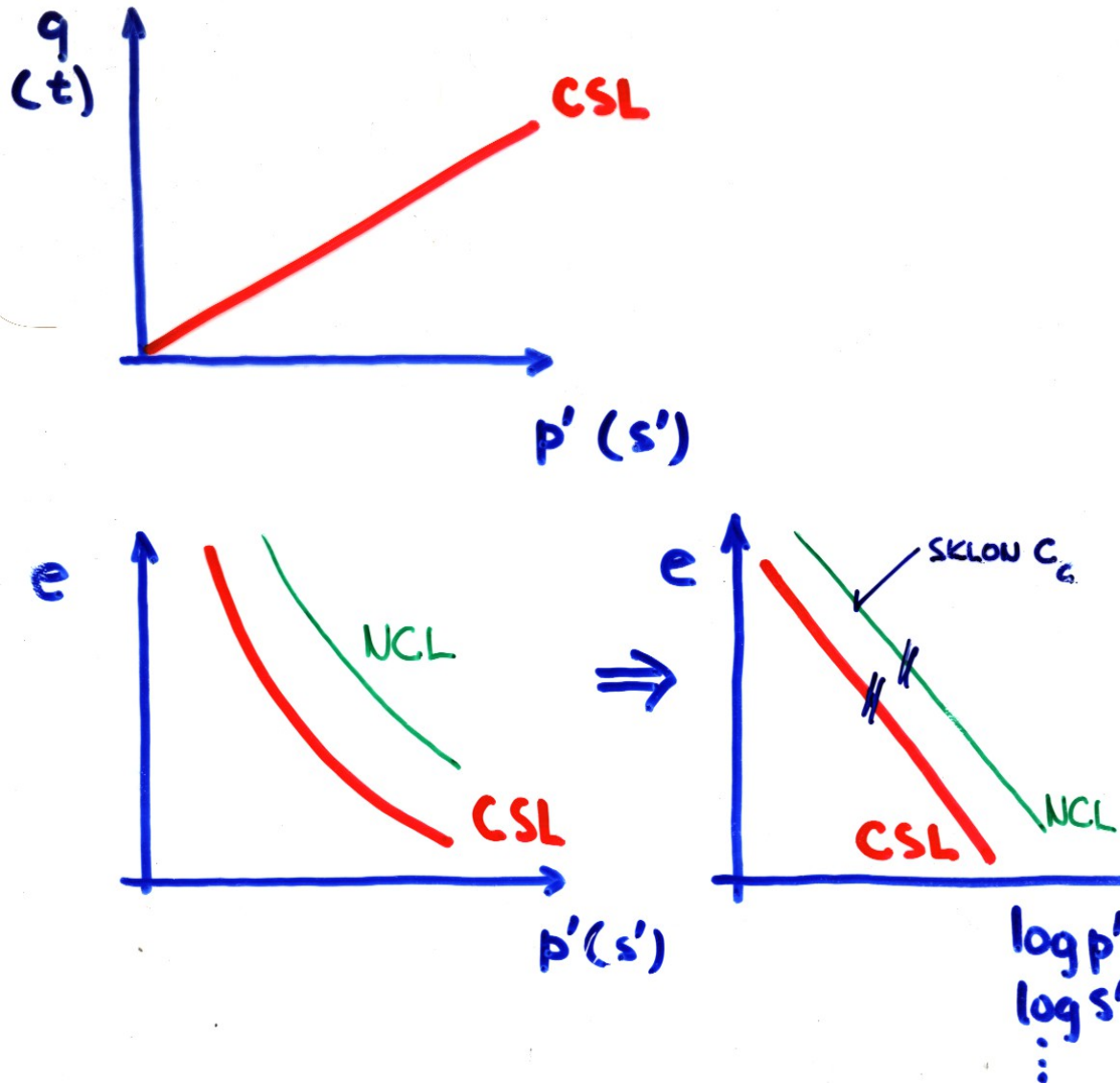
Definice kritického stavu

Kritický stav (smyk) je svázán se změnou objemu (stlačitelností):



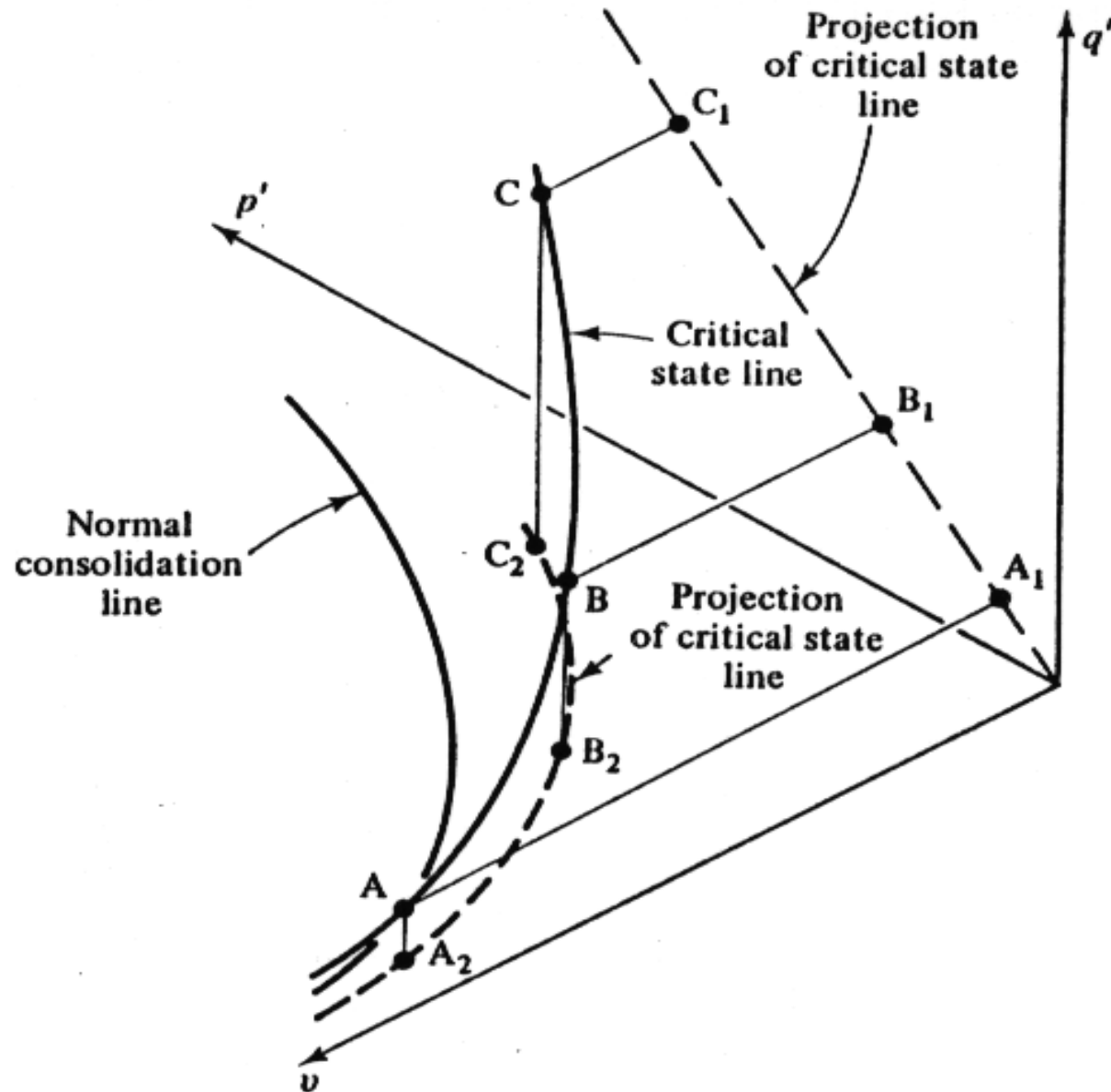
Definice kritického stavu

Kritický stav (smyk) je svázán se změnou objemu (stlačitelností):



NC rekonstituovaná zemina (jíl)

Kritický stav (smyk) je svázán se změnou objemu (stlačitelností):



[1]

Definice kritického stavu

Detailní pohled na průběh smyku: pevné částice při přetváření – stochastický proces, neuspořádaný pohyb částic...i degradace částic (drcení a pod.).

Celkově – bez ohledu na detail – **kontinuální proces – tečení** – disipace energie v procesu
- **TŘENÍ** - *to popisuje rovnice $q=Mp'$.*

Detail: při přetváření se mění vzdálenosti jednotlivých částic - stochasticky.

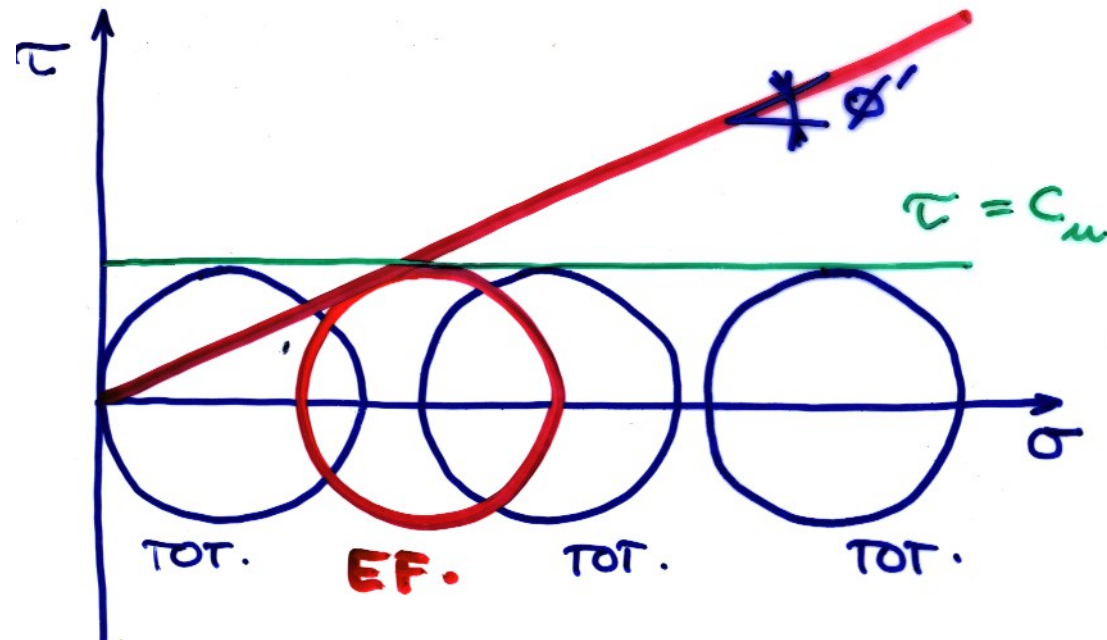
Celkově - děj lze charakterizovat **snižujícím se v** (specifický objem v = objem zeminy, v níž je jednotkový objem pevných částic) – **OBJEMOVÁ ZMĚNA – STLAČENÍ** - *to popisuje změna objemu zeminy do konečného stavu $\Gamma=v+\lambda \ln p'$.*

Koncepce kritických stavů popisuje na „fenomenologické“ (makro-) úrovni složité mikrostrukturní děje.

Odvozena pro „pastu“ = „**rekonstituovanou**“ **zeminu**, je ale podkladem obecné teorie pro popis mechanického chování zemin.

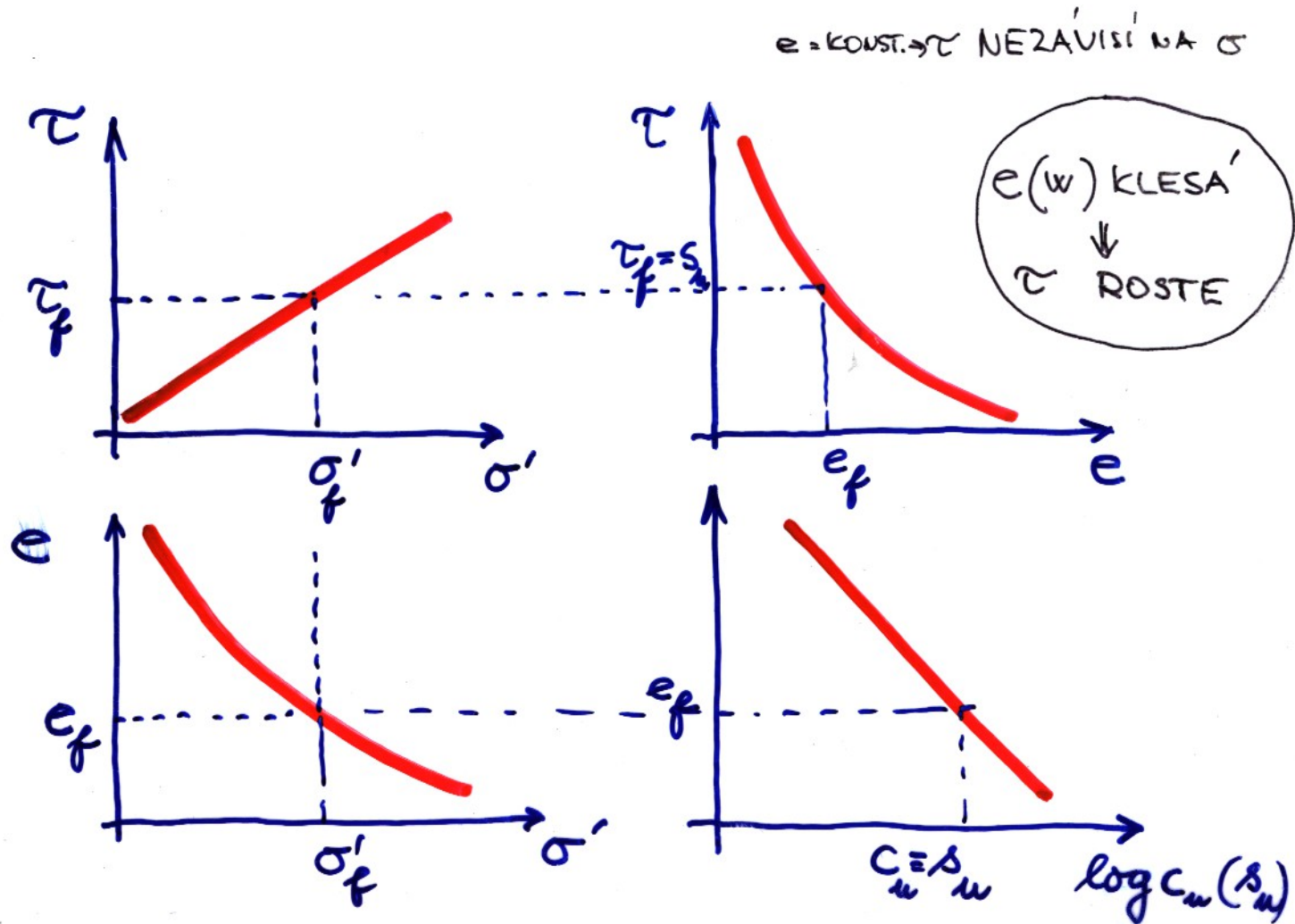
Neodvodněná pevnost

$S=1$; neodvodněné zatížení $\leftrightarrow w=\text{konst}$ (tj $n=\text{konst}$; $e = \text{konst}$; ...)

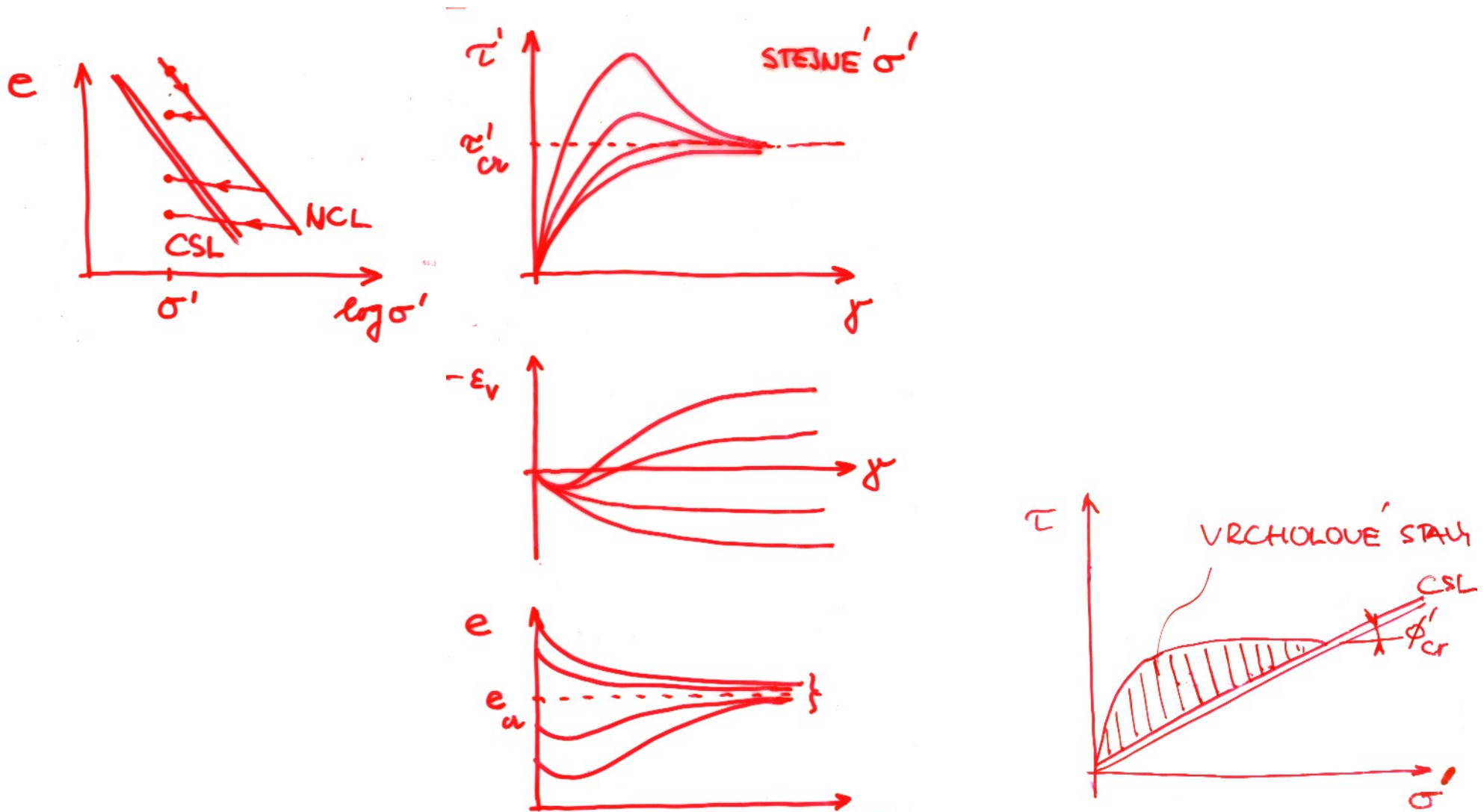


Neodvodněná pevnost

$S=1$; neodvodněné zatížení $\leftrightarrow w=\text{konst}$ (tj $n=\text{konst}$; $e = \text{konst}$; ...)



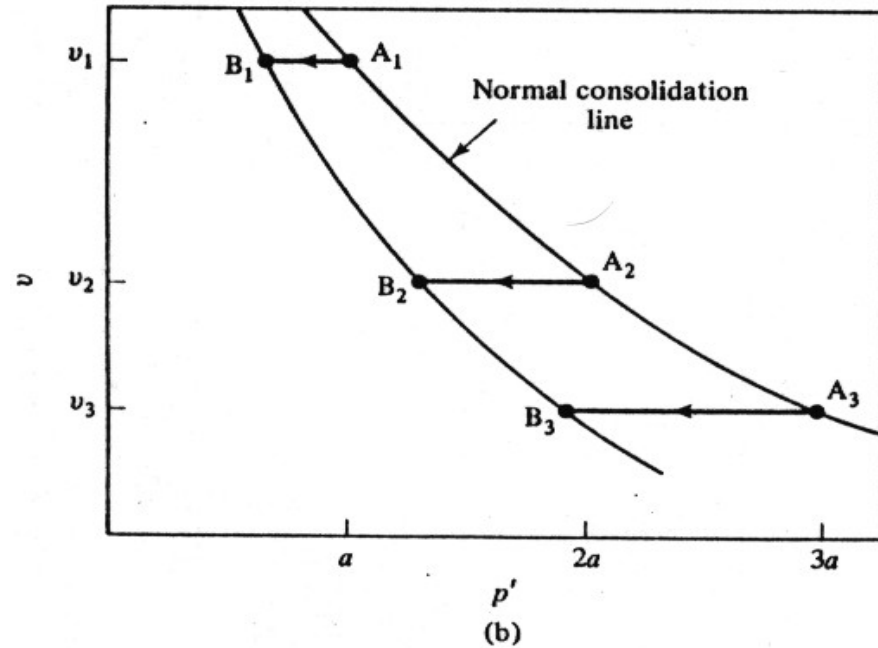
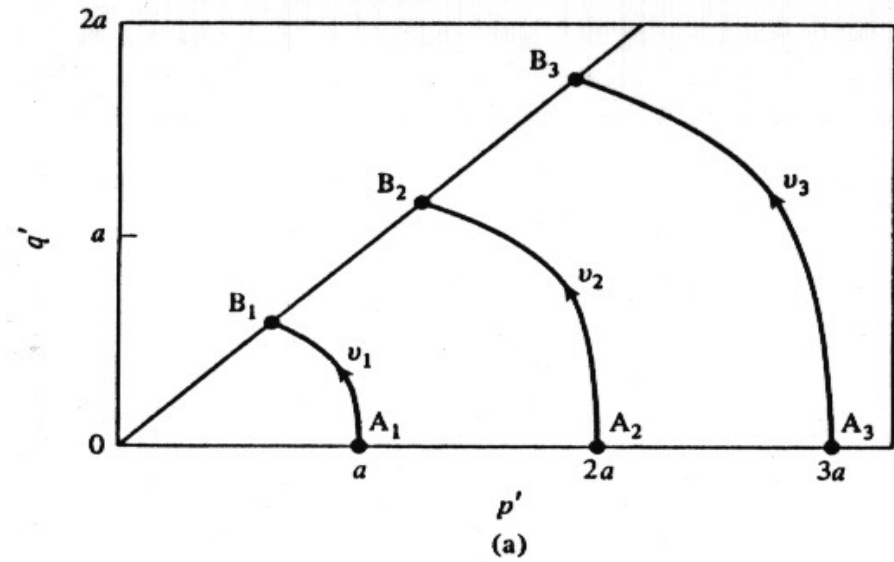
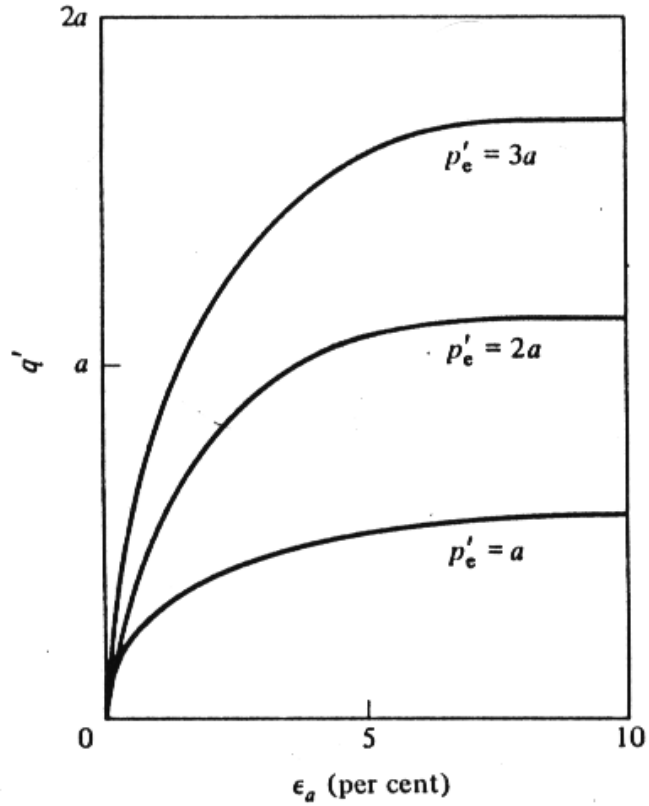
NC (kyprá) vs OC (ulehlá) zemina:



→ vzhledem k závislosti na stavu (e) potřeba „normalizace“

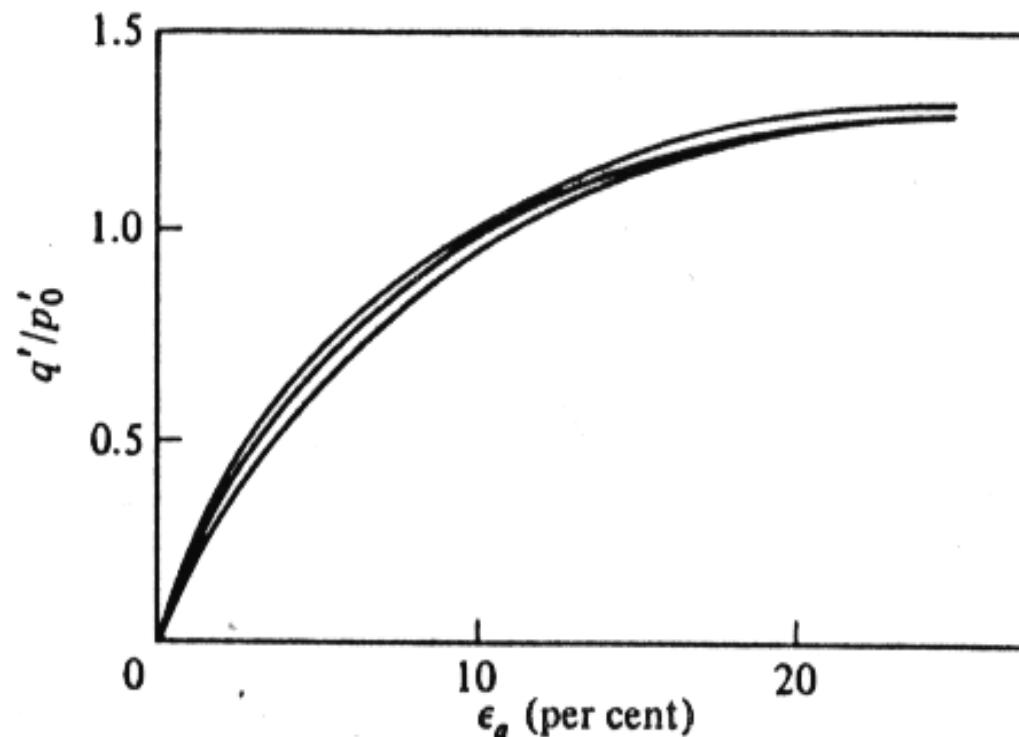
Série nedrénovaných 3ax zkoušek

NC při $p'=a$; $2a$; $3a$



Série nedrénovaných zkoušek

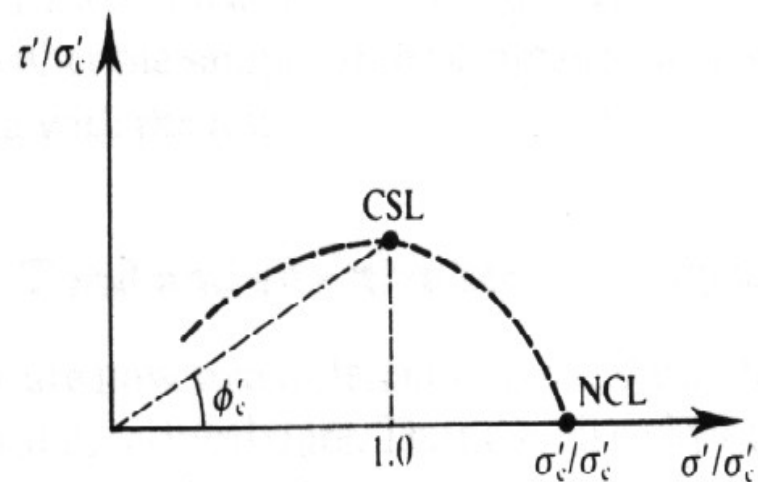
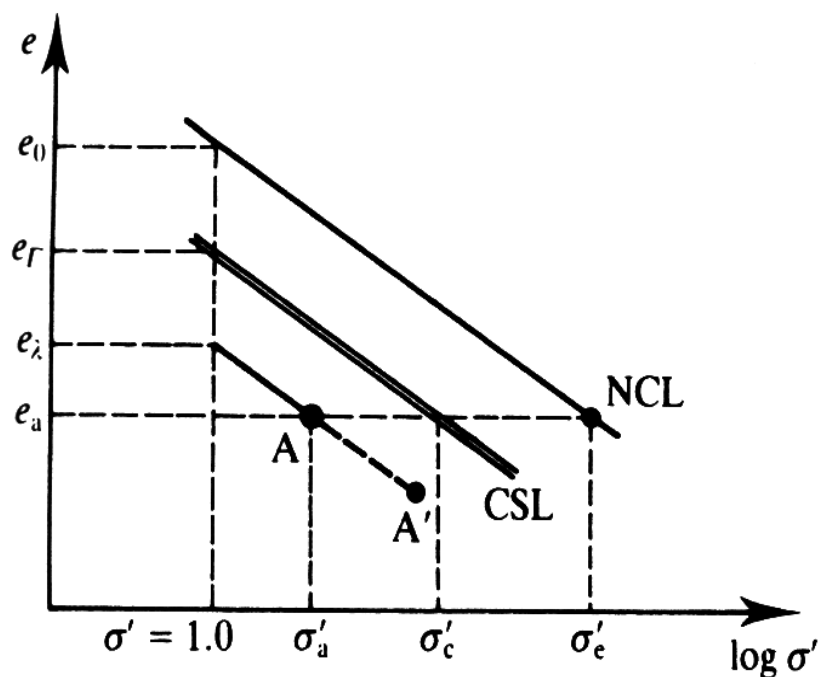
NC při $p'=a$; $2a$; $3a$



Čáry napětí vs přetvoření mají podobný průběh; při vhodném bezrozměrném zobrazení \pm splynou (\rightarrow tzv. normalizace)

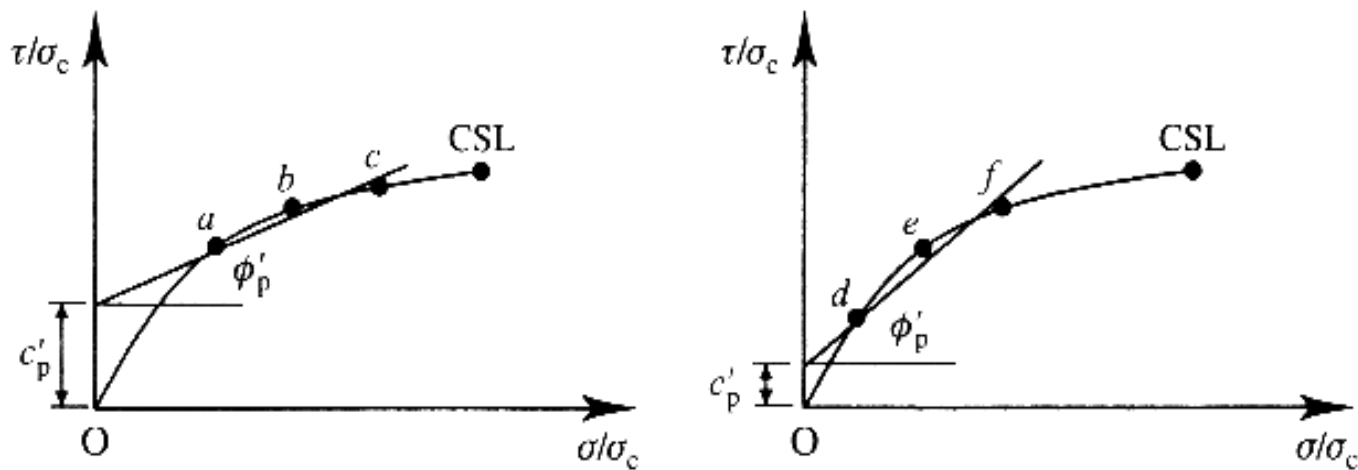
V takovém případě je chování různých vzorků fyzikálně izomorfní (identické)

Vrcholová pevnost → normalizace (← snaha vyloučit vliv e na zobrazení/rovnice)



$$\log \sigma'_c = (e_\Gamma - e_a) / C_c$$

[2]

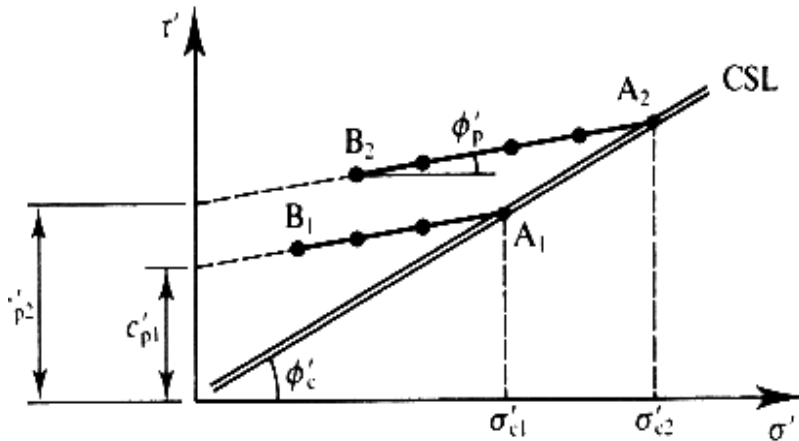


[2]

Přes normalizaci přímka nevystihuje dobře vrcholovou (= zakřivenou) MC obálku:

c'_p a ϕ'_p závisejí na úrovni napětí (na intervalu, v němž provedeny zkoušky) – nejsou materiálové parametry

Vrcholová pevnost – několik sérií zkoušek se shodným e (w) při porušení („Hvorslevova pevnost“)

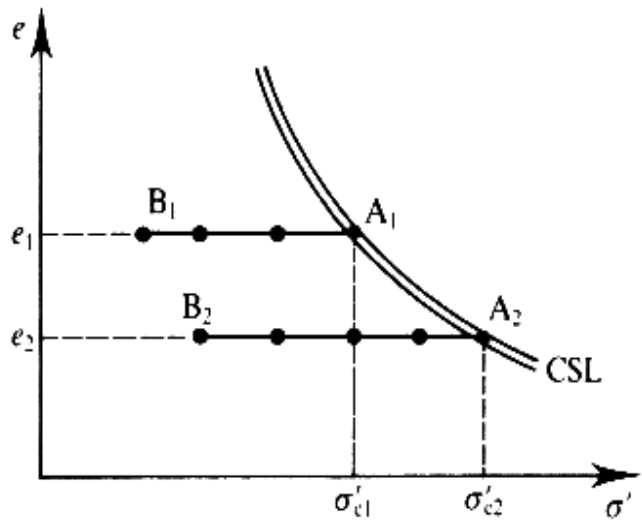


$$\tau_p' = c_p'(e) + \sigma_p' \operatorname{tg} \varphi_p'$$

φ_p' nezávisí na stavu (e)

Platí jen pro série zkoušek se stejným e_{fin} („Hvorslev“)

$c_p'(e)$ roste s klesajícím e – není parametrem



[2]

Vrcholová pevnost – několik sérií zkoušek se shodným e (w) při porušení („Hvorslevova pevnost“)

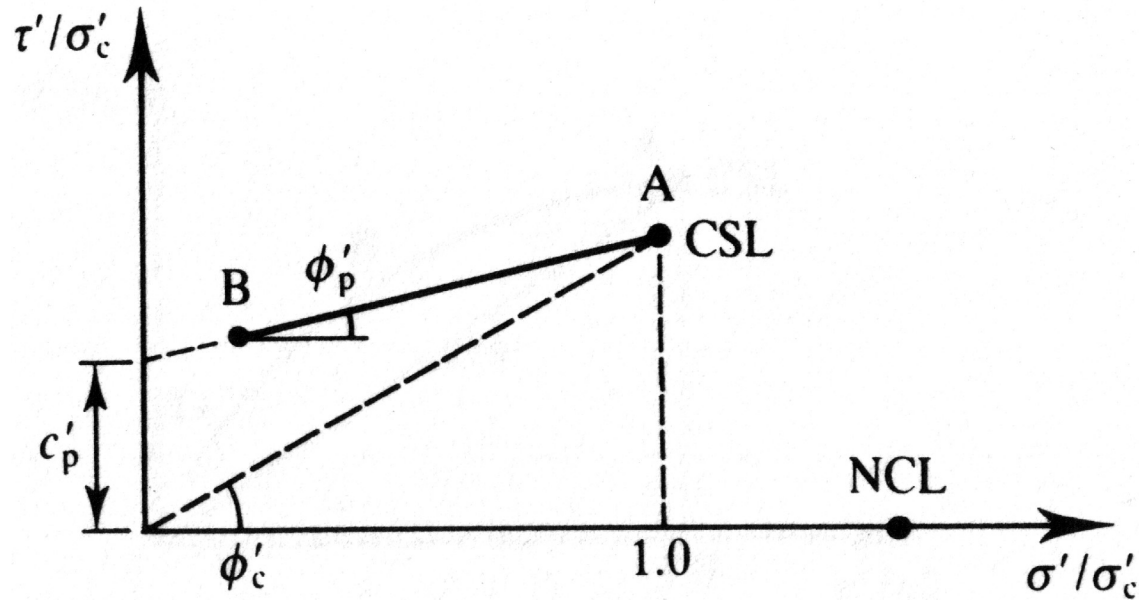
M-C rovnice:

$$\tau_p' = c_p'(e) + \sigma_p' \operatorname{tg} \varphi_p'$$

$c_p'(e)$ je relevantní pro vrcholovou pevnost u jílu i hrubozrnných zemin → nevyplývá z existence přitažlivých sil mezi zrny (částicemi)

$c_p'(e) =$ úsek na svislé ose (vrcholová soudržnost) závisí na e ; v ; w ; n → není parametrem

Vrcholová pevnost – několik sérií zkoušek se shodným e (w) při porušení („Hvorslevova pevnost“) - **normalizace**



[2]

Normalizace pomocí σ'_c : $c'_p = c'_p(e) / \sigma'_c$

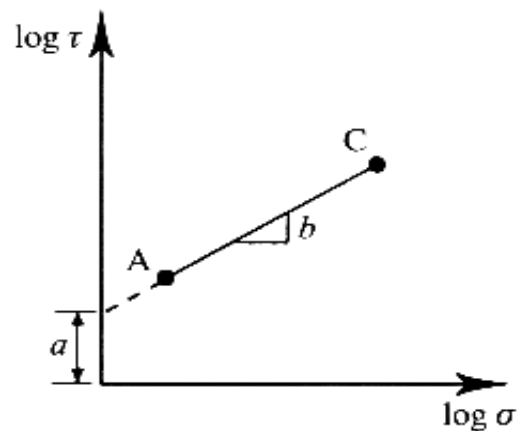
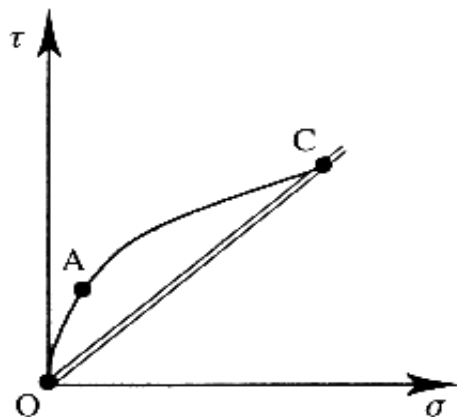
Z obrázku plyne: $c'_p = \text{tg}\phi'_c - \text{tg}\phi'_p$, tj. c'_p , ϕ'_p jsou navzájem závislé

$$\tau'_p/\sigma'_c = c'_p + \sigma'_p/\sigma'_c \text{tg}\phi'_p = (\text{tg}\phi'_c - \text{tg}\phi'_p) + (\sigma'_p/\sigma'_c) \text{tg}\phi'_p$$

Pokud je normalizovaná obálka dobře aproximována přímkou

→ c'_p , ϕ'_p nezávislé na e – materiálové parametry

Vrcholová pevnost → **mocninná funkce**



[2]

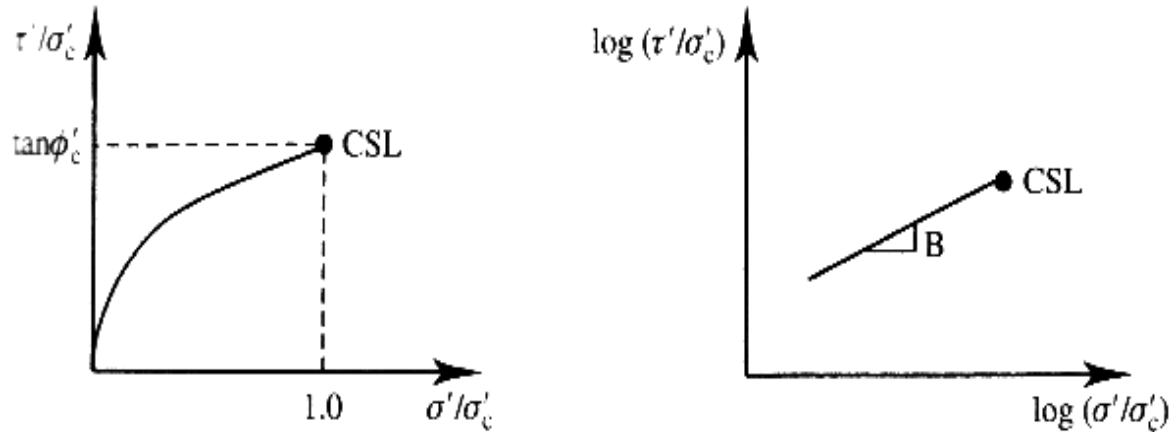
Vrcholová obálka je zakřivená, protože necementované zeminy mají $c = 0$ pro $\sigma' = 0$

$$\tau_p' = a \sigma_p'^b$$

$$\log \tau_p' = \log a + b \log \sigma_p'$$

a, b jsou parametry závislé na stavu (na w, e atd...)

Vrcholová pevnost → **mocninná funkce** - **normalizace**



[2]

Normalizace:

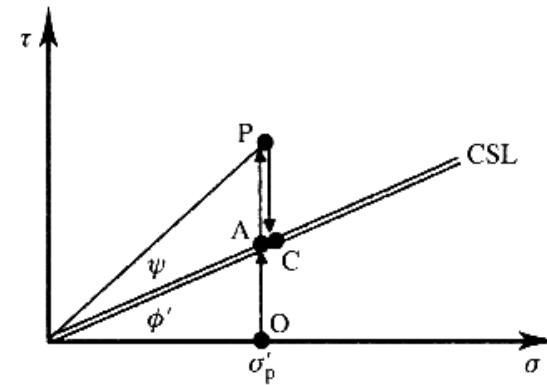
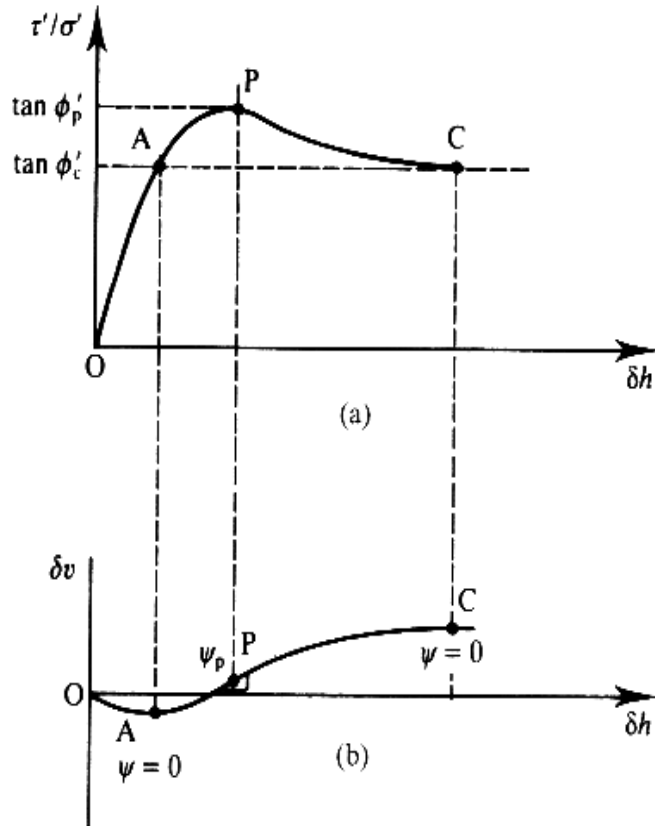
$$\tau_p'/\sigma'_c = A (\sigma_p'/\sigma'_c)^B = \tan \phi'_c (\sigma_p'/\sigma'_c)^B$$

$$\log(\tau_p'/\sigma'_c) = \log(\tan \phi'_c) + B (\sigma_p'/\sigma'_c)$$

B je materiálový parametr (konstanta; závisí pouze na zrnech, nikoliv na stavu)

Vrcholová pevnost

Vrcholová pevnost → „**sečný vrcholový úhel vnitřního tření**“ - mobilizovaný vrcholový úhel vnitřního tření včetně vlivu dilatance

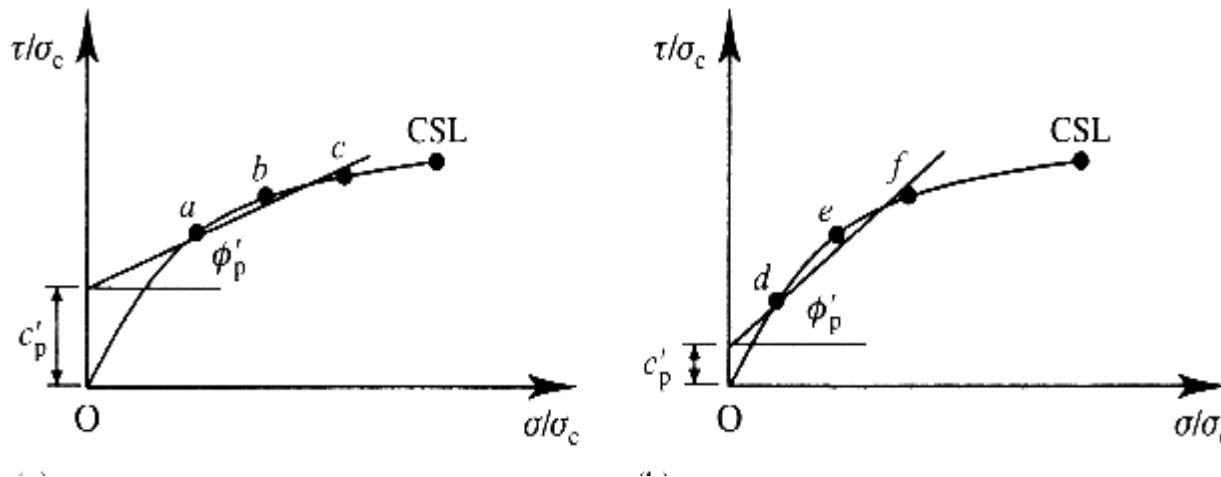


[2]

$$\tau'/\sigma' = \text{tg} (\phi'_c + \psi_p)$$

Vrcholová pevnost – shrnutí - interpretace výsledků zkoušek

Celkem tři interpretace vrcholové pevnosti, v praxi většinou používána ta **nejméně vhodná** - M-C přímka:



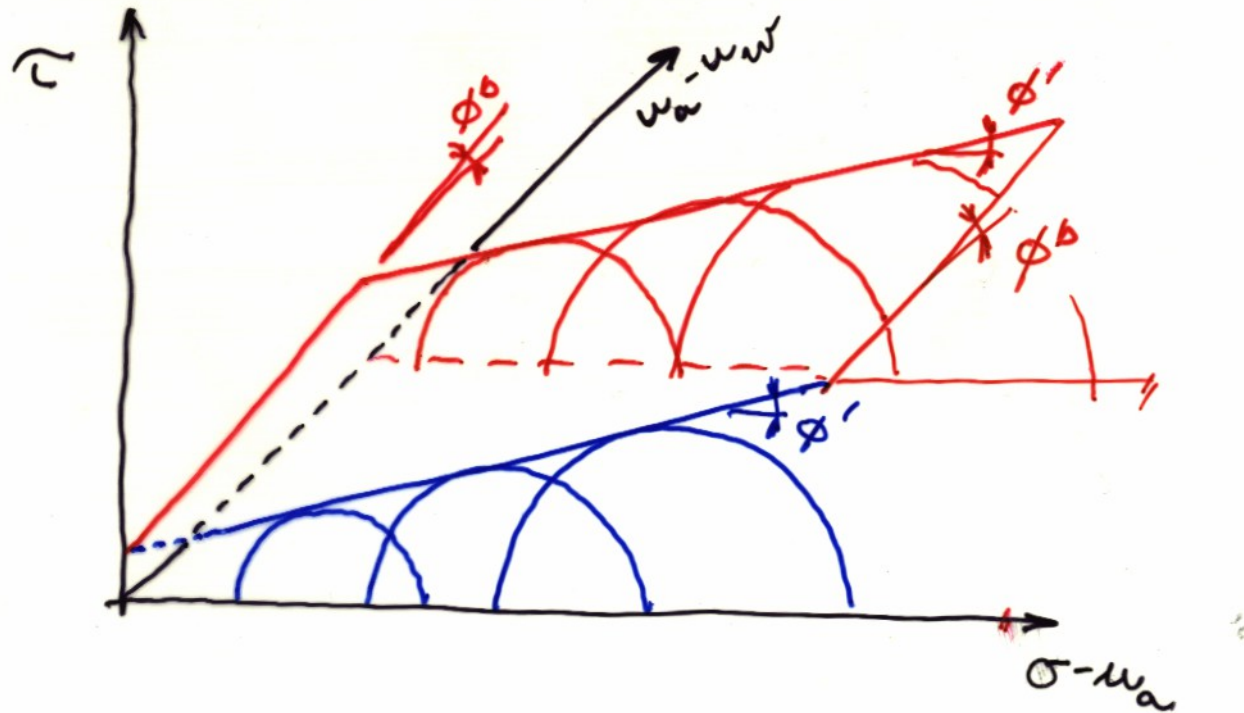
φ'_p c'_p = vrcholová pevnost **závisí na w ; e ; na úrovni σ'**

→ není skutečným parametrem

→ **NELZE JI TABELOVAT** (např. v normách apod)

Tzv. rozšířená obálka („redukované napětí“ $\sigma - u_a$; kapilární sání; smyk. napětí):
zjednodušená představa

- rovina porušení (φ' a φ^b konstanty; $\varphi^b < \varphi'$)
- neplatí Terzaghiho věta o ef. napětí

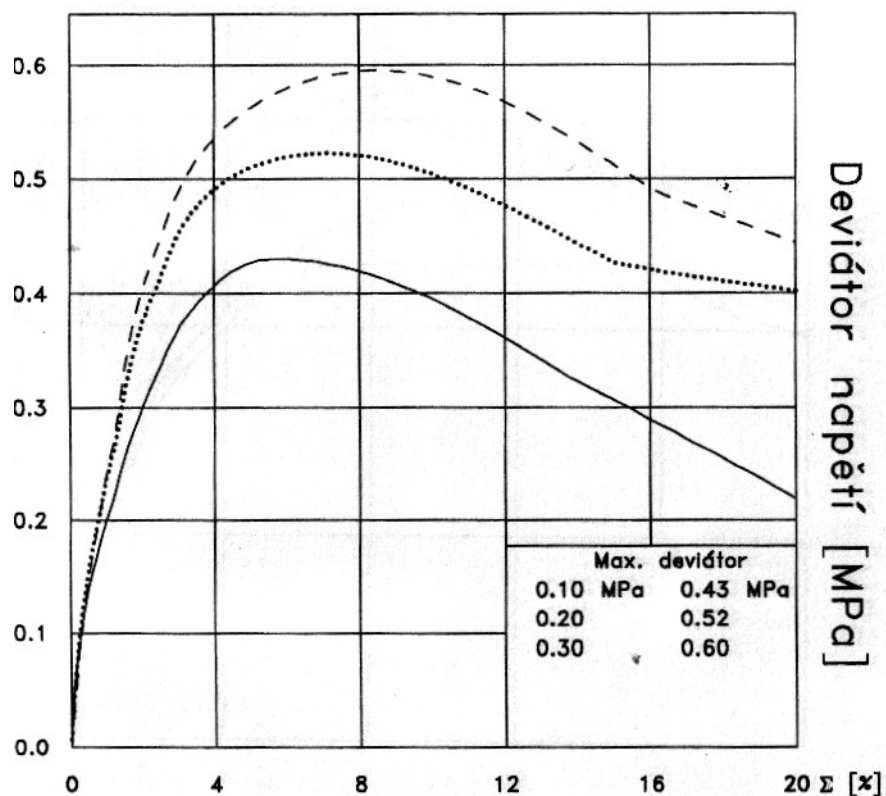


$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \operatorname{tg}\varphi' + (u_a - u_w)_f \operatorname{tg}\varphi^b$$

Interpretace výsledků zkoušek - "totální parametry"

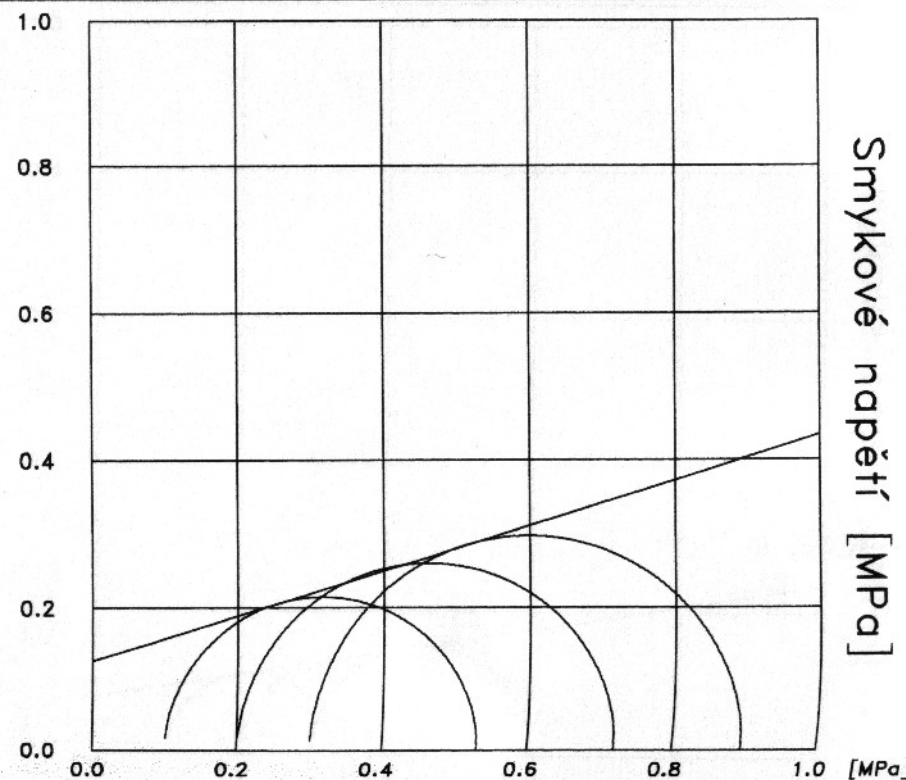
„UU“ trojosé zkoušky na jemnozrnné zemině:
MV(F7), $I_p=39$, $w_L=75$, $S_r=0,98$

TRIAXIÁLNÍ SMYKOVÁ ZKOUSKA podvodněná, nekonsolidovaná – typ UU



Parametry totální smykové pevnosti

Soudržnost c_u	:	0.13 [MPa]
$\text{tg } \phi_u$:	0.31
Úhel vnitřního tření ϕ_u	:	17.02 °
Obor platnosti ϕ_u	:	0.25 - 0.51 [MPa]

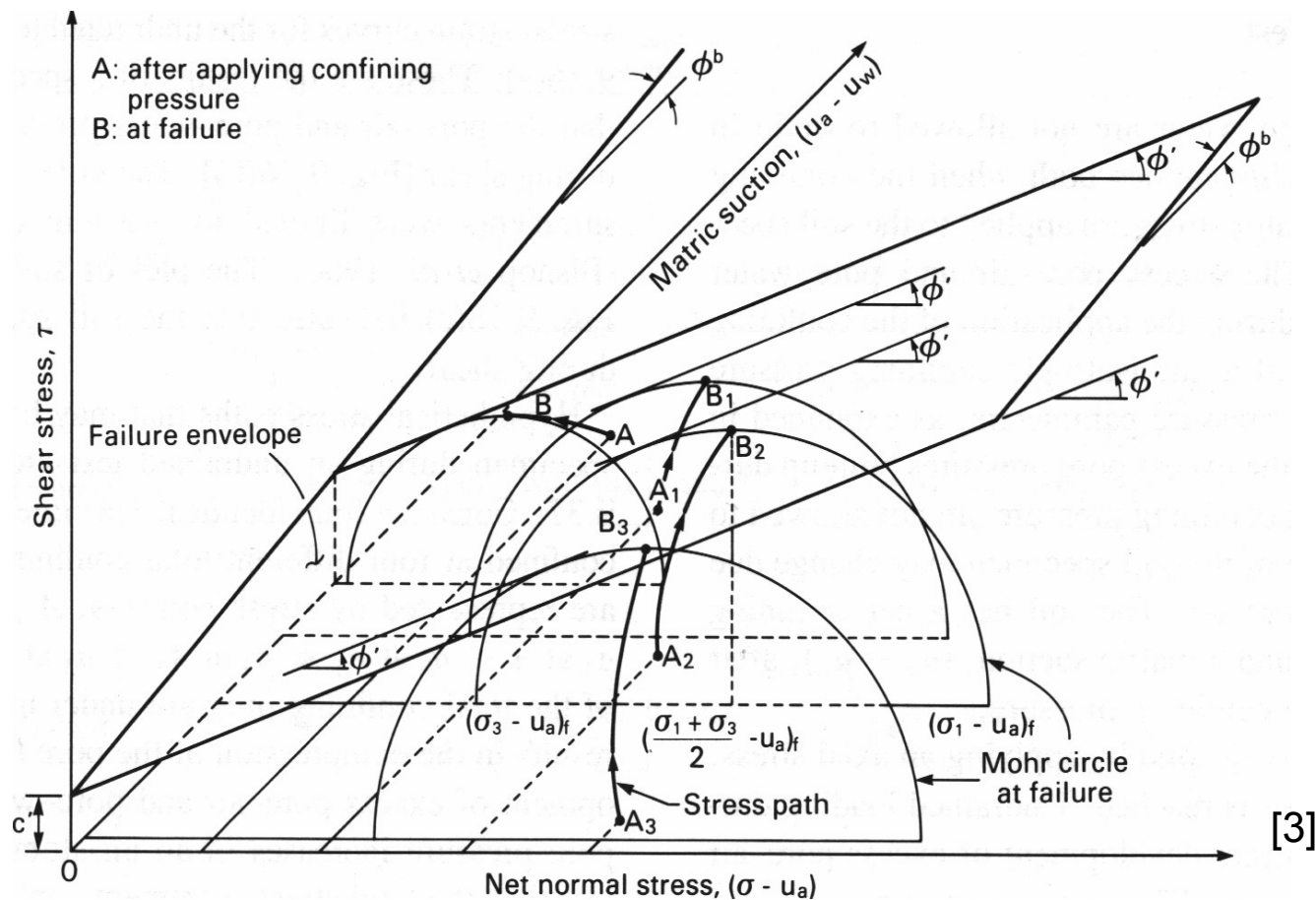


[nejmenovaná zpráva o geotechnickém průzkumu]

Interpretace výsledků zkoušek - “totální parametry”

Pevnost nenasycené zeminy při nedrénovaném smyku (\approx nasycených 3ax UU, resp. CU)

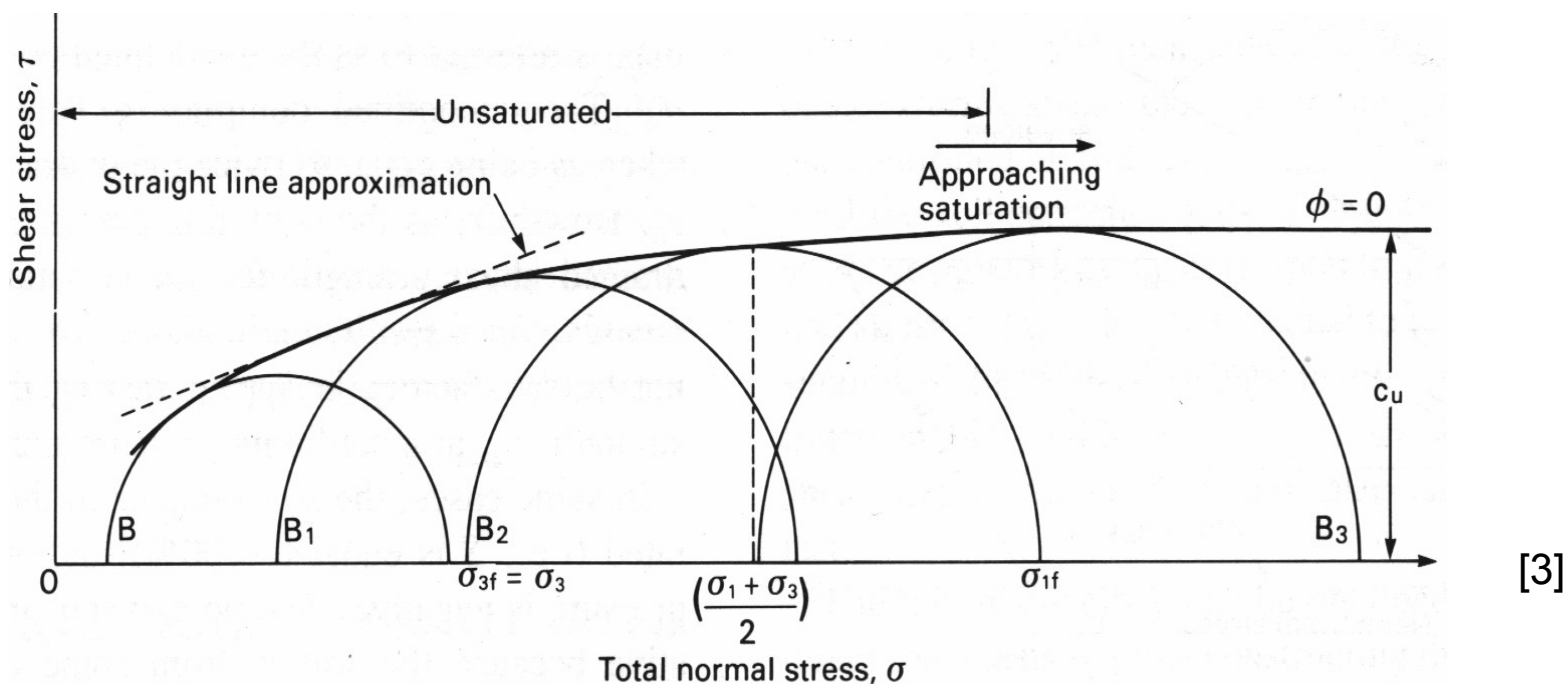
$B < 1 \rightarrow \Delta u < \Delta \sigma$; různé $\Delta(u_a - u_w)$ pro různá $\sigma_3 \rightarrow$ různé počáteční stavy A-A₃ původně identických vzorků
při smyku další $\Delta u \rightarrow$ větší MK pro vyšší reduk. napětí ($\leftarrow \phi^b < \phi'$)



Napětí při porušení (MK) lze místo k redukovanému napětí $\sigma - u_a$ vztáhnout i k totálnímu normálovému napětí

Pevnost nenasycené zeminy při nedrénovaném smyku – pokrač.

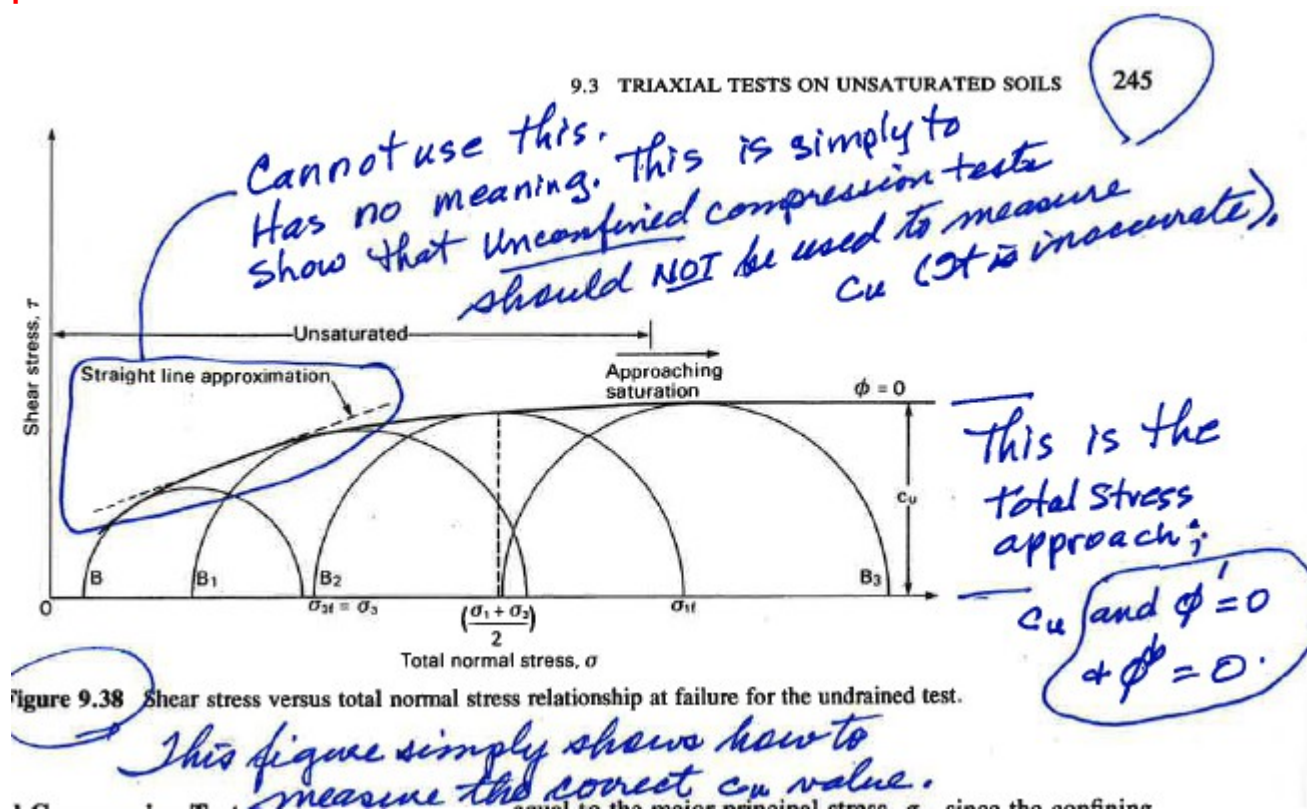
Napětí při porušení (MK) lze místo k redukovanému napětí $\sigma - u_a$ vztáhnout i k totálnímu normálovému napětí → pozice MK ale jiná než na předchozím obrázku
→ **naznačená přímková „obálka“ nemá fyzikální význam obálky pevnosti z předchozího obrázku**



nenасыená zemina / kavítace během zkoušky u překonsolidované zeminy

Interpretace výsledků zkoušek - "totální parametry"

„UU“ Obálky – pokrač.

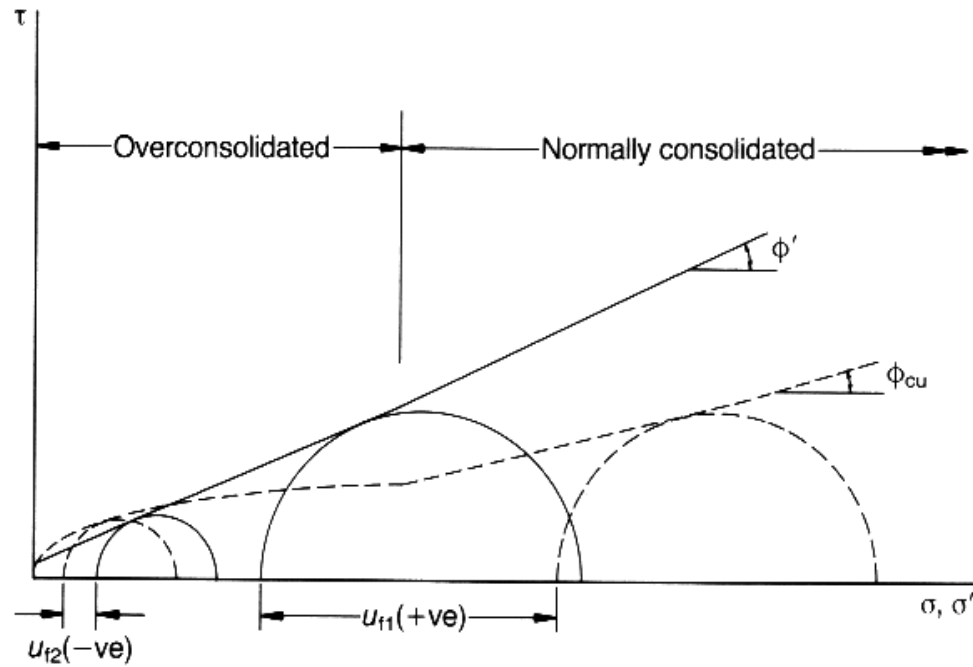


„ ϕ_u c_u “ obálka z neodvodněné zkoušky (v praxi tzv. „totální parametry“ z trojosé zkoušky UU)

závisí na stavu zeminy w ; e i na rychlosti na zatěžování - nejde o parametry zeminy

pro nenasycenou zeminu, při zobrazení v rovině smykové vs totální norm. napětí nemá fyzikální smysl obálky pevnosti

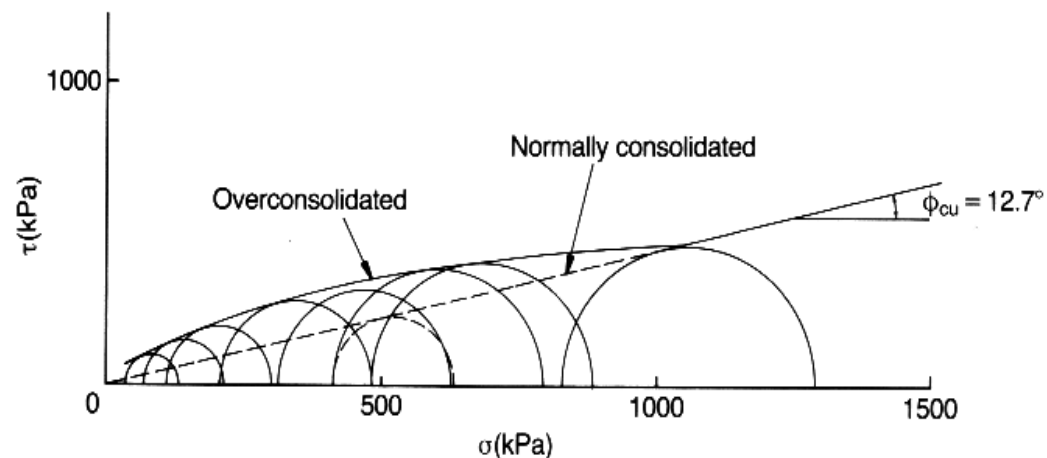
„CU“ Obálky - trojose zkoušky CIU/CAU nasycených zemin



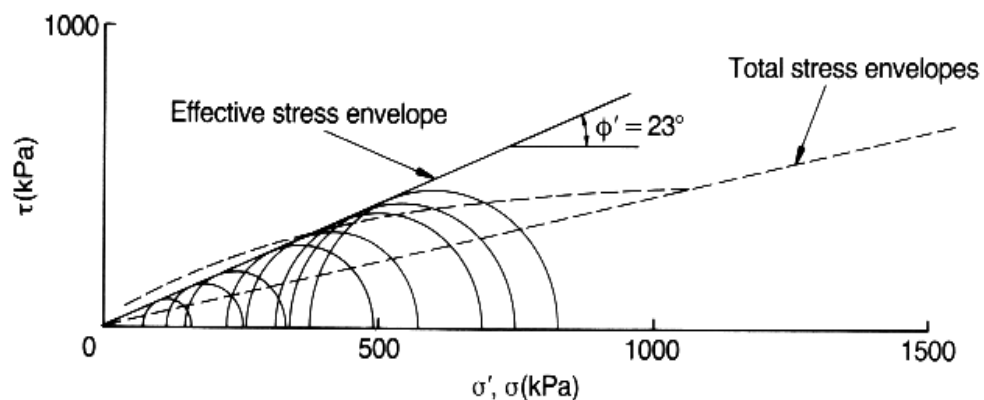
[4]

„CU“ Obálky - trojsové zkoušky CIU/CAU nasycených zemin

„Prohnětený“ jí (Weald clay) - izotropně konsolidovaný, OC i NC vzorky:



(a)

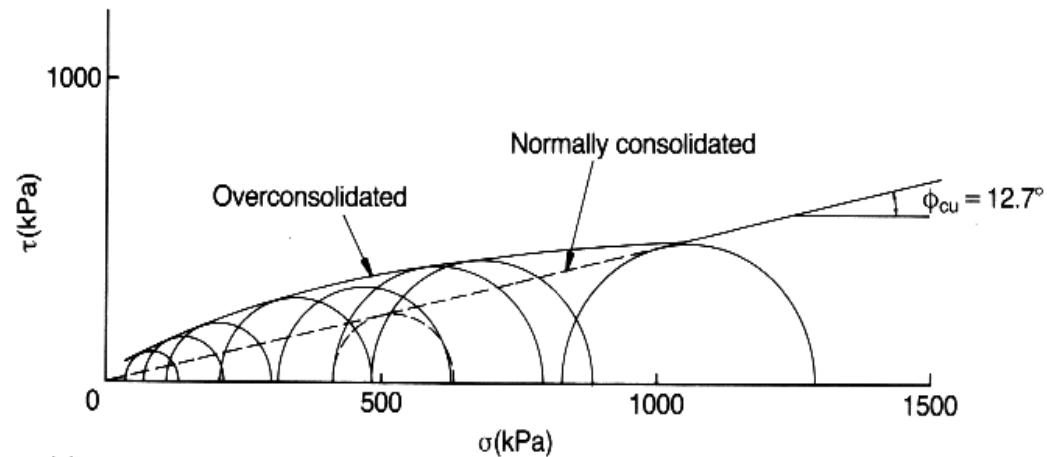


(b)

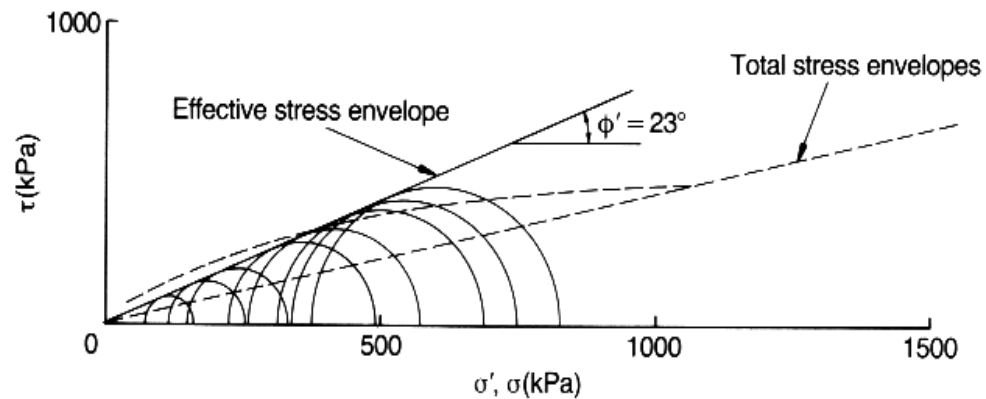
[4]

„CU“ Obálky - trojsové zkoušky CIU/CAU nasycených zemin

„Prohnětený“ jí (Weald clay) - izotropně konsolidovaný, OC i NC vzorky:



(a)

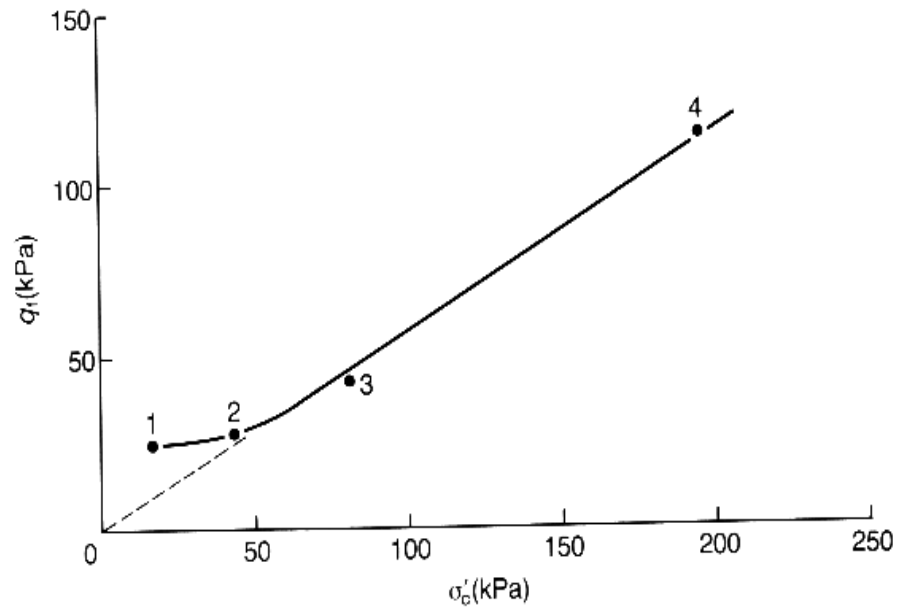


(b)

[4]

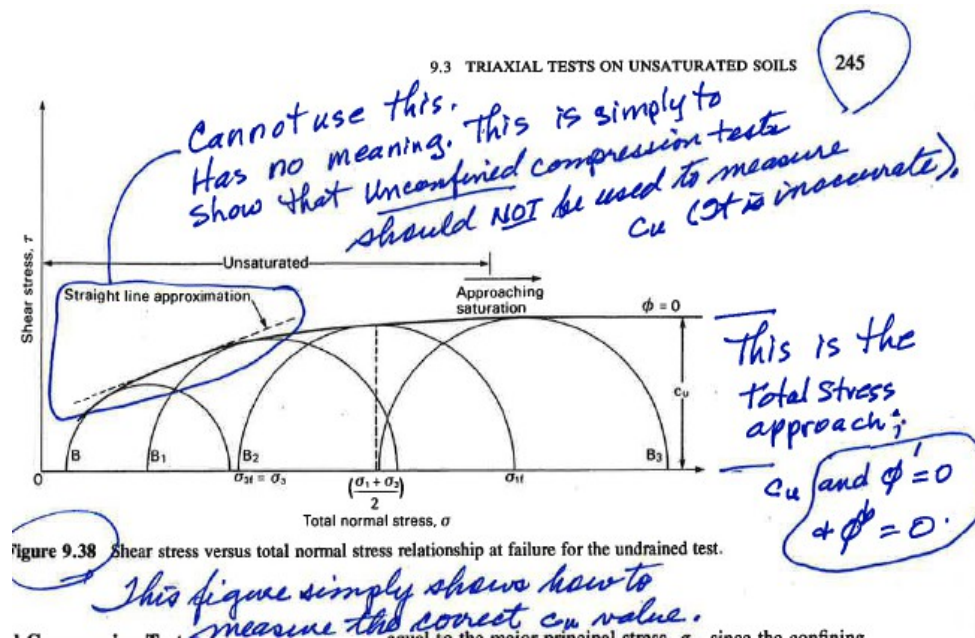
„CU“ Obálky - trojové zkoušky CIU/CAU nasycených zemin

- výsledky zkoušek nelze využít přímo jako obálku pevnosti do výpočtů
- jsou ale využitelné pro průběh neodvodněné pevnosti s_u s hloubkou, např:



[4]

UU, CU Obálky – shrnutí



Tzv. „totální parametry“ ϕ_u a c_u z trojosé zkoušky UU nebo CU)

závisí na stavu zeminy, na rychlosti zatěžování → nejsou materiálovými parametry (konstantami)

Navíc ale:

pro nasycené zeminy odporuje interpretace principu ef. napětí

pro nenasycené zeminy nemá fyzikální smysl pevnostní obálky (ignoruje napjatost nenasycené zeminy)

jediným racionálním parametrem v totálních napětích je s_u ($\phi_u \equiv 0$)

„ ϕ_u c_u “ obálka je nesprávnou interpretací zkoušek („empiricismus“)

Pevnost Interpretace výsledků zkoušek – typické hodnoty

φ_{cr}' = kritická pevnost = skutečný parametr (konstanta pro danou z.)

křemenný písek $\varphi_{cr}' = 32-35^\circ$

sprašová hlína ze středních Čech $\varphi_{cr}' = \text{cca } 32^\circ$

jíly – φ_{cr}' závisí na mineralogii, např: londýnský jíl $\varphi_{cr}' = \text{cca } 22^\circ$; brněnský tégl

$\varphi_{cr}' = \text{cca } 25^\circ$; nadložní jíly v SHR, např. v okolí Ústí n/L (Chabařovice)

$\varphi_{cr}' = \text{cca } 26^\circ \dots$; kaolin $\varphi_{cr}' = 25-27^\circ \dots \text{atd} \dots$

φ_r' = reziduální pevnost = skutečný parametr (konstanta pro danou z.)

pouze pro jíly; závisí na mineralogii; $\varphi_r' \approx 1/2 \varphi_{cr}'$ (smektity ještě nižší)

s_u = neodvodněná pevnost - vždy $\varphi_u = 0$, i pro nenasycenou zeminu; s_u závisí na w ; e ;... (není skutečným materiálovým parametrem, konstantou)

při w_L $s_u \approx 2-3 \text{ kPa}$

při w_p $s_u \approx 200-300 \text{ kPa}$

„měkký jíl“ $s_u \approx 20 \text{ kPa}$

„tuhý jíl“ $s_u \approx 50 \text{ kPa} \dots$

Nelze ji tabelovat např. v normách aj.

...tzv. „totální parametry pevnosti“ ($\varphi_u \neq 0$; c_u) z 3ax zkoušek UU nebo CU nejsou žádnými parametry, nemají použití v praxi; pozůstatek empiricismu z počátků MZ (1/2 20. století) \equiv znak zastaralé/chybné mechaniky zemin...

φ_p' c_p' = vrcholová pevnost závisí na w ; e ;... σ' (není skutečným parametrem, konstantou)

Nelze ji bez intervalu platnosti pro σ' tabelovat např. v normách aj.

Základní

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

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

Lehce dostupná (ale...obsahující chyby, zastaralé koncepce - používat s opatrností)

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

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.)

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

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

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

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

...a řada dalších, bohužel nic v češtině.

- [1] Atkinson, J.H. and Bransby, P.L. (1978) The mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanics. McGraw-Hill, Maidenhead (UK).
- [2] Atkinson, J.H. (2007) The mechanics of soils and foundations. 2nd ed. Taylor & Francis.
- [3] Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993) Soil mechanics for unsaturated soils. J Wiley&Sons.
- [4] Parry, R.H.G (1995) Mohr circles, stress paths and geotechnics. E&FN Spon.