
Vybrané kapitoly z geotechniky

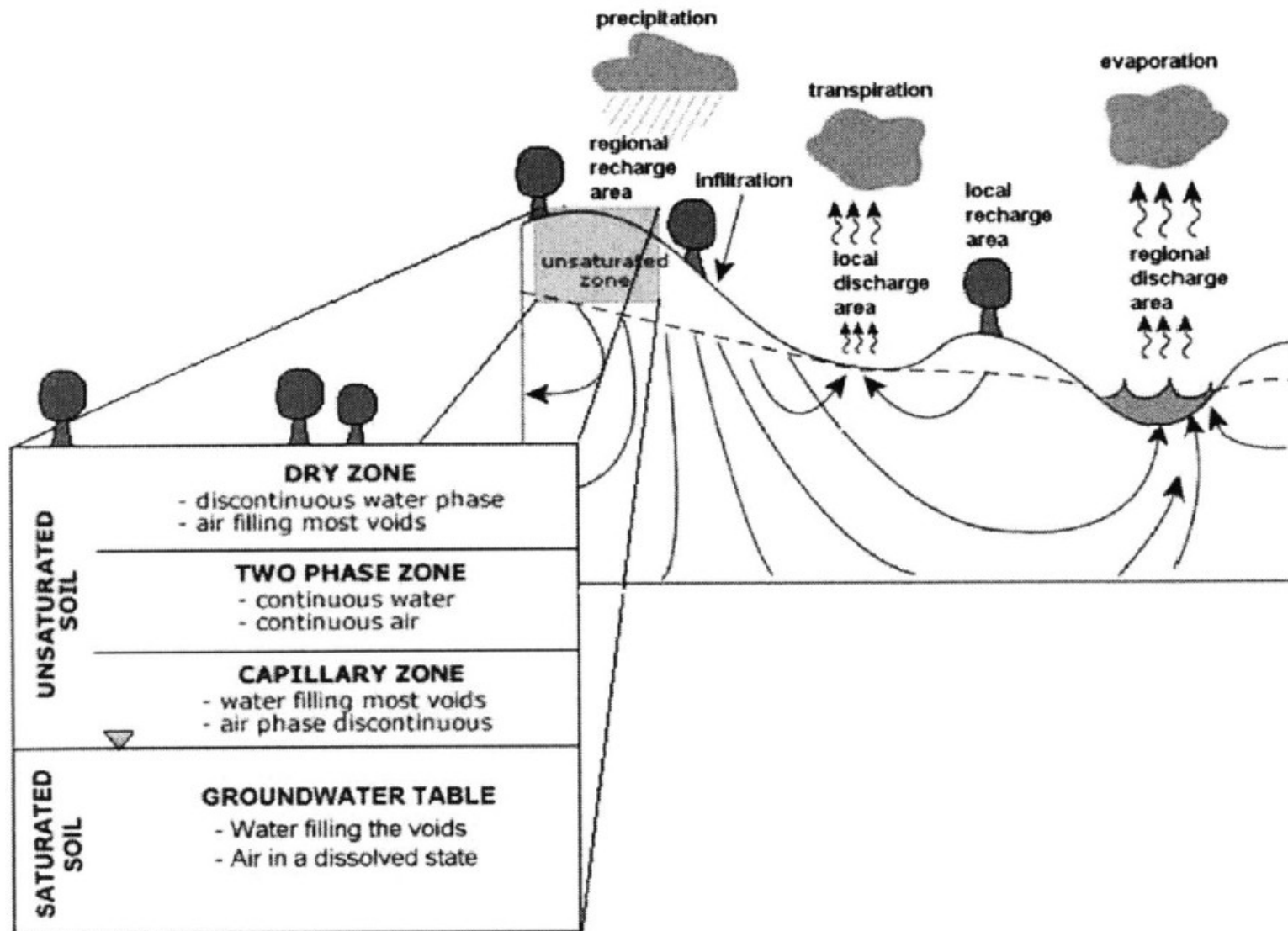
Nenasycené zeminy

Literatura:

- [1] Fredlund, D. and Rahardjo, H. (1993) Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley.
- [2] Lu, N. and Likos, W.J. (2004) Unsaturated soil mechanics. John Wiley.
- [3] Fredlund, D.G. (2006) Unsaturated soil mechanics in engineering practice. JGGE ASCE, Vol. 132, No. 3, 286-321.

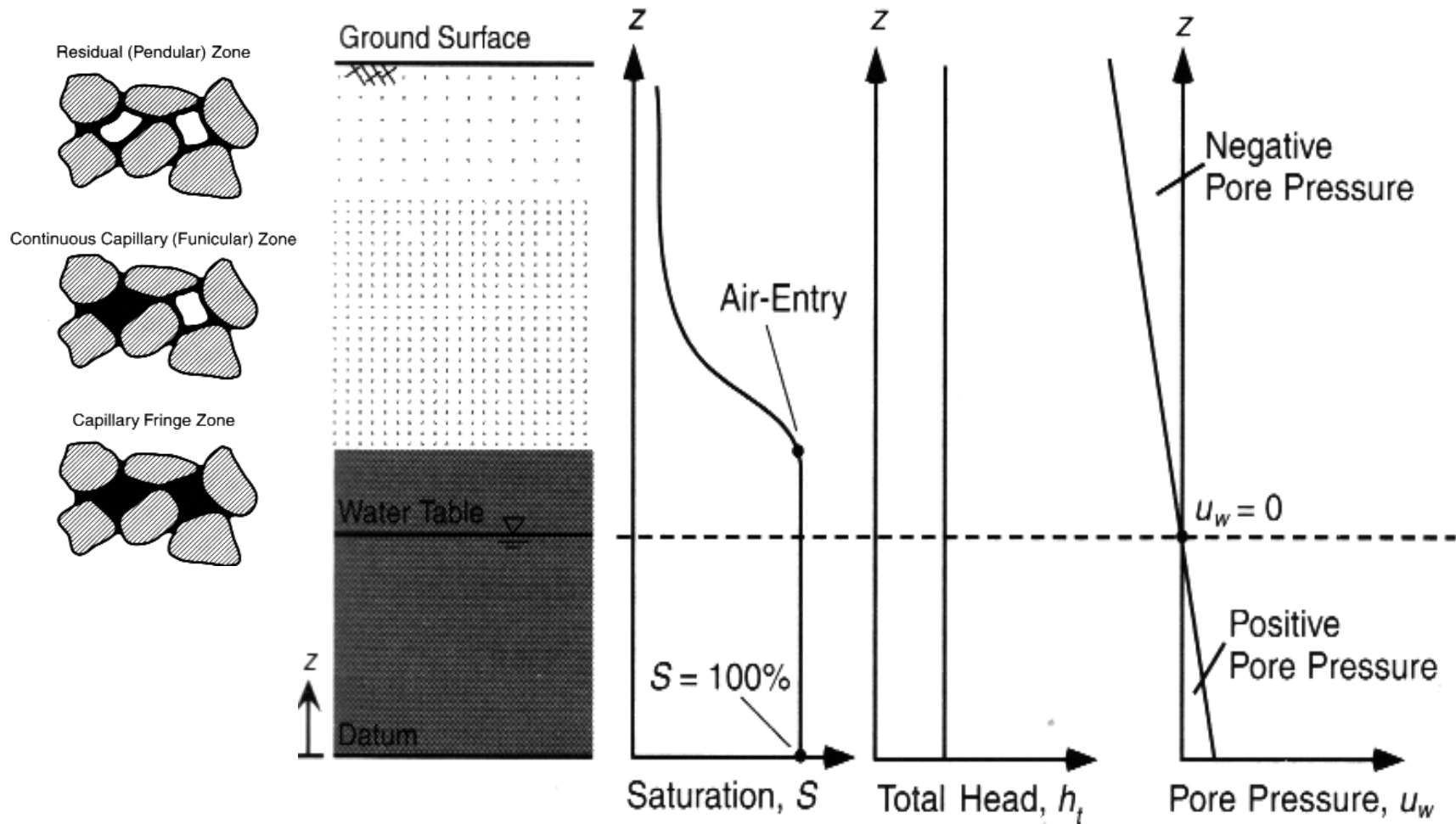
Vadozí ("nenasyčená") zóna

Kapilární zóna je ale nasycená

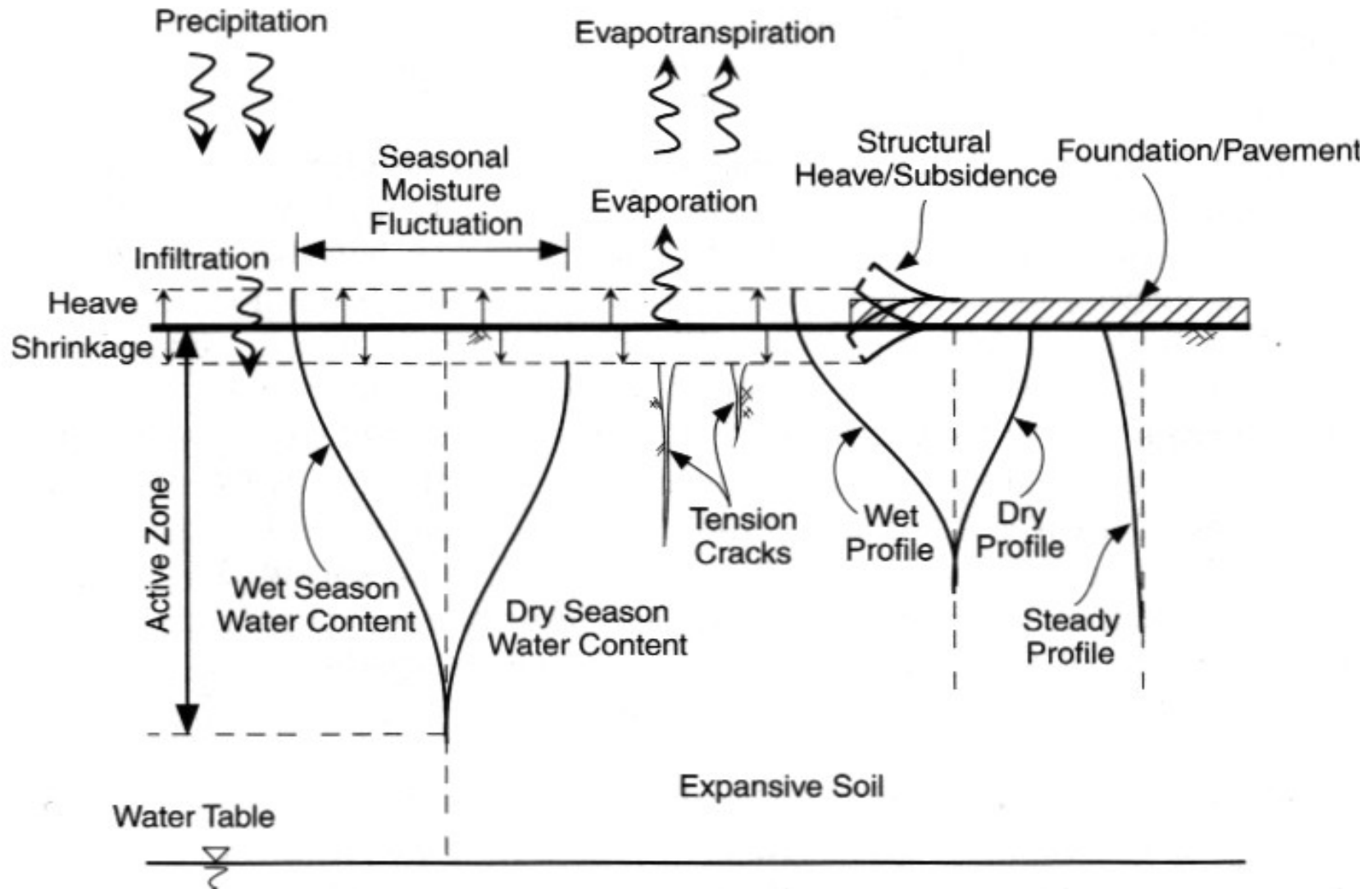


[3]

...vadózní zóna – stavové charakteristiky

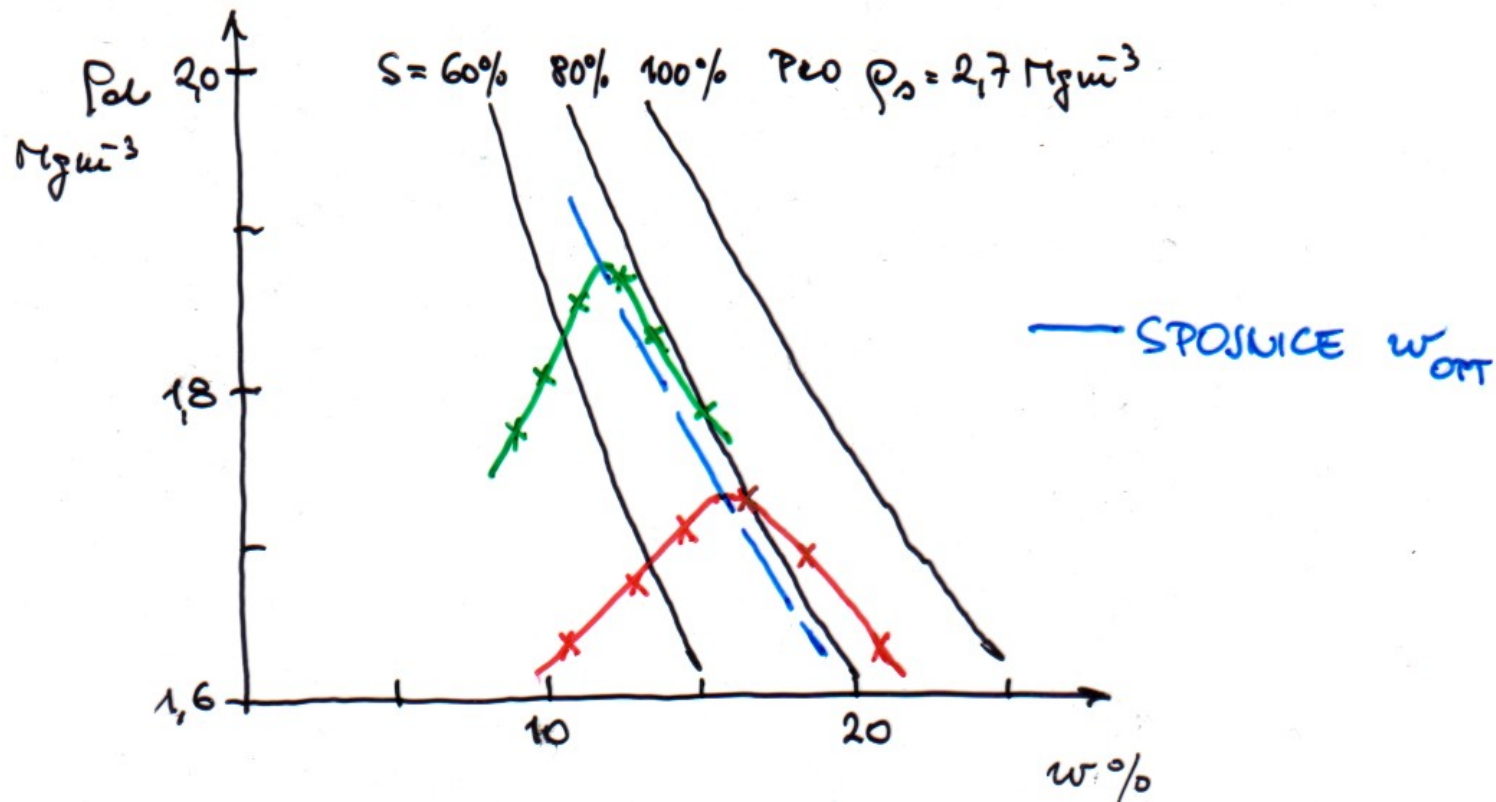


Proč je to důležité – historicky zájem o “**expanzivní**” zeminy
 Cyklické změny objemu podle S_r



[2]

Proč je to důležité – hutněné zemní konstrukce z definice nenasycené ($S_r < 1$)



Proč je to důležité – reziduální zeminy jsou zpravidla od počátku nenasycené ($S_r < 1$)

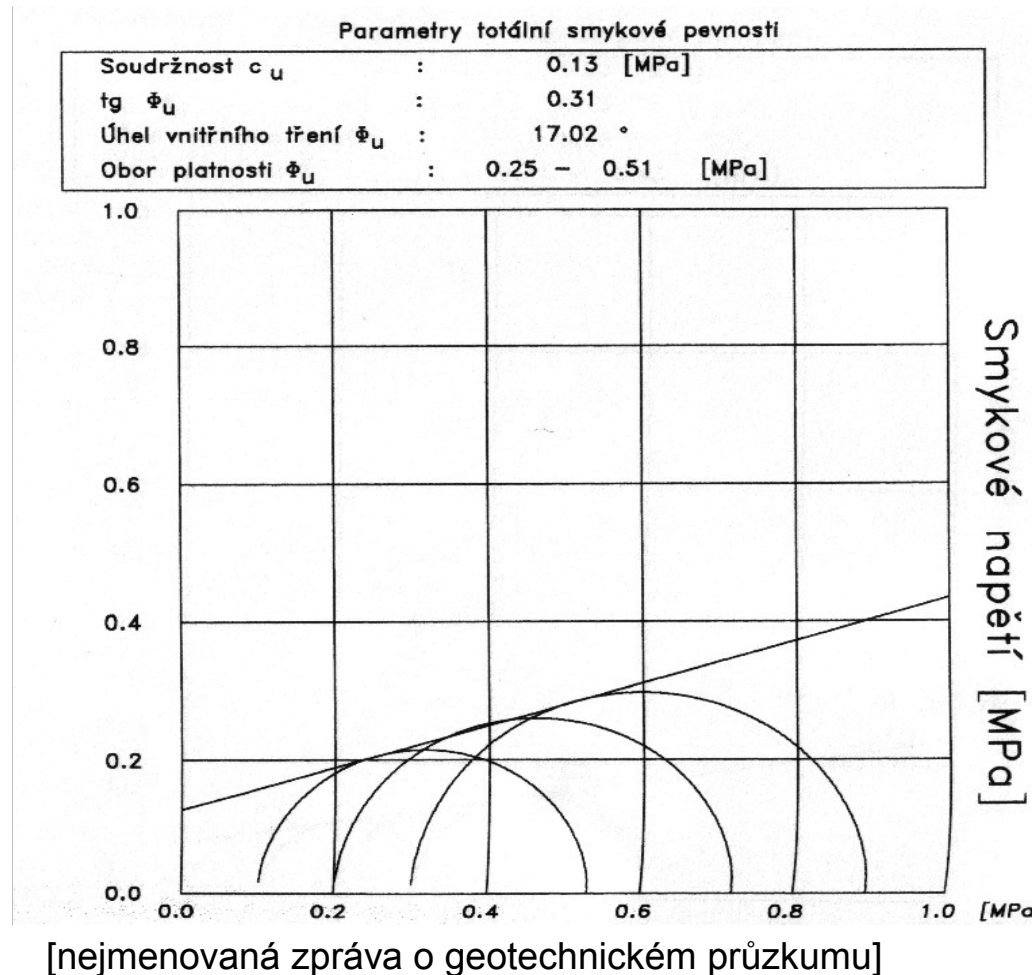
Podobně výsyvky – z počátku nenasycené



Proč je to důležité - interpretace UU zkoušek nasycených zemin

Koncepce neodvodněné pevnosti $s_u = \text{konst.}$ neplatí

Na rozdíl od nasycených zemin w se může měnit při $e = \text{konst.}$ a objem (e) se může měnit i při rychlé změně totálního napětí (zatížení)



Celkové sání v pórové vodě vyjadřuje celkový **termodynamický potenciál** pórové vody vzhledem k vodě volné

Celkový potenciál určuje:

- kapilarita
- interakce pevné a kapalně fáze (síly krátkého dosahu)
- chemické (osmotické) vlivy
(teplota zanedbána)

Při zanedbání sil krátkého dosahu

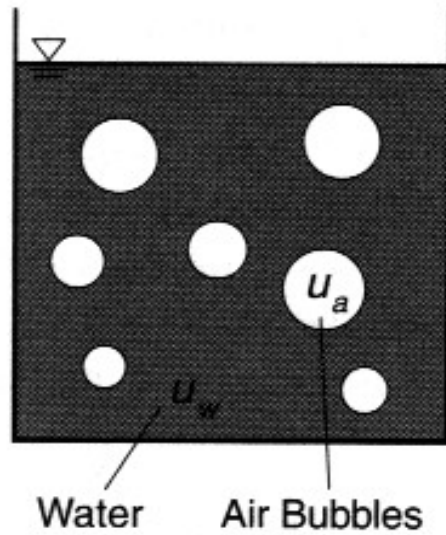
$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o$$

Ψ_m sání matricové (**kapilární**) zahrnuje interakci fází

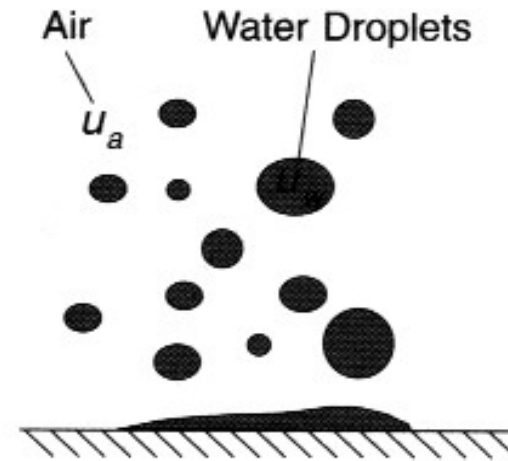
Ψ_o osmotické sání

.... kapilární síly, sání

Rozhraní kapalina vs plyn (voda vs vzduch) – povrchové napětí voda vs vzduch: $T_s \approx 70 \text{ mN/m}$ (závisí na teplotě)



$$u_a > u_w$$



$$u_a < u_w$$

.... kapilární síly, sání

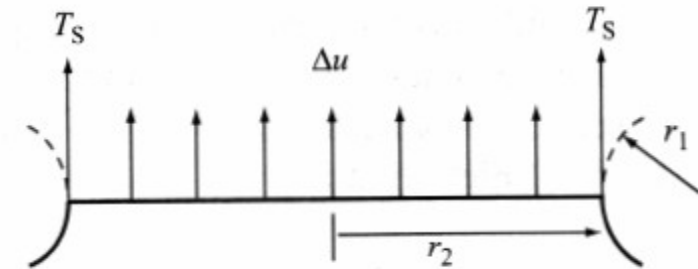
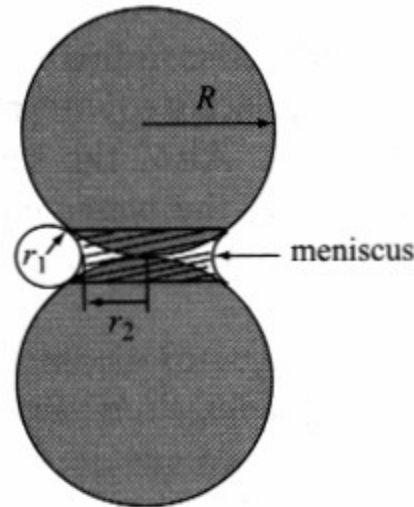
Vypařování – postupný rozdíl tlaků Δu –
postupné zakřivování povrchu
rozhraní voda-vzduch

→ Laplaceova rovnice pro rozdíl tlaků:

$$\Delta u = u_a - u_w = T_s (1/r_1 - 1/r_2)$$

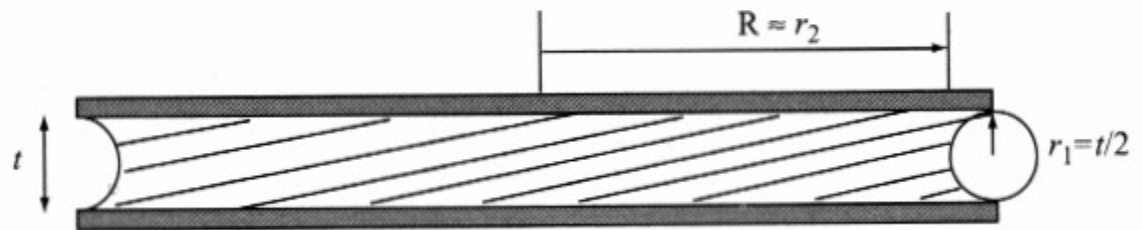
kde r_1 a r_2 jsou poloměry
menisku, nikoliv zrn

$\Delta u \equiv$ kapilární sání



(a)

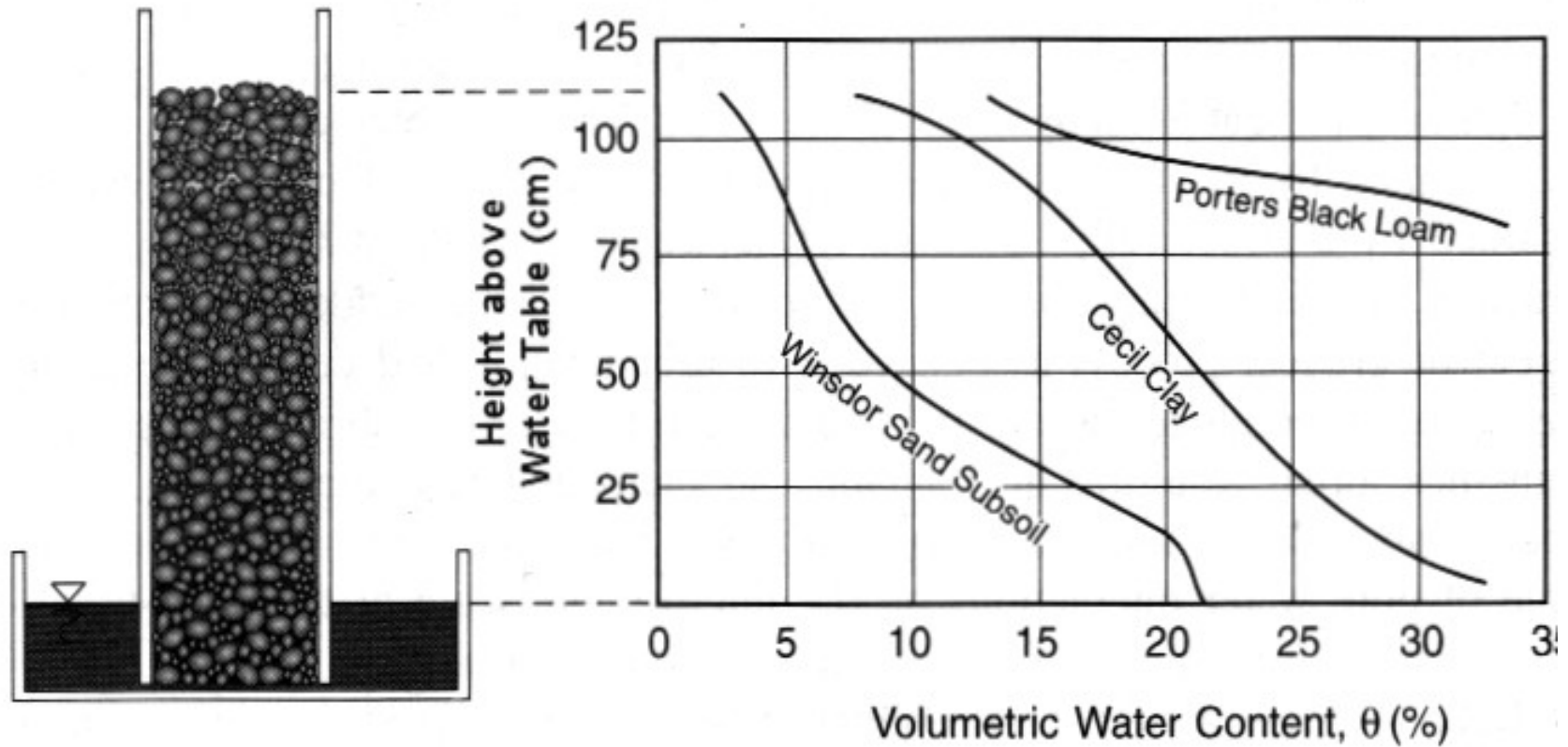
Ploché částice → $r_2 \gg r_1$, $1/r_2$ lze zanedbat



[Santamarina, 2001]

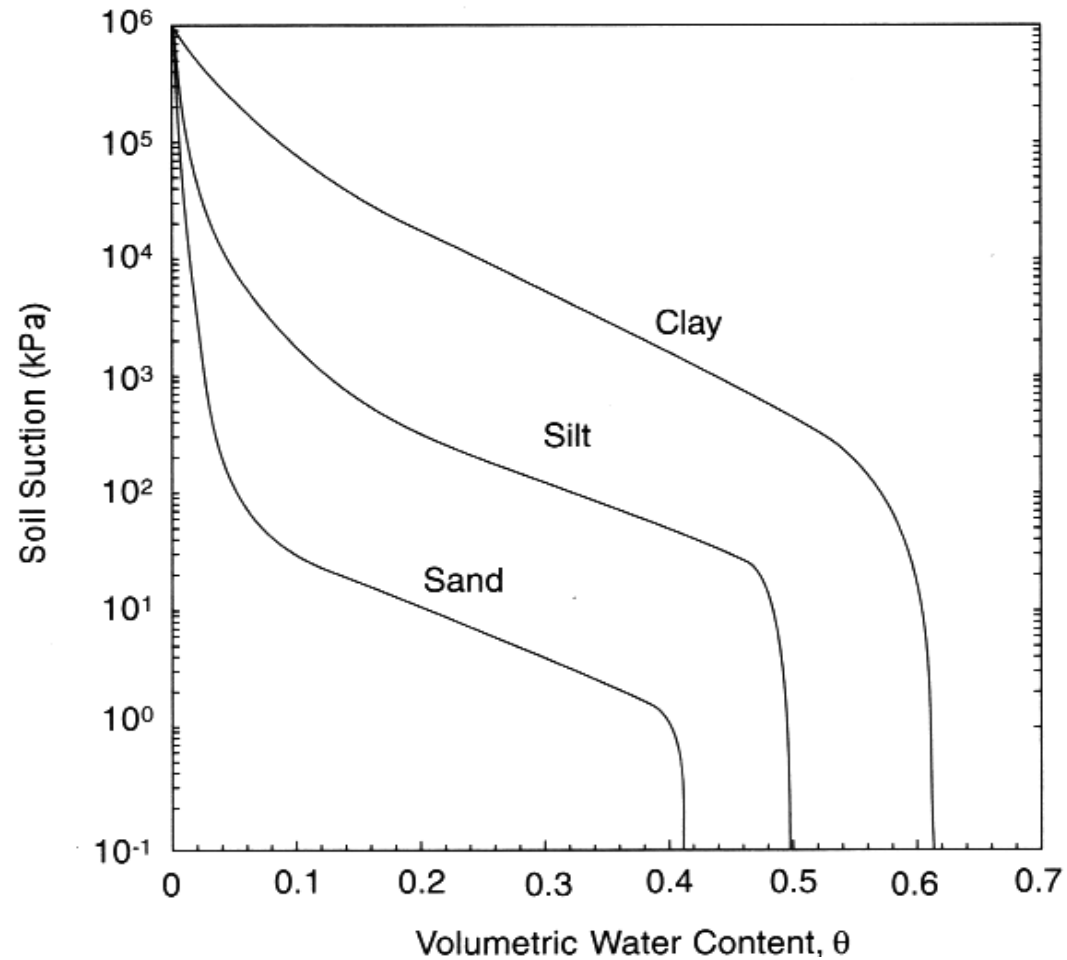
Kapilarita v zeminách – kapilární elevace

→ retence – **retenční čára** (SWCC)

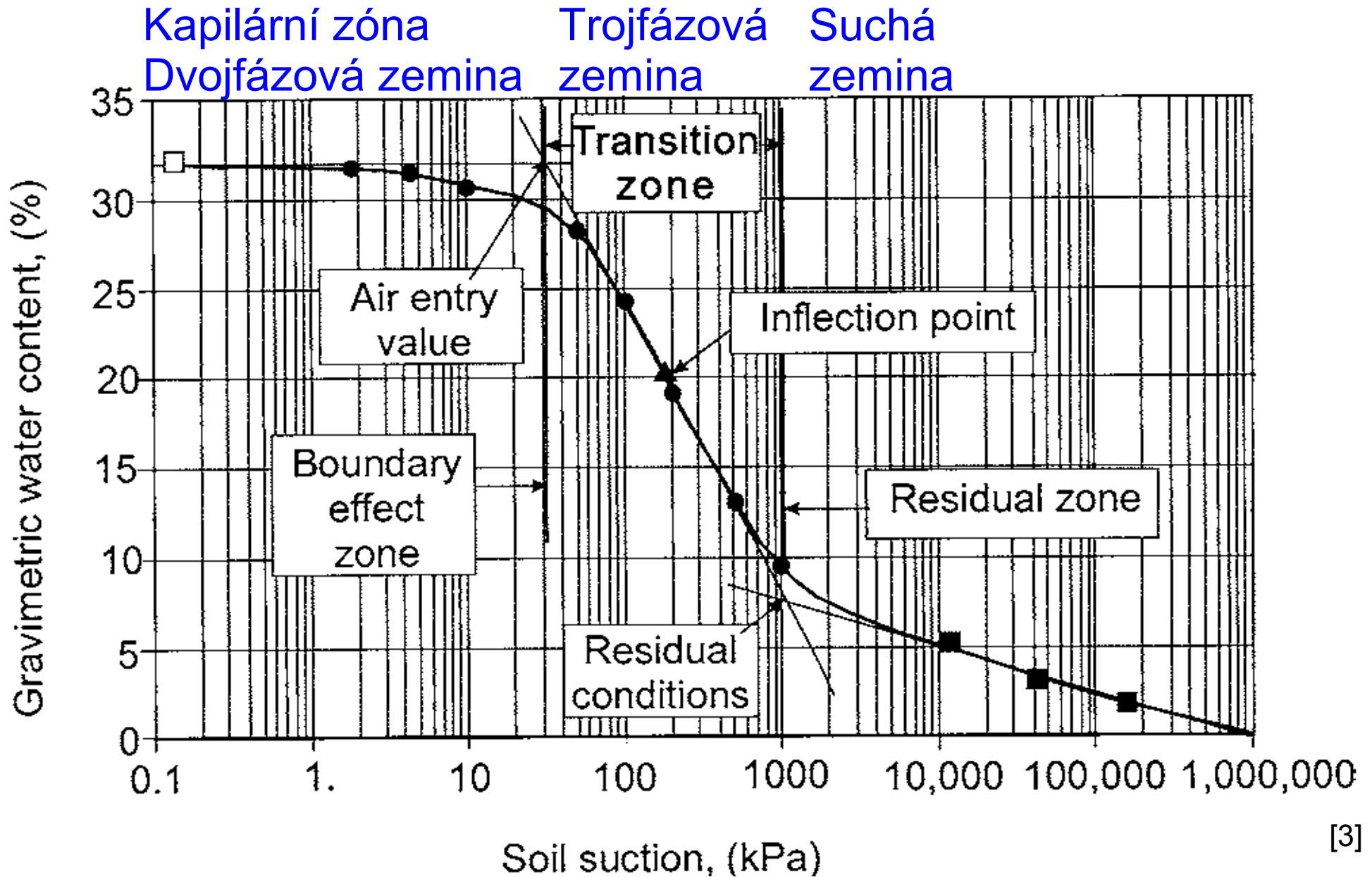


[2]

...retenční čára (SWCC)



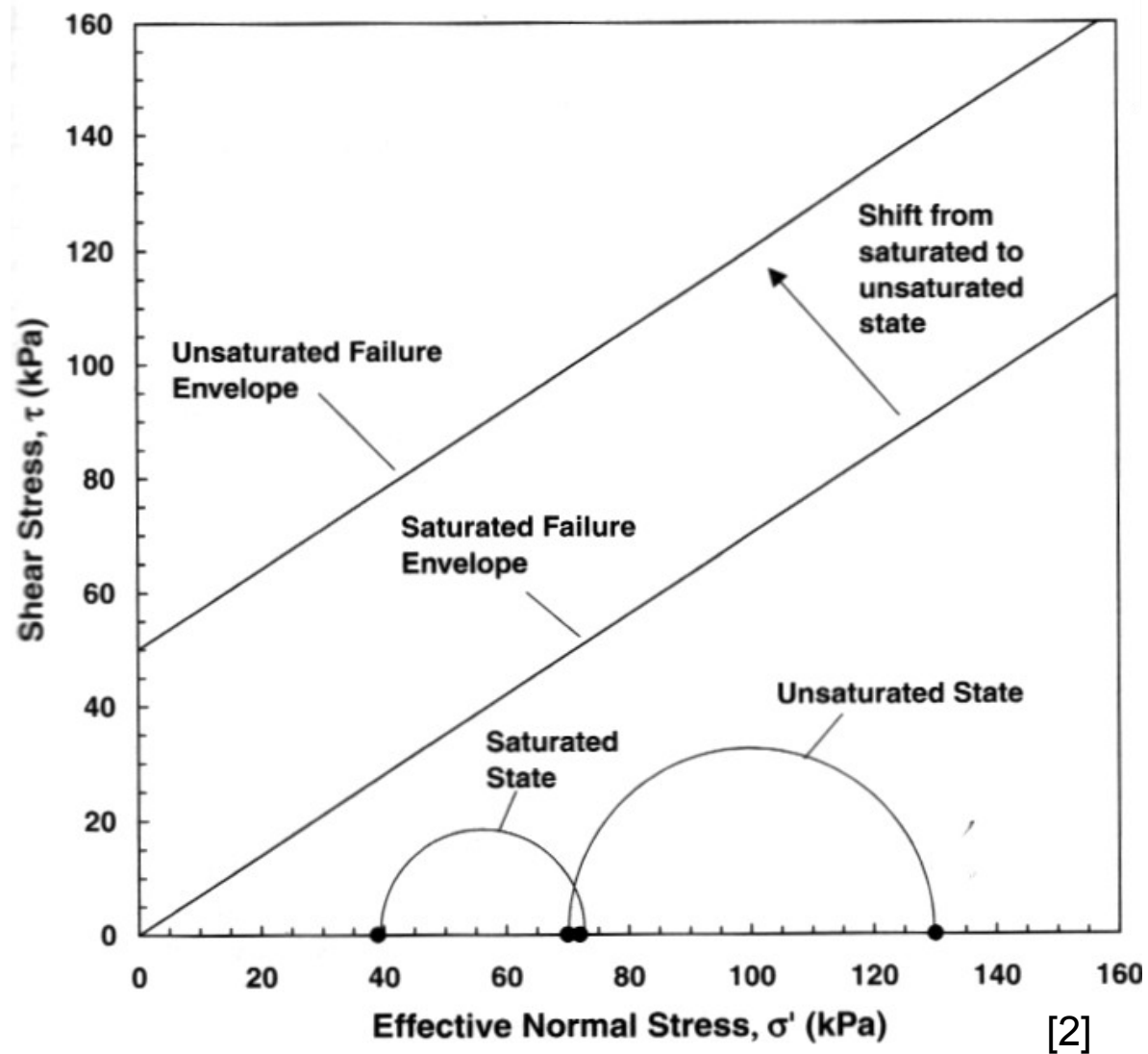
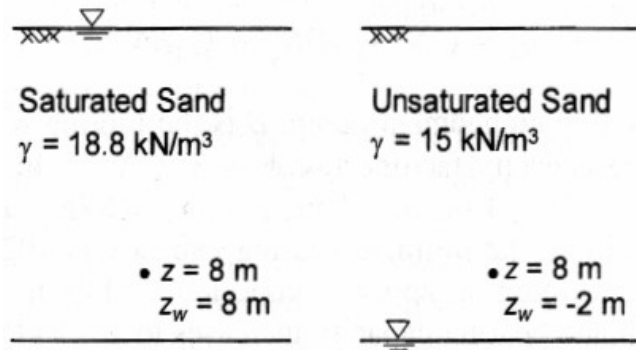
Retenční čára (pF čára, SWCC)



[3]

Napjatost a pevnost saturevané vs nesaturevané zeminy

...napjatost v nenasycené zemině (pokud platí efektivní napětí...)



Nasycené zeminy

$$\sigma' = \sigma - u$$

“všechny měřitelné projevy změny napětí, tj. změna rozměrů, tvaru, pevnosti, jsou spojeny výhradně se změnami efektivního napětí...”

Efektivní napětí je stavová proměnná, která jednoznačně určuje chování nasycené zeminy.

Nasyčené zeminy

$$\sigma' = \sigma - u$$

“všechny měřitelné projevy změny napětí, tj. změna rozměrů, tvaru, pevnosti, jsou spojeny výhradně se změnami efektivního napětí...”

Efektivní napětí je stavová proměnná, která jednoznačně určuje chování nasycené zeminy.

Částečně nasycené = nenasycené zeminy

Zatím nebyla nalezena plně vyhovující formulace efektivního napětí

“Bishopova” rovnice $\sigma' = \sigma - u_a + X(u_a - u_w) = \sigma^{\text{net}} + X s$

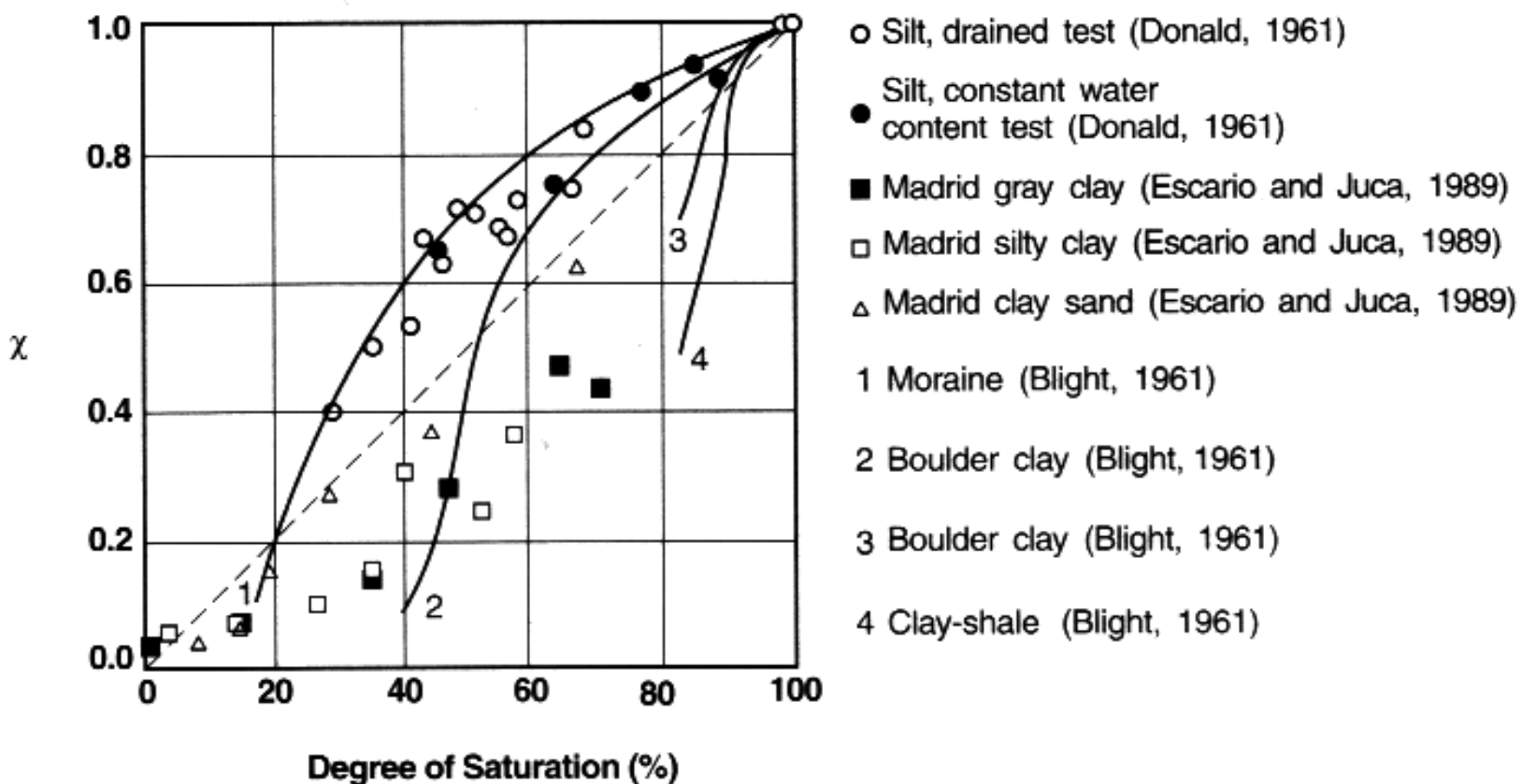
vážený průměr pórových tlaků $\sigma' = \sigma - (Xu_w + (1-X)u_a)$

σ^{net} je redukované napětí (totální napětí)

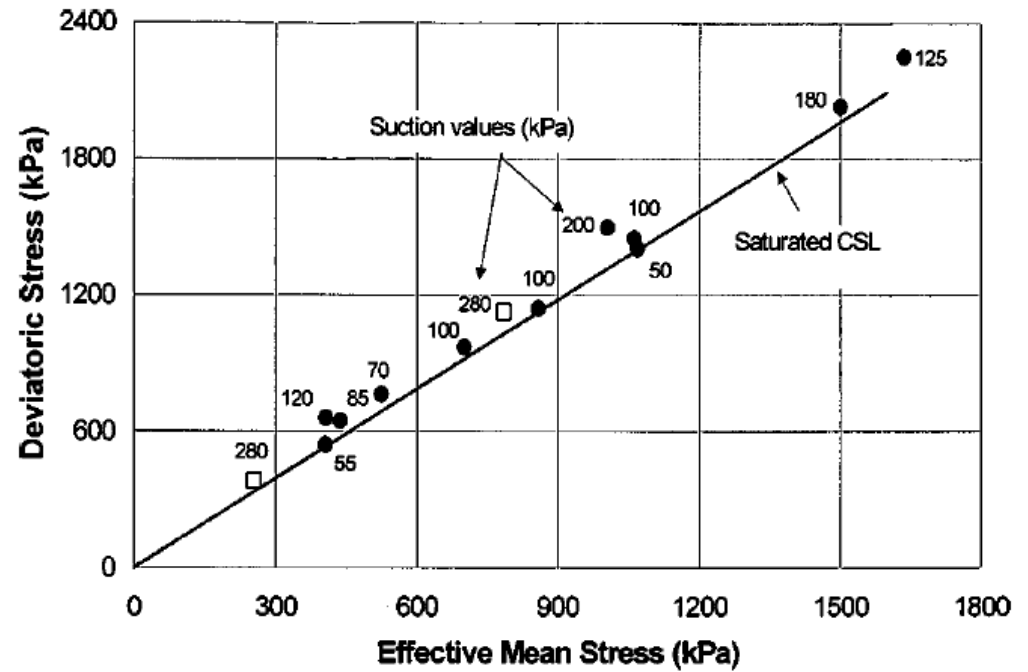
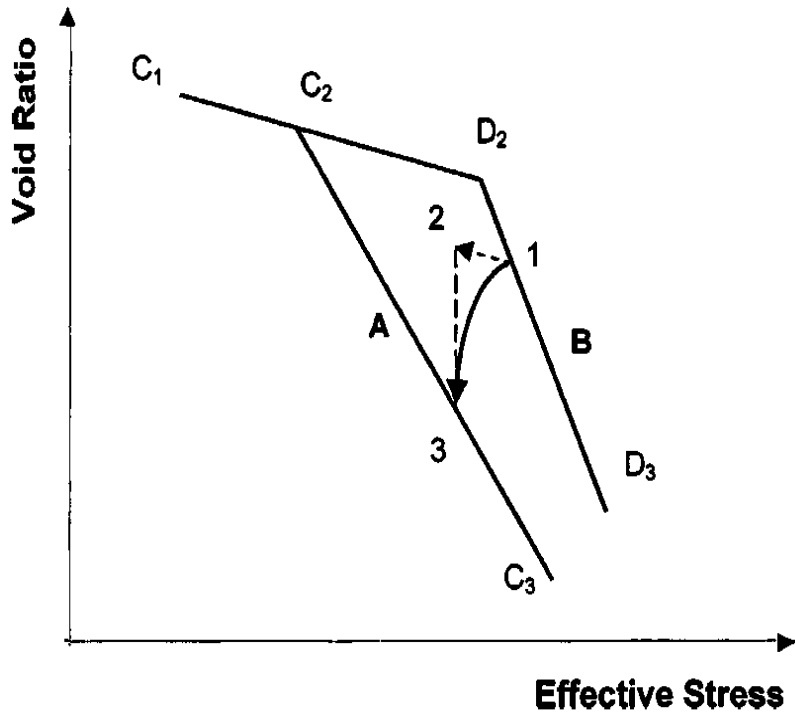
s je kapilární sání (Laplace)

X je materiálový parametr, neplatí $X = S_r$, ale $X = X(S_r)$

.... Bishopova rovnice, χ



Snaha o zdůvodnění platnosti efektivních napětí



(Khalili et al, 2004)

V současné době se používají buď

dvě nezávislé proměnné pro napětí

$p - u_a$ (=p) redukované napětí (net stress)

$u_a - u_w$ (=s) (kapilární) sání

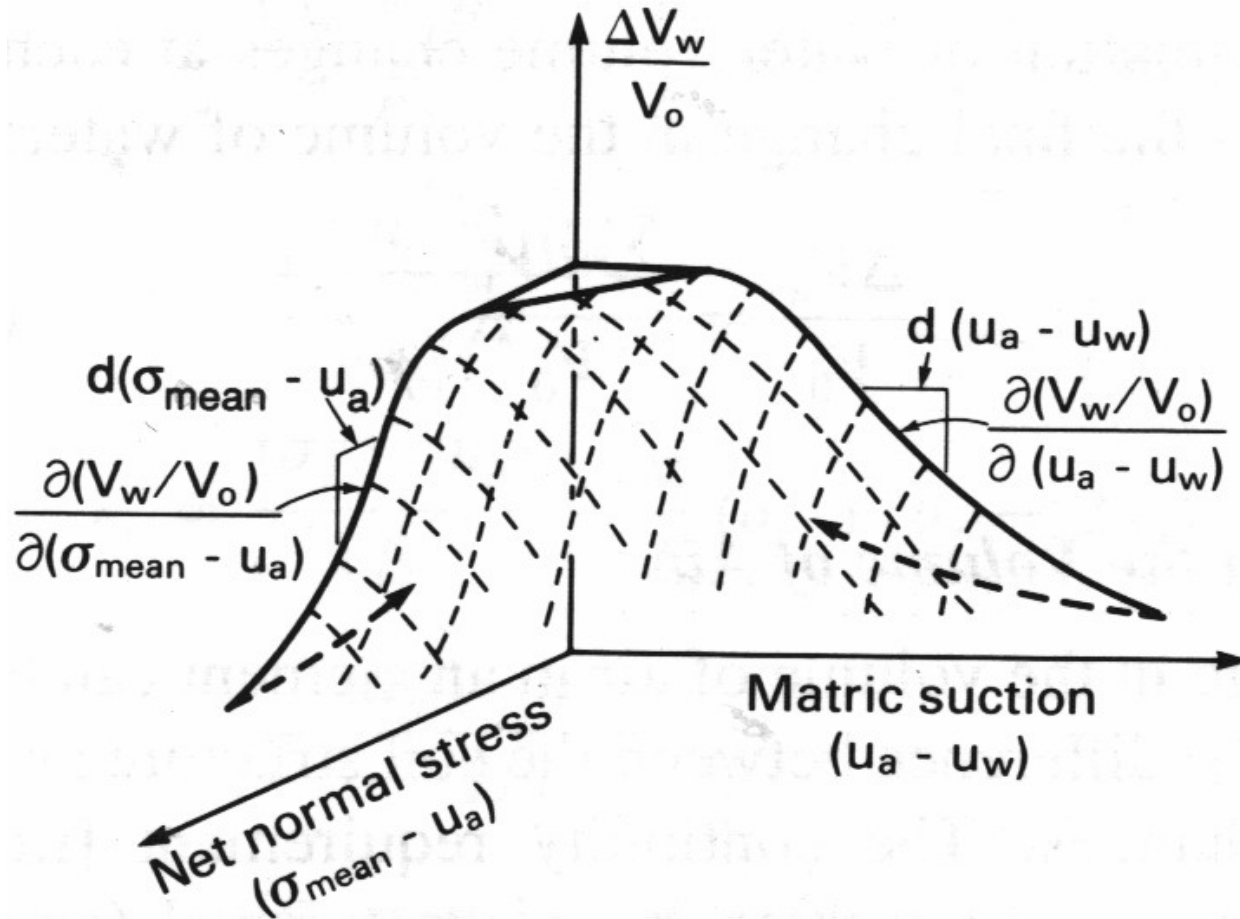
nebo rovnice pro efektivní napětí podle Bishopa

$$\sigma' = \sigma - (Xu_w + (1-X)u_a)$$

kde ale $X \neq S_r$

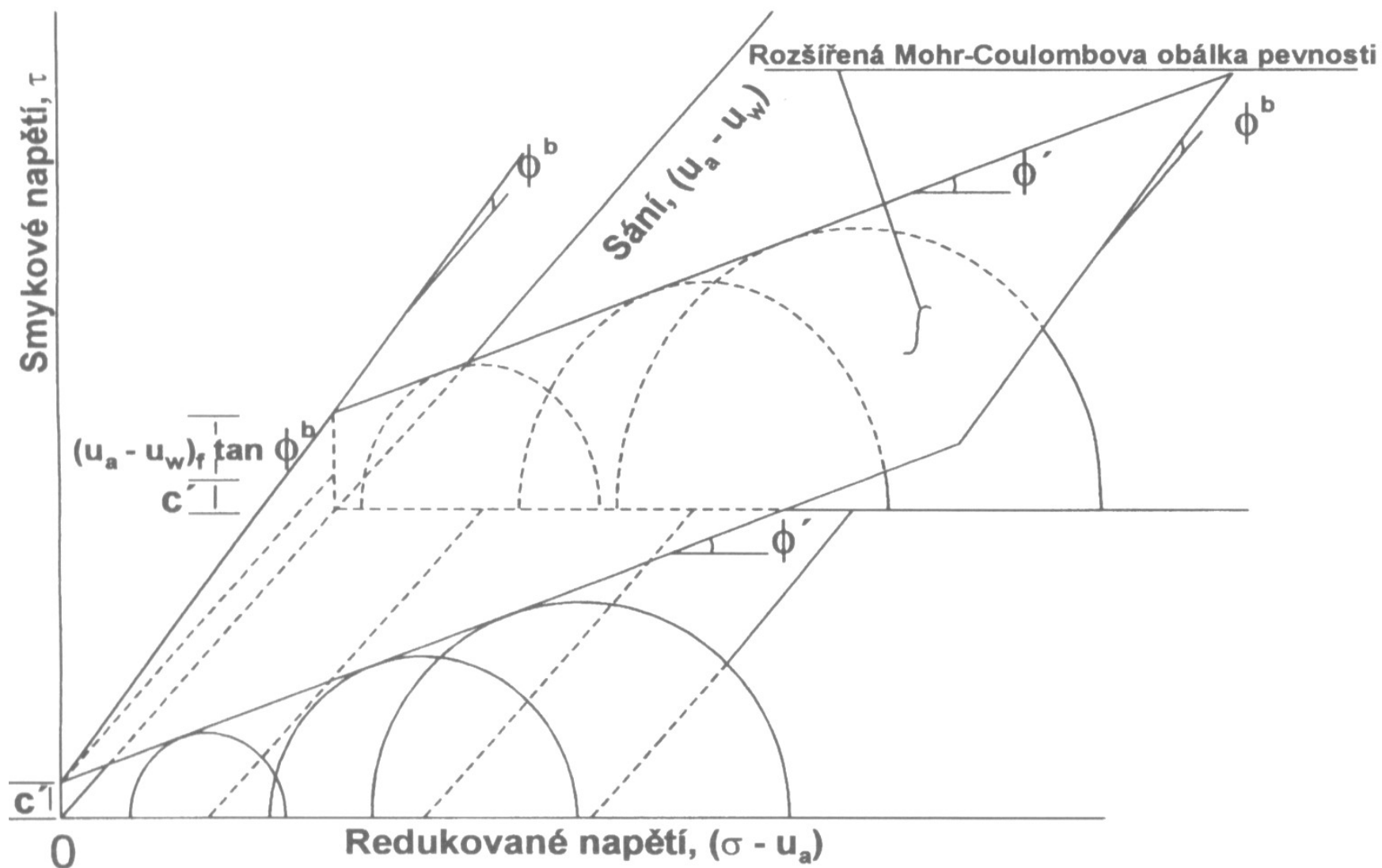
Efektivní napětí

Dvě nezávislé proměnné pro napětí → “zdvojení parametrů”



(Fredlund and Rahardjo, 1993)

Efektivní napětí



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

Dvě nezávislé proměnné pro napětí vs efektivní napětí – pevnost

nenасыčená zemina

$$\tau_{f, \text{unsat}} = c' + (\sigma - u_a + X (u_a - u_w)) \operatorname{tg} \varphi'$$

nasycená zemina:

$$u_a = u_w$$

$$\tau_{f, \text{sat}} = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi'$$

rozdíl pevností nenасыčené a nasycené zeminy

$$\tau_{f, \text{unsat}} - \tau_{f, \text{sat}} = X (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi'$$

$$X = (\tau_{f, \text{unsat}} - \tau_{f, \text{sat}}) / ((u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi')$$

Efektivní napětí

Dvě nezávislé proměnné pro napětí vs efektivní napětí – pevnost (Khalili and Khabaz, 1998)

nenасыčená zemina

$$\tau_{f, \text{unsat}} = c' + (\sigma - u_a + X (u_a - u_w)) \operatorname{tg} \phi'$$

nasycená zemina:

$$u_a = u_w$$

$$\tau_{f, \text{sat}} = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi'$$

rozdíl pevností nenasycené a nasycené zeminy

$$\tau_{f, \text{unsat}} - \tau_{f, \text{sat}} = X (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi'$$

$$X = (\tau_{f, \text{unsat}} - \tau_{f, \text{sat}}) / ((u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi')$$

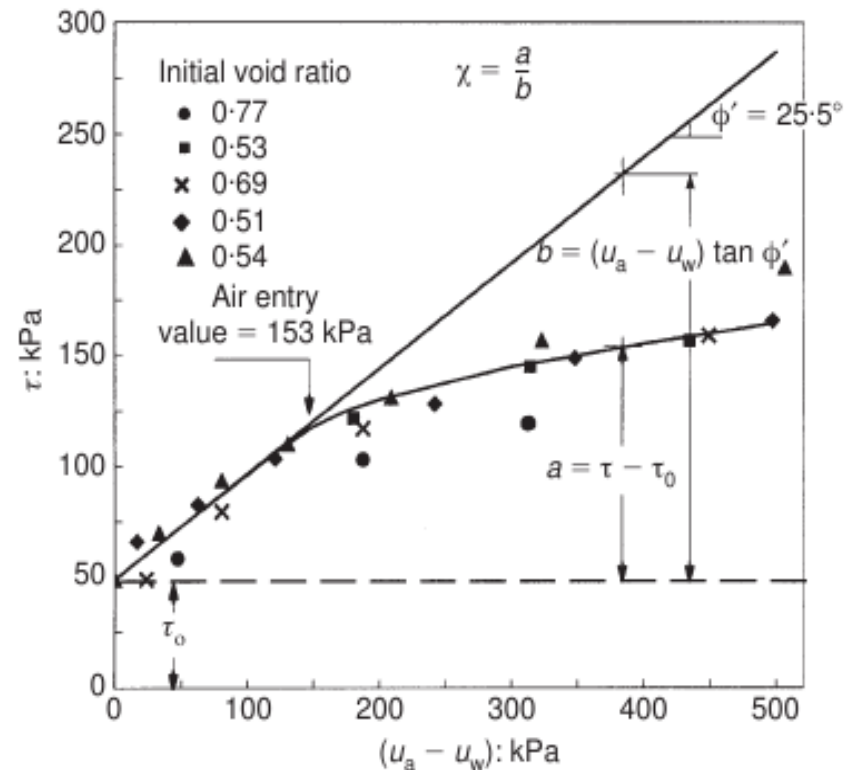


Fig. 1. A typical relationship between the shear strength τ and matric suction $(u_a - u_w)$ (Gan *et al.*, 1988)

Efektivní napětí

Dvě nezávislé proměnné pro napětí vs efektivní napětí – pevnost (Khalili and Khabaz, 1998)

nenасыčená zemina

$$\tau_{f, \text{unsat}} = c' + (\sigma - u_a + X (u_a - u_w)) \operatorname{tg} \varphi'$$

nasycená zemina:

$$u_a = u_w$$

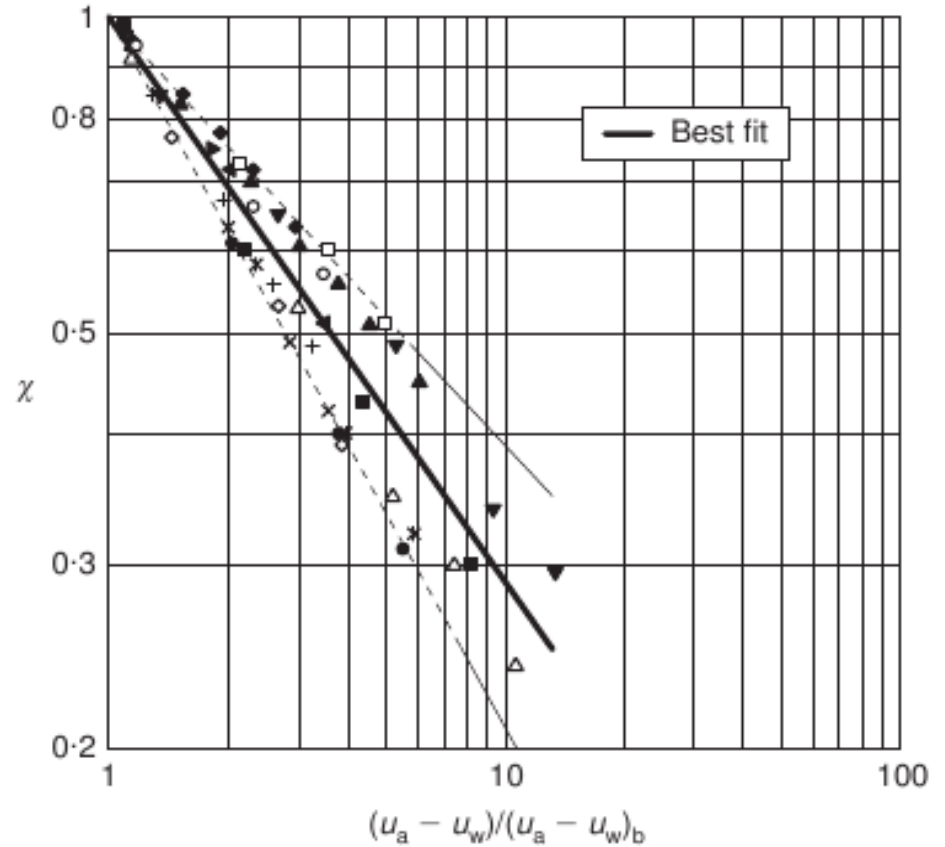
$$\tau_{f, \text{sat}} = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi'$$

rozdíl pevností nenasycené a nasycené zeminy

$$\tau_{f, \text{unsat}} - \tau_{f, \text{sat}} = X (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi'$$

$$X = (\tau_{f, \text{unsat}} - \tau_{f, \text{sat}}) / ((u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi')$$

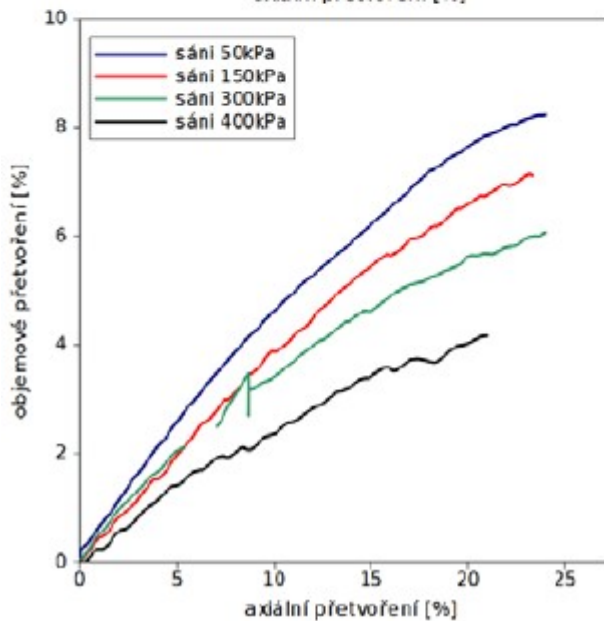
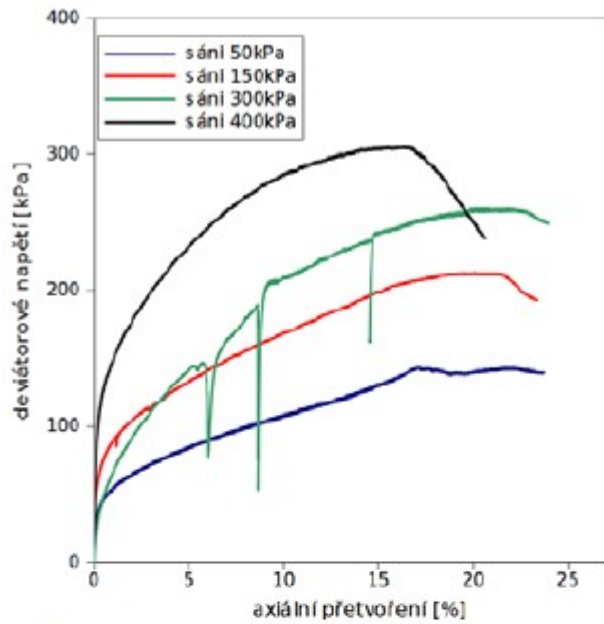
Vyhodnocení pevnosti 14 různých zemin



....empirický vztah pro X pro pevnost: $X = (\text{vstupní hodnota vzduchu}) / (\text{sání})^{0.55}$

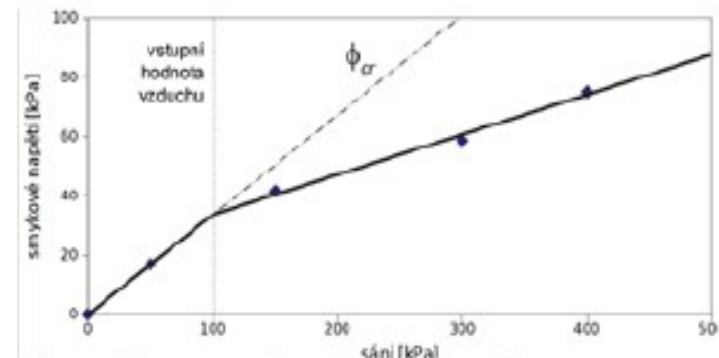
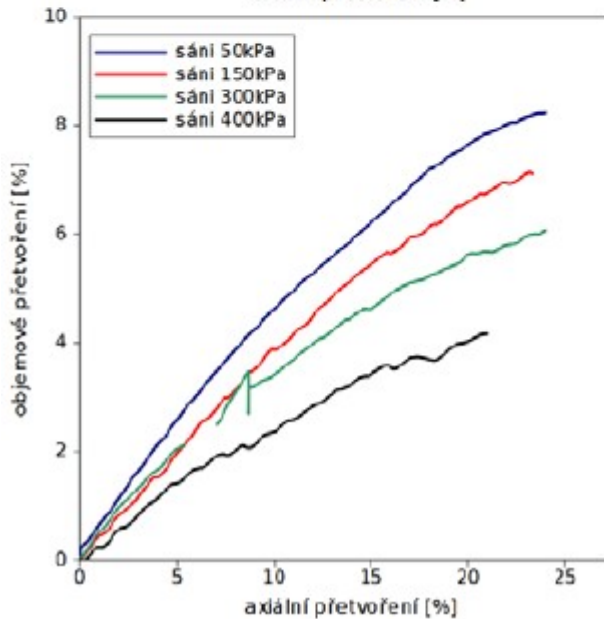
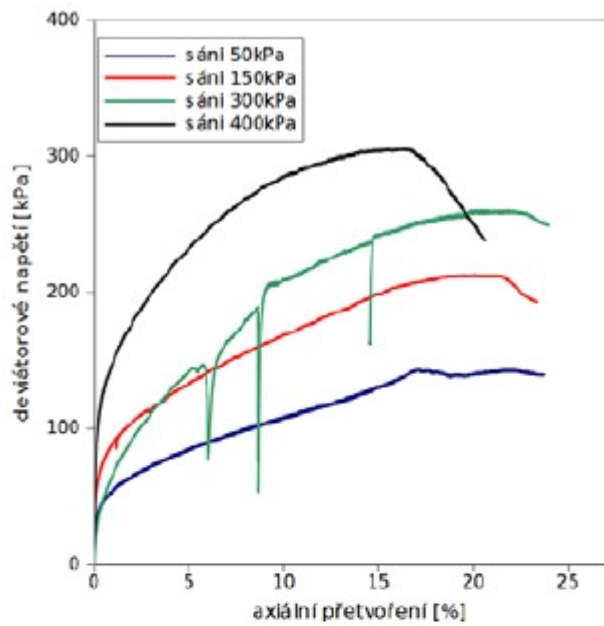
Efektivní napětí

Dvě nezávislé proměnné pro napětí vs efektivní napětí – pevnost – CID rekonstituované výsypkové zeminy

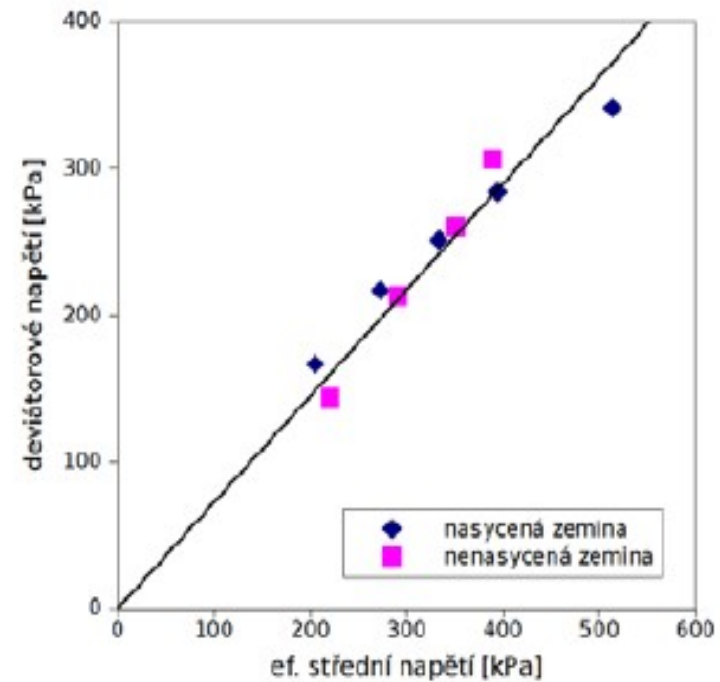


Efektivní napětí

Dvě nezávislé proměnné pro napětí vs efektivní napětí – pevnost – CID rekonstituované výsypkové zeminy

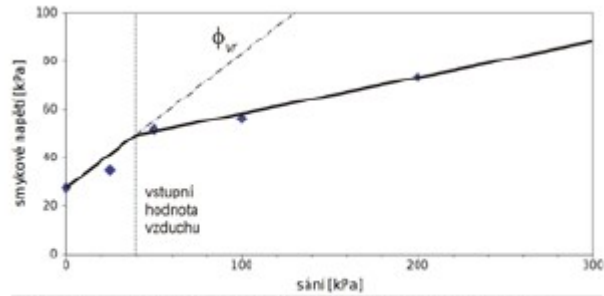


Obr. 3 Závislost pevnosti terciárního jílu na sání
Fig. 3 Strength dependency on suction for Tertiary clay

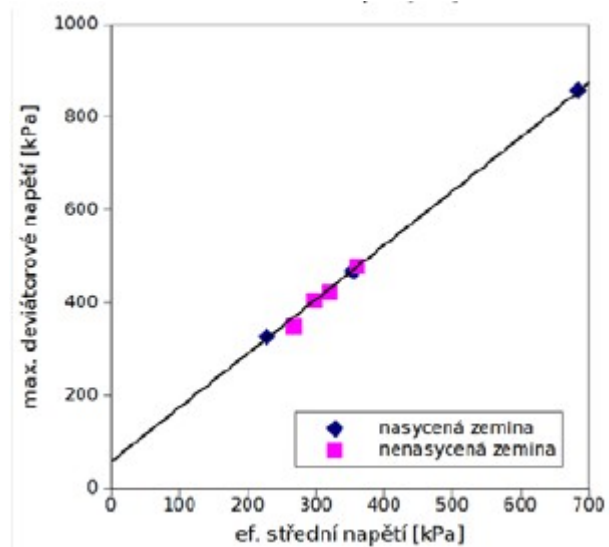


Efektivní napětí

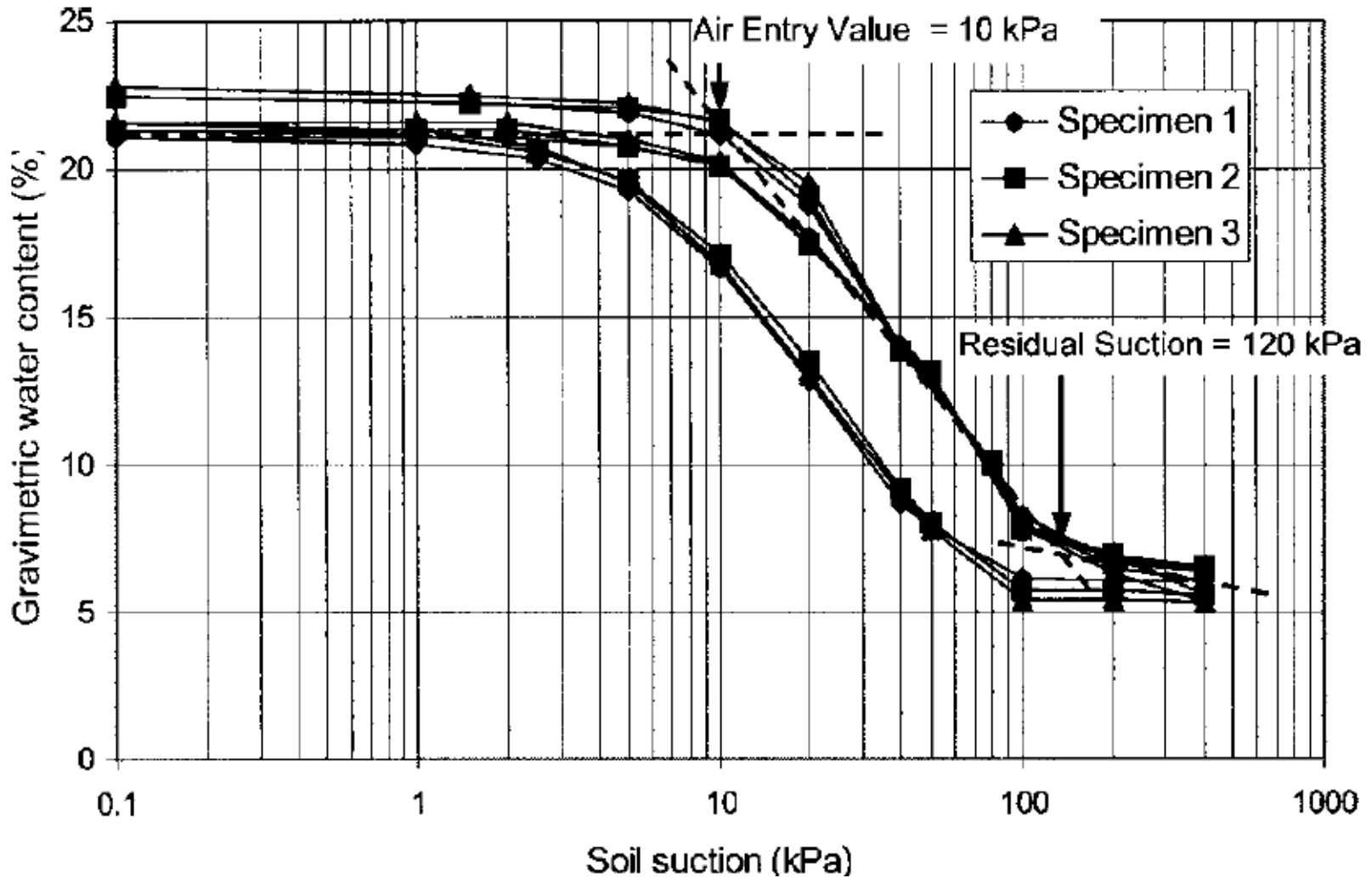
Dvě nezávislé proměnné pro napětí vs efektivní napětí – pevnost – neporušené vzorky reziduální zeminy



Obr. 5 Závislost vrcholové pevnosti brazilské zeminy na sání



Hystereze RČ

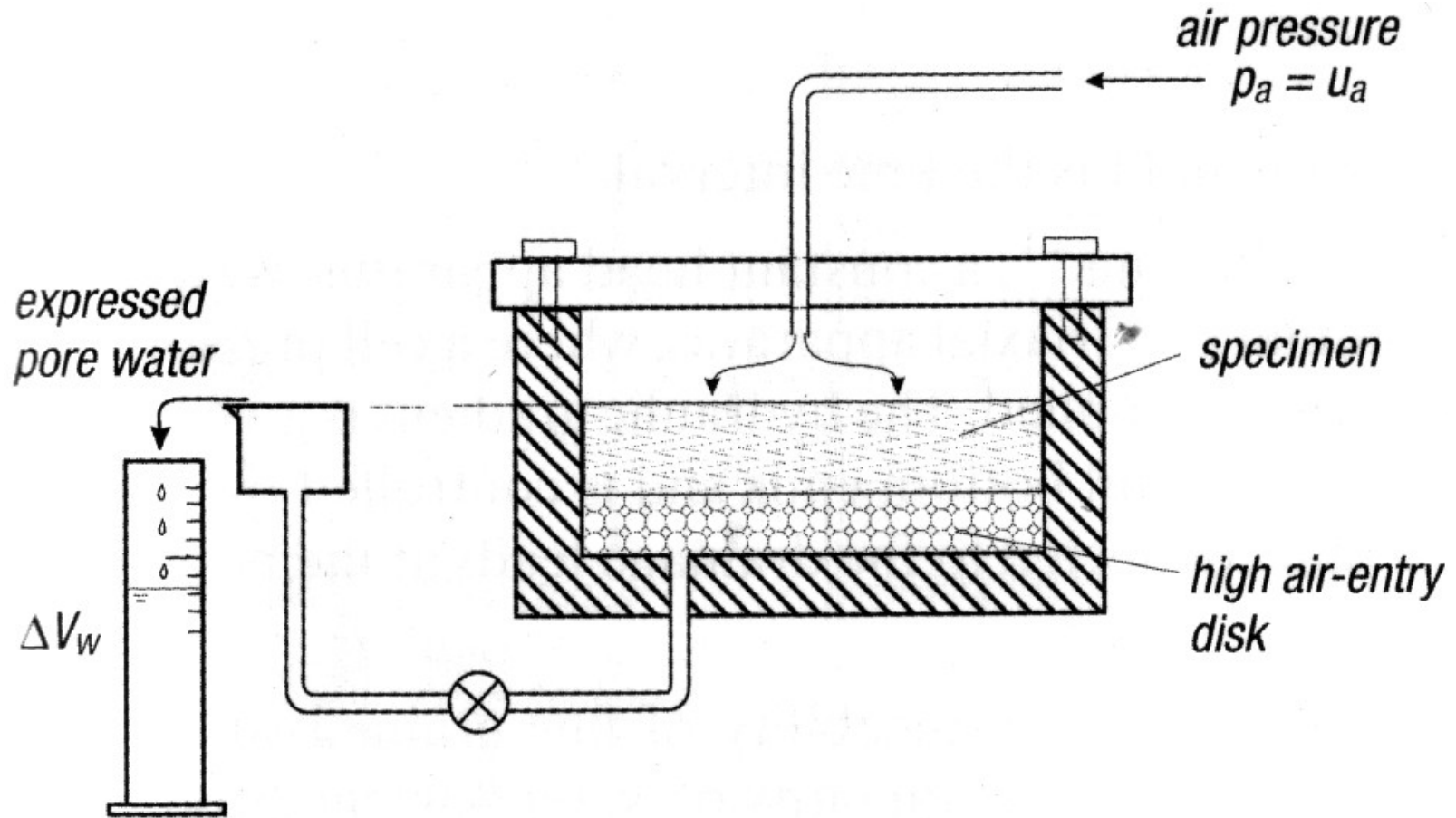


(Fredlund, 2006)

Přímá metoda určení RČ

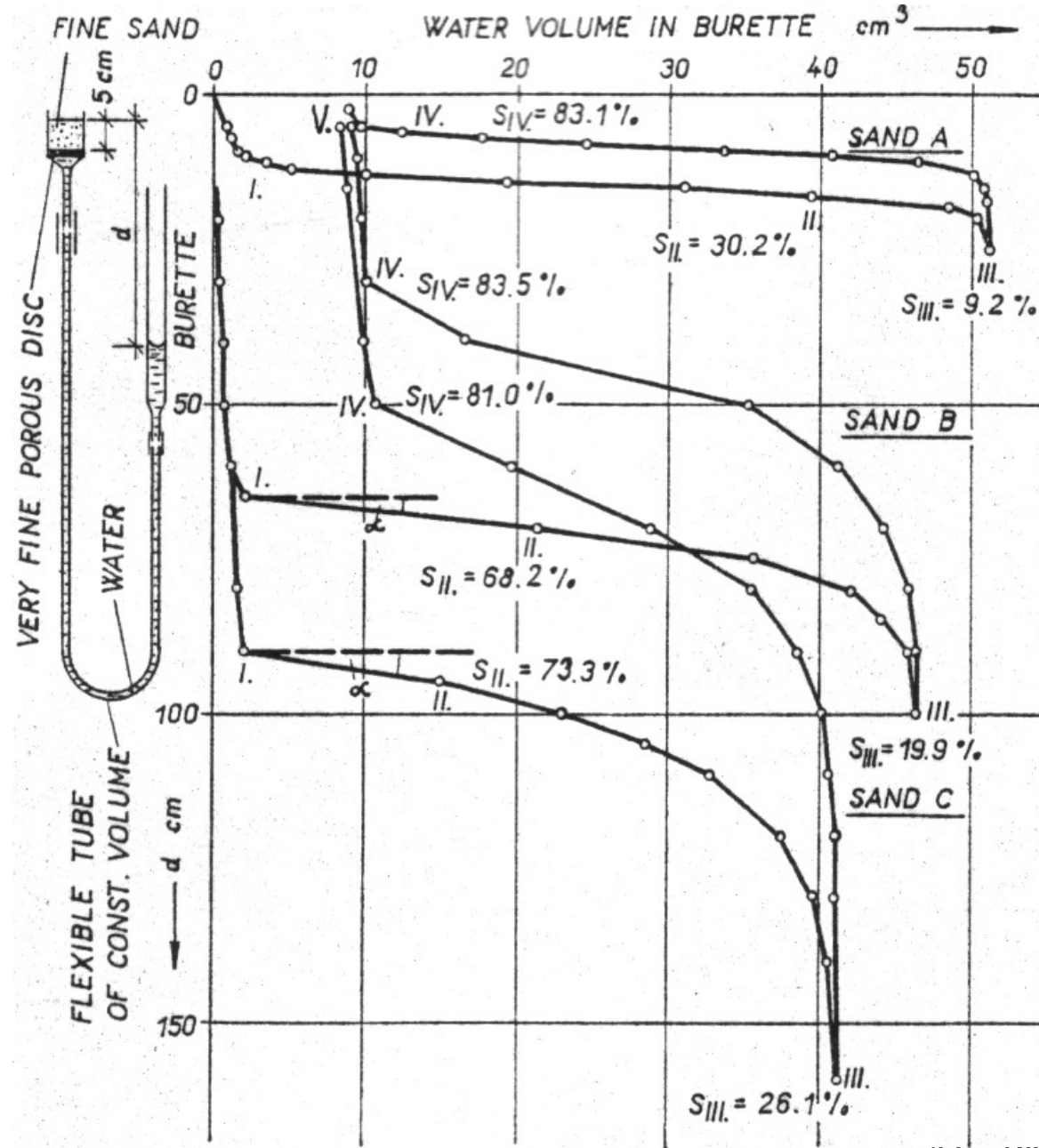
objem vody vytlačené tlakem vzduchu

pro zabránění kavitace **proporční zvýšení tlaků** (“axis translation”)
“**pressure plate**”



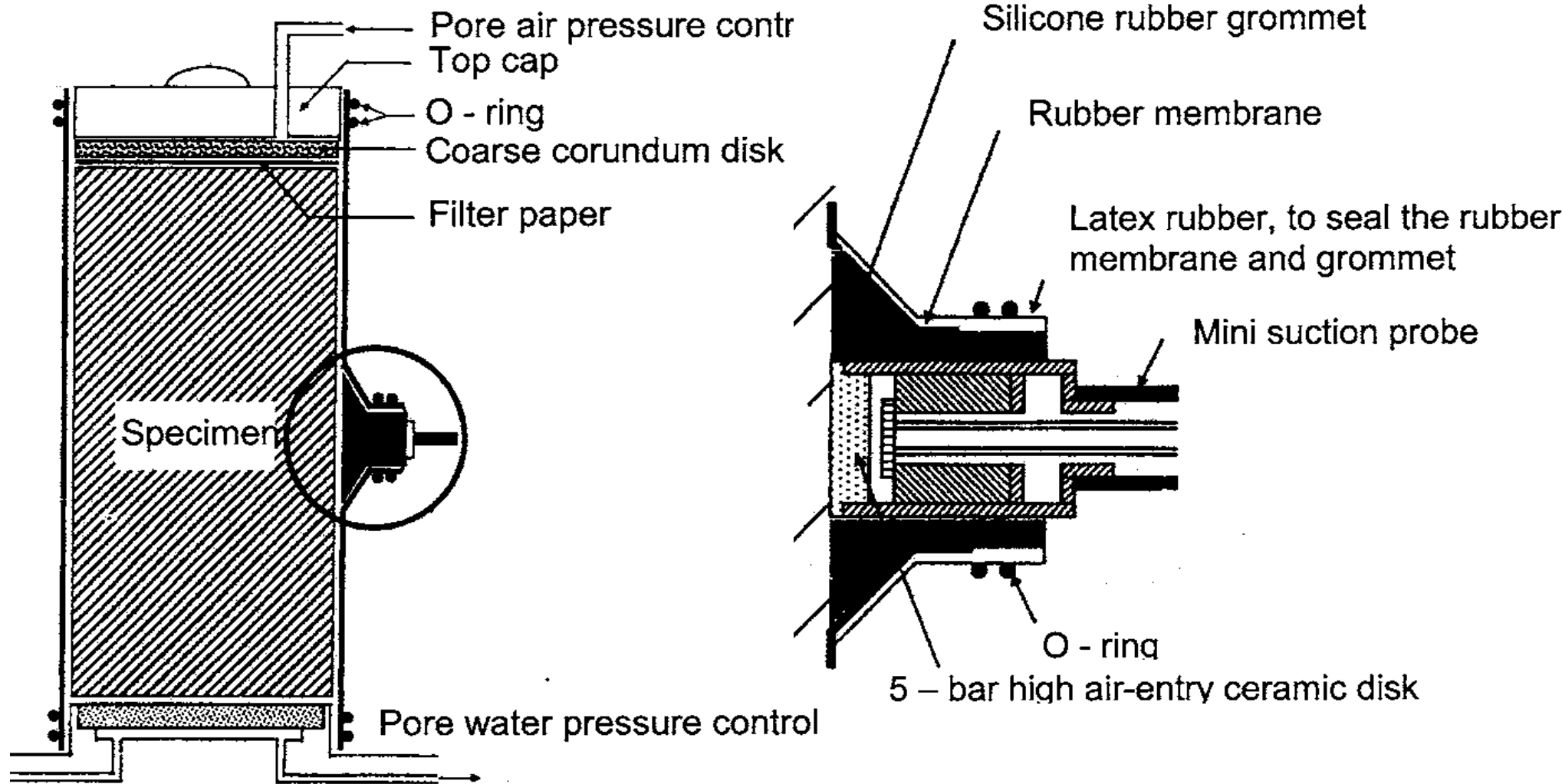
Měření sání, stanovení retenční čáry

Hrubozrnná zemina



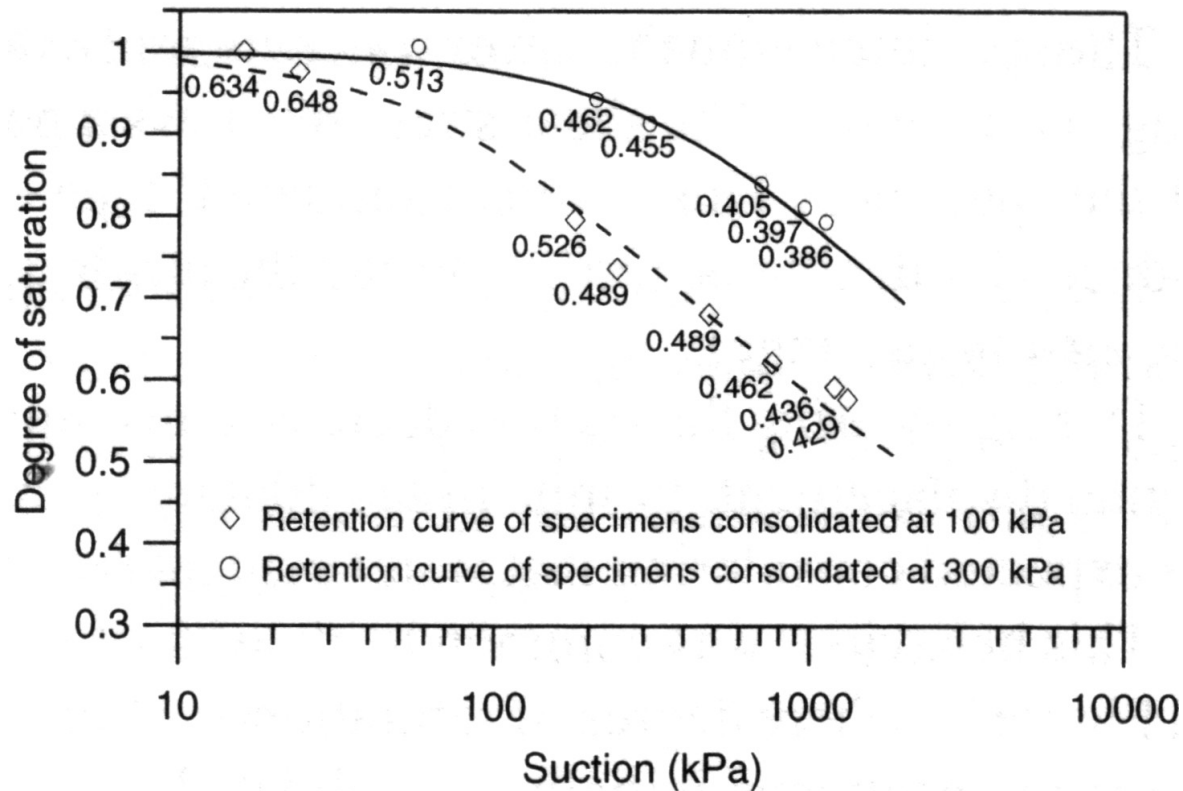
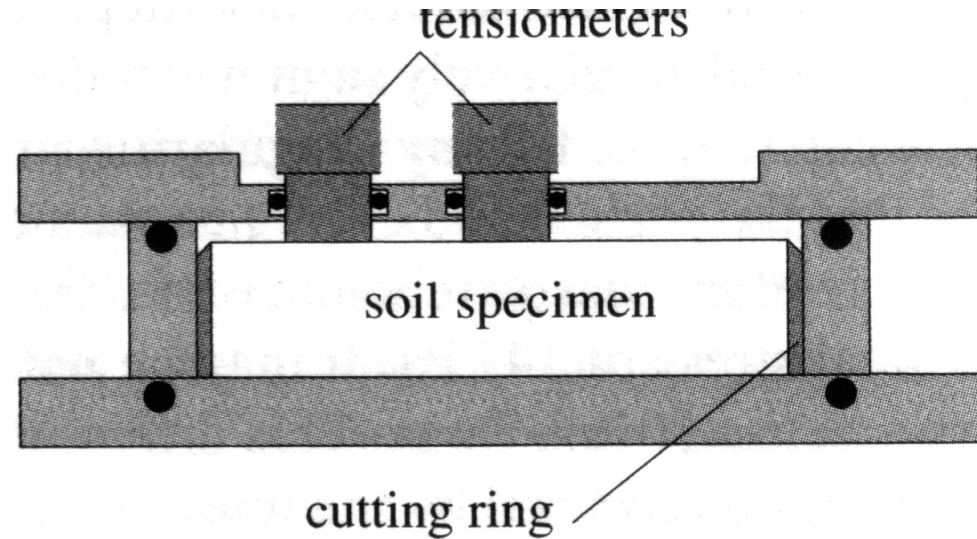
(Havlíček a Myslivec, 1965)

Přímé měření sání snímačem (bez proporčního zvýšení napětí)



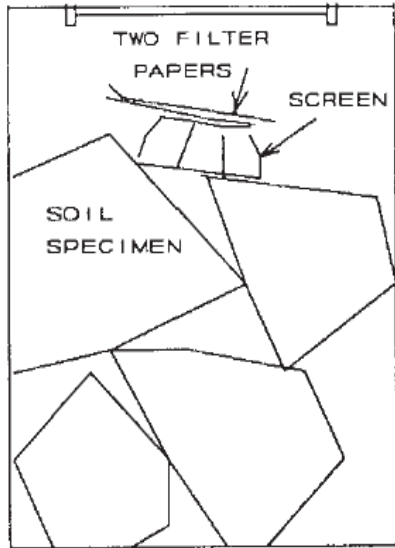
(Fredlund, 2006)

Přímá metoda určení RČ:
přímé měření sání

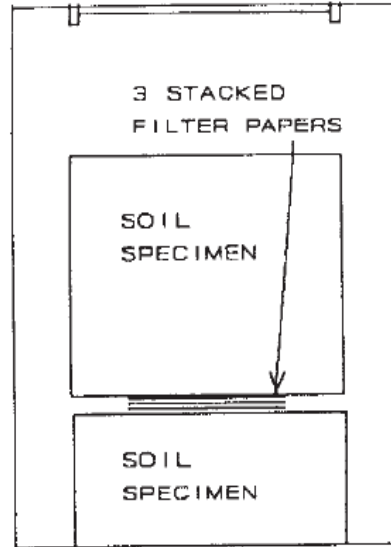


(Boso et al, 2005)

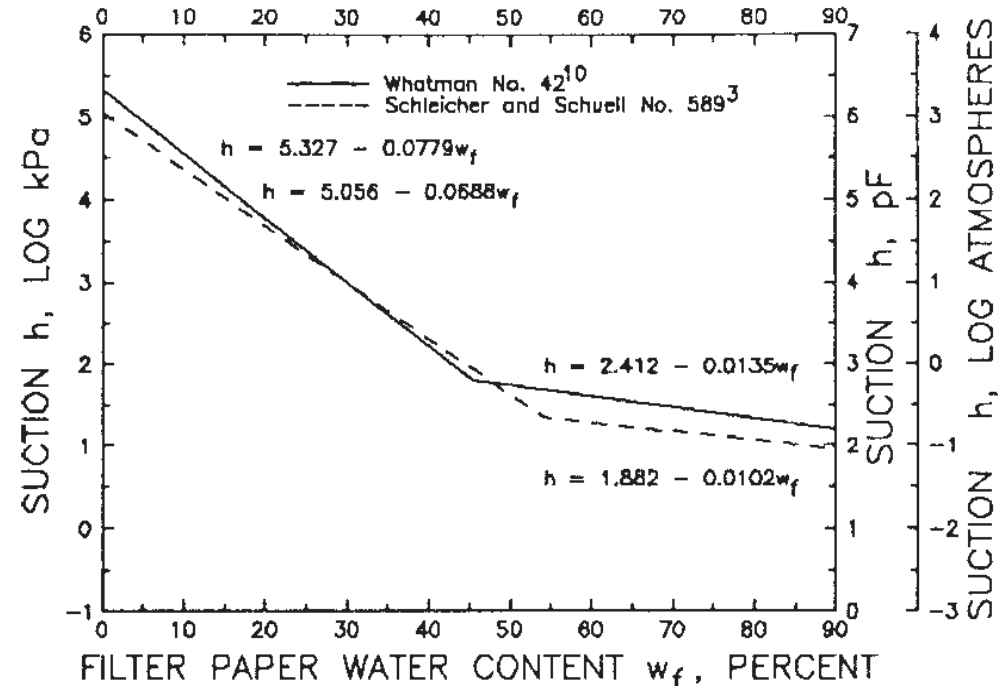
Nepřímé metody měření sání Filtrační papír



A. Total Suction

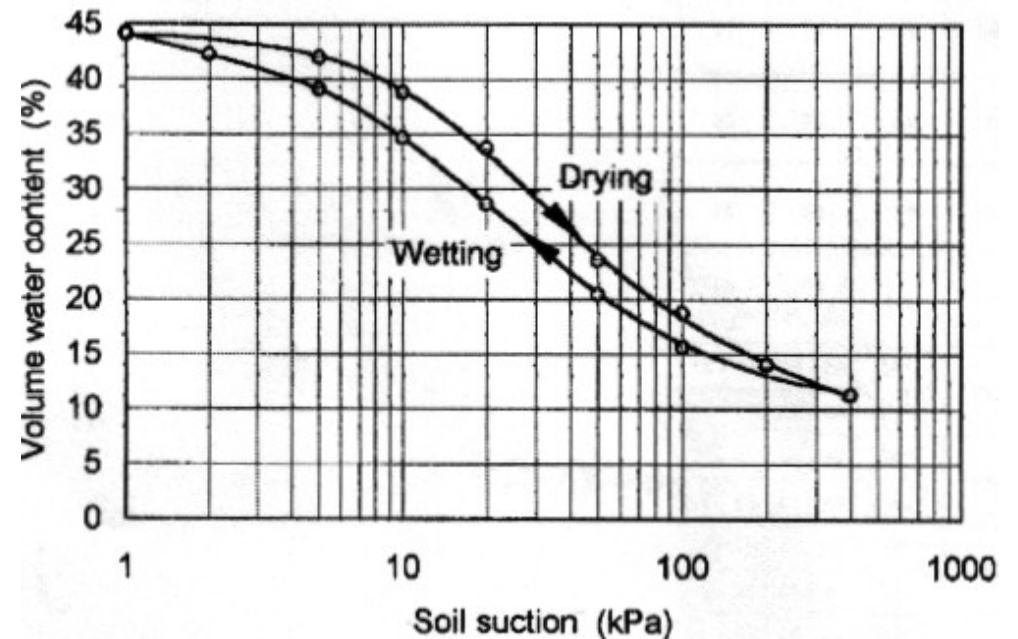
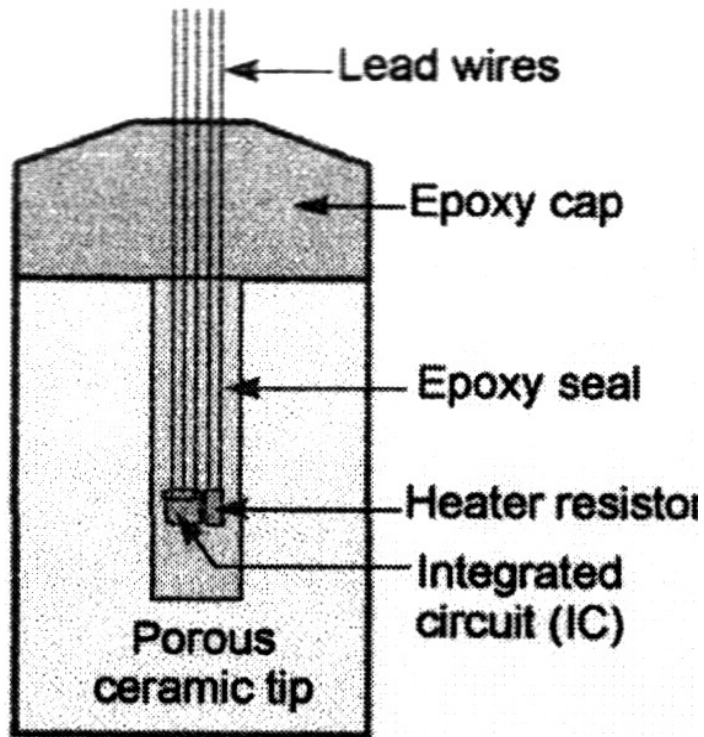


B. Matrix Suction

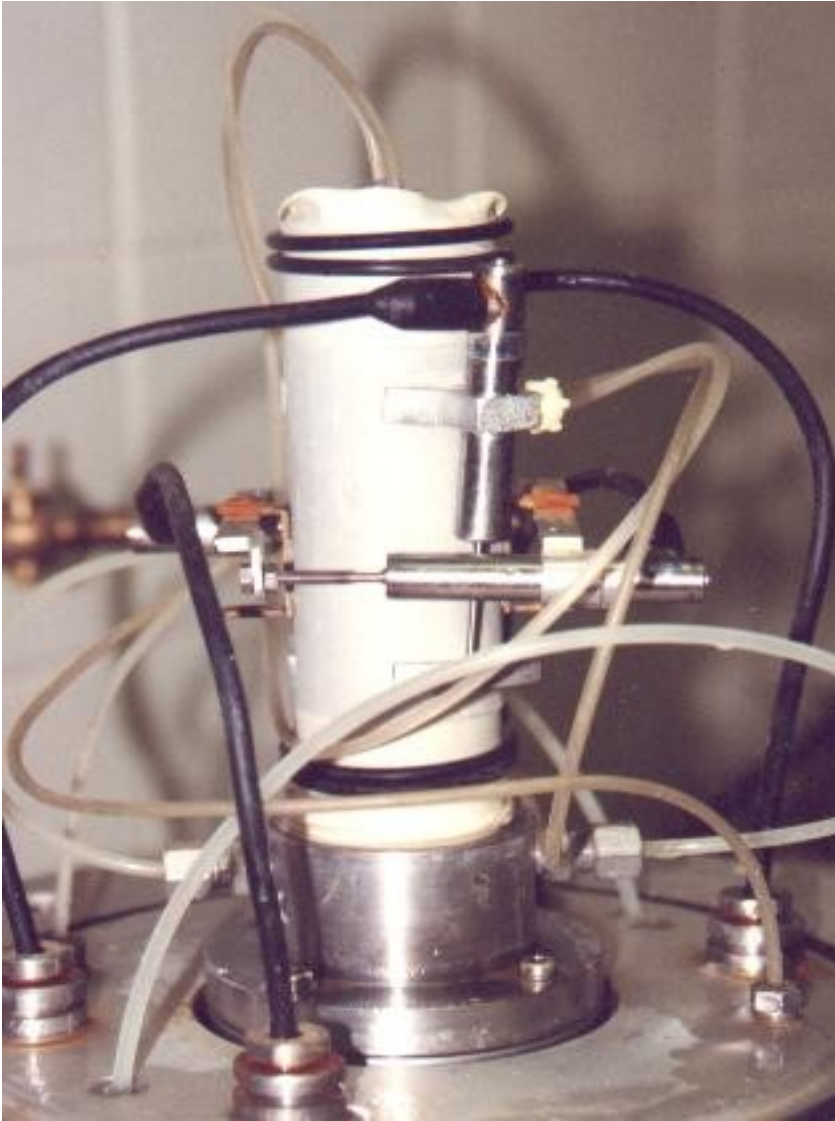


(ASTM D5298-03)

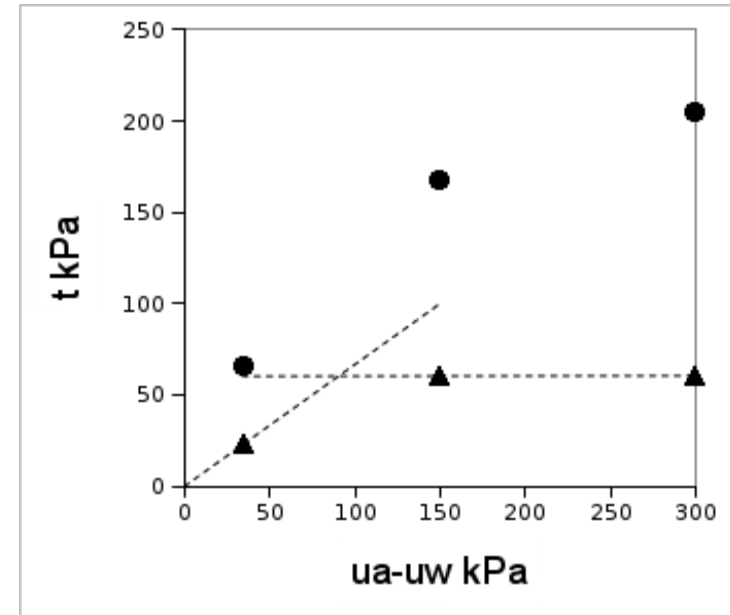
Nepřímé metody měření sání Teplotní čidla



Měření parametrů v laboratoři



(Kořán, 2004)



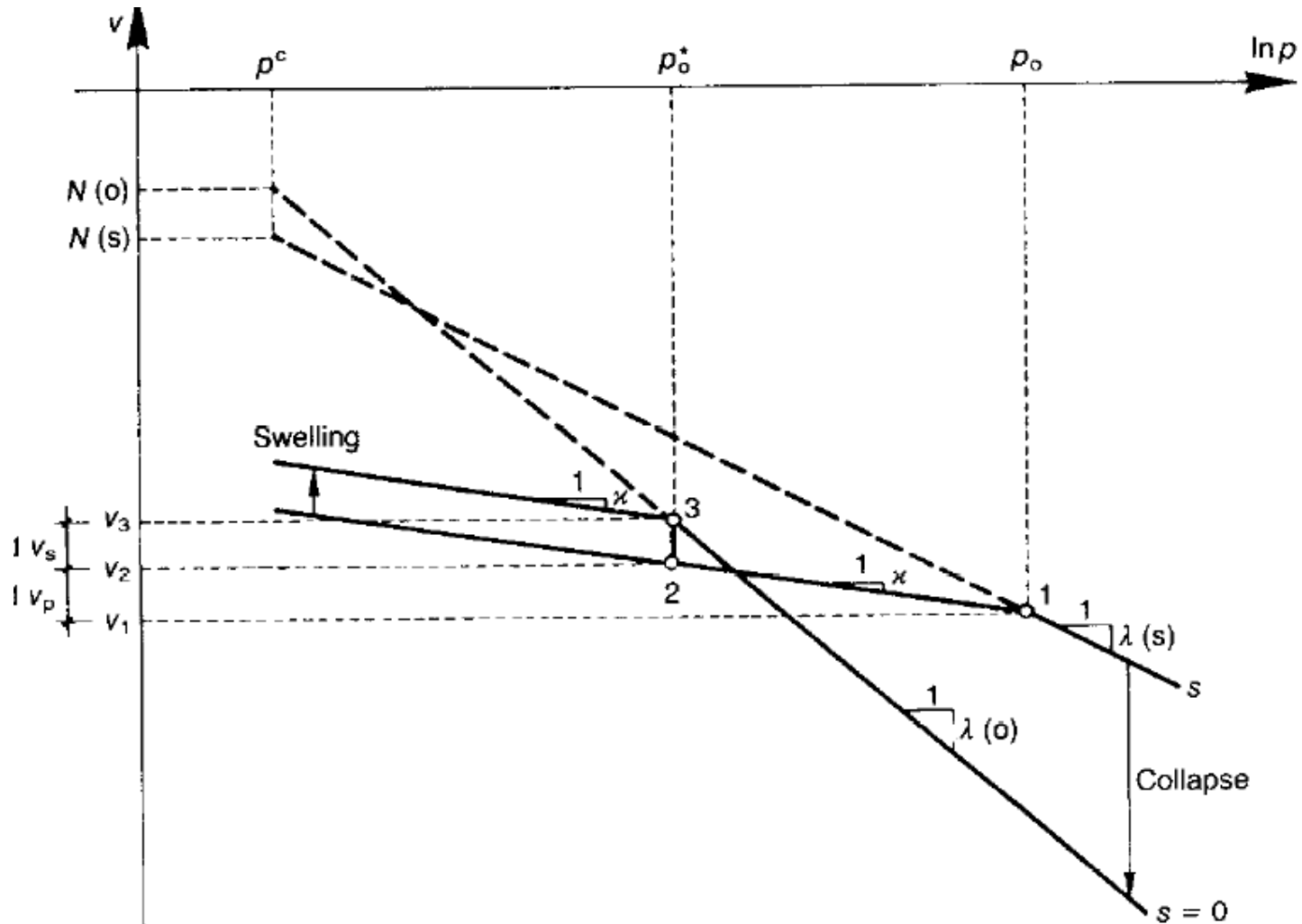
Obálka nelineární vzhledem k sání

Pro měření objemových změn vzorků → **komora s dvojitou stěnou**

Komora s dvojitou stěnou

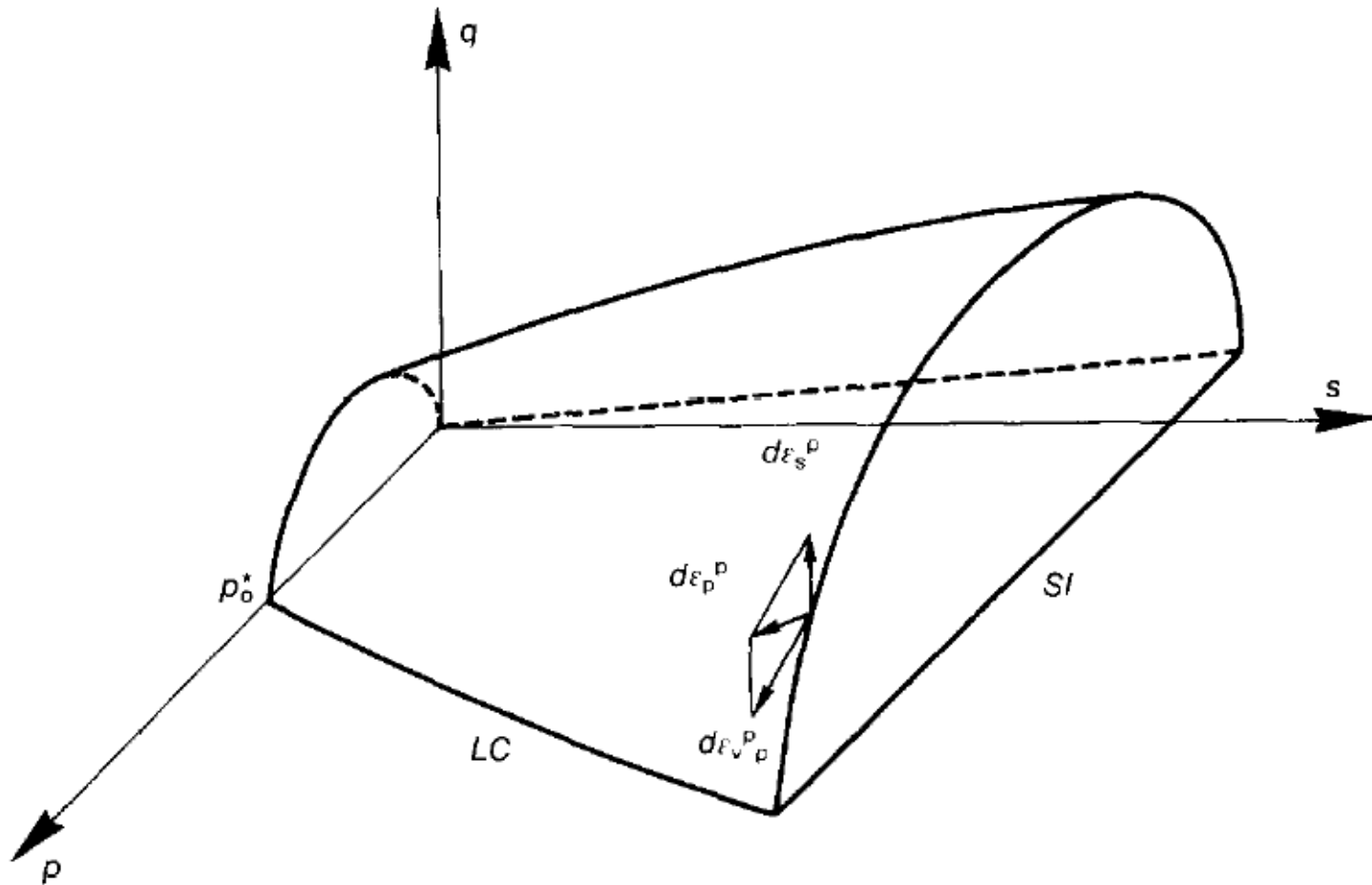


Barcelonský model zplastizování, plocha plasticity v (p, v)



(Alonso et al, 1990)

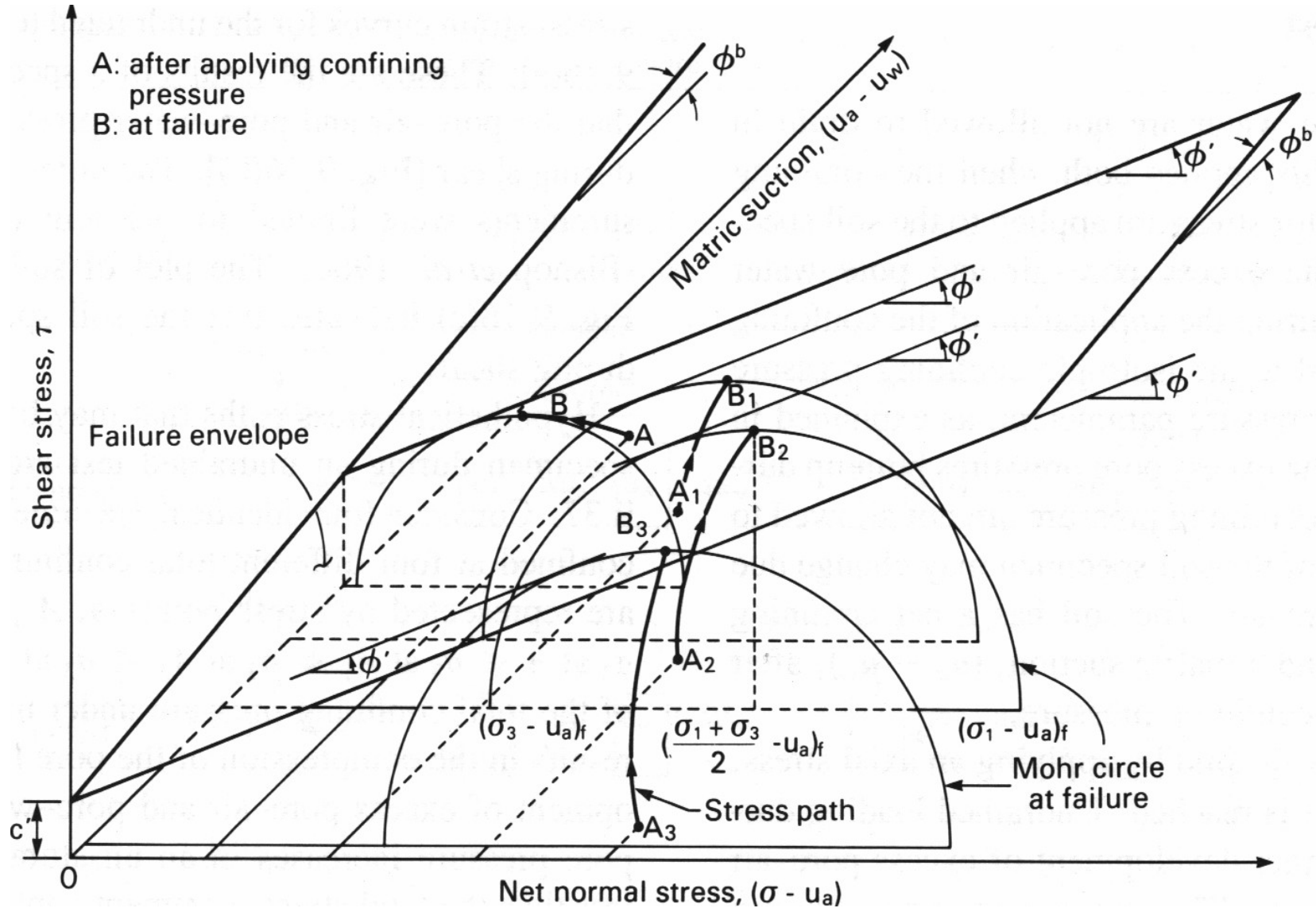
Barcelonský model 3D zobrazení plochy plasticity v (p,q,s)



(Alonso et al, 1990)

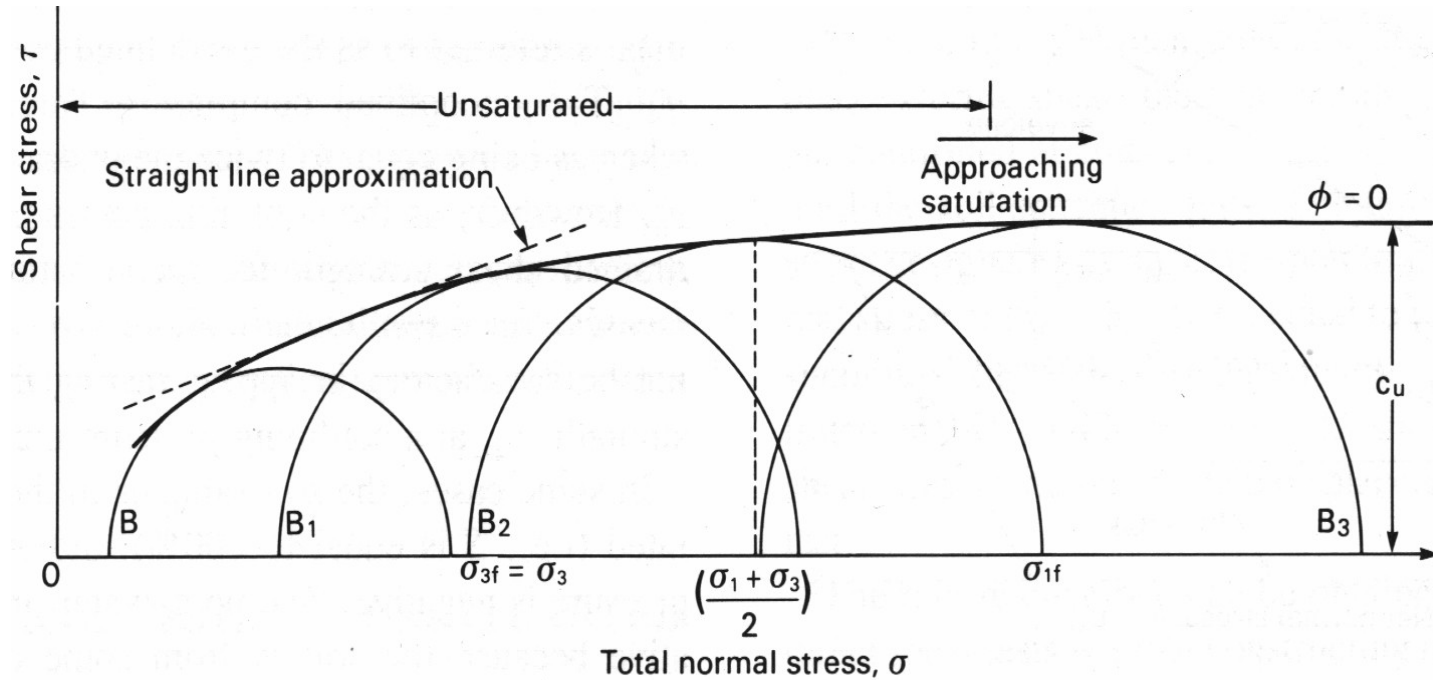
UU Obálky nenasycených zemin

$B < 1 \rightarrow \Delta u < \Delta \sigma$; 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 ($\leftarrow \phi^b < \phi'$)



[1]

UU Obálky - pokrač.

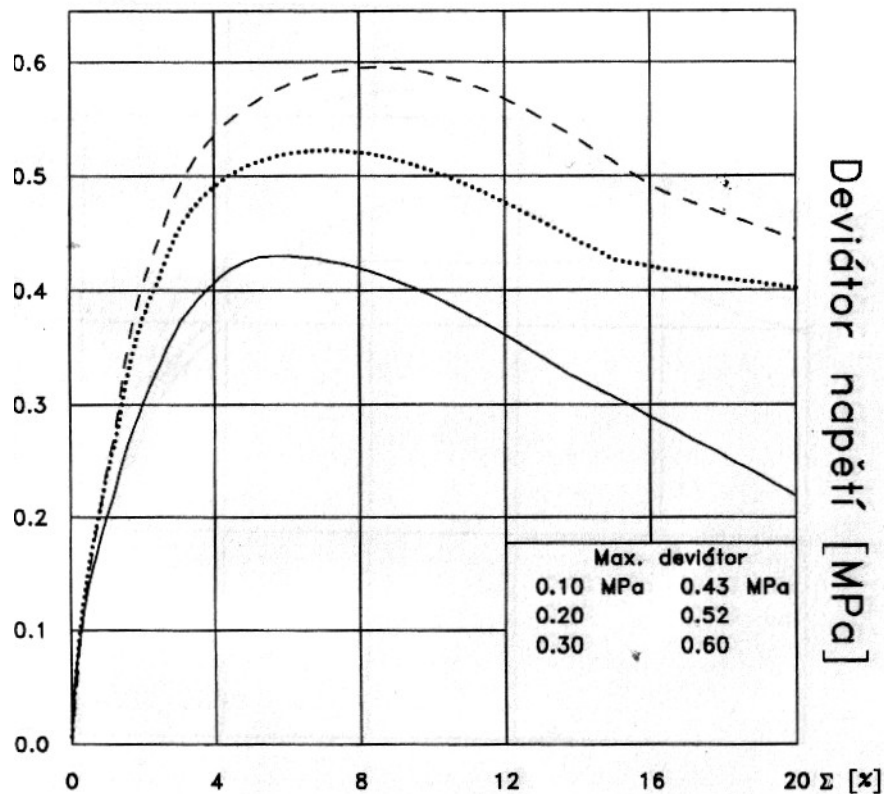


Při zkoušce při nižších napětích kavitace

UU trojosé zkoušky na jemnozrnné zemině:

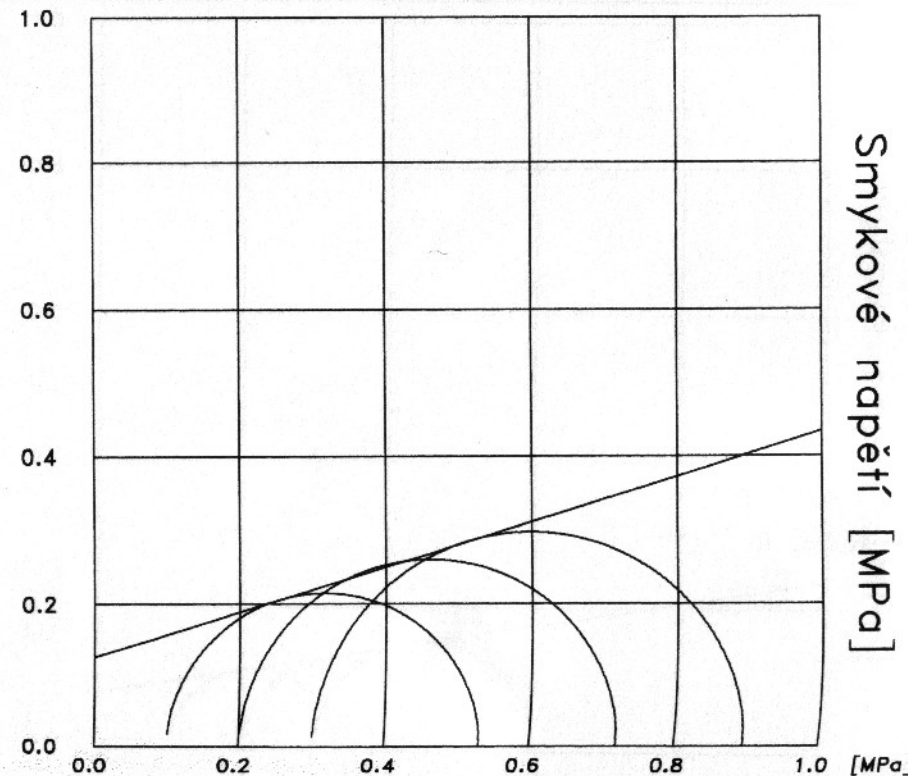
MV(F7), $I_p=39$, $w_L=75$, $S_r=0,98$

TRIAXIÁLNÍ SMYKOVÁ ZKOUSKA
 odvodněná, 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)

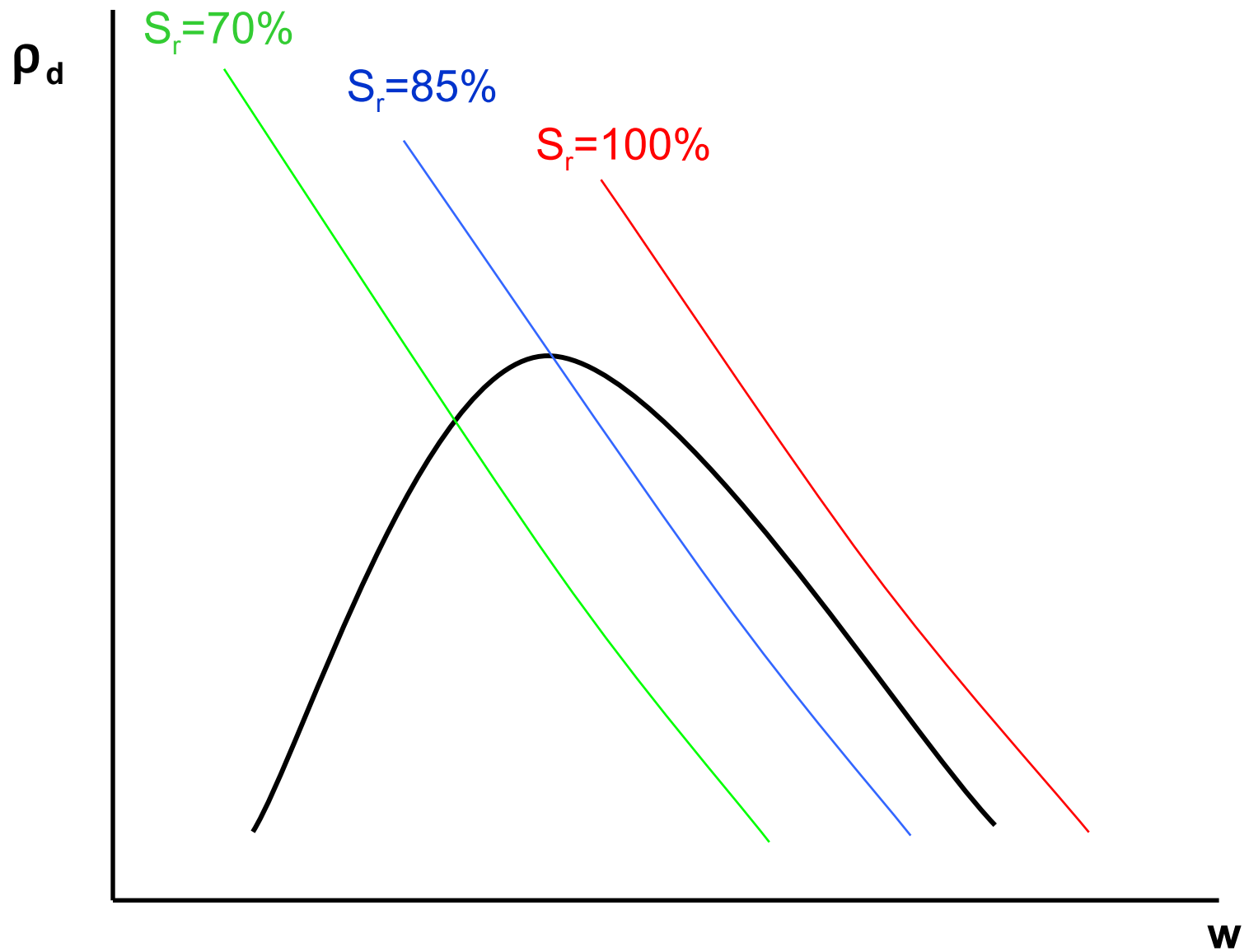
STABILITA NÁSYPU



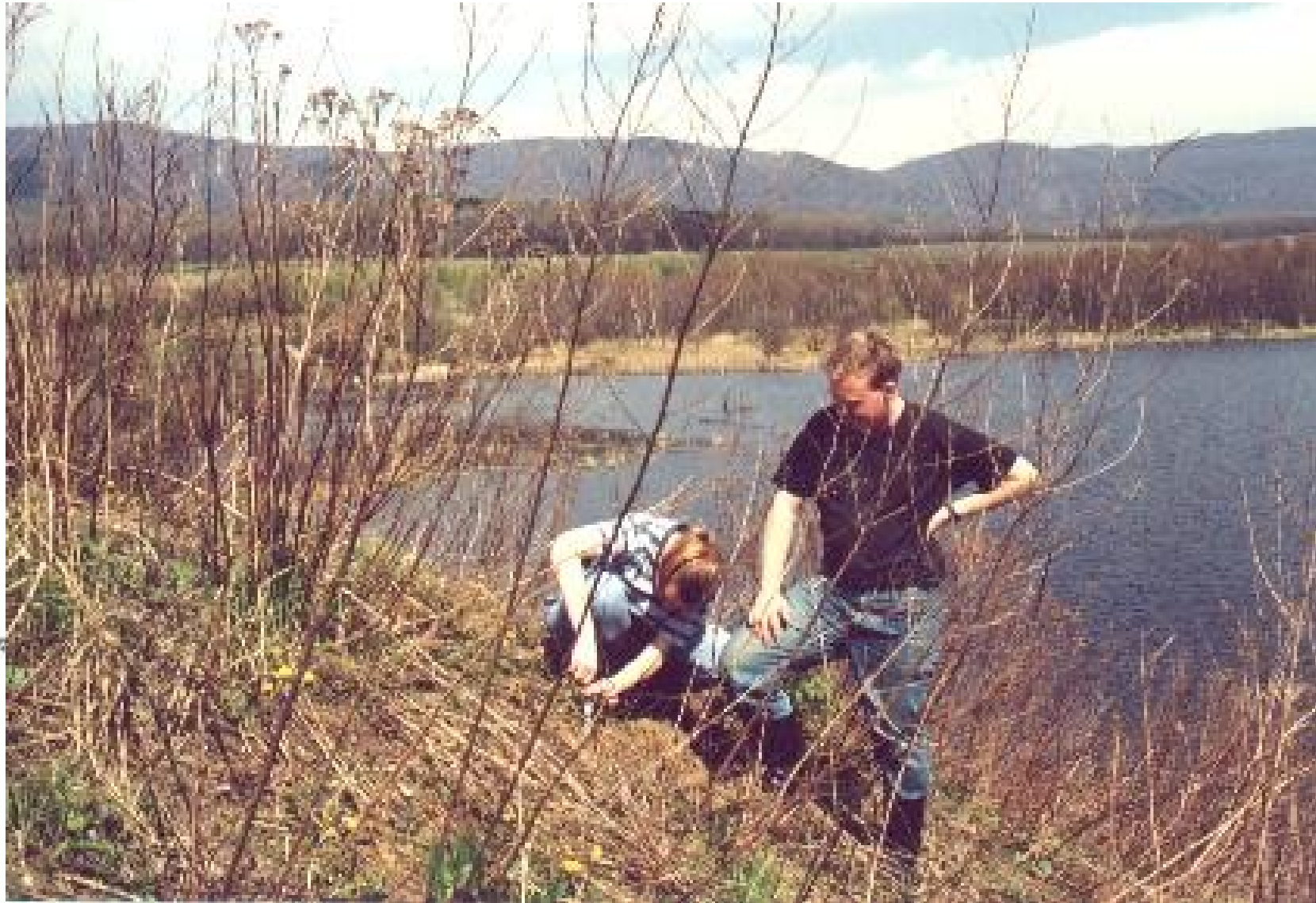
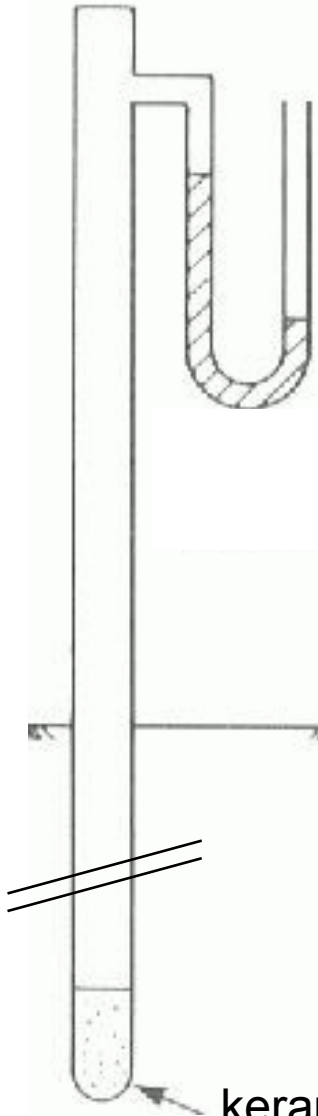
STABILITA NÁSYPU



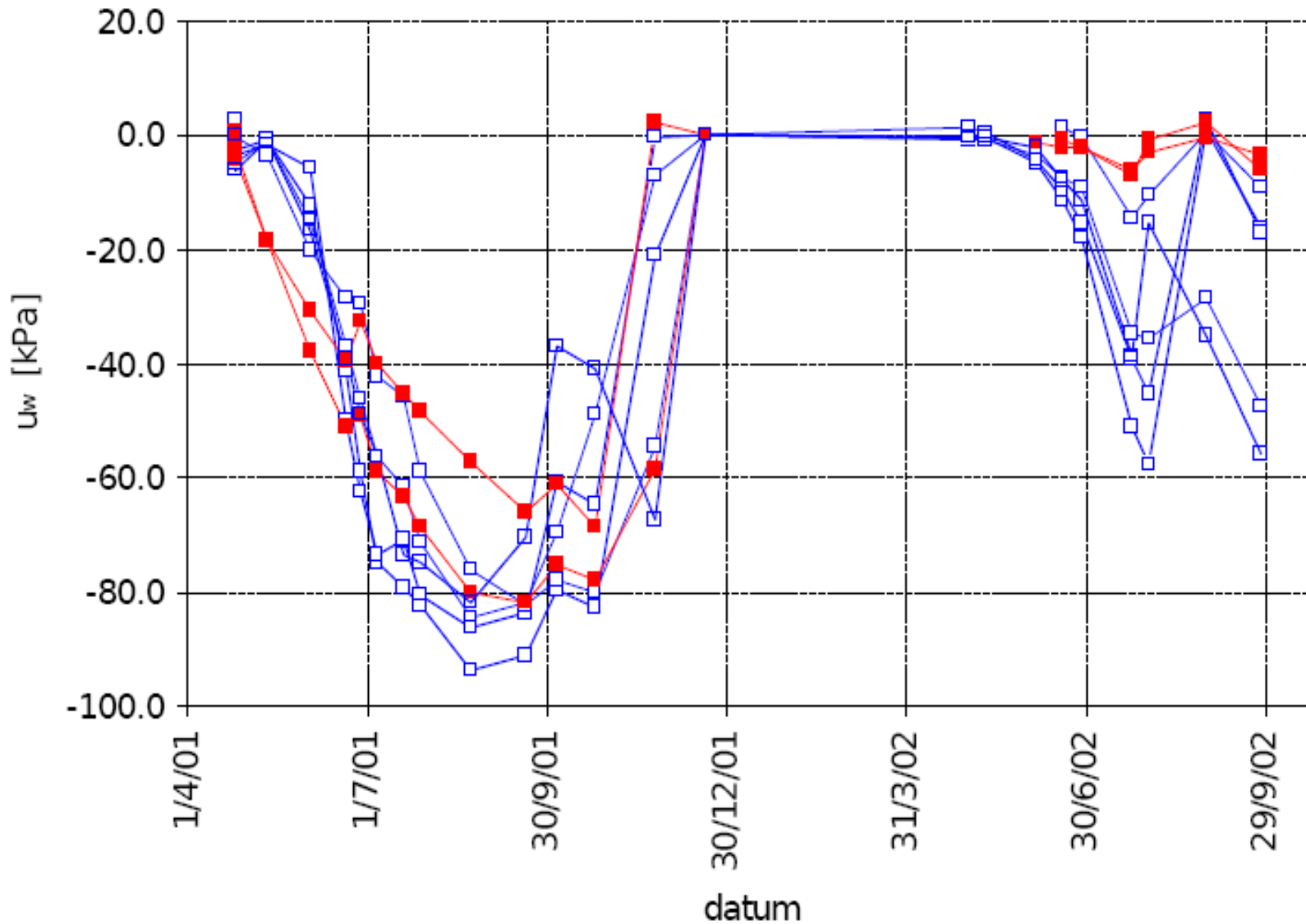
STABILITA NÁSYPU



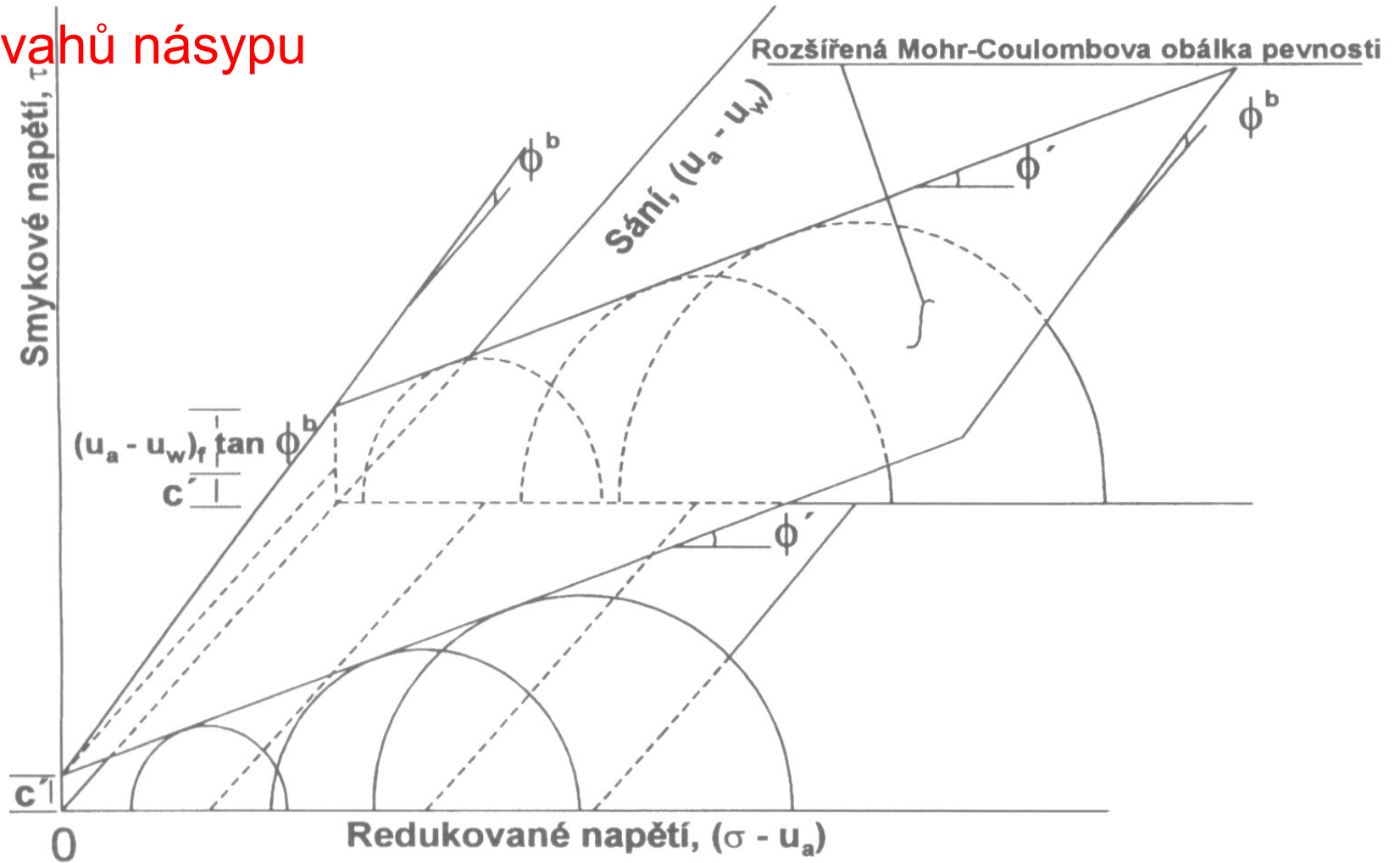
Tenzometr



Měření sání v násypu in situ



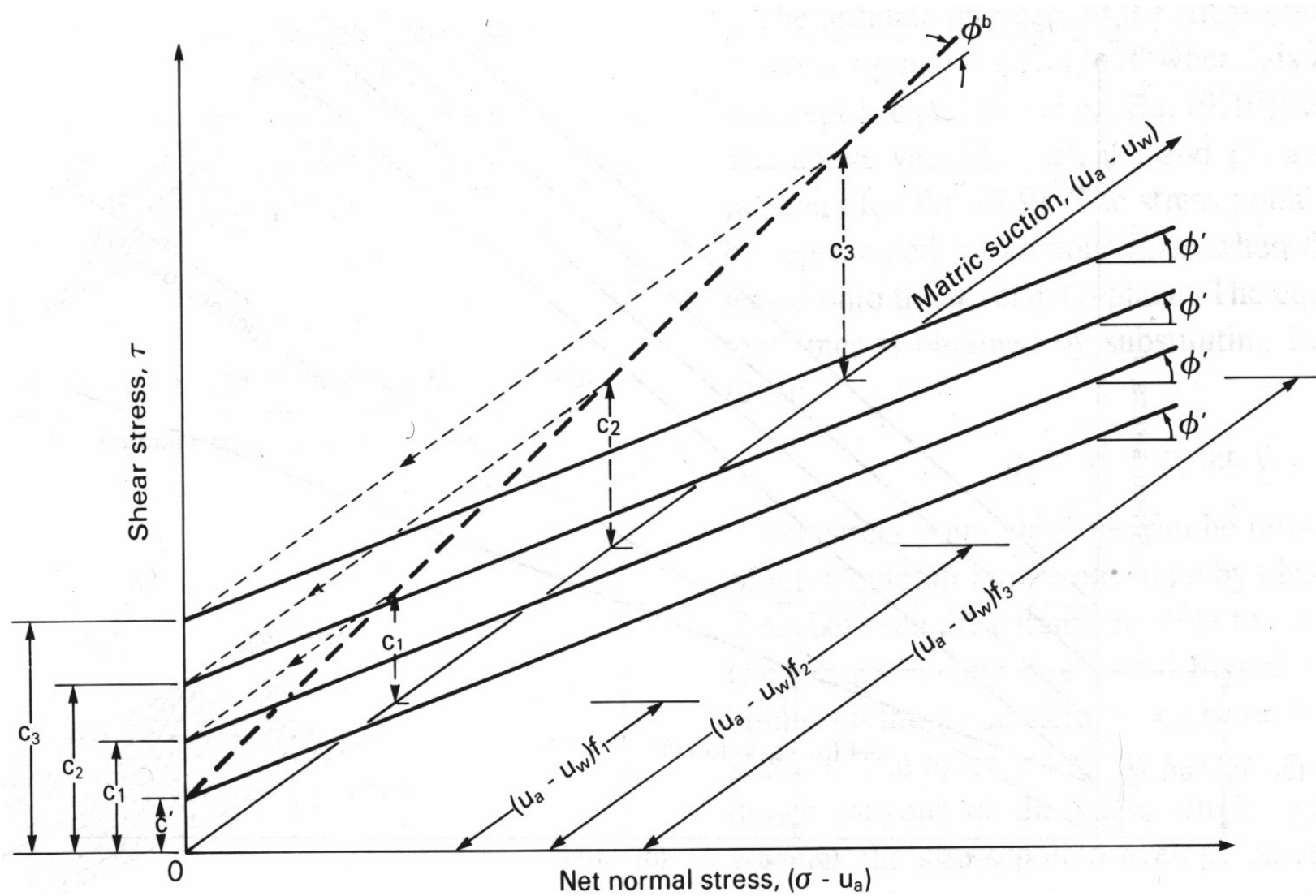
Stabilita svahů násypu



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

$$c_{\text{kapilární}} = (u_a - u_w)_f \operatorname{tg}\phi^b = \dots = fce(q_f, (p - u_a)_f, \phi')$$

Kapilární koheze (linearita obálky?)



[1]

$$c' = 0; \phi' = 28^\circ$$

Nenasycená zemina

$$\tau_f = c_c + (\sigma - u_a)_f \operatorname{tg}\phi' = c_c + 0,53 \sigma$$

sání 35 kPa $\rightarrow c_c \cong 20$ kPa **FS = 3**

sání 150 kPa $\rightarrow c_c \cong 40$ kPa

Nasycená zemina

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg}\phi' = 0,53 \sigma'$$

FS = 0,9

Stabilitní výpočty metodou mezní rovnováhy

1. Sání cca 35 kPa lze pro danou zeminu uvažovat jako kapilární kohezi $c_c = 20$ kPa (40 kPa pro sání 150 - 300 kPa).
2. V zimním období sání klesá na nulu.
3. V klimatických podmínkách ČR nelze dlouhodobě uvažovat zvýšení pevnosti a stability vlivem sání.
4. Sesuvy pozorované na obou hutněných násypech souvisí se sezónním poklesem sání ('dlouhodobá' - odvodněná stabilita).

Citovaná literatura

- Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40, No 3, 405-430.
- Bishop, A.W. (1961) The measurements of pore pressure in the triaxial test. *Proc. Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths, London, 38-46.
- Boso, M., Tarantino, A. and Mongiovi, L. (2005) Shear strength behaviour of a reconstituted clayey silt. *Proc. Unsaturated soils*, Mancuso & Tarantino (eds), Taylor and Francis, London, 1-14.
- Fredlund, D.G. (2006) Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *JGGE ASCE*, Vol. 132, No. 3, 286-321.
- Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977) Stress state variables for unsaturated soils. *JGEDiv ASCE*, 103, No 5, 447-466.
- Havlíček, J. and Myslivec, A. (1965) The influence of saturation and stratification on the shearing properties of certain soil. *Proc 6ICSMFE*, Vol 1, 235-239.
- Karube, D. (1988) New concept of effective stress in unsaturated soil and rock. *ASTM STP977*, 539-552
- Khalili, N., Geiser, F. and Blight, G.E: (2004) Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence. *International Journal of Geomechanics ASCE*, 4, 2, 115-126.
- Kořán, P. (2004) Smyková pevnost nenasycené jílovité zeminy a kaolinu. *Doktorská dizertace*. PŘF UK, Praha.
- Li, X.S. (2003) Effective stress in unsaturated soil: a microstructural analysis. *Géotechnique* 53, No 2, 273-277.
- Rahardjo, H. and Leong, E.C. (2006) Suction measurements. *ASCE Geot. Spec. Publ. No 147 (Proc 4th Int Conf Unsat Soils)*, Vol 1, 81-104.
- Shuai, F, Fredlund, D.G. and Samarakesera, L. (2003) Numerical simulation of water movement in the suction equalization of a thermal conductivity sensor. *Geot. Testing. J. Vol. 26, No. 2*, 1-9.
- Terzaghi, K. (1936) The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. *Proc. ICSMFE*, Vol. 1, Cambridge, Mass., 54-56.