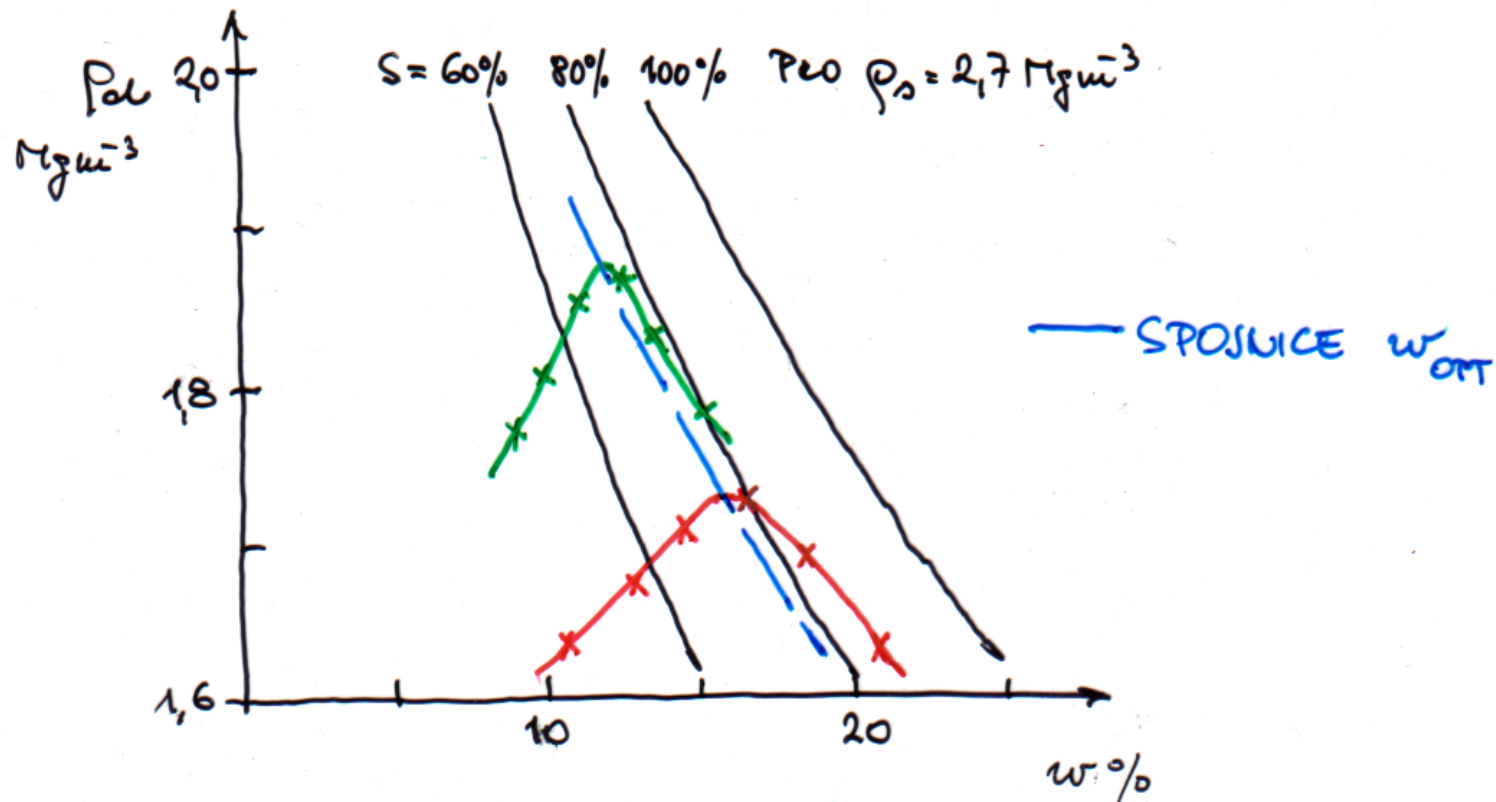


---

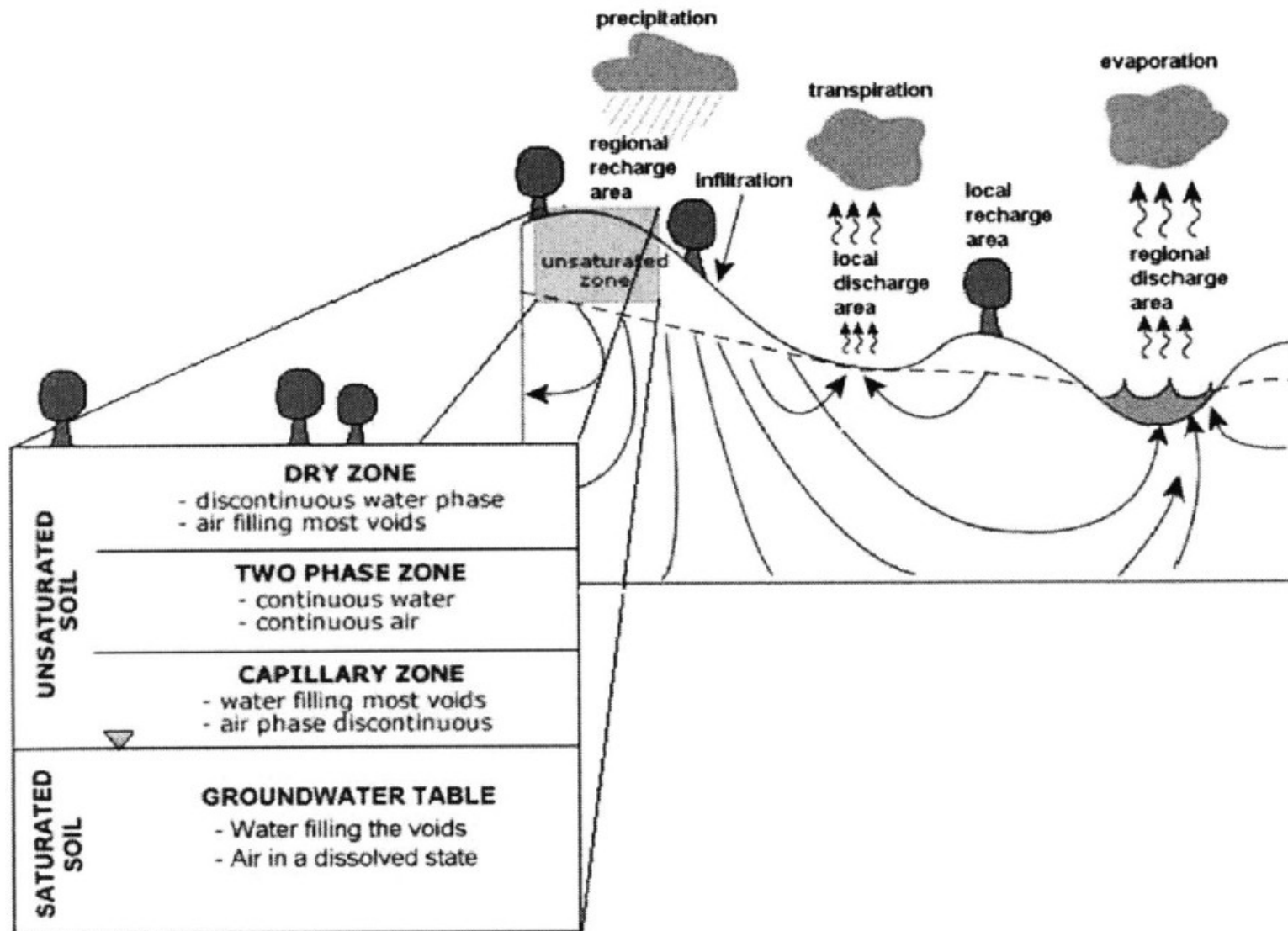
# MZ2 – přednáška 1: Částečně nasycené zeminy

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

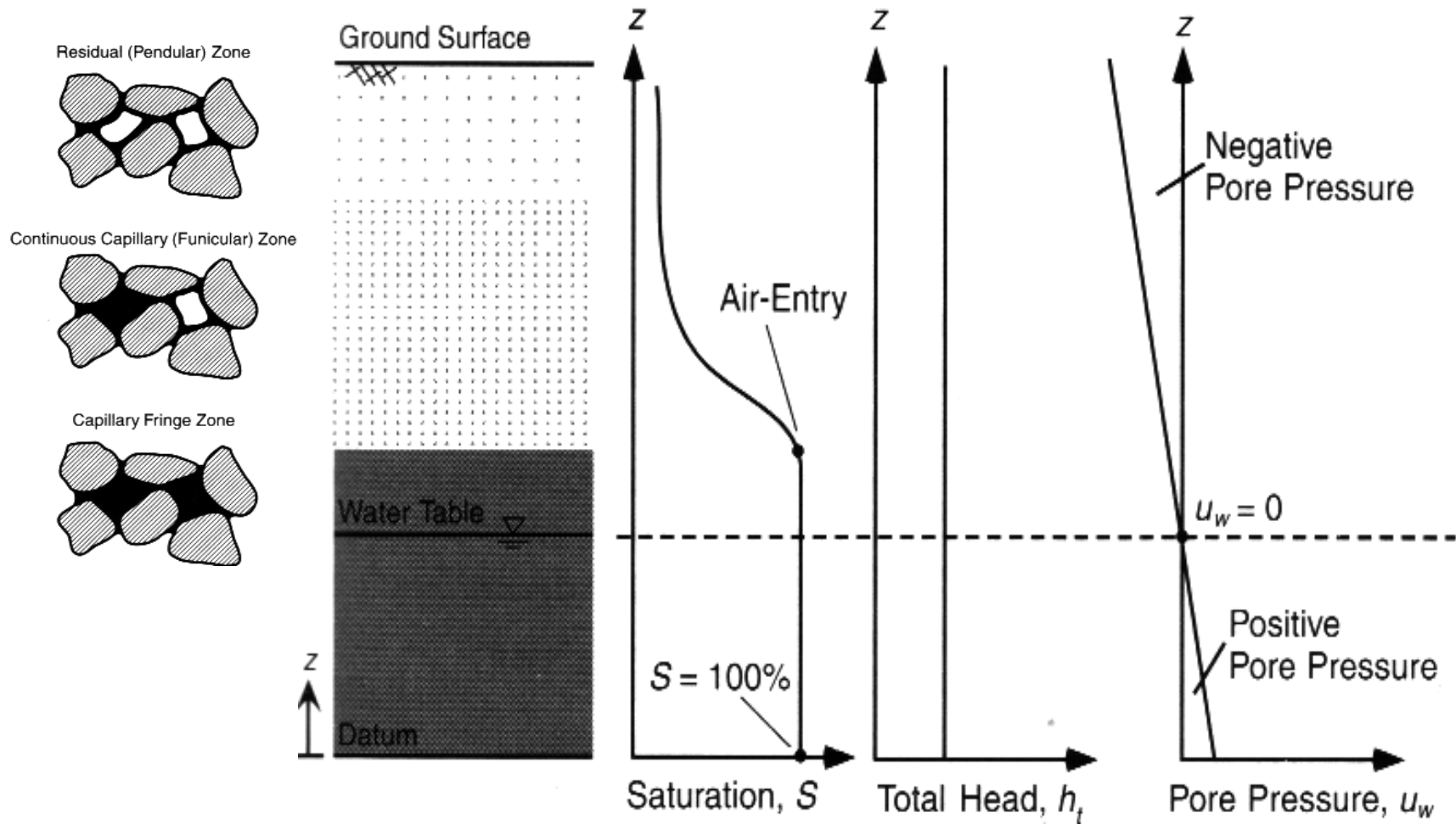


## Vadozní (“nenasyčená”) zóna

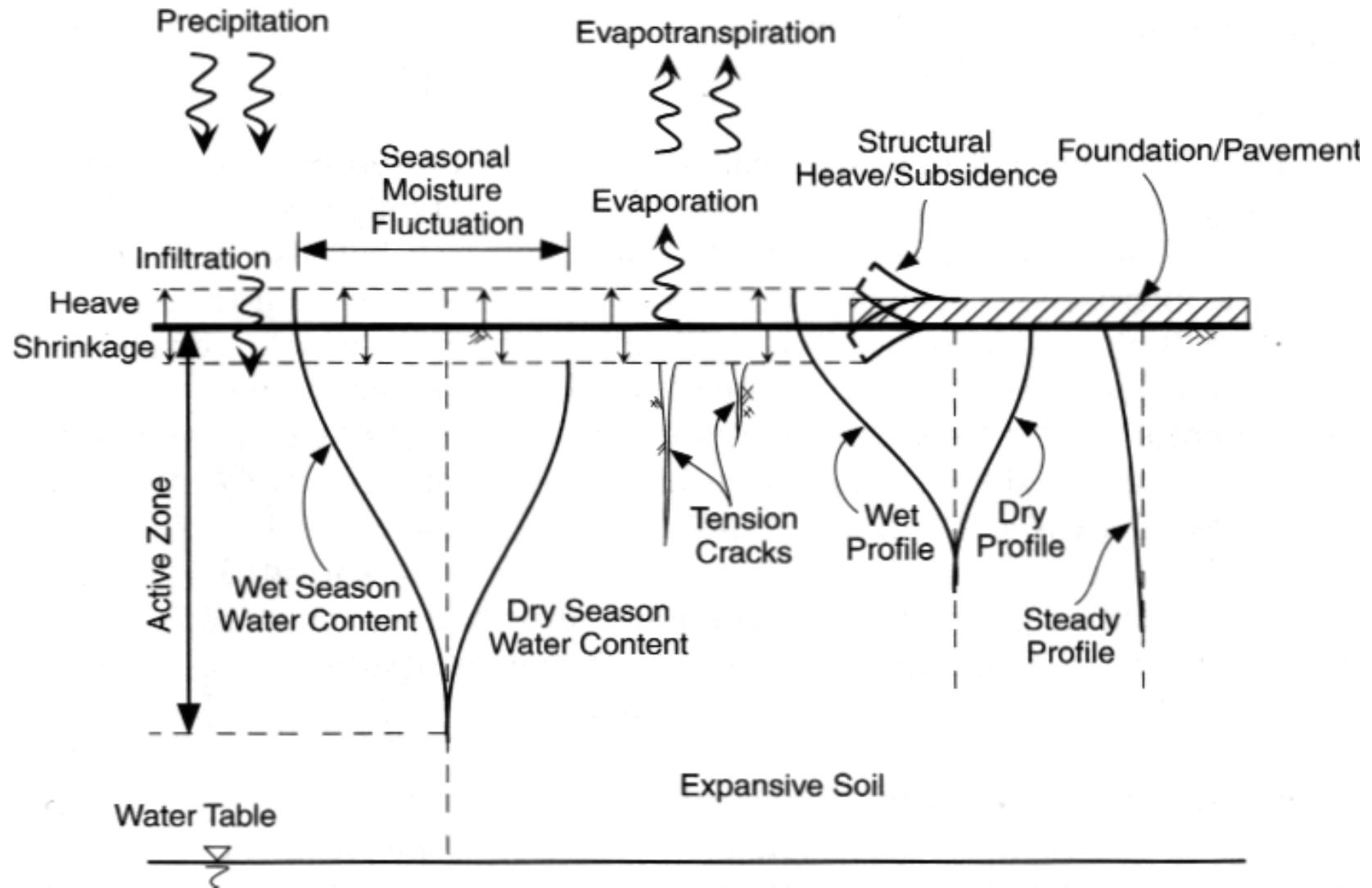
Kapilární zóna je ale nasycená



## ...vadózní zóna – stavové charakteristiky



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



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

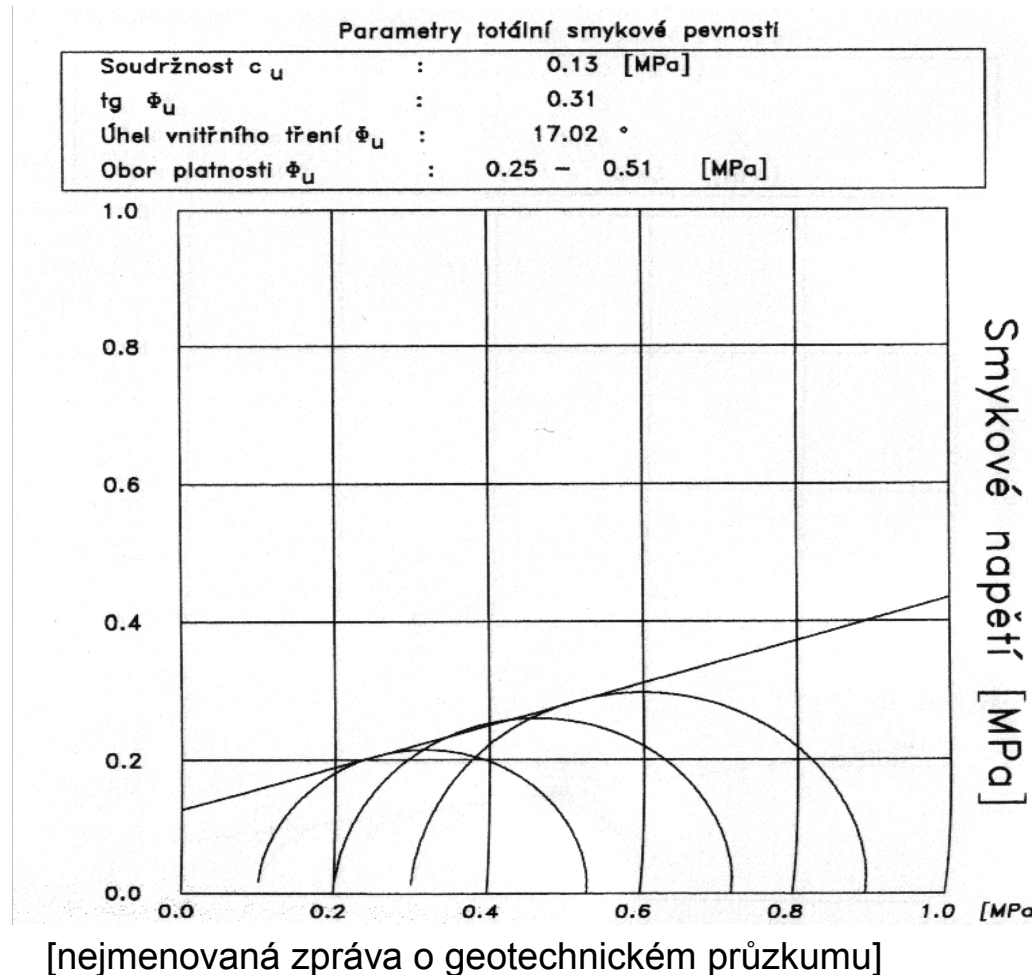
Podobně výsyvky – zpočátku nenasycené



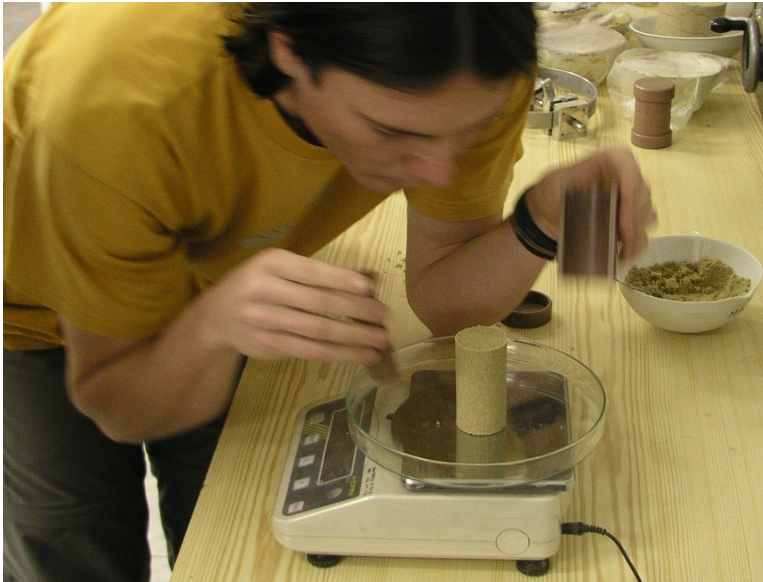
## Proč je to důležité - interpretace UU zkoušek nasycených zemin

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)



## Proč je to důležité





**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

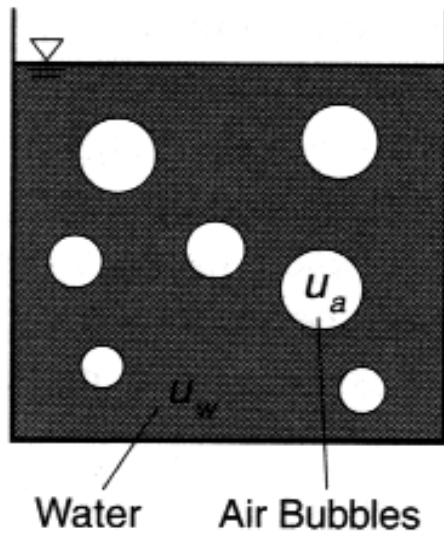
$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o$$

$\Psi_m$  sání matricové (**kapilární**) zahrnuje interakci fází

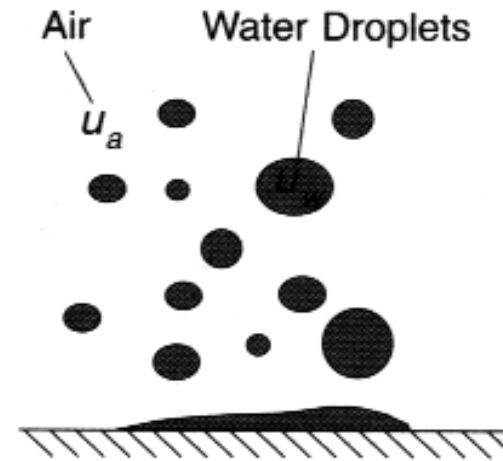
$\Psi_o$  osmotické sání

## .... 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

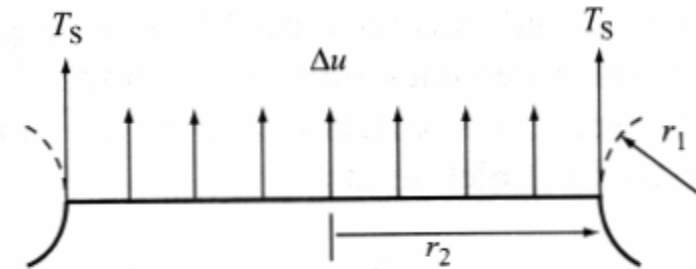
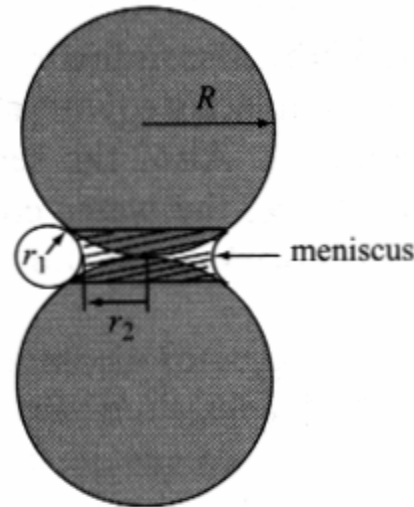
Vypařování – postupný rozdíl tlaků  $\Delta u$  –  
postupné zakřivování povrchu  
rozhraní voda-vzduch

→ Laplaceova rovnice pro rozdíl tlaků:

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

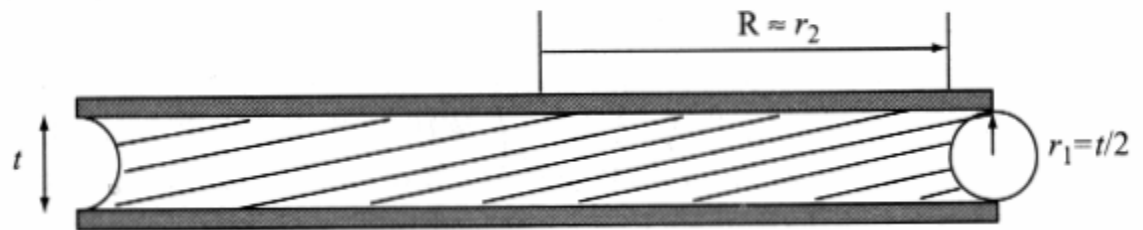
kde  $r_1$  a  $r_2$  jsou poloměry  
menisku, nikoliv zrn

$\Delta u \equiv$  kapilární sání



(a)

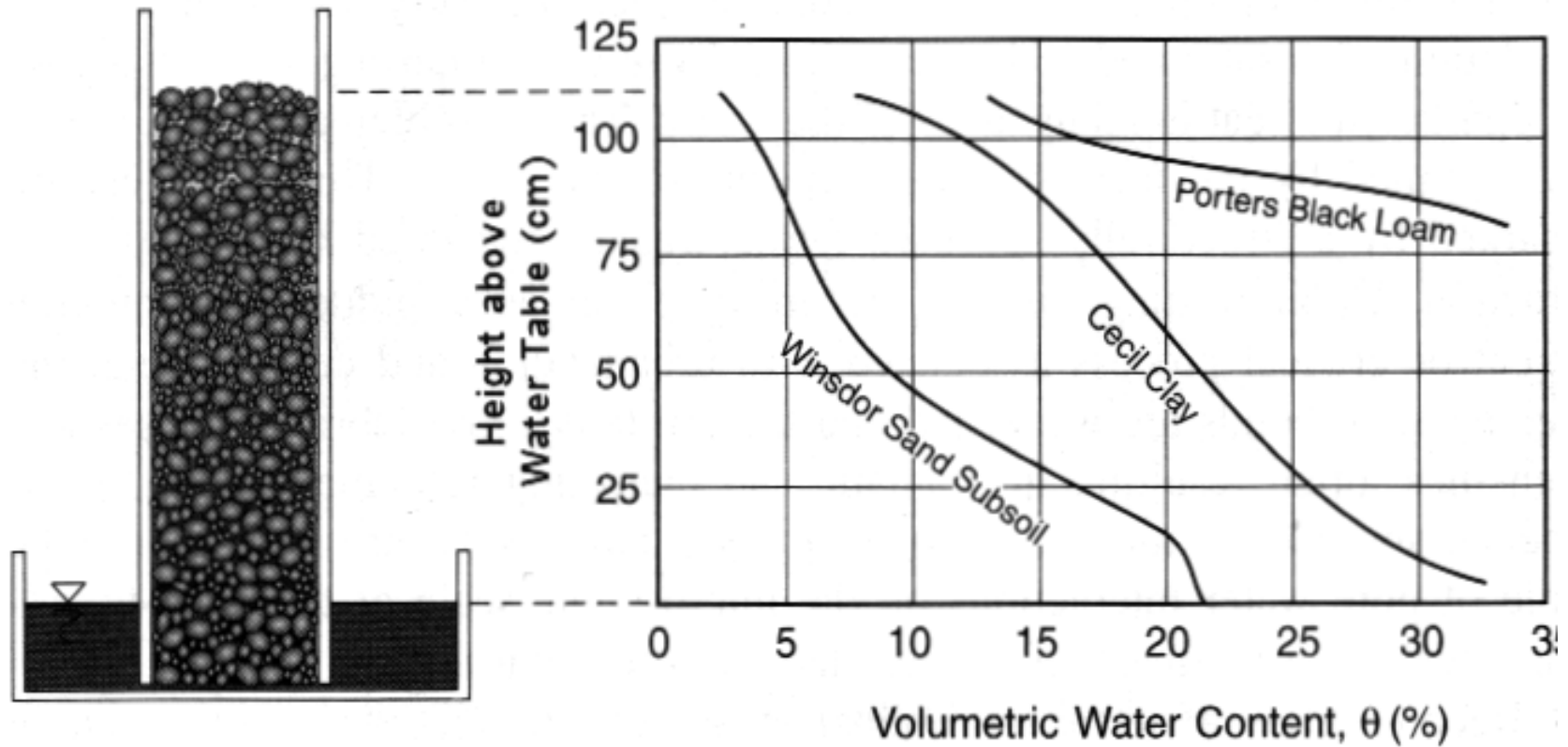
Ploché částice →  $r_2 \gg r_1$ ,  $1/r_2$  lze zanedbat



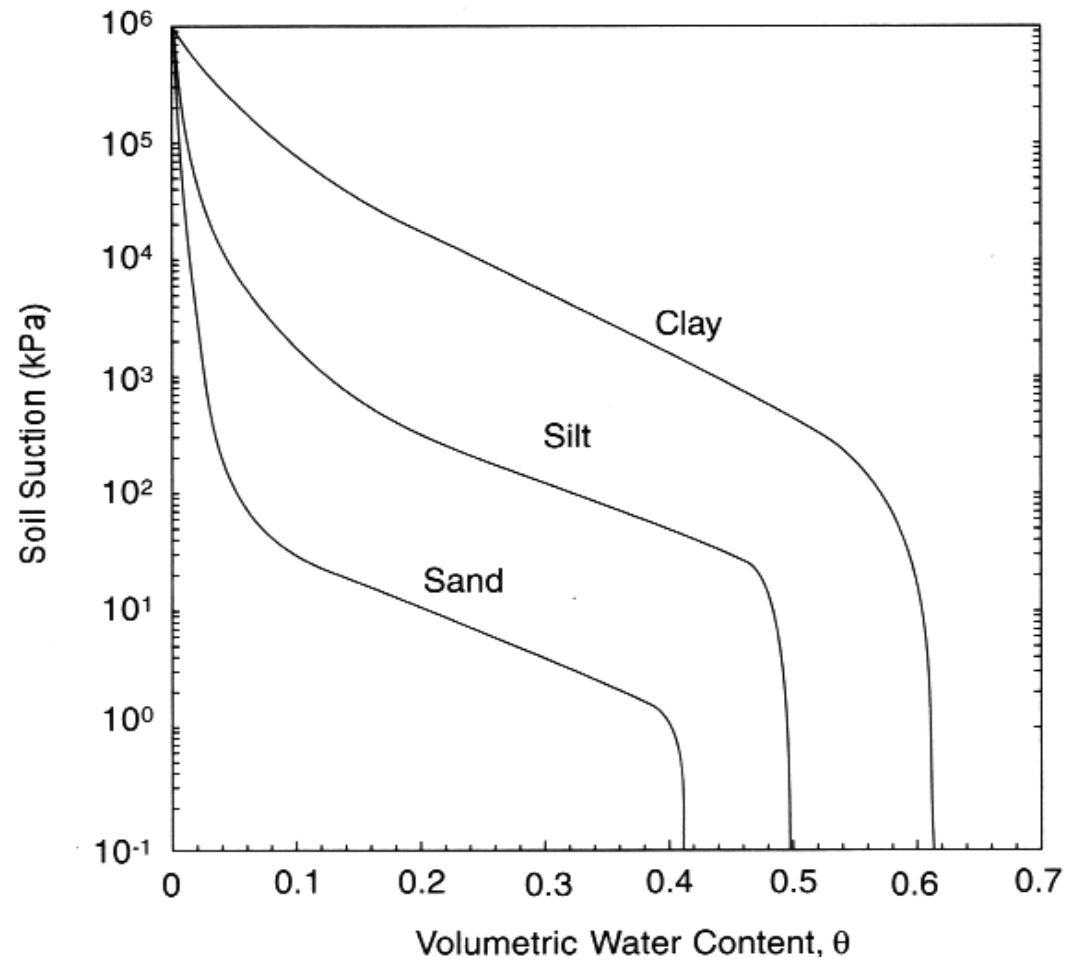
[Santamarina, 2001]

## Kapilarita v zeminách – kapilární elevace

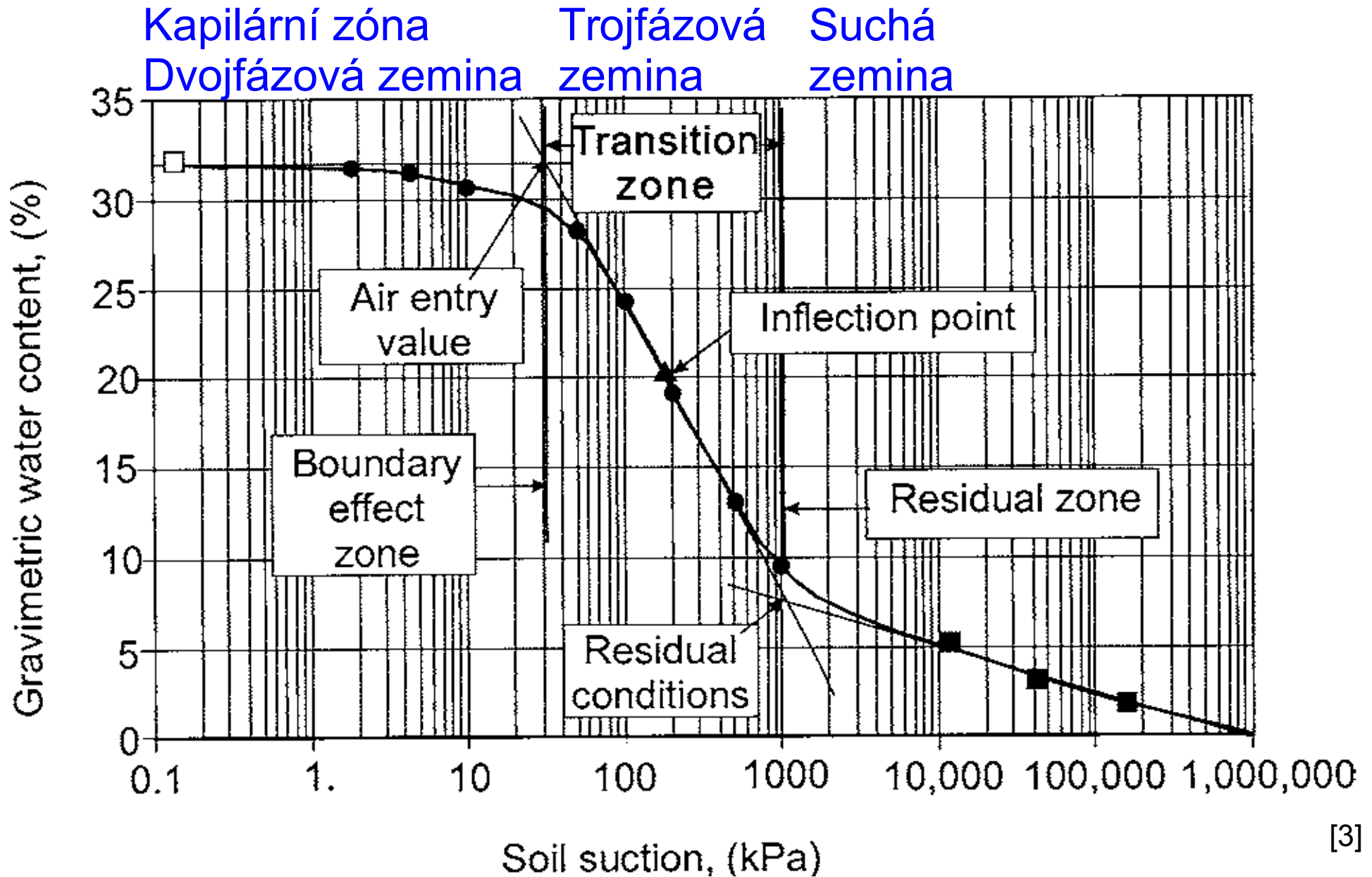
→ retence – **retenční čára** (WRC; SWCC)



...retenční čára (SWCC; WRC)



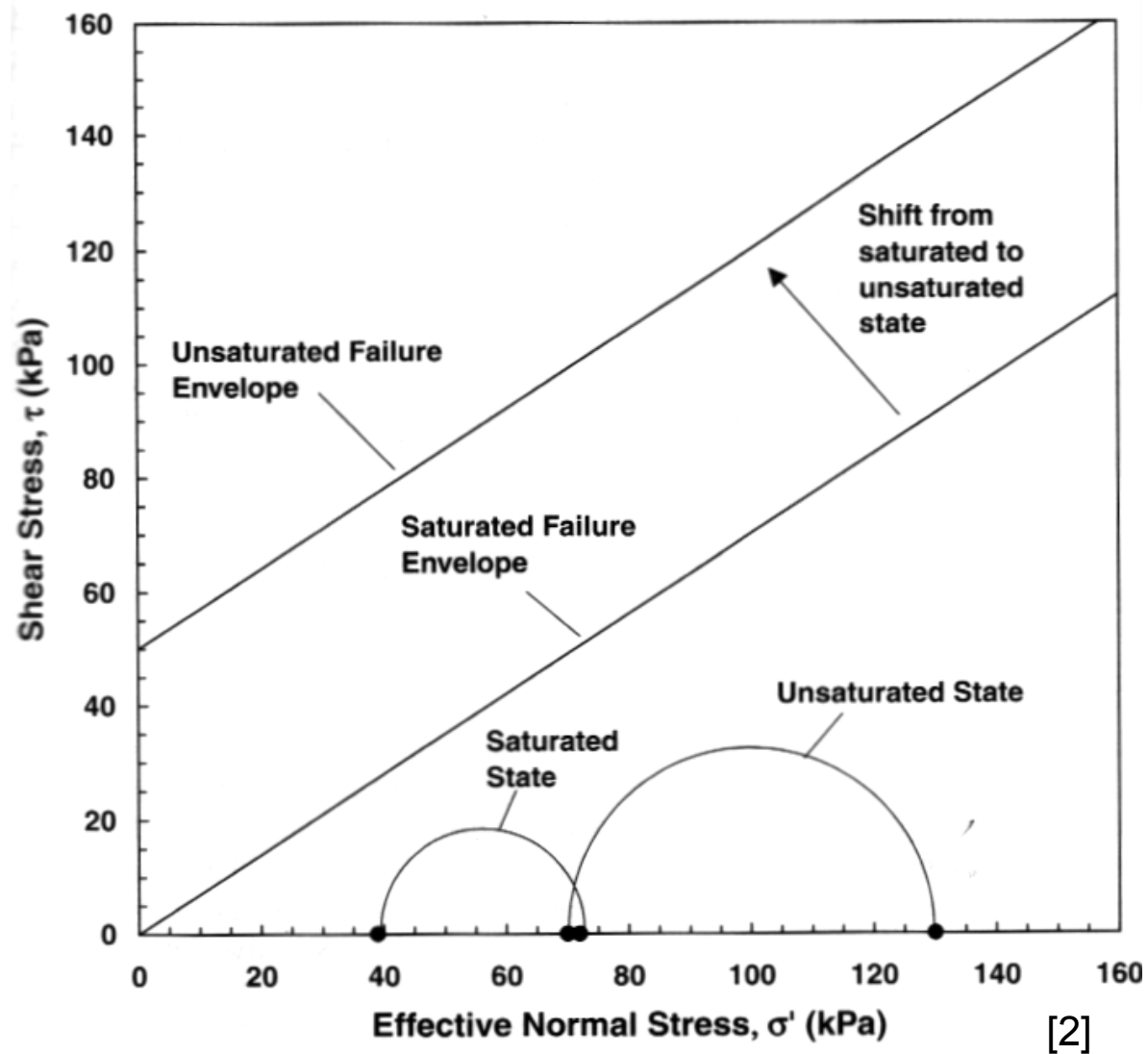
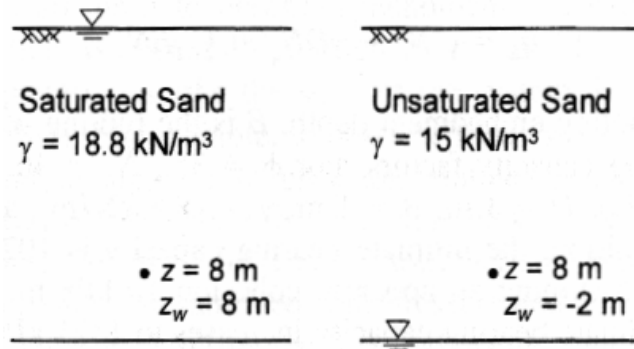
Retenční čára (pF čára, SWCC)



[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

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

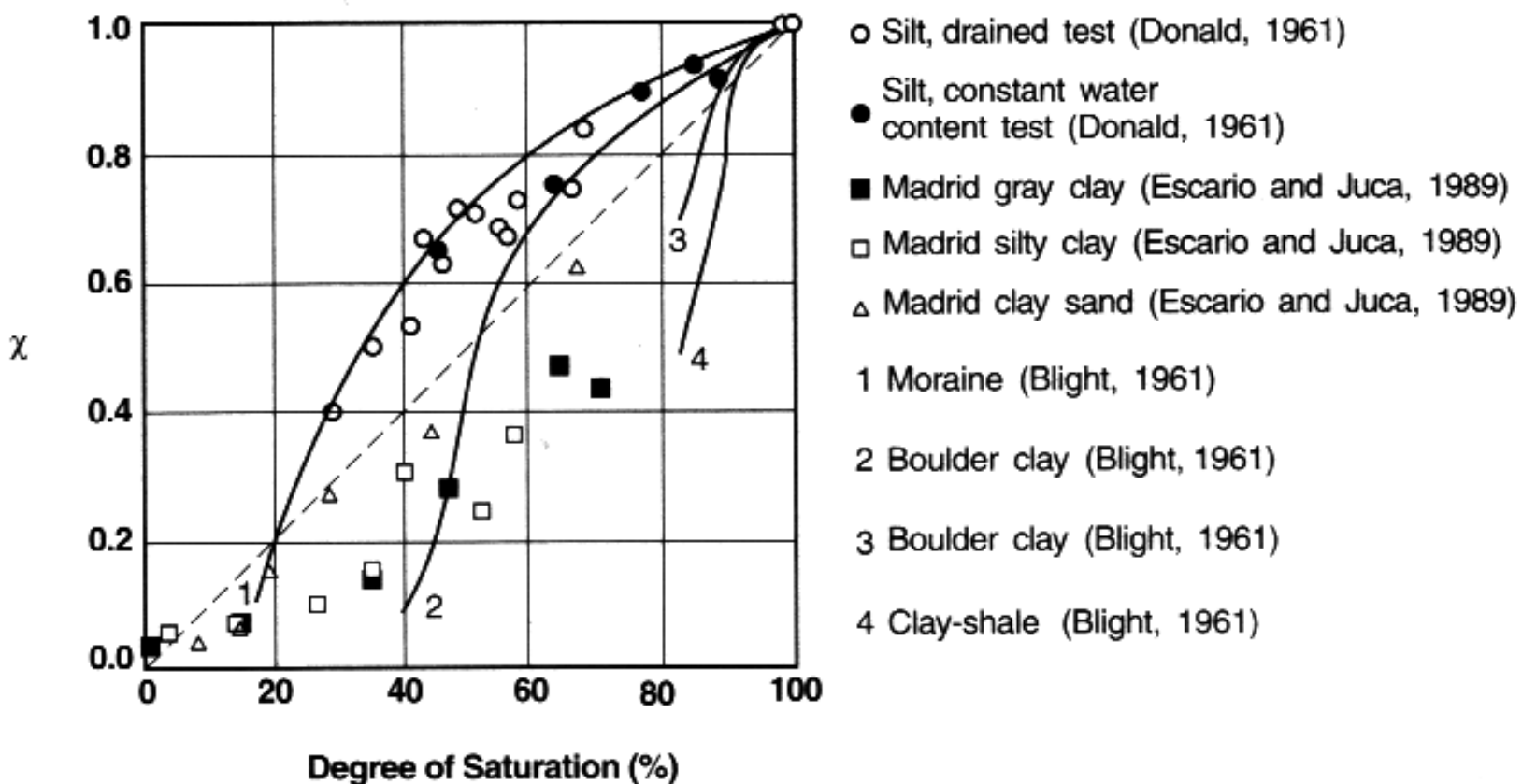
vážený průměr pórových tlaků  $\sigma' = \sigma - (\chi u_w + (1 - \chi) u_a)$

$\sigma^{\text{net}}$  je redukované napětí (totální napětí)

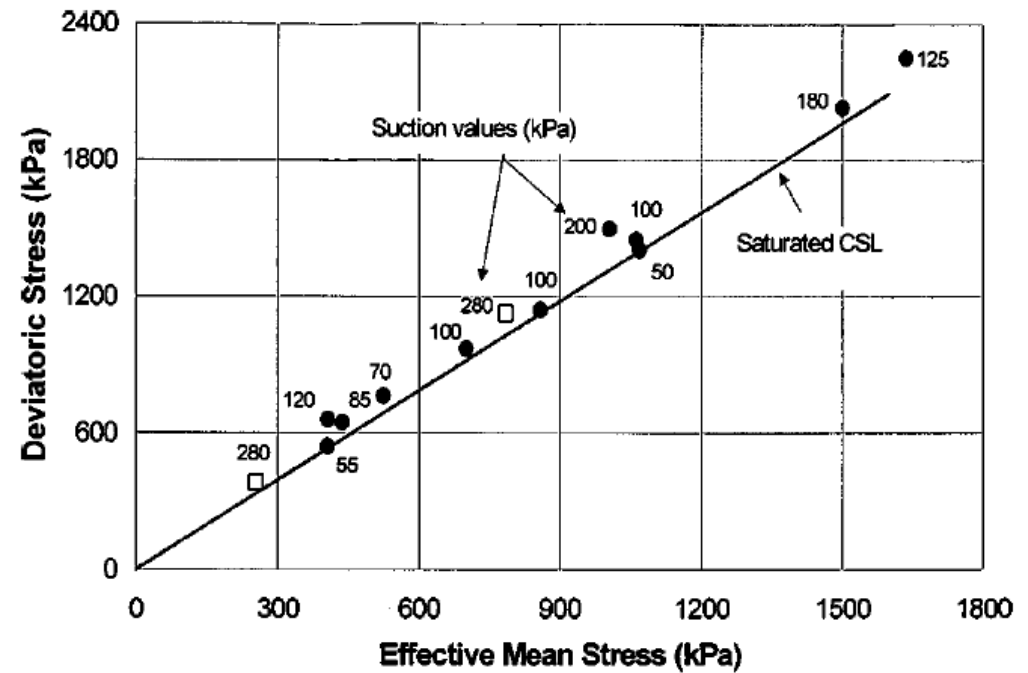
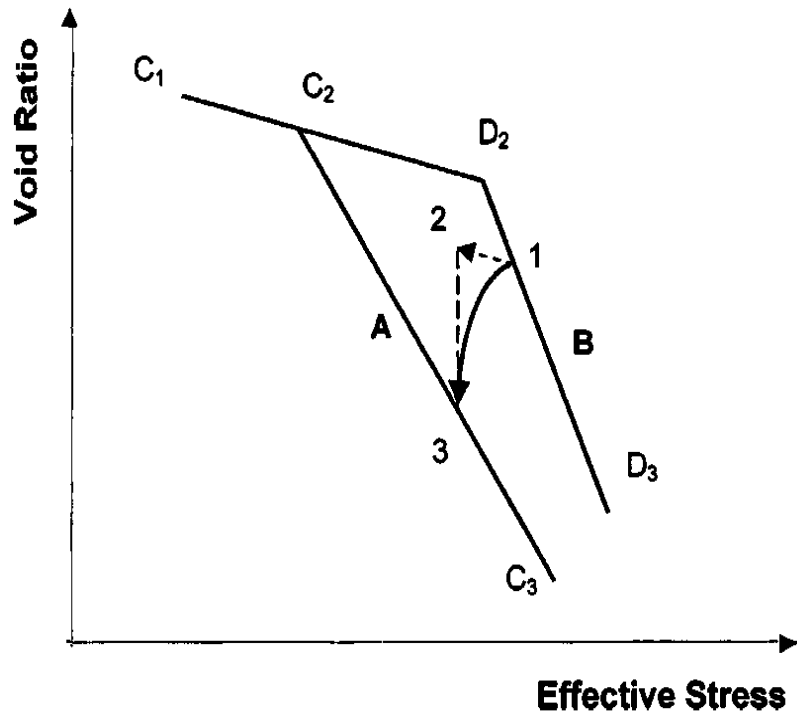
$s$  je kapilární sání (Laplace)

$\chi$  je materiálový parametr, velmi zjednodušeně  $\chi \approx S_r$ ,  $\chi = \chi(S_r)$

.... Bishopova rovnice,  $\chi$



## 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

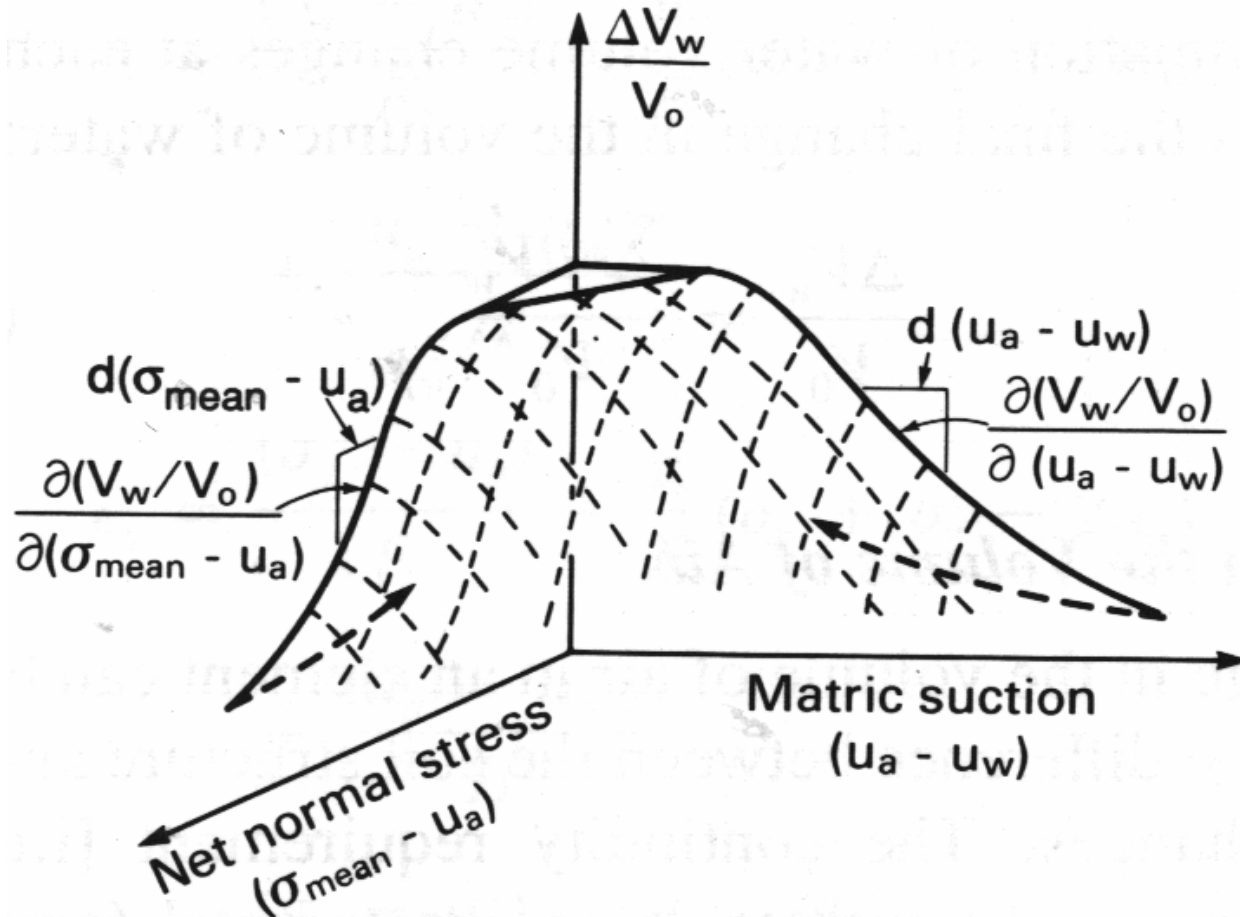
nebo rovnice pro **efektivní napětí** podle Bishopa

$$\sigma' = \sigma - (\chi u_w + (1 - \chi) u_a)$$

kde ale  $\chi$  je funkcí stupně nasycení  $S_r$  nebo sání  $s$

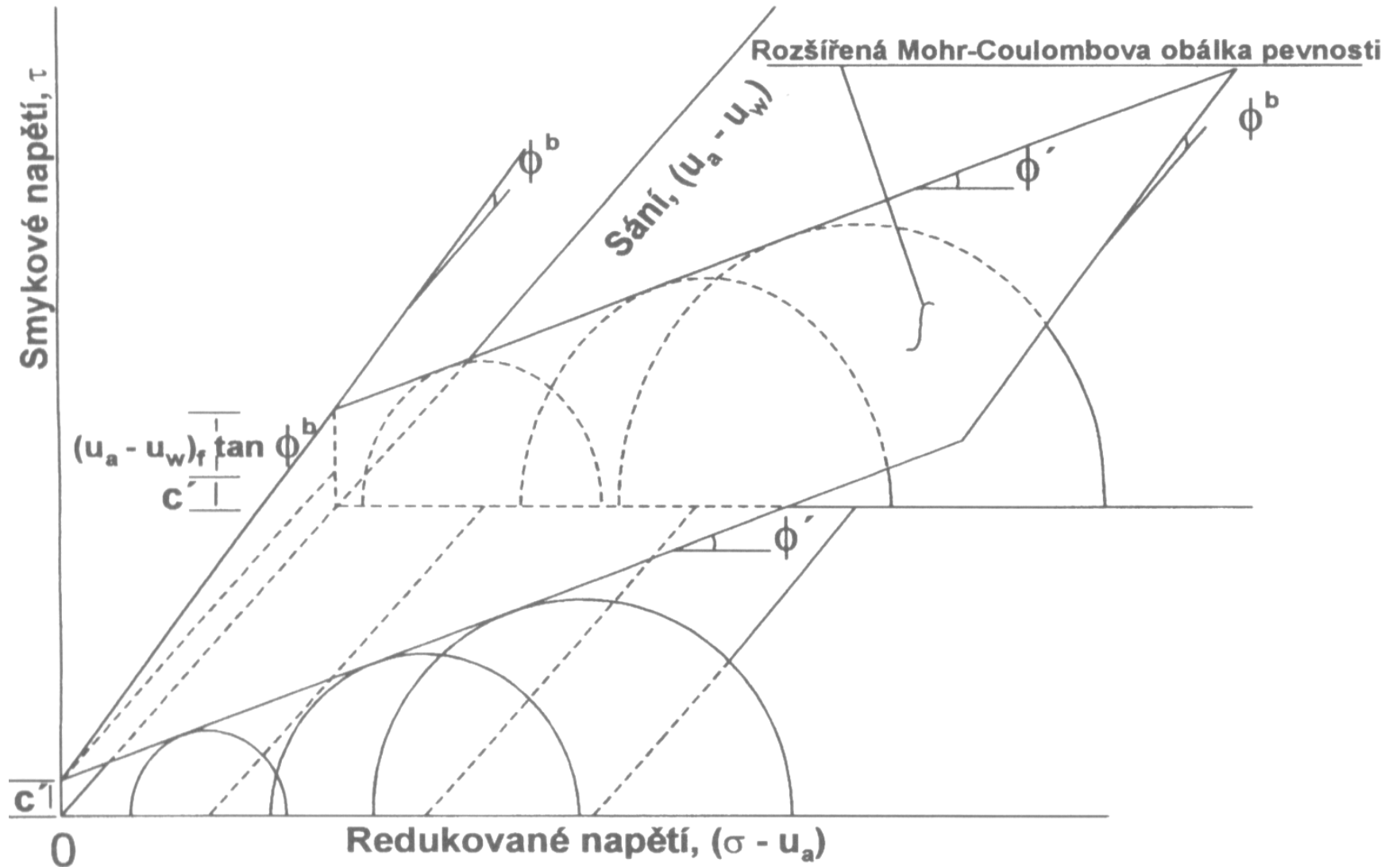
# Efektivní napětí

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

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

nasycená zemina:

$$u_a = u_w$$

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

rozdíl pevností nenасыčené a nasycené zeminy

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

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

# Efektivní napětí

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

nenасыčená zemina

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

nasycená zemina:

$$u_a = u_w$$

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

rozdíl pevností nenasycené a nasycené zeminy

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

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

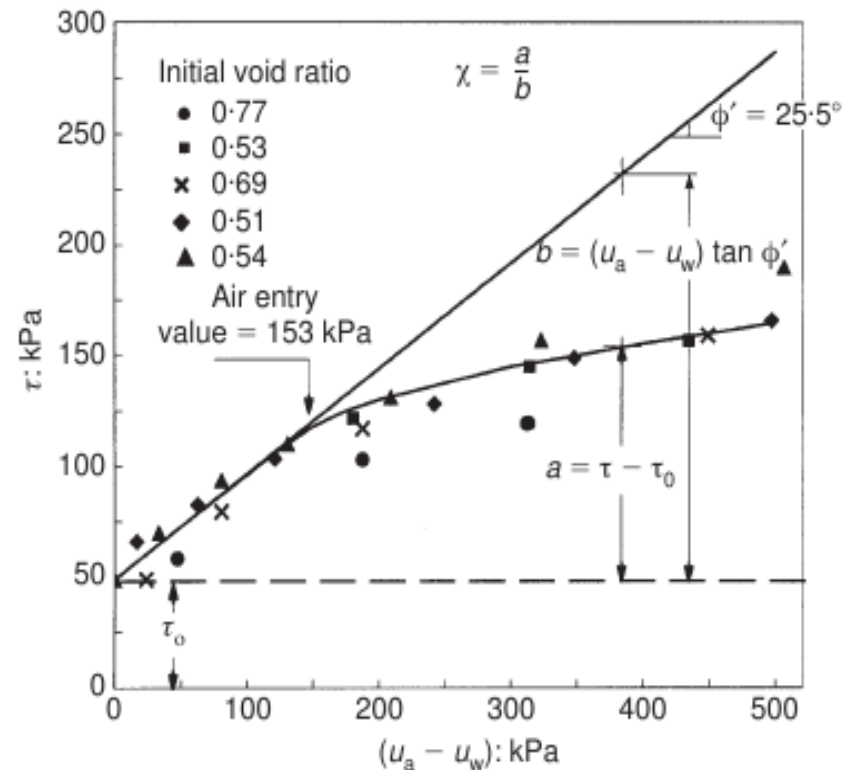


Fig. 1. A typical relationship between the shear strength  $\tau$  and matric suction  $(u_a - u_w)$  (Gan *et al.*, 1988)



# Efektivní napětí

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

nenасыčená zemina

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

nasycená zemina:

$$u_a = u_w$$

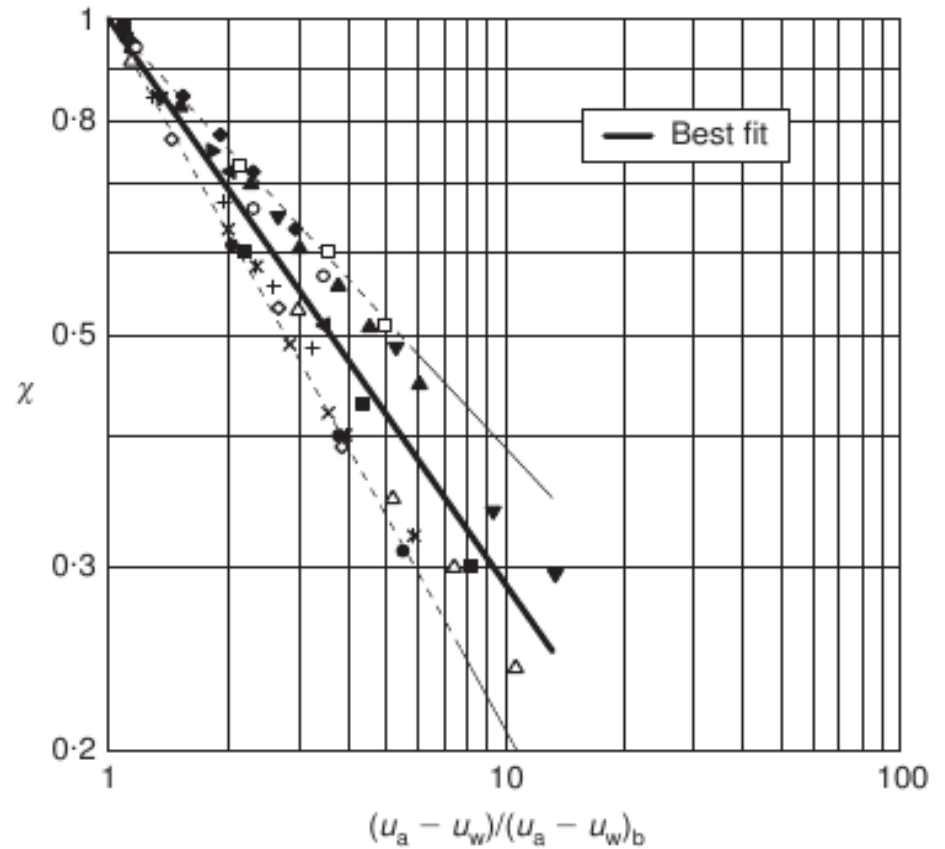
$$\tau_{f, \text{sat}} = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi'$$

rozdíl pevností nenasycené a nasycené zeminy

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

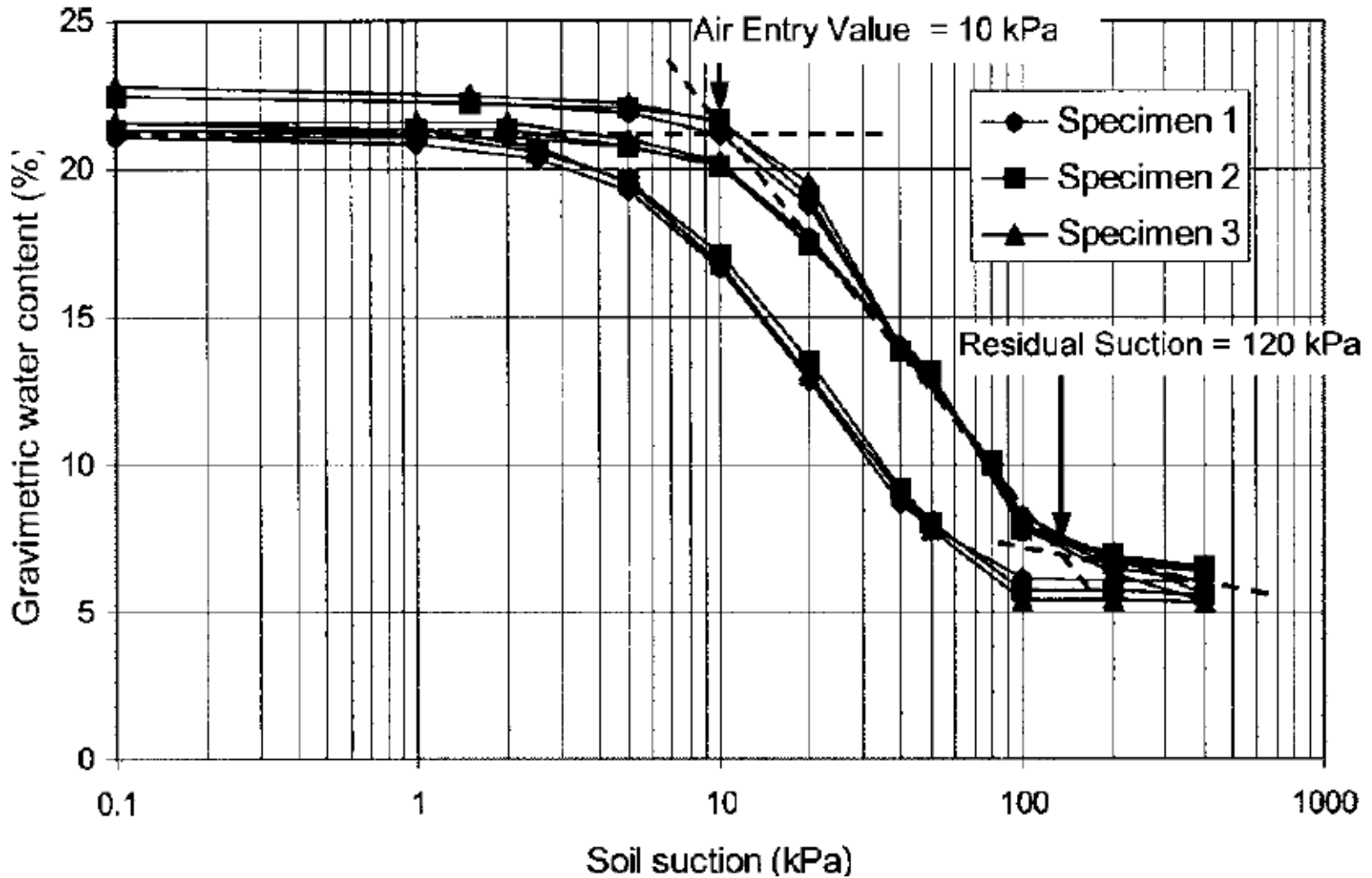
$$\chi = (\tau_{f, \text{unsat}} - \tau_{f, \text{sat}}) / ((u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi')$$

Vyhodnocení pevnosti 14 různých zemin



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

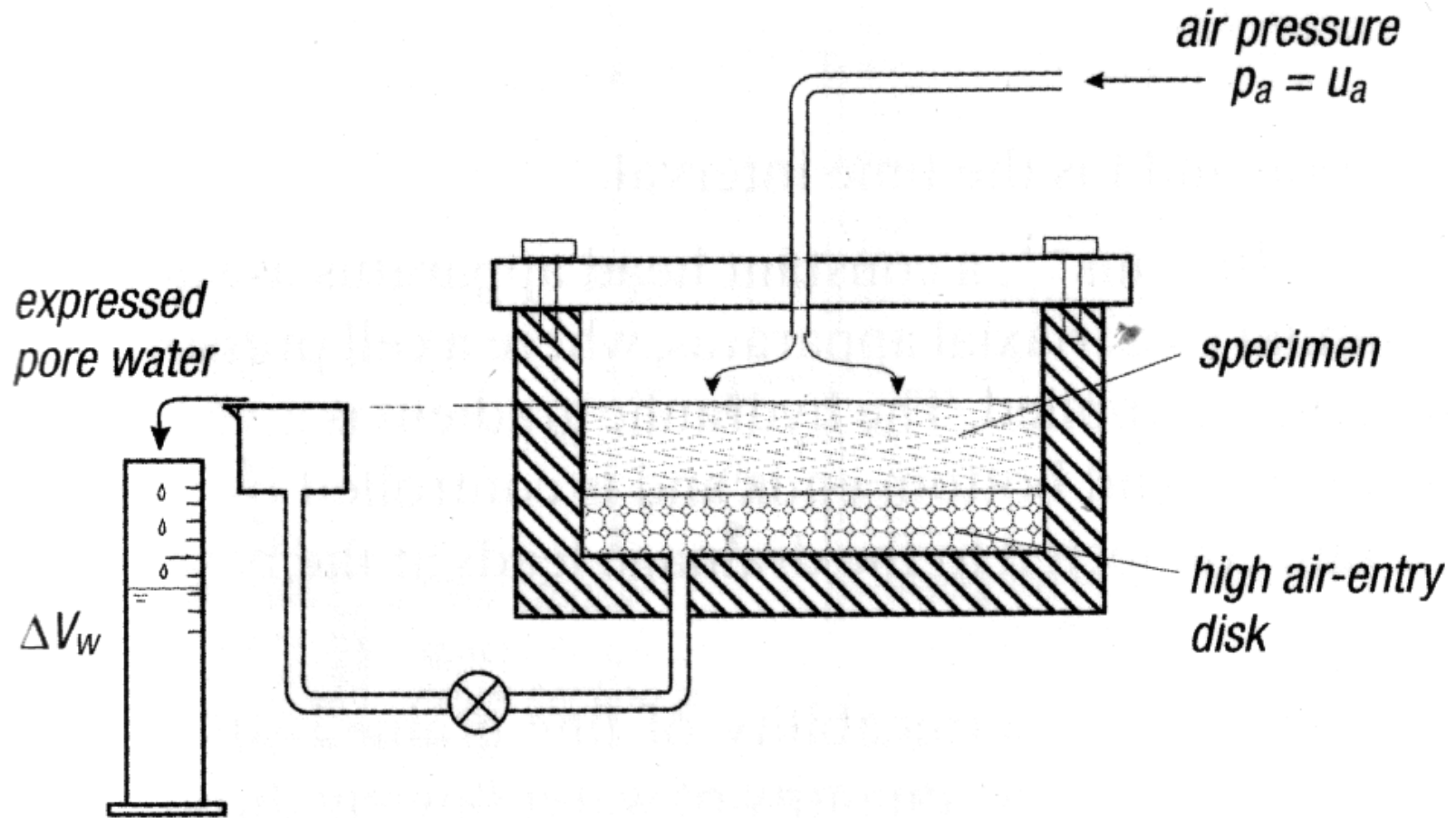
## Hystereze RČ



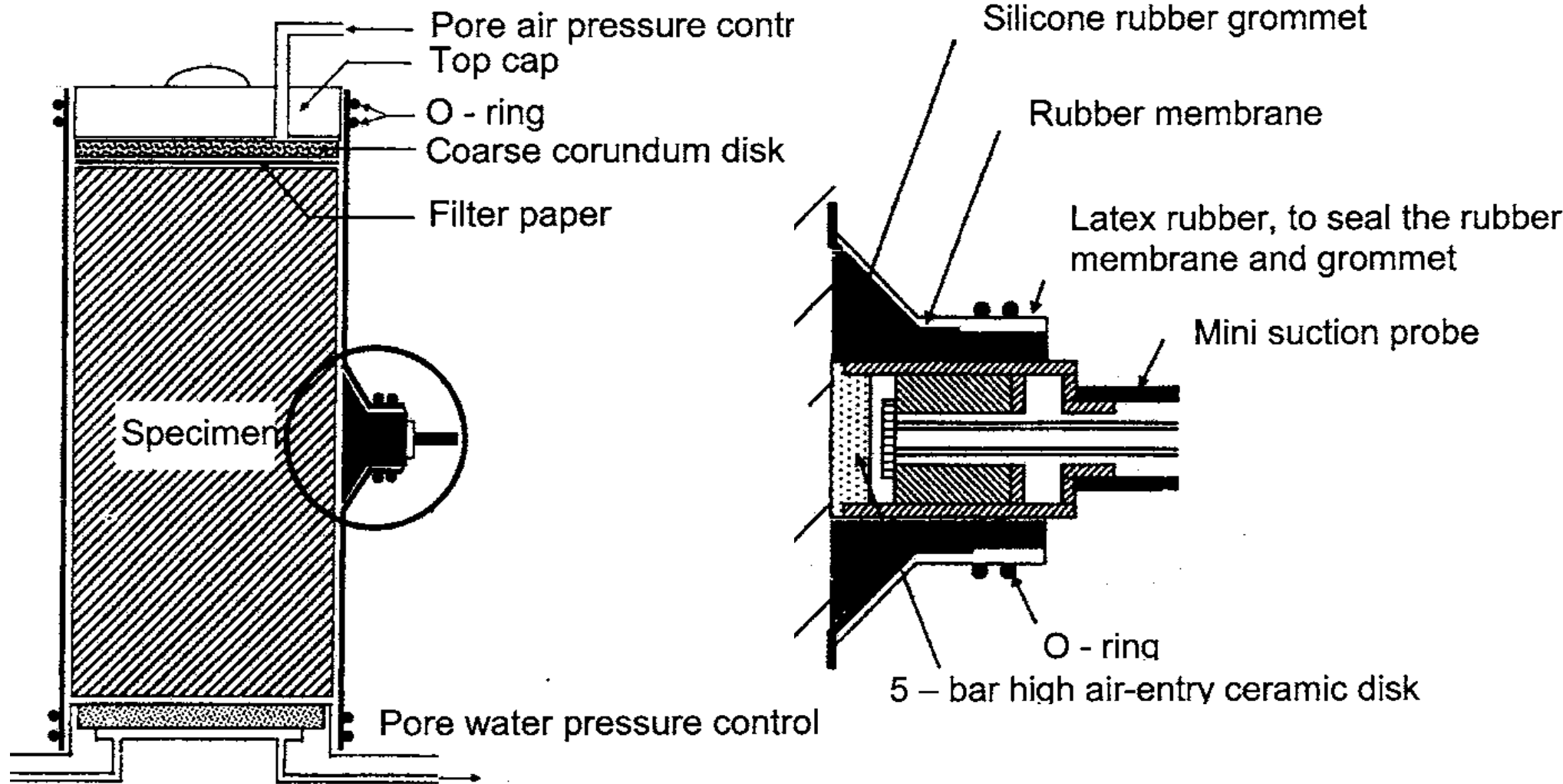
(Fredlund, 2006)

## Přímá metoda určení RČ

objem vody vytlačené tlakem vzduchu  
pro zabránění kavitace **proporční zvýšení tlaků** (“axis translation”)  
“**pressure plate**”

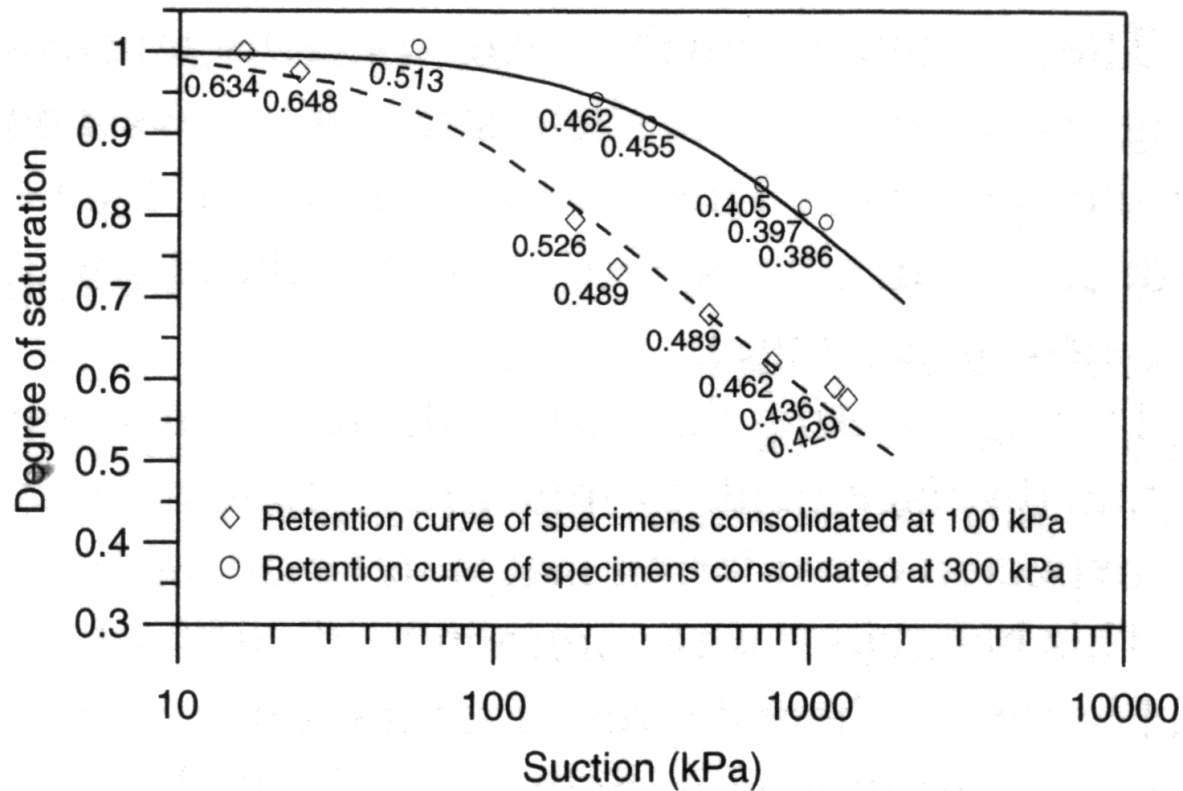
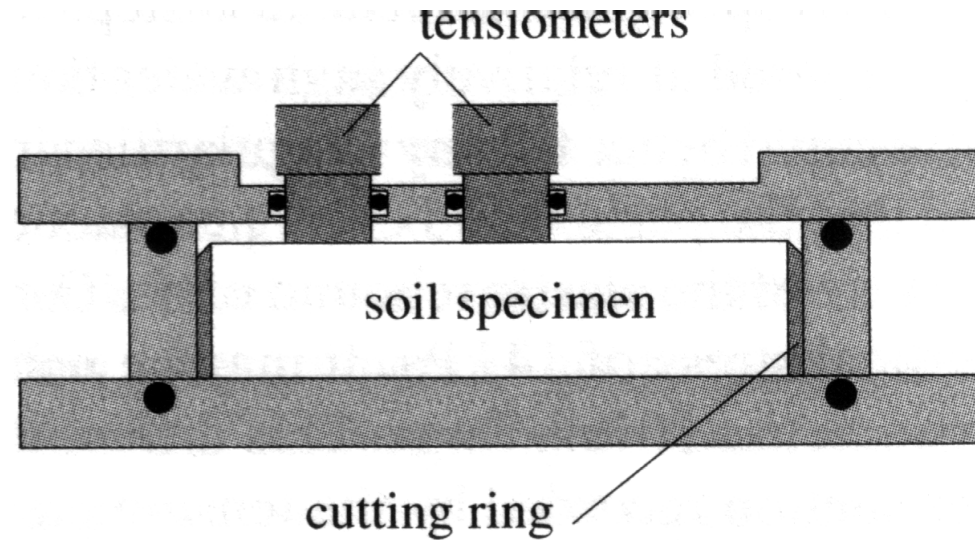


## Přímé měření sání snímačem (bez proporčního zvýšení napětí)



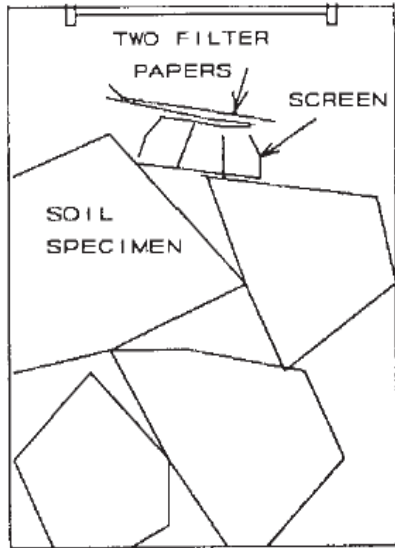
(Fredlund, 2006)

**Přímá metoda určení RČ:**  
přímé měření sání

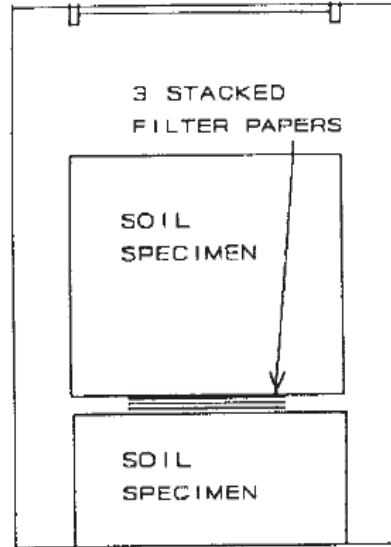


(Boso et al, 2005)

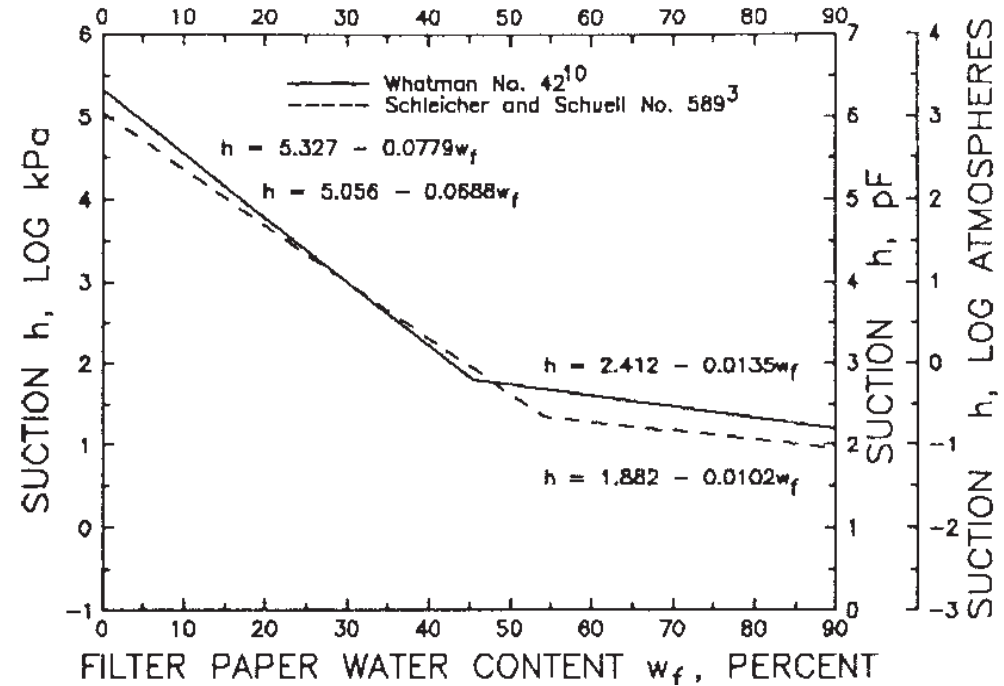
## Nepřímé metody měření sání Filtrační papír



A. Total Suction

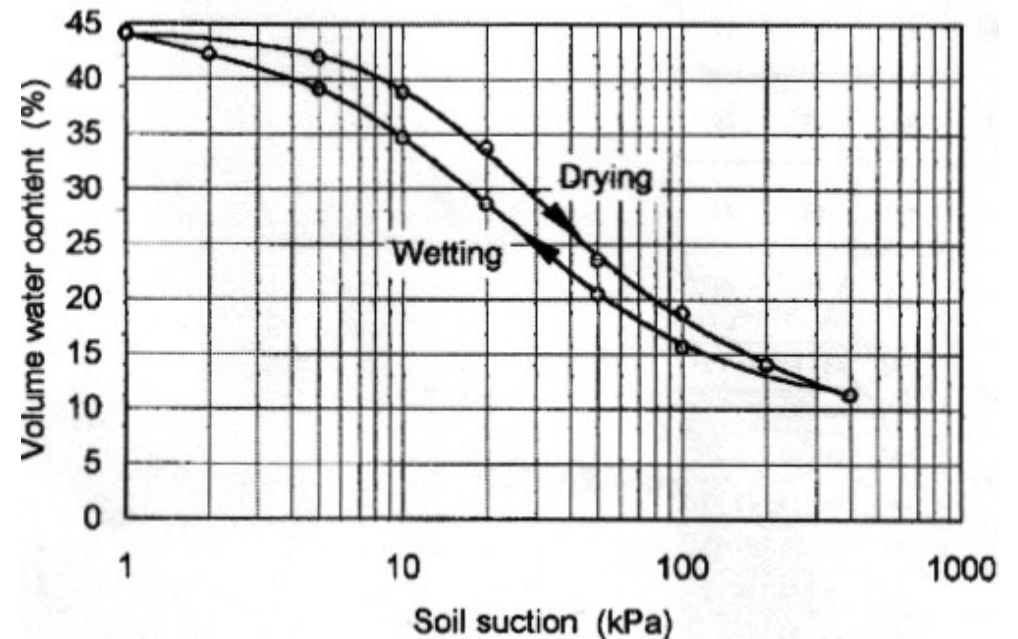
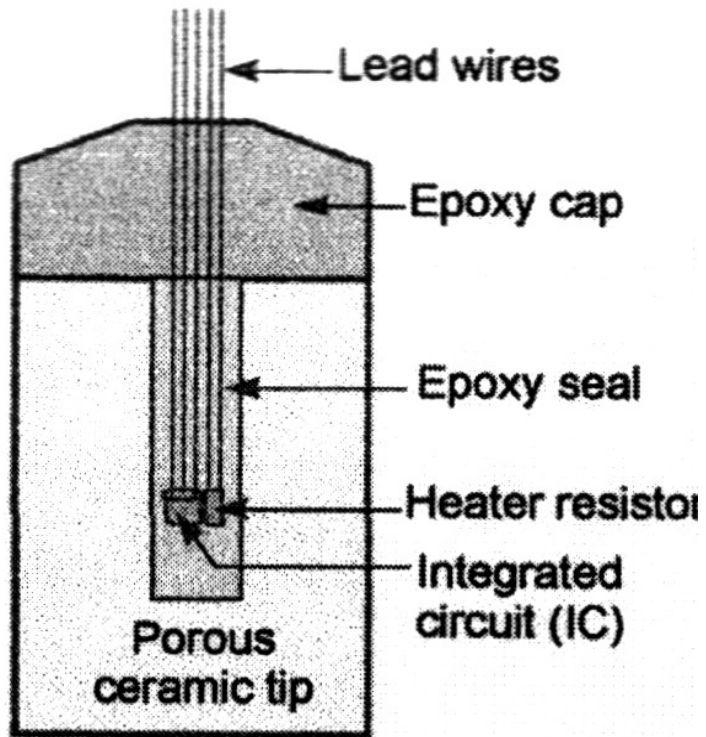


B. Matrix Suction



(ASTM D5298-03)

## Nepřímé metody měření sání Teplotní čidla



Shuai et al, 2003, GTJ

