

A photograph of a forest stream with a title overlay. The stream flows through a dense forest of tall, thin trees. The water is clear and flows over rocks, creating small rapids. The surrounding forest is lush with green and brown foliage. The title "OCHRANA PODZEMNÍCH VOD" is written in white, serif, all-caps font across the middle of the image. Below it, the letter "V." is also written in white, serif font.

# OCHRANA PODZEMNÍCH VOD

V.

# MULTIFÁZOVÉ SYSTÉMY FLUID

v horninovém prostředí se mohou vyskytovat 2 i více fluid, jejichž současná přítomnost výrazně ovlivňuje jejich vzájemné chování

- voda a vzduch
- voda a NAPL
- NAPL a vzduch

## NASYCENÍ (SATURACE)

- ukazuje relativní objemové zastoupení fluida v porózním prostředí

$$S_i = \frac{V_i}{V_p}$$

$V_i$  objem  $i$ -tého fluida

$V_p$  objem pórů

- v multifázových systémech

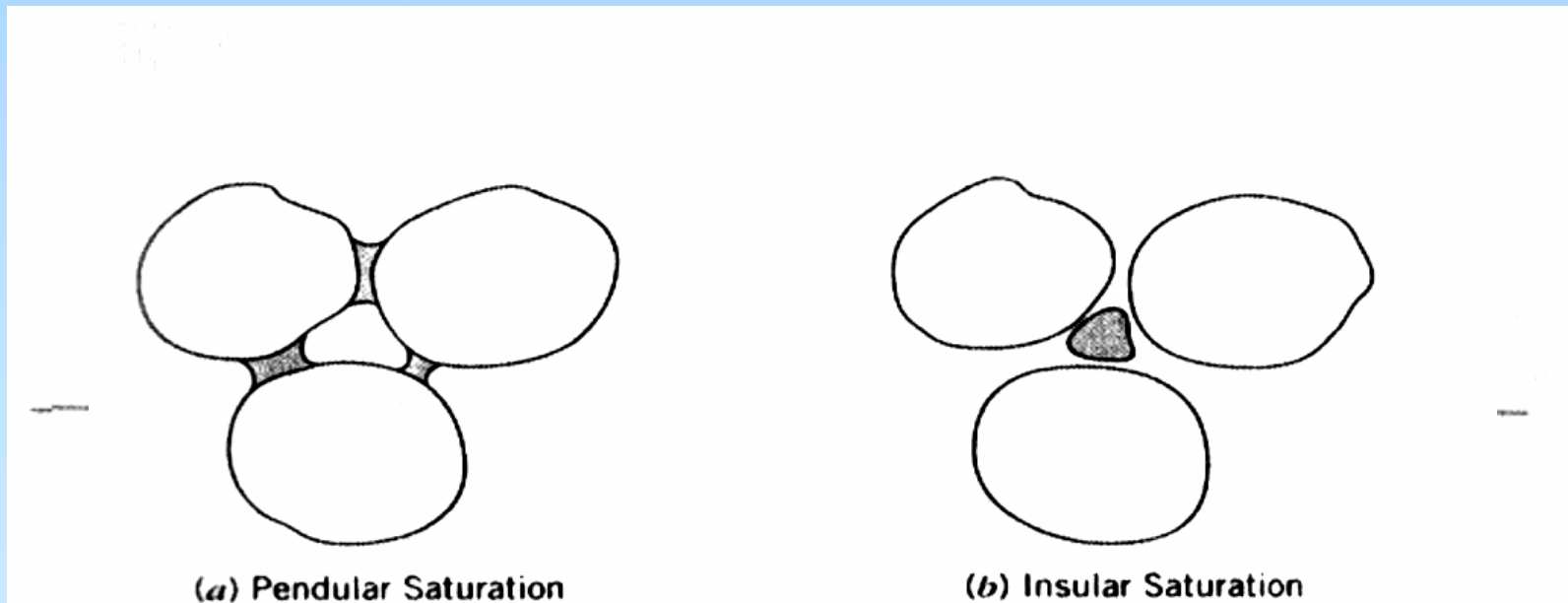
je součet nasycení jednotlivých fluid roven 1 (např.  $S_{vzduch} + S_{DNAPL} + S_{voda} = 1$ ) - teoreticky

# SMÁČIVOST

- tendence jednoho fluida být přitahováno k pevné fázi (hornině) na úkor jiného při současné přítomnosti obou fluid
- vyplývá z podobných fyzikálních vlastností fluida a horniny
- jedinou možností přesného stanovení smáčivosti je změření **kontaktního úhlu  $\phi$**

$\phi < 90^\circ$  ( $\phi < 70^\circ$ ) fluidum je smáčejší

$\phi > 90^\circ$  ( $\phi > 110^\circ$ ) fluidum je nesmáčejší



**voda** - vzduch - hornina  
**voda** - DNAPL - hornina  
**voda** - **DNAPL** - organická hmota  
**vzduch** - **DNAPL** - hornina

*smáčivostní charakteristika NAPL  
je vždy nejistá*

## POVRCHOVÉ NAPĚTÍ (NAPĚTÍ NA FÁZOVÉM ROZHRAŇÍ)

- při kontaktu jednoho fluida s druhým (nebo s pevnou fází) existuje uvnitř fluida vždy volná energie
- vzájemná přitažlivost molekul uvnitř jednoho fluida je větší než k molekulám druhého fluida nebo pevné fáze + distribuce vektorů síly při hladině
- důsledkem je existence hladiny jako „napjaté membrány“
- drobné mince v hrnku s vodou
- hodnoty napětí na fázovém rozhraní  $\sigma$  [dynů/cm, N/m] se pohybují v rozmezí 0 (neomezeně mísitelná fluida) do 72 dynů/cm (0,072 N/m) – povrchové napětí vody
- většina DNAPL má hodnoty  $\sigma$  v rozmezí 0,015 – 0,050 N/m

## KAPILÁRNÍ SÍLA (JEVY)

kapilární jevy významně ovlivňují pohyb fluid v multifázovém prostředí

1. definice 
$$P_c = \frac{2\sigma}{r}$$

uvažuje závislost  
kapilárního tlaku  
na kapalině vyplňující póry a hornině

2. definice 
$$P_c = P_{nw} - P_w$$

kapilární tlak je možné definovat  
i jako rozdíl v tlaku mezi  
nesmáčeující a smáčeující kapalinou

$$P_c = \frac{(2\sigma \cos \varphi)}{r}$$

kapilární tlak, který vytváří pór nebo puklina  
vyplněný vodou a brání tak vstupu  
jiné - nesmáčeující kapaliny (potřebný ke vstupu)

- kapilární tlak je mírou tendence porózního prostředí nasávat smáčeující a odpuzovat nesmáčeující fluidum
- je obtížné vtlačit nesmáčeující fluidum do prostředí s póry vyplněnými smáčeujícím fluidem
- čím je menší velikost pórů, tím větší kladou póry odpor vstupu nesmáčeující kapaliny
- nesaturovaná zóna – kapilární tlak ve formě záporné tlakové výšky - sukce

## NASÁVÁNÍ A DRENÁŽ (IMBIBITION AND DRAINAGE)

- dynamické procesy vytěsňování jednoho fluida druhým

### **nasávání**

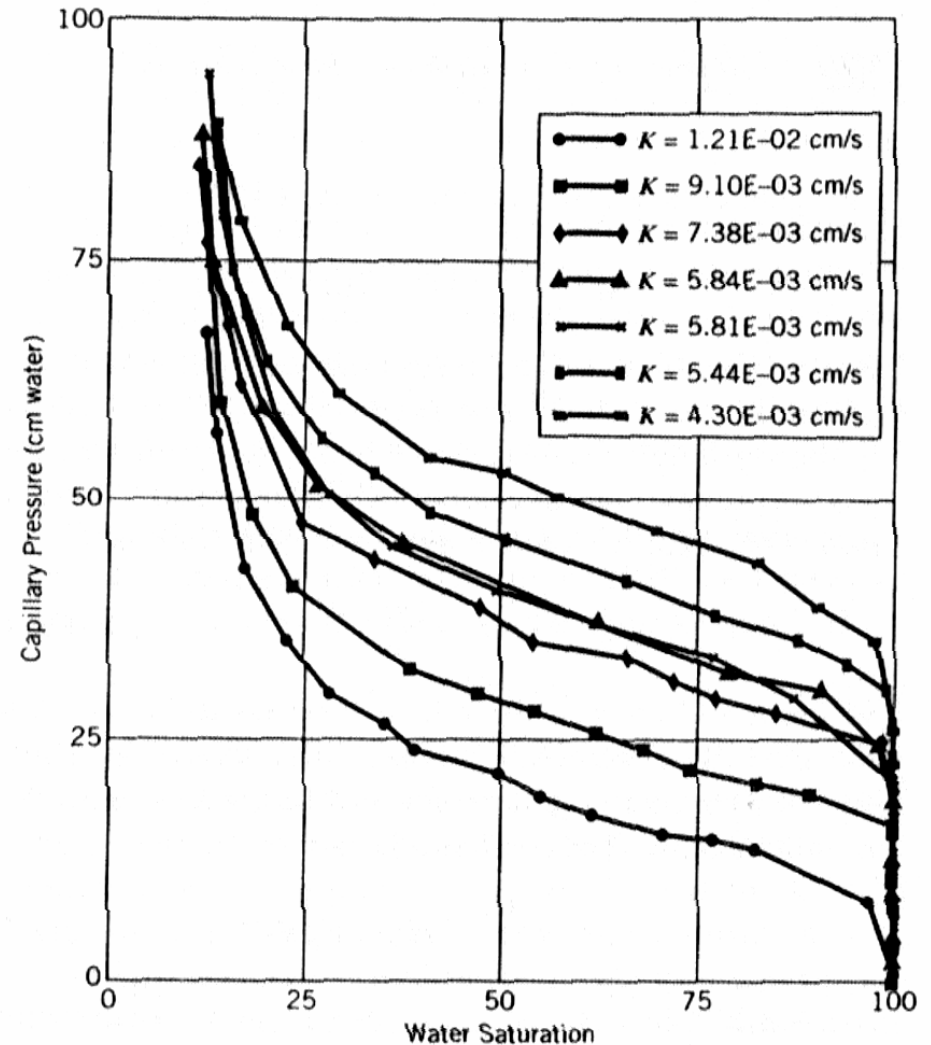
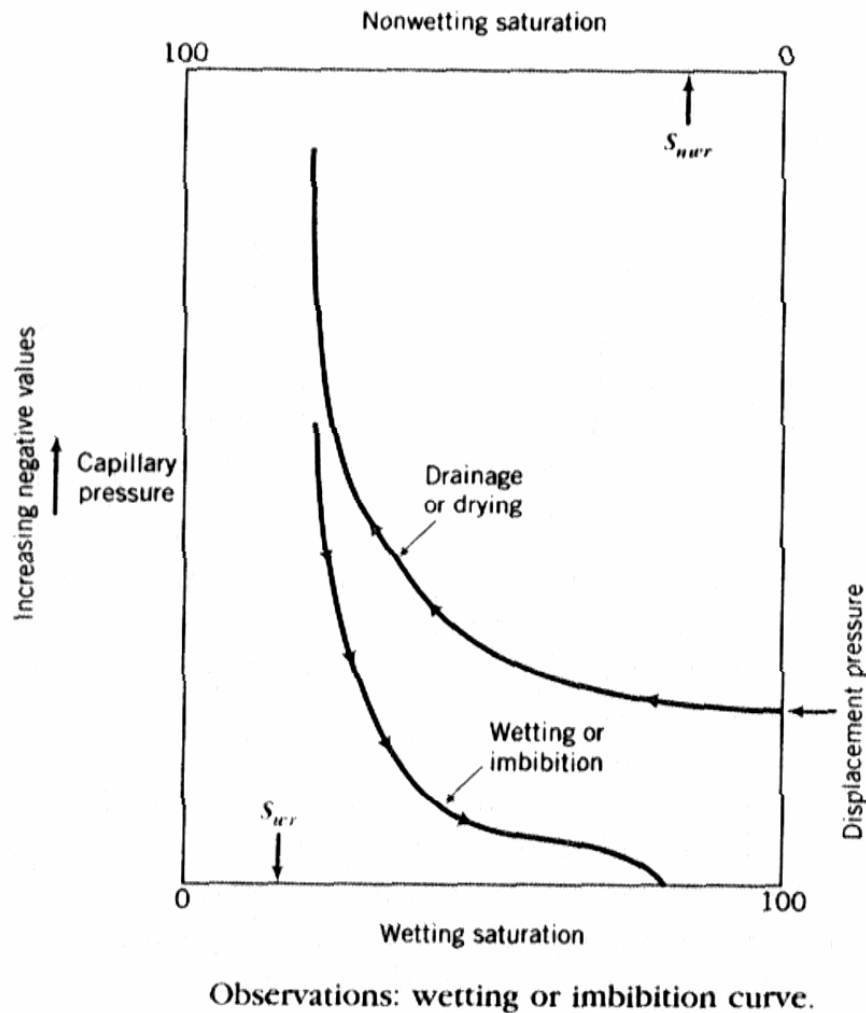
- vytěsňování nesmáčejiho fluida fluidem smáčejiím
- např. infiltrace vody do suché horniny,  
vstup vody do vodou smáčeného systému hornina – NAPL

### **drenáž**

- vytěsňování smáčejiho fluida fluidem nesmáčejiím
- např. vstup DNAPL do vodou smáčené horniny s póry vyplněnými vodou

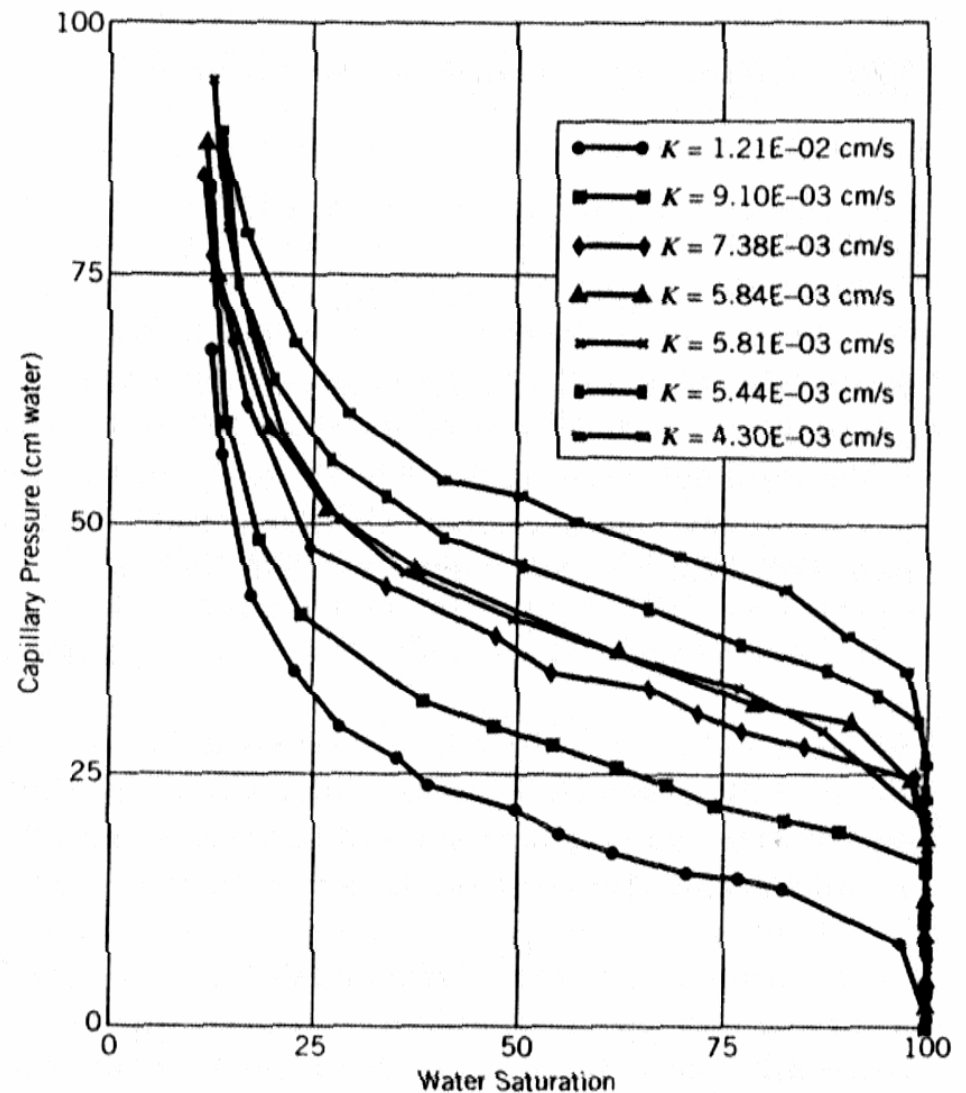
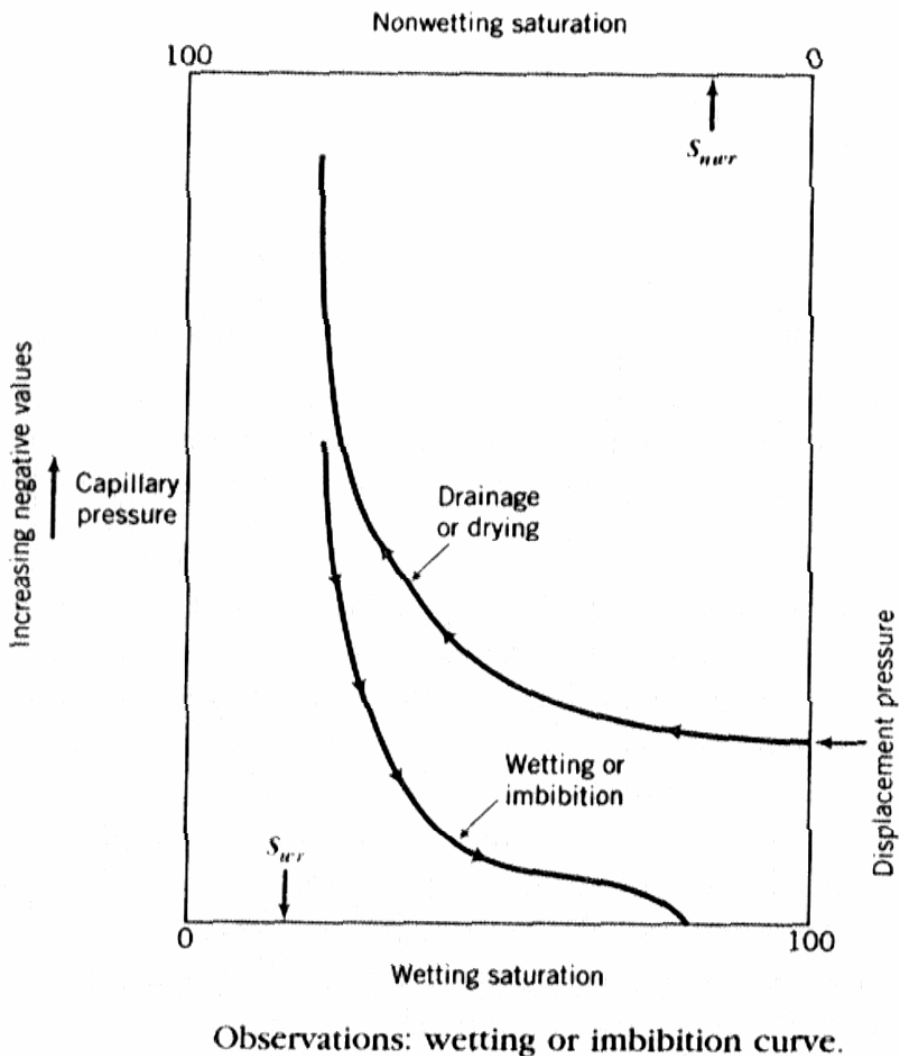
vztahy mezi drenáží a nasáváním jsou pro konkrétní systémy (hornina – smáčejií – nesmáčejií fluidum) vynášeny v tzv. **křivkách kapilárního tlaku**

### **hystereze křivek**



## REZIDUÁLNÍ (ZBYTKOVÉ) NASYCENÍ

- ireverzibilní hodnota nasycení horniny fluidem, pokud se fluidum v hornině vyskytovalo
- k poklesu reziduálního nasycení může docházet jinými procesy (rozpuštění, vytěkávání)
- hodnota reziduálního nasycení smáčejičího a nesmáčejičího fluida se může výrazně lišit



## VSTUPNÍ TLAK

- hodnota kapilárního tlaku, potřebná ke vstupu nesmáčeující kapaliny do prostředí nasyceného smáčeující kapalinou
- odečtení z grafu (pro konkrétní vzorky zemin)
- orientační výpočty podle vzorců –  $\varphi$ ,  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $r$



# PROUDĚNÍ V NENASYCENÉ ZÓNĚ

## Nasycená zóna

- pohyb v důsledku změn potenciálu ovlivněných změnami tlaku v pórech a výškou nad srovnávací úrovní
- tlaková výška je kladná, na hladině nulová

## Nenasycená zóna

- voda je pod negativním tlakem (tlaková výška  $< 0$ ) v důsledku adhezních sil – kapilární tlak  $\psi$
- kapilární tlak je funkcí vlhkosti půdy – čím menší vlhkost půdy, tím menší hodnota kapilárního tlaku (větší záporná hodnota) a naopak
- celkový vlhkostní potenciál (energie) je dán součtem tlakového potenciálu (kapilární tlak), gravitačního ~~a osmotického potenciálu~~

$$\phi = \psi(\theta) + z \quad \phi_{EV} = P_c + \rho_w \cdot g \cdot z \quad \phi_{EW} = \frac{P_c}{\rho_w \cdot g} + z = h + z$$

jednotky používané pro vyjádření celkového potenciálu

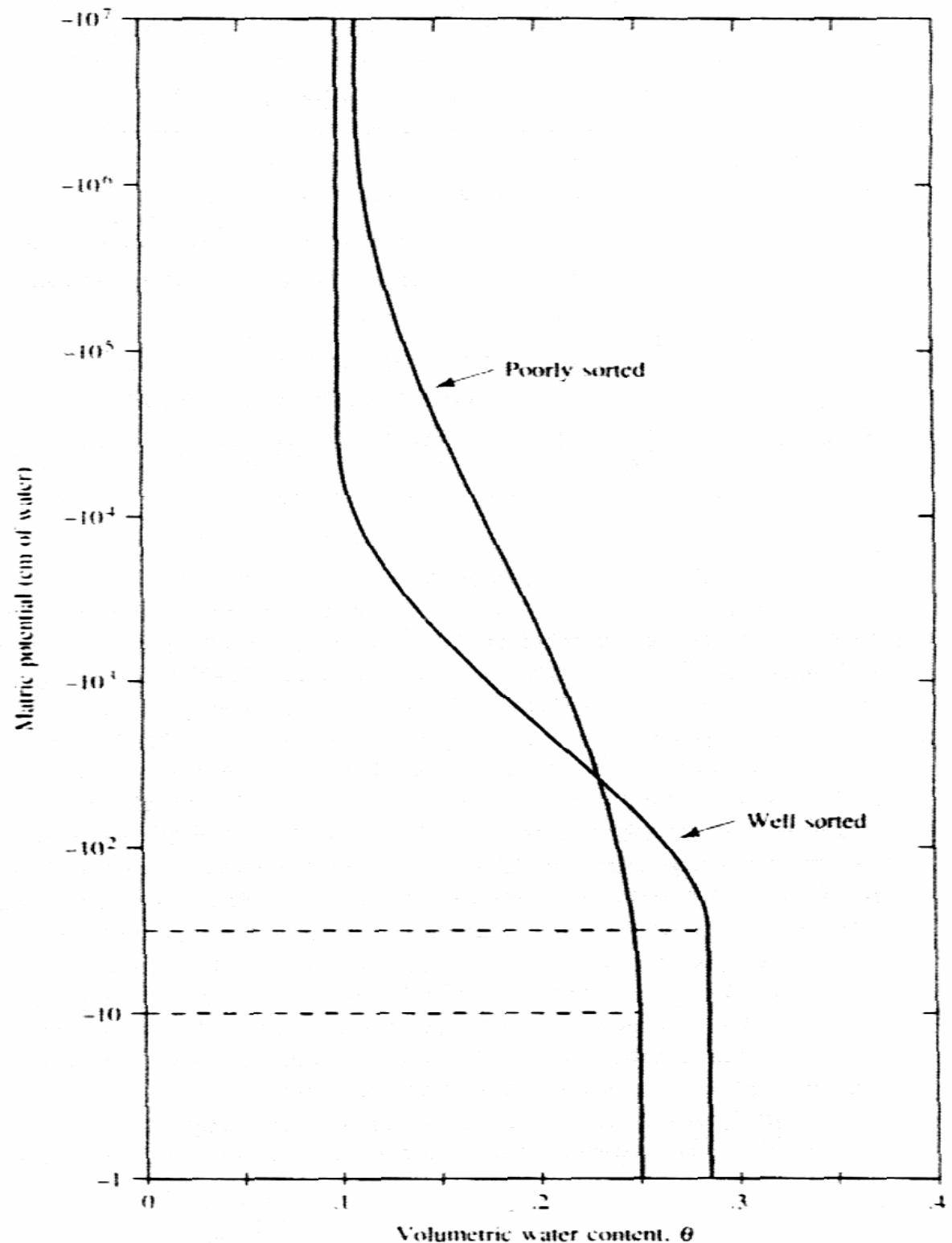
- atmosféry –  $1 \text{ atm}$
- pascaly –  $1 \text{ Pa}$  ( $\text{kPa}$ )
- centimetry vodního sloupce –  $h$  ( $\text{cm}$ )

$$1 \text{ atm} = 1000 \text{ cm vodního sloupce} = 10^5 \text{ Pa}$$

## Křivka kapilární tlak – vlhkost

(soil–water retention curve)

- ukazuje závislost vlhkosti půdy na kapilárním tlaku
- čím je menší vlhkost, tím větší je kapilární tlak
- je vlastností každé zeminy, ve které se vyskytuje smáčejí fáze (voda) a nesmáčejí fáze (vzduch)
- pro různé zeminy má odlišný tvar (zrnitost, vytrídění sedimentů, apod.)
- podobně existují i křivky pro systémy nesmáčejí a smáčejí kapaliny (voda a NAPL, NAPL a vzduch, apod.)



Rovnice **Brooks-Corey** vyjadřuje vztah mezi kapilárním tlakem a vlhkostí

- experimentální stanovení na odebraných vzorcích zemin

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left( \frac{\psi}{\psi_b} \right)^{-\lambda}$$

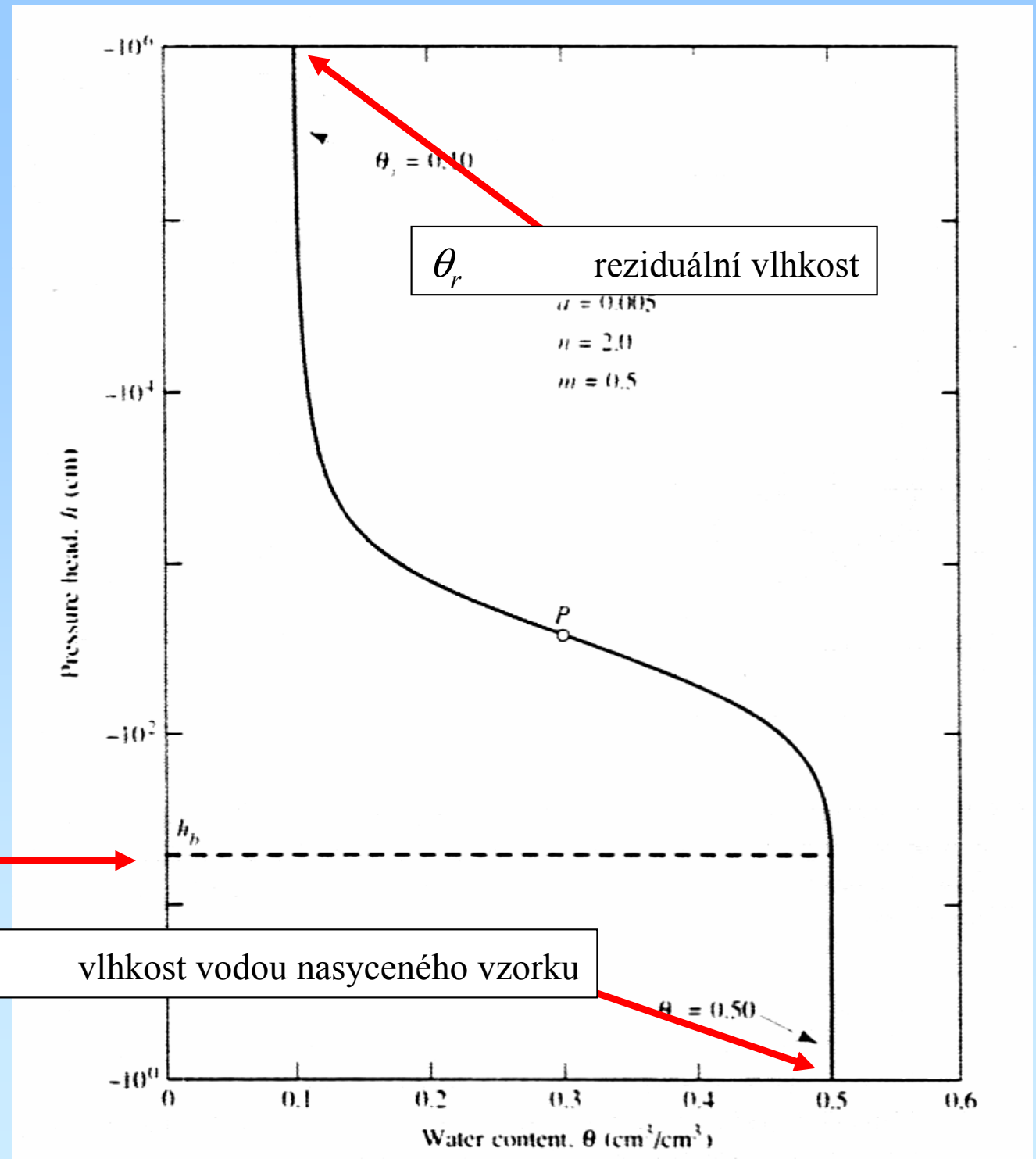
$\theta$	vlhkost
$\theta_s$	vlhkost vodou nasyceného vzorku
$\theta_r$	reziduální vlhkost
$\psi$	kapilární tlak
$\psi_b$	vstupní tlak vzduchu (bubbling pressure)
$\lambda$	experimentálně odvozený parametr pro daný typ půdy

$$S_e = \left( \frac{S_w - \theta_r}{1 - \theta_r} \right)$$

$$S_w = \theta / \theta_s$$

$S_e$	efektivní nasycení
$\theta_r$	reziduální vlhkost

určení parametrů do rovnice  
Brooks-Corey z křivek  
kapilární tlak - vlhkost



$\psi_b$  vstupní tlak vzduchu  
(bubbling pressure)

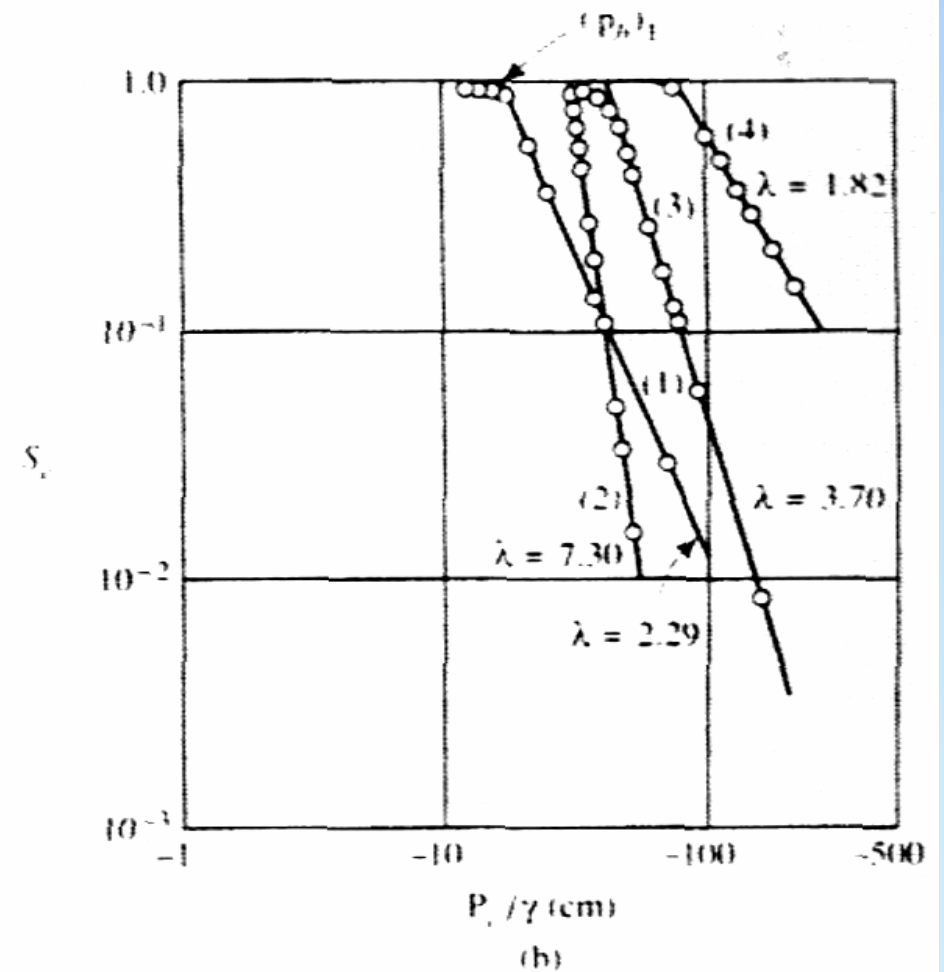
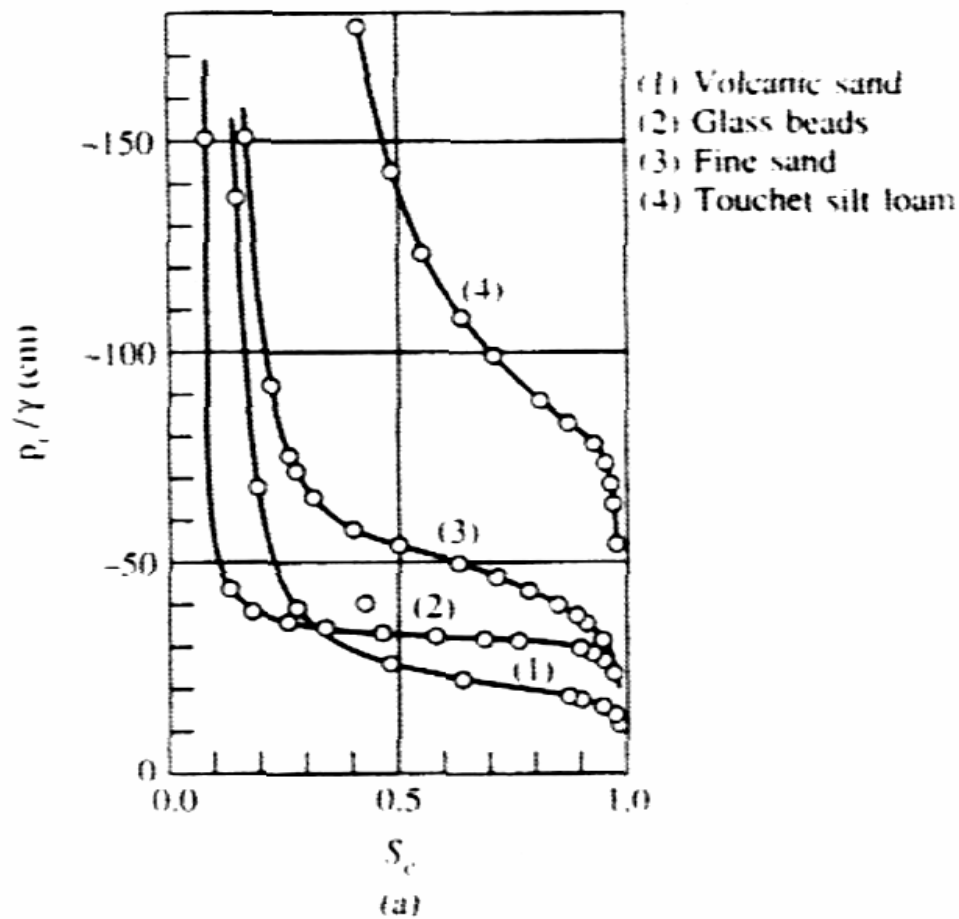
$\theta_s$  vlhkost vodou nasyceného vzorku

## určení parametru $\lambda$ do rovnice Brooks-Corey

vynesení hodnot změřeného kapilárního tlaku  $P_c$  jako podíl  $P_c/\gamma$  (specifická hmotnost vody) proti efektivnímu nasycení

v bilogarithmickém měřítku se křivky promítnou jako přímky

sklon těchto přímek odpovídá parametru  $\lambda$



## rovnice van Genuchtena

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\psi|^n)^m\right]}$$

$\theta$	vlhkost
$\theta_s$	vlhkost vodou nasyceného vzorku
$\theta_r$	reziduální vlhkost
$\psi$	kapilární tlak
$\alpha, m, n$	experimentálně odvozené parametry

$$n = \frac{1}{1 - m}$$

$$\alpha = \frac{1}{\psi_b} \left(2^{1/m} - 1\right)^{1-m}$$

## Určení parametrů pro rovnici van Genuchtena

v grafu vyneseme kapilární tlak v logaritmickém měřítku do maximální hodnoty –15 000 cm vody

odečteme hodnoty  $\theta_s$  a  $\theta_r$  (odpovídá tlaku – 15 000)

nalezneme bod P 
$$\theta_P = \frac{\theta_s + \theta_r}{2}$$

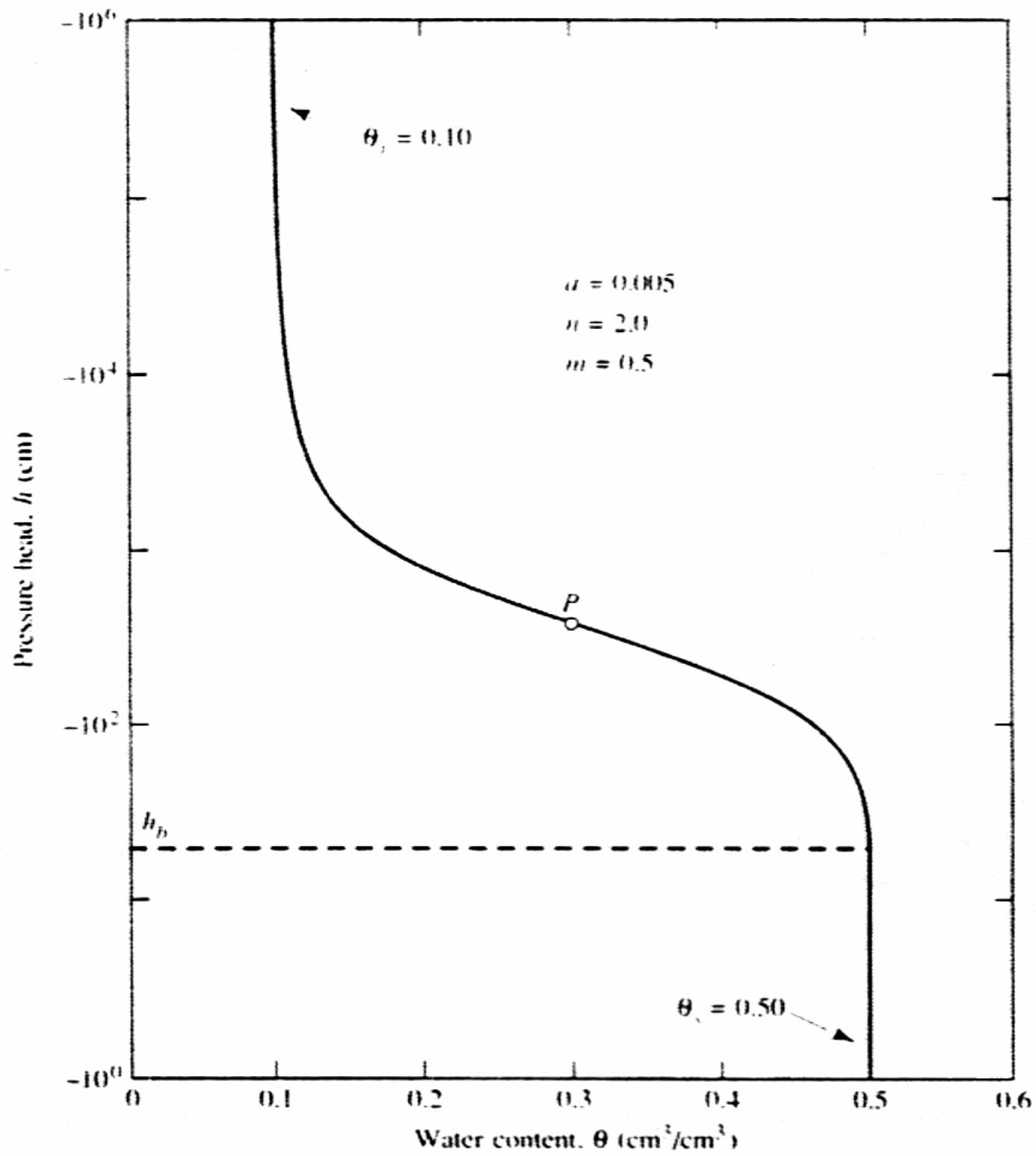
sklon  $S$  odpovídá sklonu přímky v bodě P

určíme odpovídající hodnotu bezrozměrného sklonu  $S_p$  
$$S_p = \frac{S}{\theta_s - \theta_r}$$

určíme parametr  $m$  
$$1 - \exp(-0,8 \cdot S_p) \quad (0 < S_p \leq 1)$$

$$1 - \frac{0,5755}{S_p} + \frac{0,1}{S_p^2} + \frac{0,025}{S_p^3} \quad (S_p > 1)$$

dopočítáme ostatní parametry –  $n + \alpha$





## KONSTRUKCE KŘIVEK KAPILÁRNÍ TLAK – VLHKOST

vzorek nasycený vodou o známém objemu vody je propojen přes porózní desku s buretou

nasycení porózní desky vodou

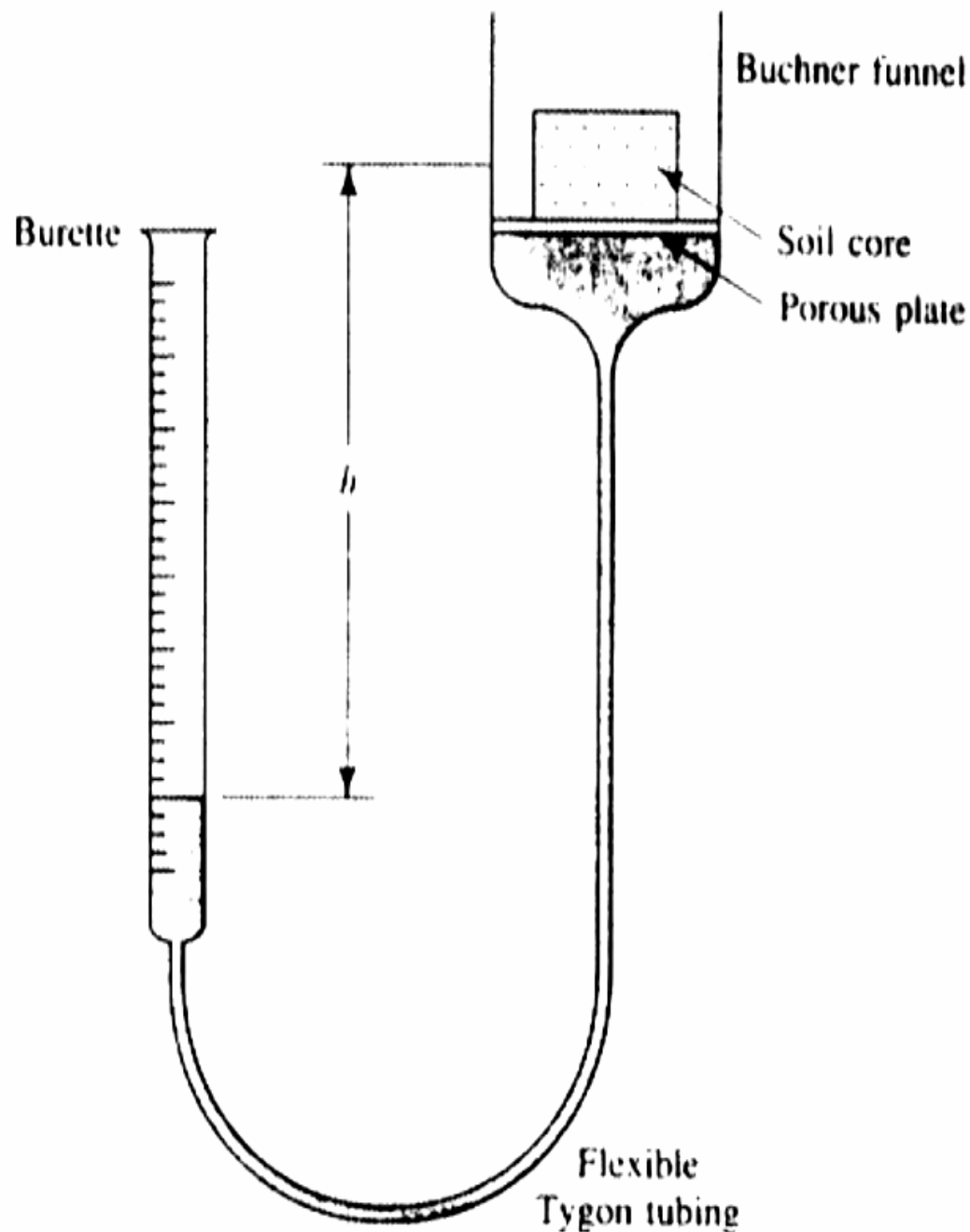
pohyb burety dolů a nahoru vede ke změně tlakové výšky, což způsobuje uvolnění určitého objemu vody

po ustanovení rovnováhy se odečte hodnota

použitelný postup do  $-300$  cm vody

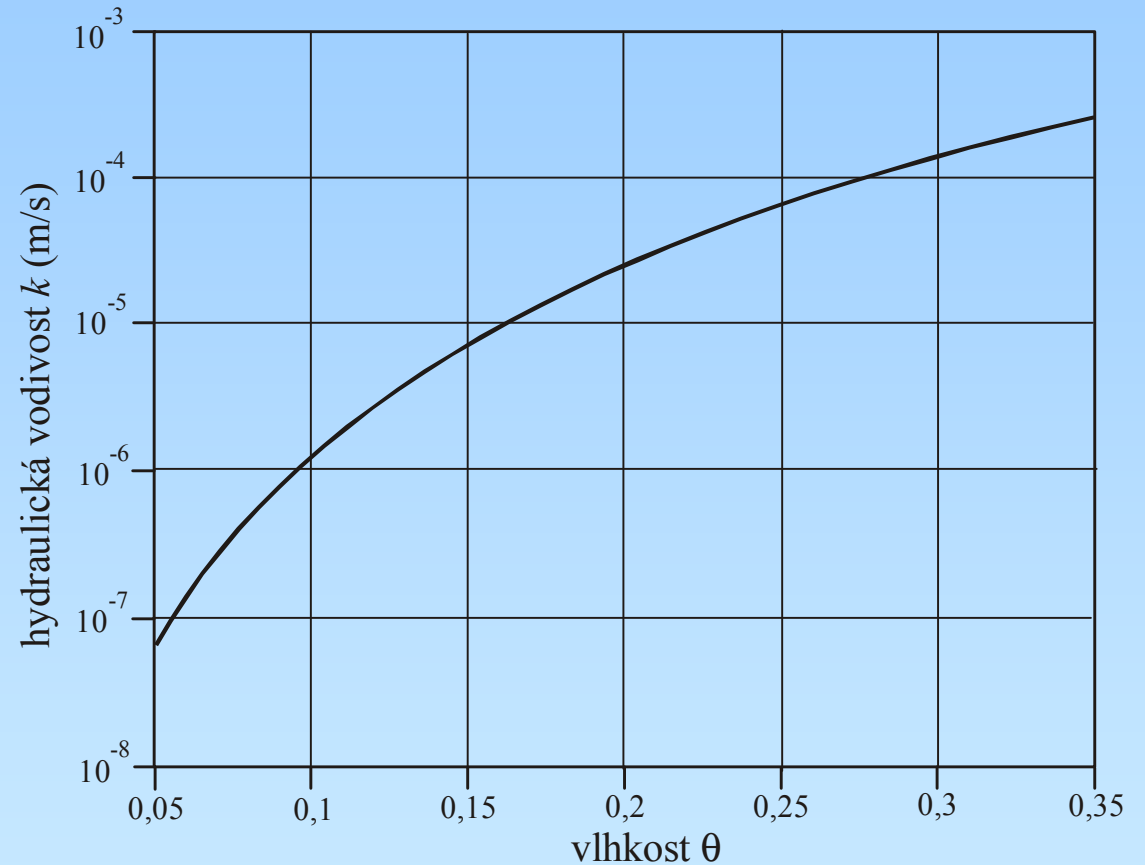
pod  $-300$  cm vody je nutné použít přetlak v prostoru nad nasyceným vzorkem (0,3 – 15 atm)

podobné zařízení i pro konstrukci retenčních křivek



## Hydraulická vodivost v nenasycené zóně

- je funkcí vlhkosti
- s rostoucí vlhkostí roste hydraulická vodivost a naopak
- křivky jsou pro různé horniny odlišné
- např. pro písky je charakteristický
- výrazný pokles hydraulické vodivosti s poklesem vlhkosti než pro jíly



vzorec pro výpočet hydraulické  
vodivosti zeminy v nenasycené  
zóně při vlhkosti  $\theta$

$$K(\theta) = \frac{k_r(\theta) \cdot k \cdot \rho_w \cdot g}{\mu_w}$$

vzorec pro výpočet hydraulické  
vodivosti zeminy v nenasycené  
zóně při vlhkosti  $\theta$

$$K(\theta) = K_s \cdot S_e^{1/2} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$$

(podle van Genuchtena)

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)}$$

## RELATIVNÍ PROPUSTNOST

- v multifázovém prostředí spolu fluida soupeří o volný prostor (objem pórů)
- propustnost prostředí pro jedno fluidum je potom mírou nasycení prostředí tímto fluidem
- platí i v satureované zóně pro systémy NAPL – voda, NAPL – voda – vzduch, apod.

