

A photograph of a forest stream with a waterfall, overlaid with the title text. The stream flows through a dense forest of tall, thin trees. The water is clear and white with foam as it cascades over rocks. The forest floor is covered in fallen leaves and moss. The overall scene is serene and natural.

# OCHRANA PODZEMNÍCH VOD

V.



obecná úplná rovnice analytického řešení ve 3-D systému a plošném zdroji

$$\frac{C(x, y, z, t)}{C_0} = \frac{1}{8} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x - vt}{2(\alpha_x vt)^{\frac{1}{2}}} \right] \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{(y + Y/2)}{2(\alpha_y x)^{\frac{1}{2}}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{(y - Y/2)}{2(\alpha_y x)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{(z + Z)}{2(\alpha_z x)^{\frac{1}{2}}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{(z - Z)}{2(\alpha_z x)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}$$

pro linii symetrie

$$\frac{C(x, 0, 0, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x - vt}{2(\alpha_x vt)^{\frac{1}{2}}} \right] \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{Y}{4(\alpha_y x)^{\frac{1}{2}}} \right] \operatorname{erf} \left[ \frac{Z}{2(\alpha_z x)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}$$

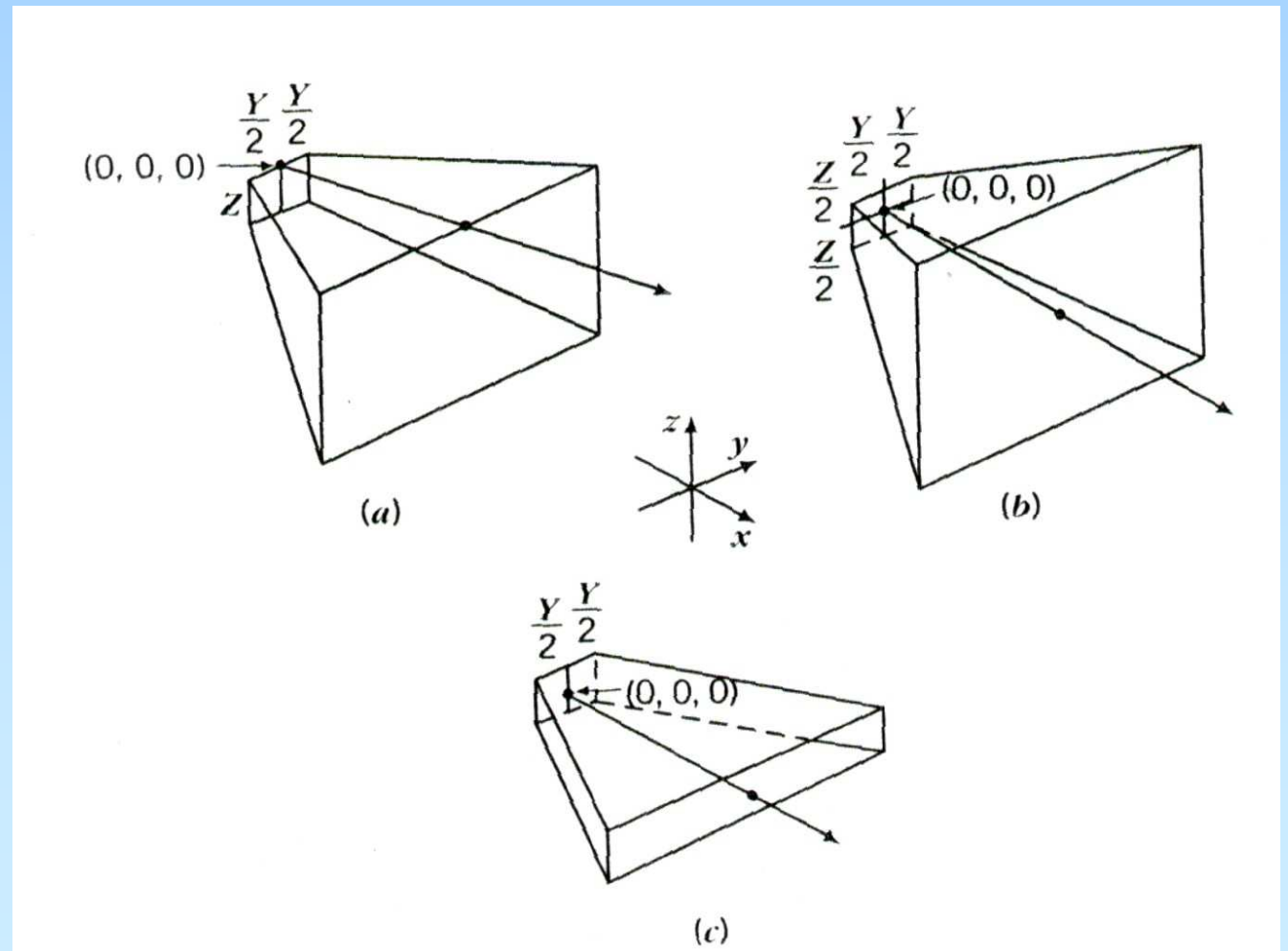
obecná úplná rovnice analytického řešení ve 3-D systému a plošném zdroji

- úprava rovnice podle geometrie zdroje a možnosti šíření kontaminantu

- úplný tvar – šíření ve směru  $z$  jen jedním směrem,  
ve směru osy  $y$  oběma směry

- šíření v obou směrech  $y$  a  $z$

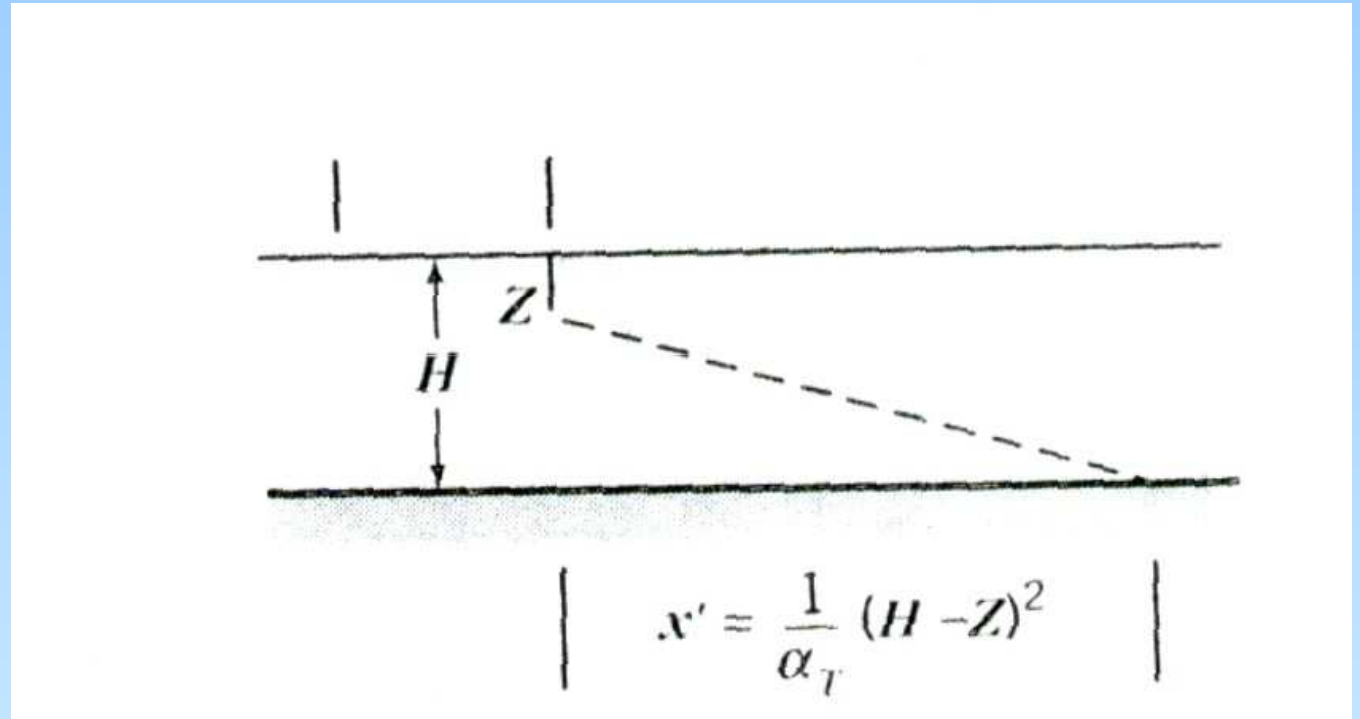
- šíření pouze v obou směrech  $y$   
– odpadá člen pro  $Z$



malé mocnosti zvodněných kolektorů

- po určité vzdálenosti vyplní kontaminační mrak zvoďeň v celém profilu  $Z$
- zanedbání dalšího významu příčné disperzivity ve směru  $Z$  na šíření kontaminantu

$$x' = \frac{(H - Z)^2}{\alpha_z}$$



- pokud vzdálenost  $x$  ve vzorci přesáhne  $x'$ , ve vzorci použijeme hodnotu  $x'$

### Zavedení koeficientu retardace do rovnic

- hodnotu rychlosti advekce  $v$  nahrazuje hodnota rychlosti pohybu retardovaného kontaminantu

# ROZPAD LÁTEK

- přispívá k celkovému poklesu koncentrace látky transportované médiem
- zaměnitelné s procesy hydrodynamické disperze a retardace
- vzájemné odlišení a kvantifikace možné jen při sledování látek vznikajících při rozpadu
- celá řada procesů
  - biodegradace
  - rozpad radioaktivních látek
  - rozpad (transformace) anorganických látek

## **Klasický koncept rozpadu**

- platí jen u organických a radioaktivních látek
- nevratná přeměna – vznik dceřinných produktů (např.  $\text{CO}_2$  z organických látek, stabilní izotopy radioaktivních látek, apod.)

# KINETIKA REAKCÍ

- kinetiky reakcí 0., 1. a 2. řádu
- podle exponentu závislé proměnné

## KINETIKA 0. ŘÁDU

- rychlost rozpadu je konstantní a nezávisí na koncentraci původní látky

- obecně 
$$-\frac{dC}{dt} = k$$

- po integrování časem obdržíme 
$$C_t = C_o - kt$$

- konstantní hodnota rozpadové konstanty
- v praxi velmi vzácné

## KINETIKA 1. ŘÁDU

- rychlost rozpadu závisí na koncentraci původní látky

- obecně 
$$-\frac{dC}{dt} = kC$$

- po integrování 
$$C_t = C_o e^{-kt}$$

- konstantní hodnota rozpadové konstanty

- běžně se vyskytující radioaktivní izotopy, některé organické látky (BTX)

- organické látky – rychlost reakce závisí na dalších faktorech

(pH, množství bakteriální hmoty) souvisejících s lokálními podmínkami

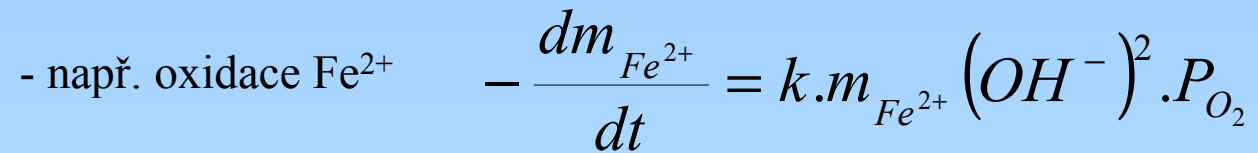
nejedná se o klasickou konstantu – lokálně proměnlivá, rozpětí dat v literatuře

- radioaktivní látky – konstanta platí ve všech podmínkách

- poločas rozpadu 
$$t_{1/2} = 0,693/k$$

## KINETIKA 2. ŘÁDU

- exponent závislé proměnné je 2



- podobně existují i reakce dalších řádů



# BIODEGRADACE ORGANICKÝCH LÁTEK

rychlost reakcí lze přesněji popsat jako funkci množství bakteriální hmoty (event. množství primárního substrátu)

- Michaelis – Mentenova kinetika
- Monodova kinetika  
(kinetiky 0., 1. a smíšeného řádu)

$$v = \frac{v_{\max} \cdot S}{(K_m + S)}$$

$v$	rychlost reakce (event. rychlost růstu)
$v_{\max}$	maximální rychlost reakce (event. rychlost růstu)
$S$	koncentrace substrátu limitujícího produkci bakteriální hmoty
$K_m$	poloviční koncentrace substrátu ve srovnání s maximální rychlostí reakce (event. rychlostí růstu)

- je-li  $S \gg K_m$ , pak  $K_m + C$  je téměř rovno  $C$  a reakce má charakter kinetiky 0. řádu,

kde  $v = v_{max}$  a  $v_{max}$  je limitujícím faktorem rychlosti reakce

- je-li  $S \ll K_m$ ,

pak po úpravě získáme vztah 
$$v = \frac{v_{max}}{K_m} S$$

kde poměr  $v_{max}/K_m$  je roven rozpadové konstantě a reakce má charakter kinetiky 1. Řádu

### Monodova kinetika

$$\Delta C = M_t v_{max} \frac{S}{K_m + S} \Delta t$$

$M_t$

celková koncentrace  
mikrobiální hmoty

$v_{max}$

maximální utilizace kontaminantu  
na jednotkovou hmotnost  
mikrobiální hmoty

## Monodova kinetika

- pokud uvažujeme, že proces rozkladu organické látky je aerobní – oxidace organické látky
- kyslík a organická látka jsou jedinými faktory podmiňujícími růst bakteriální hmoty

- změna koncentrace kontaminantu

$$\Delta C = M_t v_{\max} \frac{S}{K_m + S} \frac{O}{K_o + O} \Delta t$$

$O$  koncentrace rozpuštěného kyslíku

$F$  poměr mezi spotřebovaným kyslíkem a kontaminantem

- změna koncentrace kyslíku

$$\Delta O = M_t v_{\max} F \frac{S}{K_m + S} \frac{O}{K_o + O} \Delta t$$

$K_o$  konstanta udávající rychlost reakce při polovičním nasycení kyslíkem

# 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

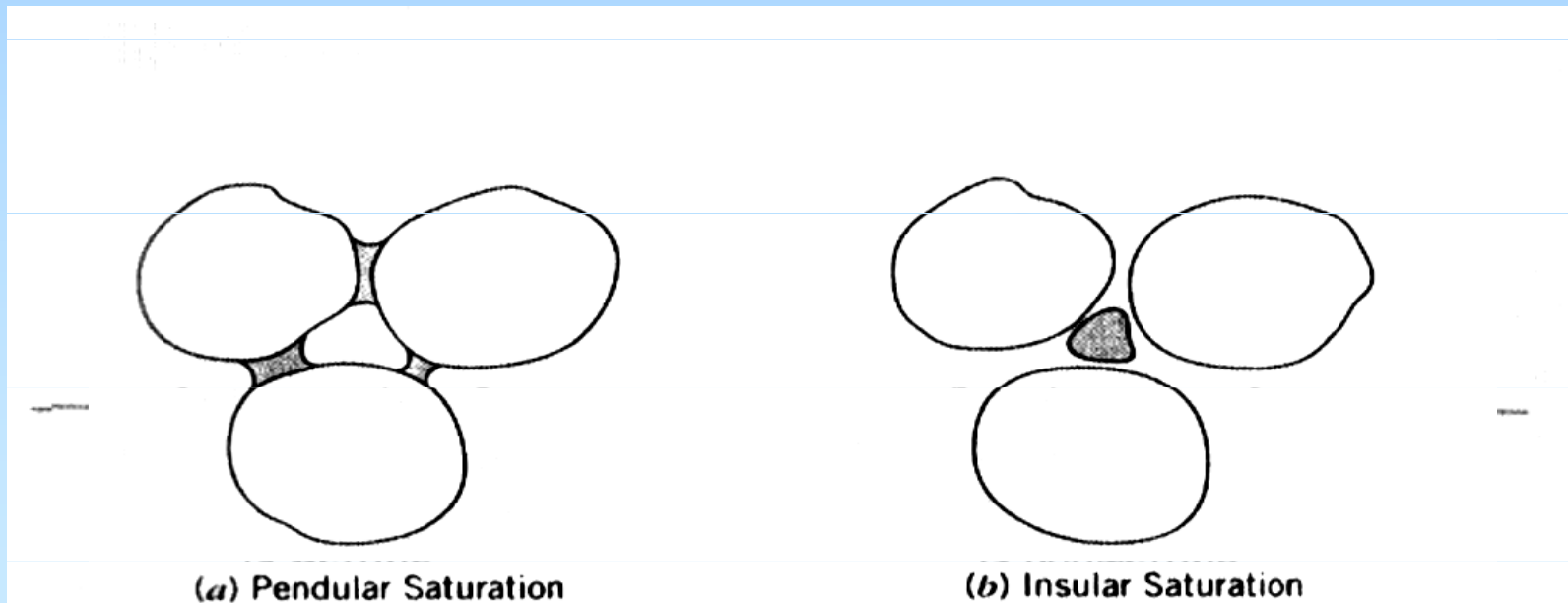


# SMÁČIVOST

- 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  
nesmáčející a smáčející kapalinou

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

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

- kapilární tlak je mírou tendence porózního prostředí nasávat smáčející a odpuzovat nesmáčející fluidum
- je obtížné vtlačit nesmáčející fluidum do prostředí s póry vyplněnými smáčejícím fluidem
- čím je menší velikost pórů, tím větší kladou póry odpor vstupu nesmáčející 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

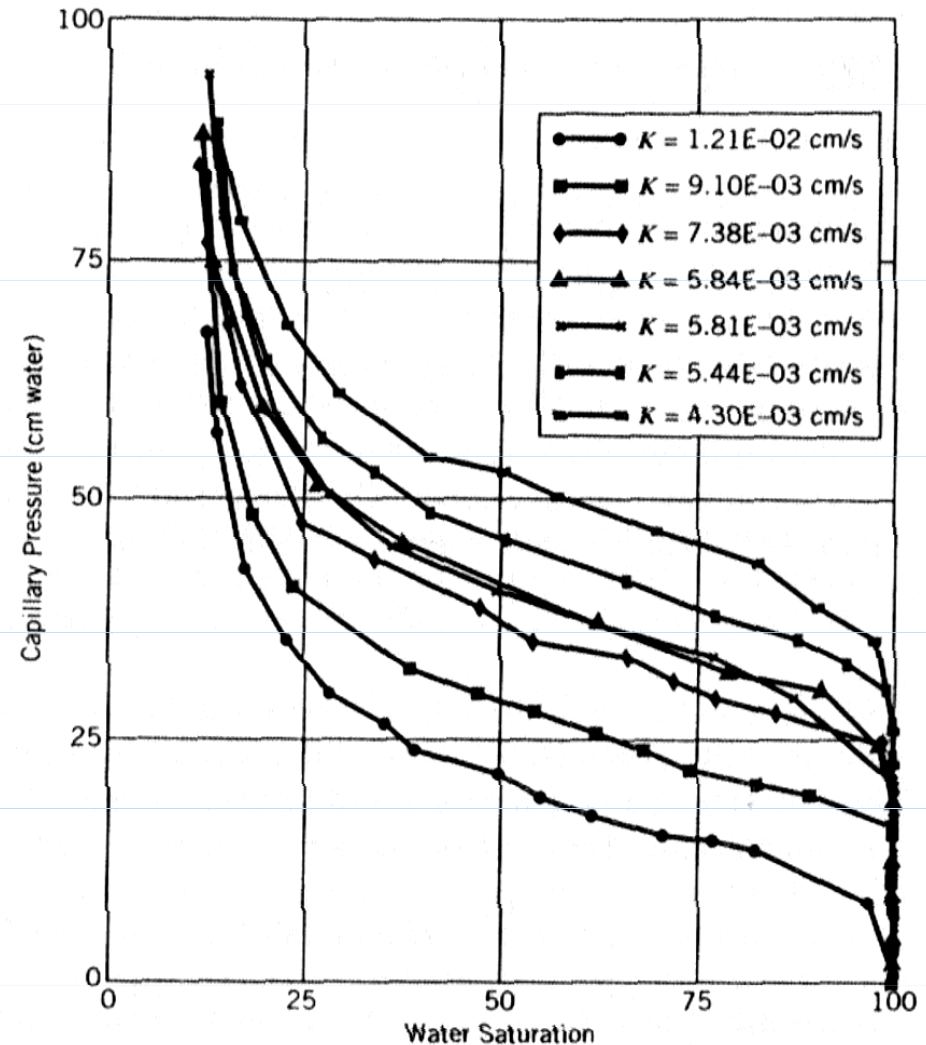
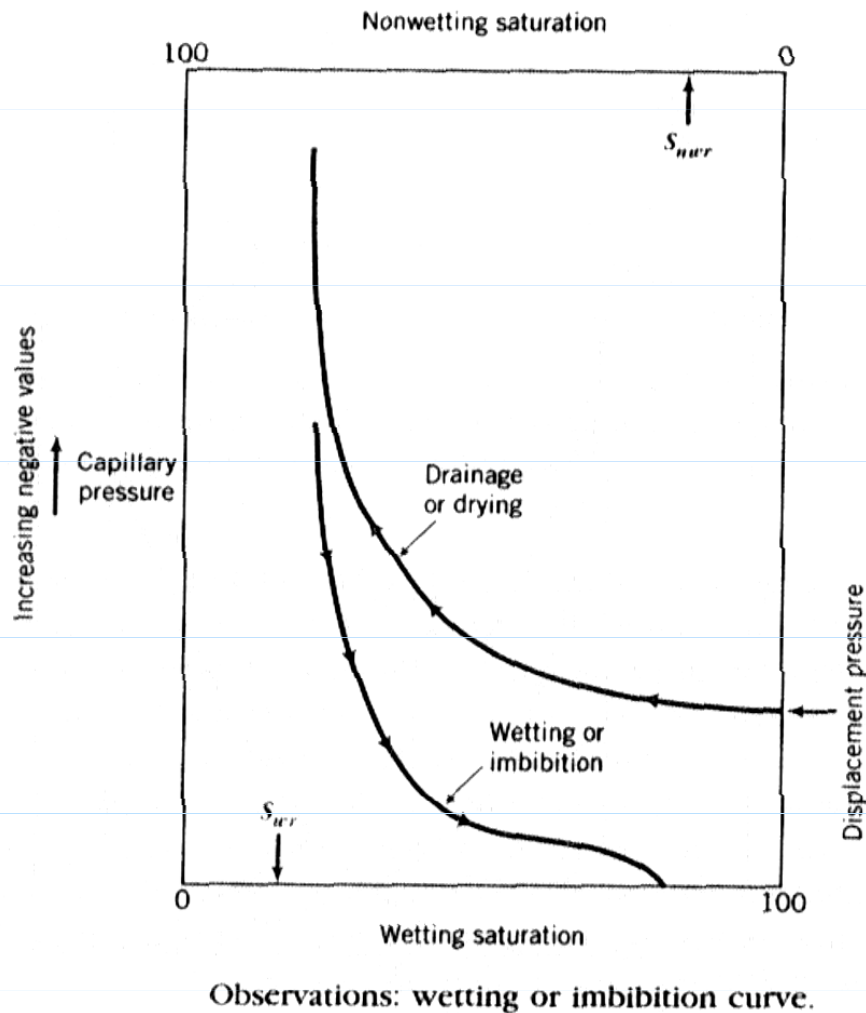
### **drenáž**

- 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**

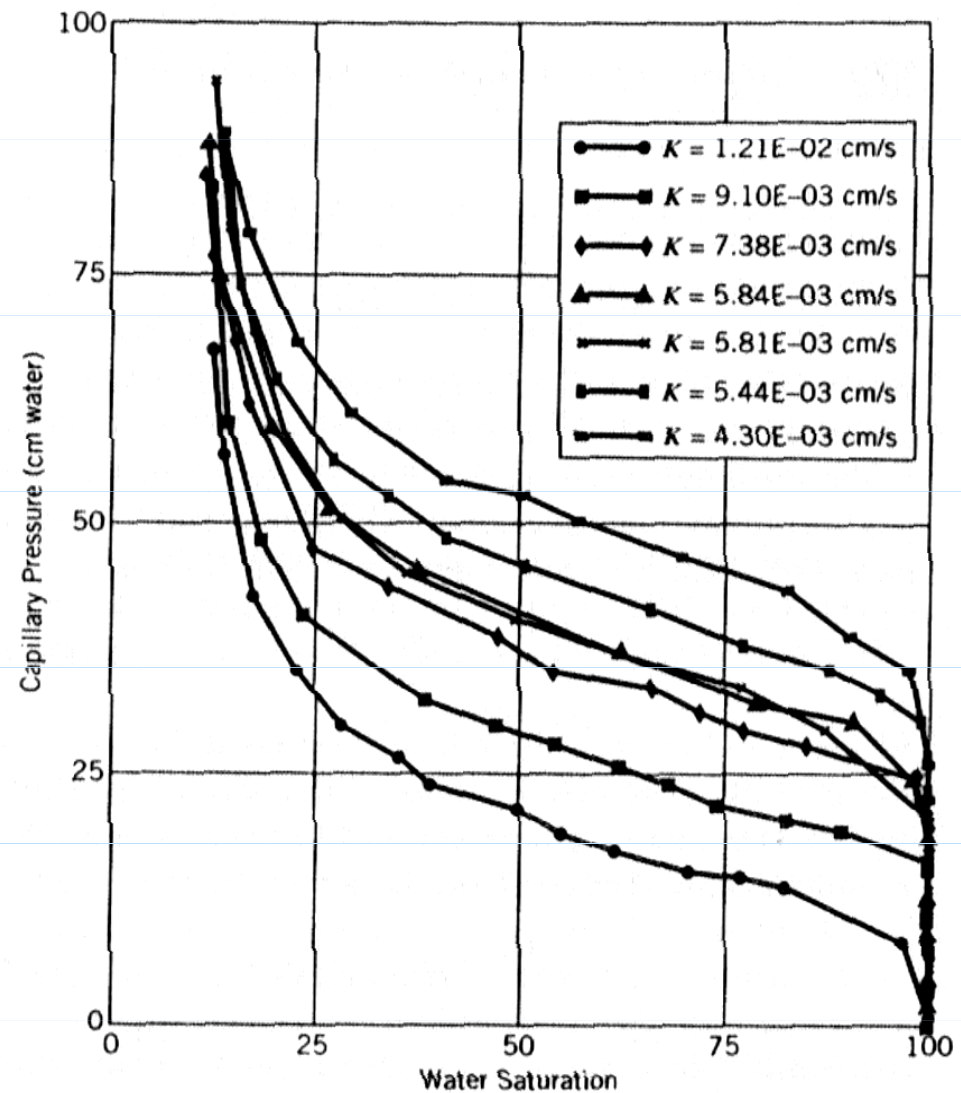
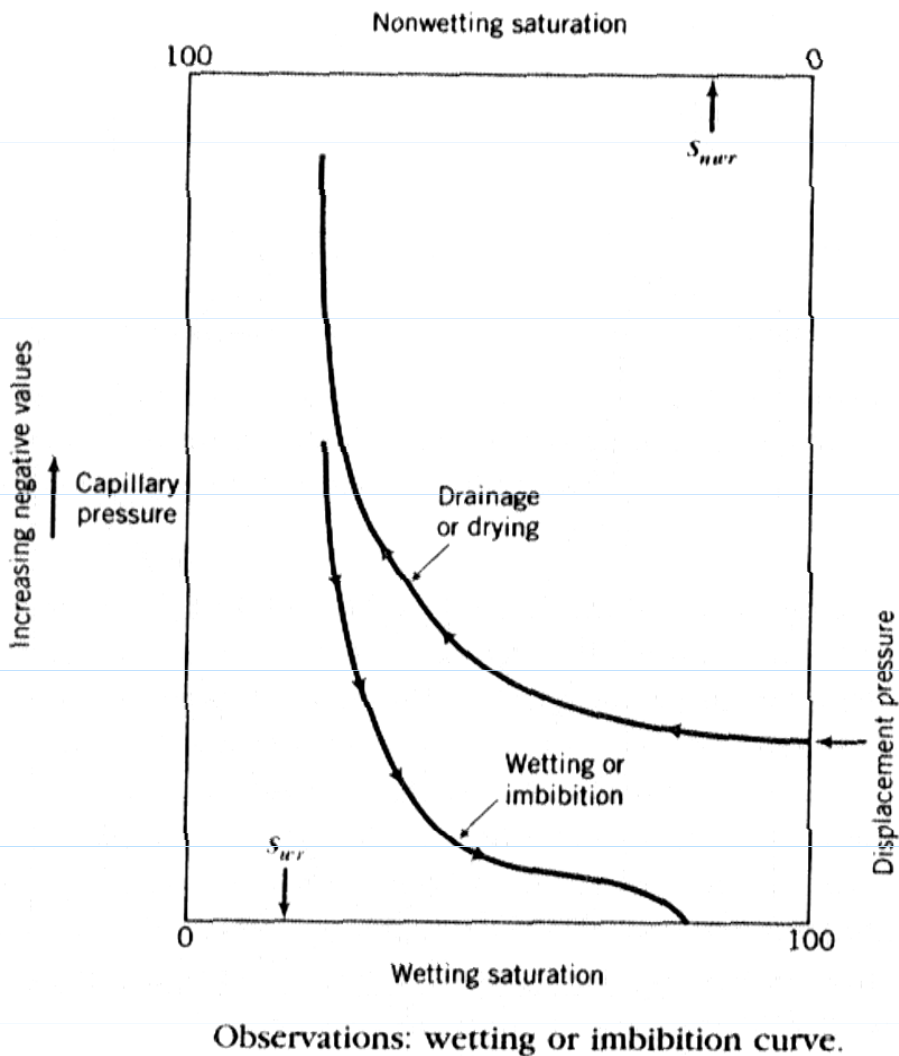
### **hystereze křivek**





## 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 smáčejiho a nesmáčejiho 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~~

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

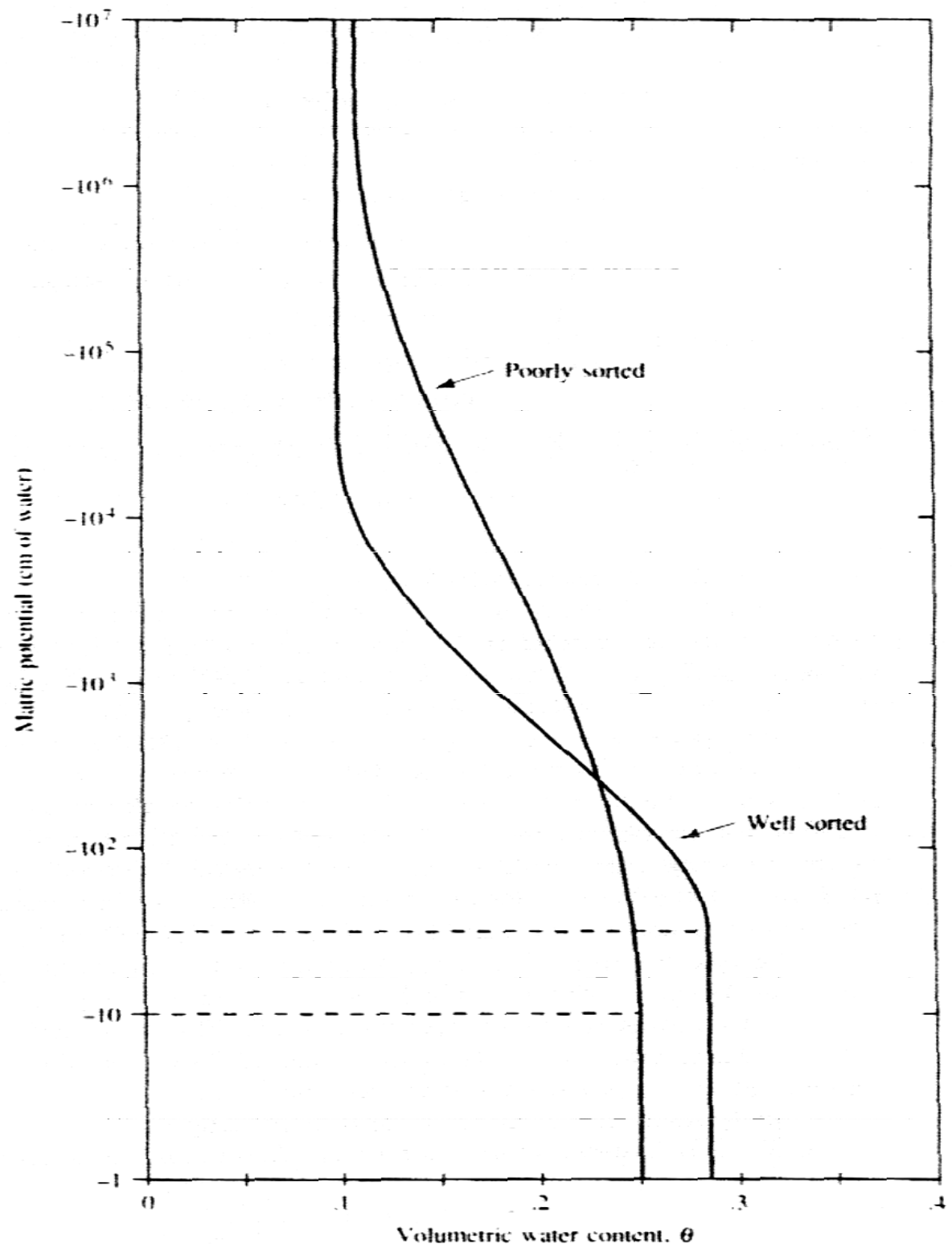
jednotky používané pro vyjádření celkového potenciálu

- 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 fáz (voda) a nesmáčejí fáz (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

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

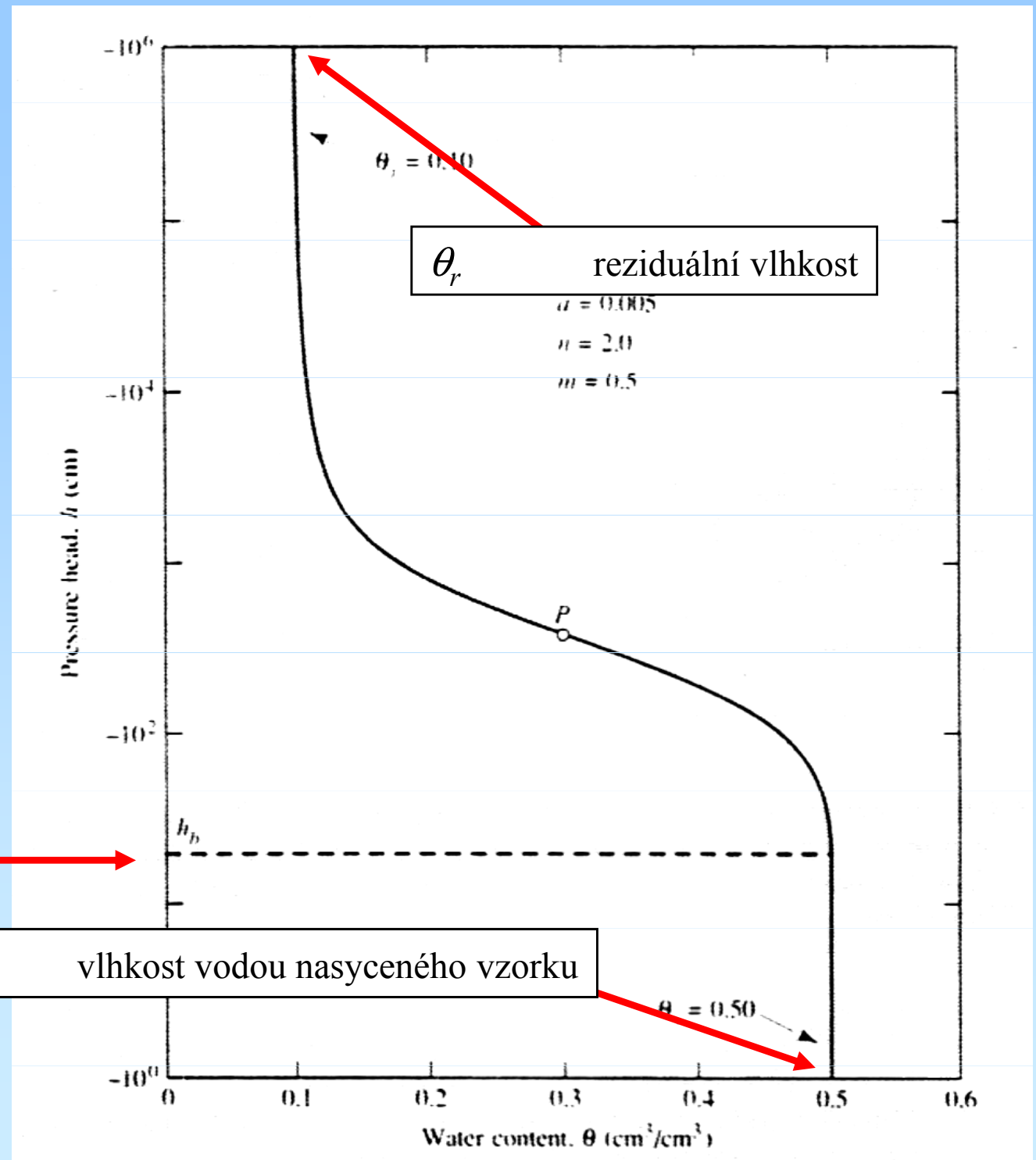
$\theta$	vlhkost
$\theta_s$	vlhkost vodou nasyceného vzorku
$\theta_r$	reziduální vlhkost
$\psi$	kapilární tlak
$\psi_b$	vstupní tlak vzduchu (bubbling pressure)
$\lambda$	experimentálně odvozený parametr pro daný typ půdy

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

$$S_w = \frac{\theta}{\theta_s}$$

$S_e$	efektivní nasycení
$\theta_r$	reziduální vlhkost

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



$\psi_b$  vstupní tlak vzduchu  
(bubbling pressure)

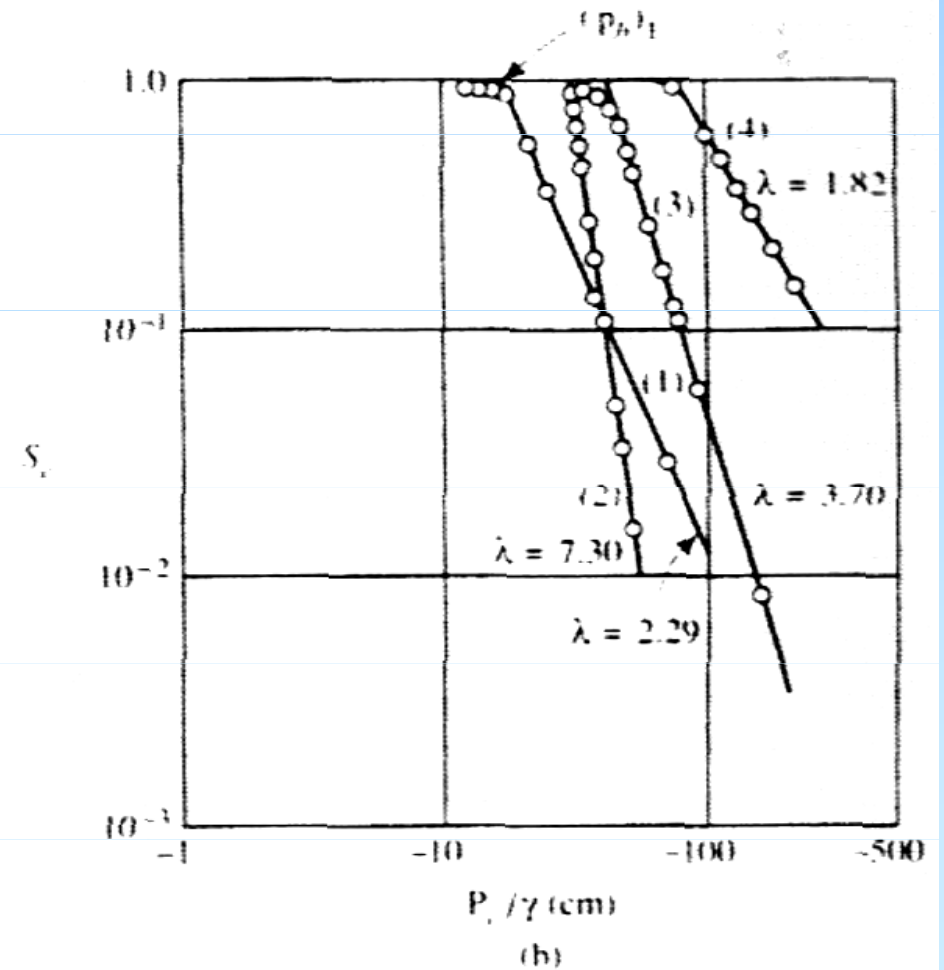
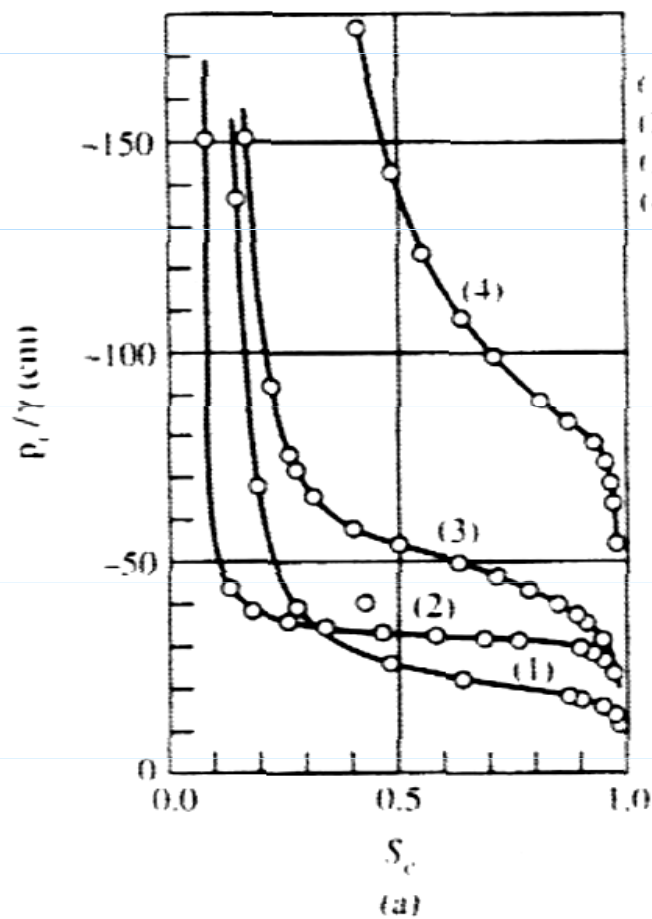
$\theta_s$  vlhkost vodou nasyceného vzorku

## 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 
$$\theta_P = \frac{\theta_s + \theta_r}{2}$$

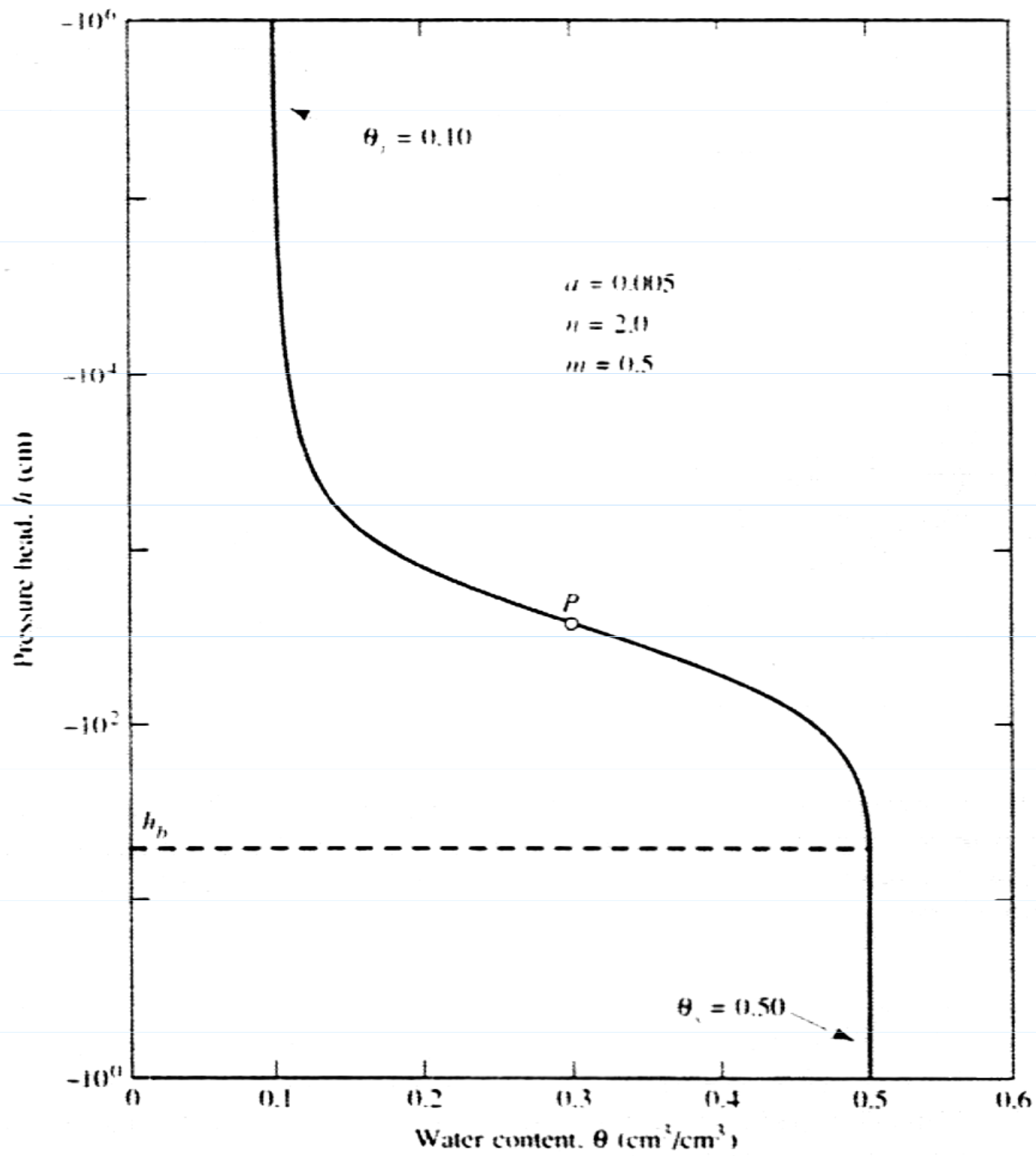
sklon  $S$  odpovídá sklonu přímky v bodě P

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

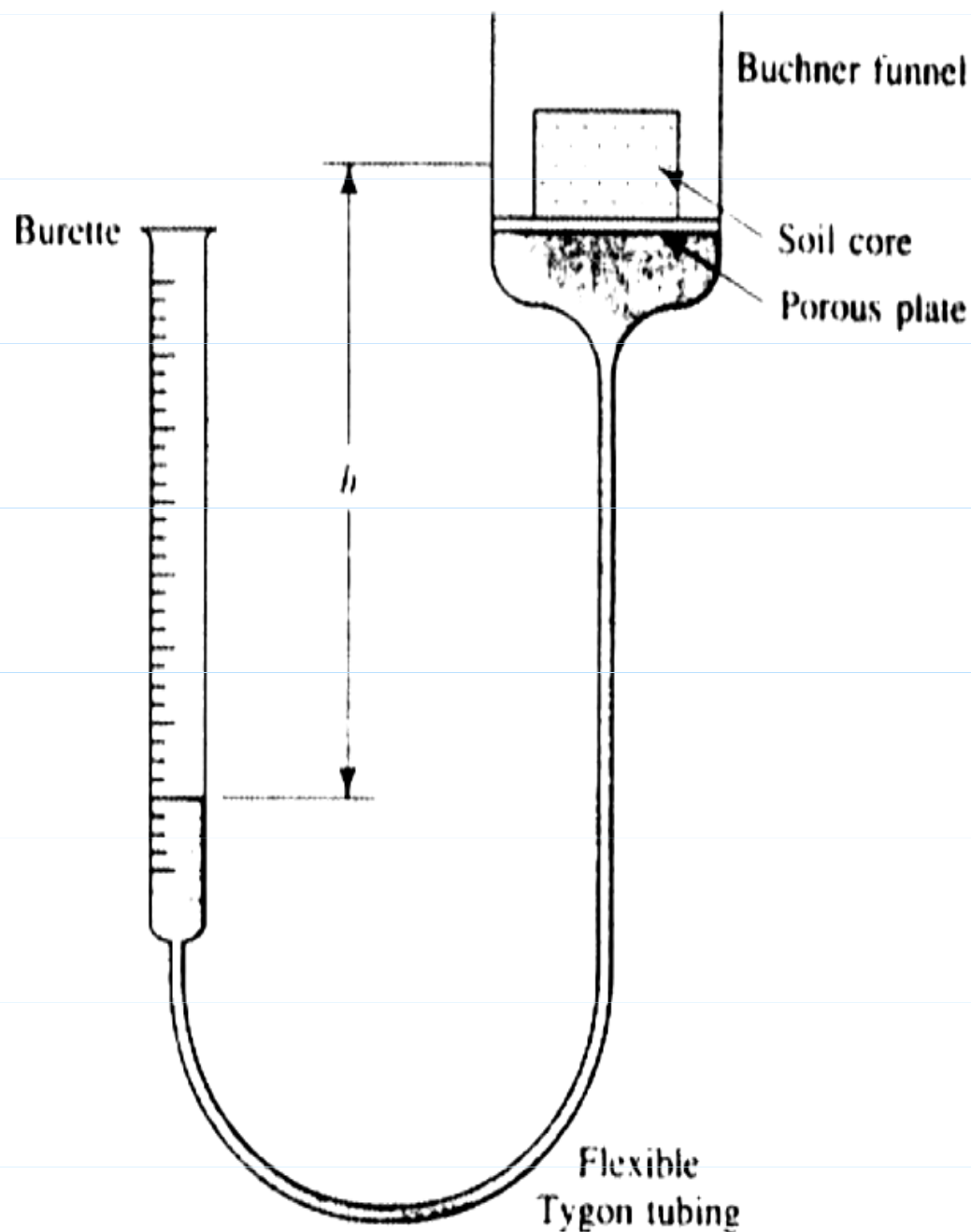
pohyb burety dolů a nahoru vede ke změně tlakové výšky, což způsobuje uvolnění určitého objemu vody

po ustanovení rovnováhy se odečte hodnota

použitelný postup do  $-300$  cm vody

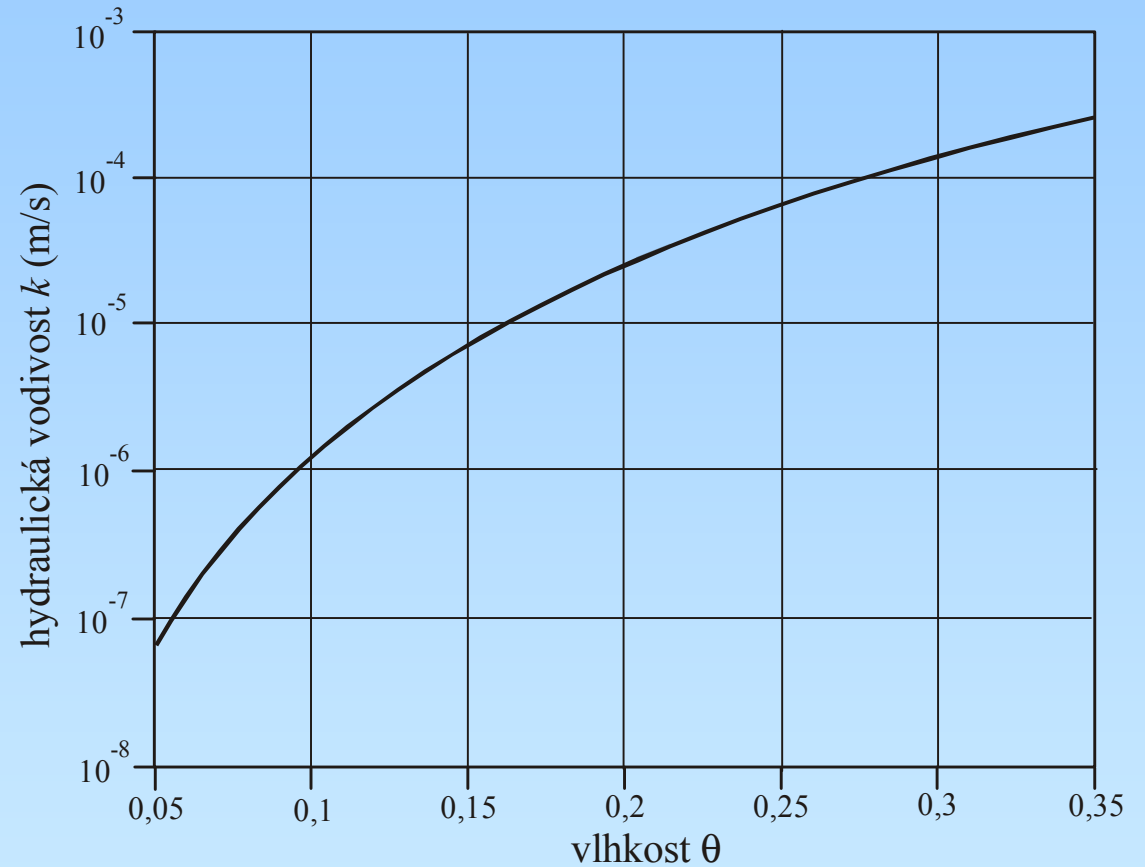
pod  $-300$  cm vody je nutné použít přetlak v prostoru nad nasyceným vzorkem (0,3 – 15 atm)

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 saturované zóně pro systémy NAPL – voda, NAPL – voda – vzduch, apod.

