

A black and white photograph of a forest stream. The stream flows through a dense forest of tall, thin trees. The water is slightly blurred, suggesting movement. The text "OCHRANA PODZEMNÍCH VOD" is overlaid in the center of the image in a bold, serif font.

OCHRANA PODZEMNÍCH VOD

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

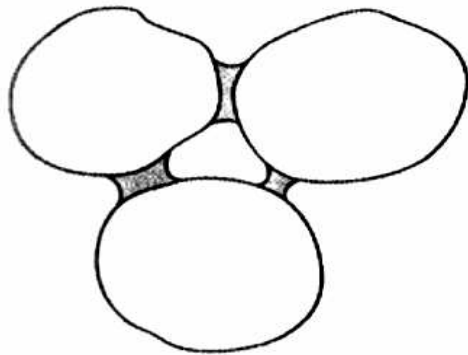
je součet nasycení jednotlivých fluid roven 1 (např. $S_{vzduch} + S_{DNAPL} + S_{voda} = 1$) - teoreticky

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 ϕ**

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

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



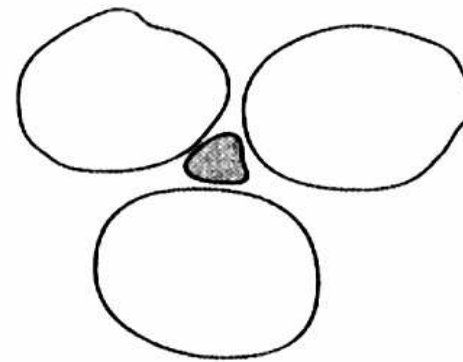
(a) Pendular Saturation

voda - vzduch - hornina

voda - DNAPL - hornina

voda - **DNAPL** - organická hmota

vzduch - **DNAPL** - hornina



(b) Insular Saturation

*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 σ [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 σ 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

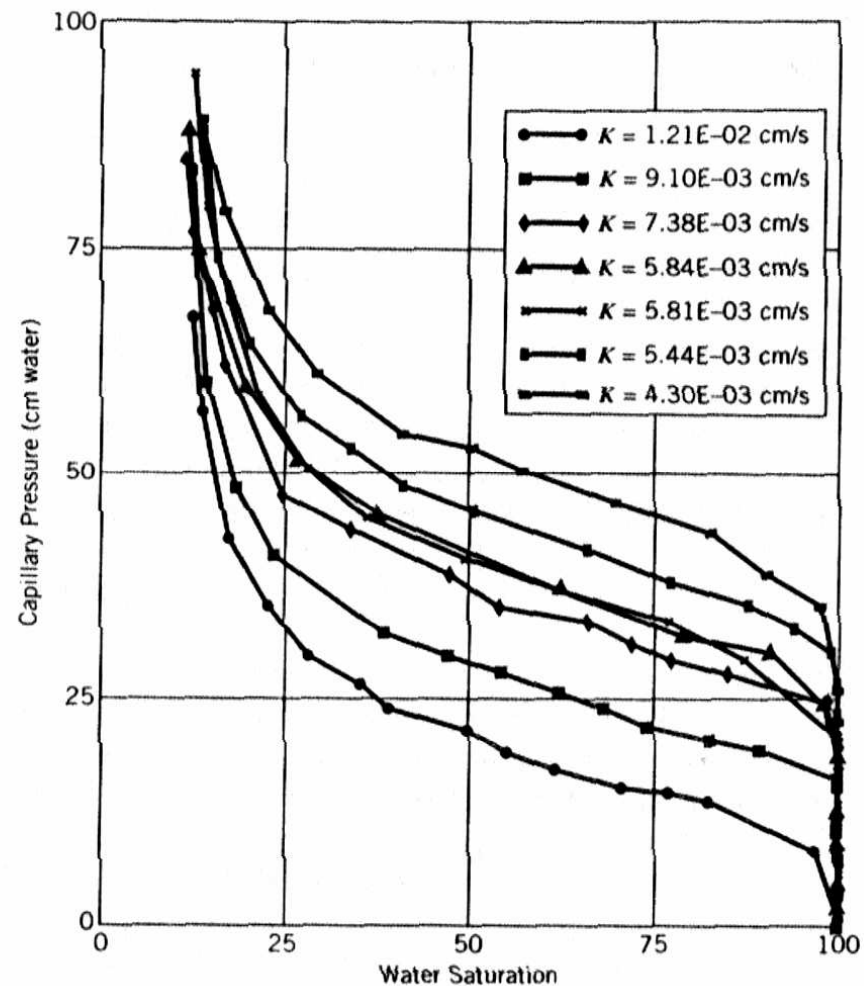
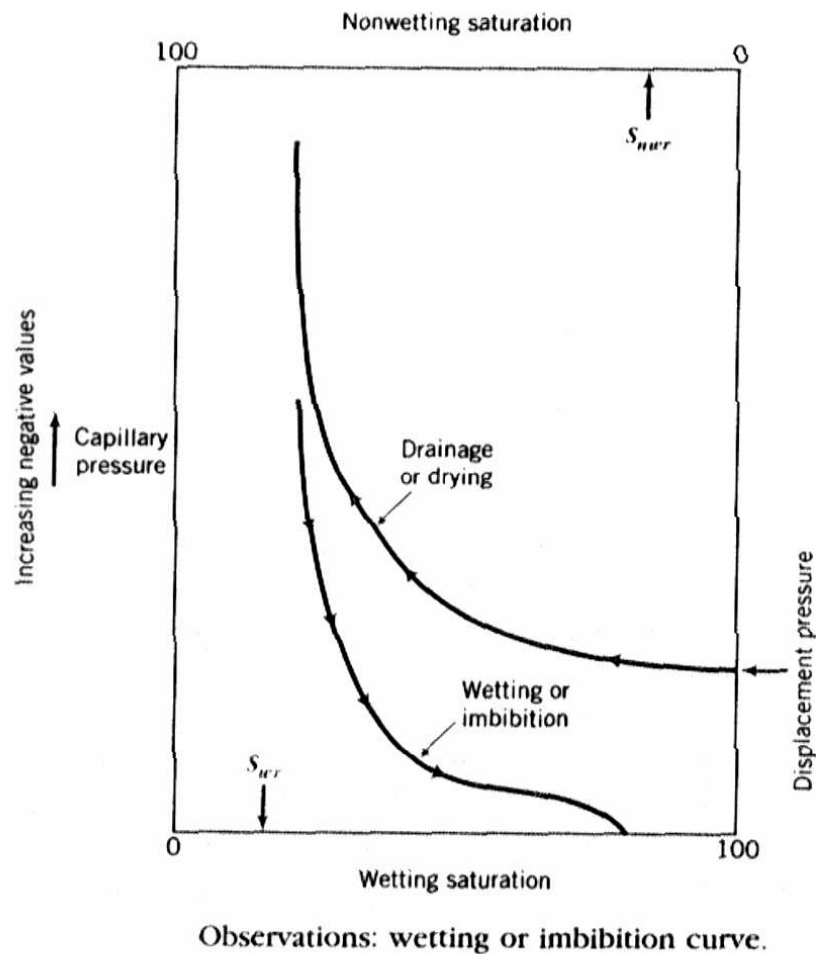
- vytěsňování nesmáčejího fluida fluidem smáčejíím
- např. infiltrace vody do suché horniny,
vstup vody do vodou smáčeného systému hornina – NAPL

drenáž

- vytěsňování smáčejího fluida fluidem nesmáčejíím
- např. vstup DNAPL do vodou smáčené horniny s póry vyplněnými vodou

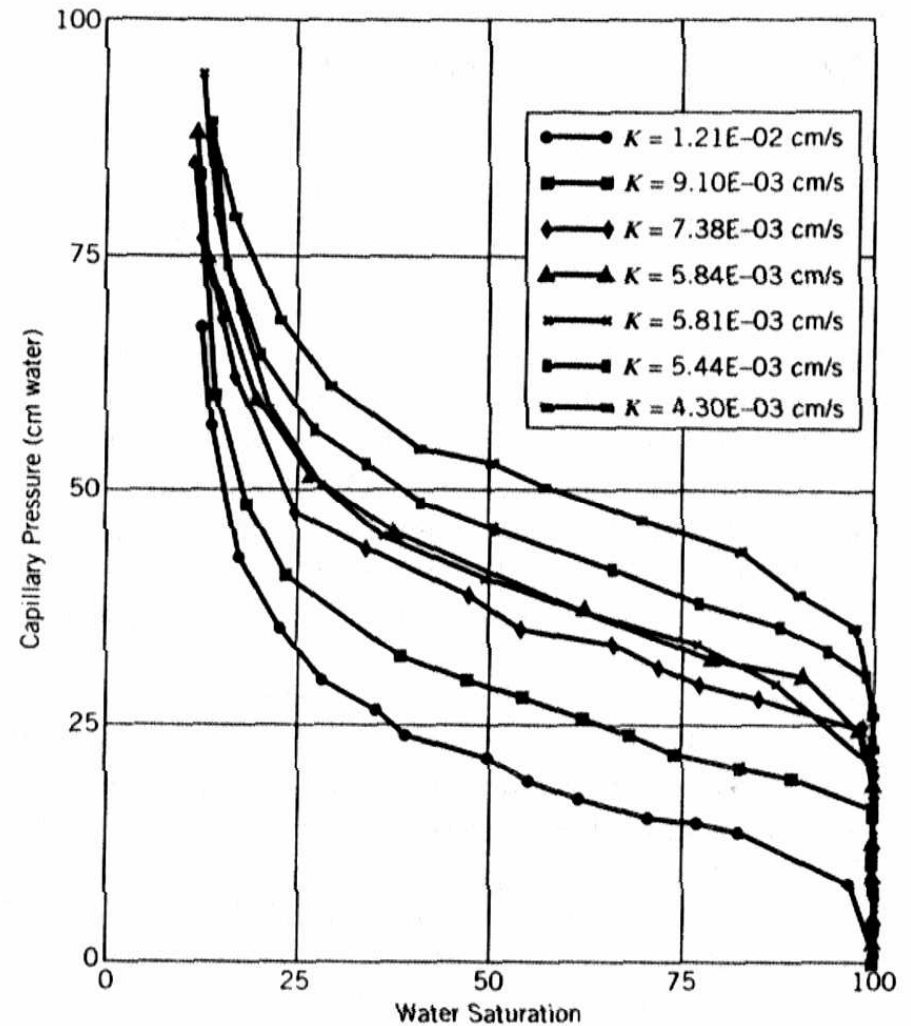
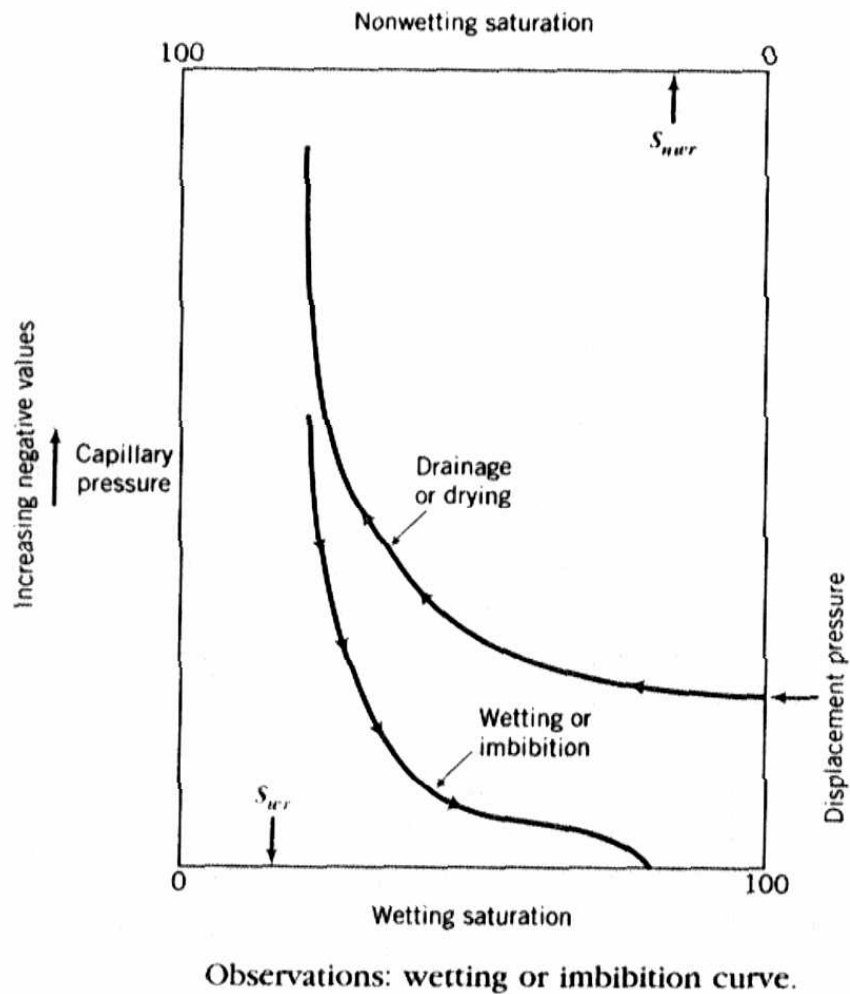
vztahy mezi drenáží a nasáváním jsou pro konkrétní systémy (hornina – smáčejíí – nesmáčejíí fluidum) vynášeny v tzv. **křivkách kapilárního tlaku**

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 – ϕ , σ , ρ , 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 ψ
- 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

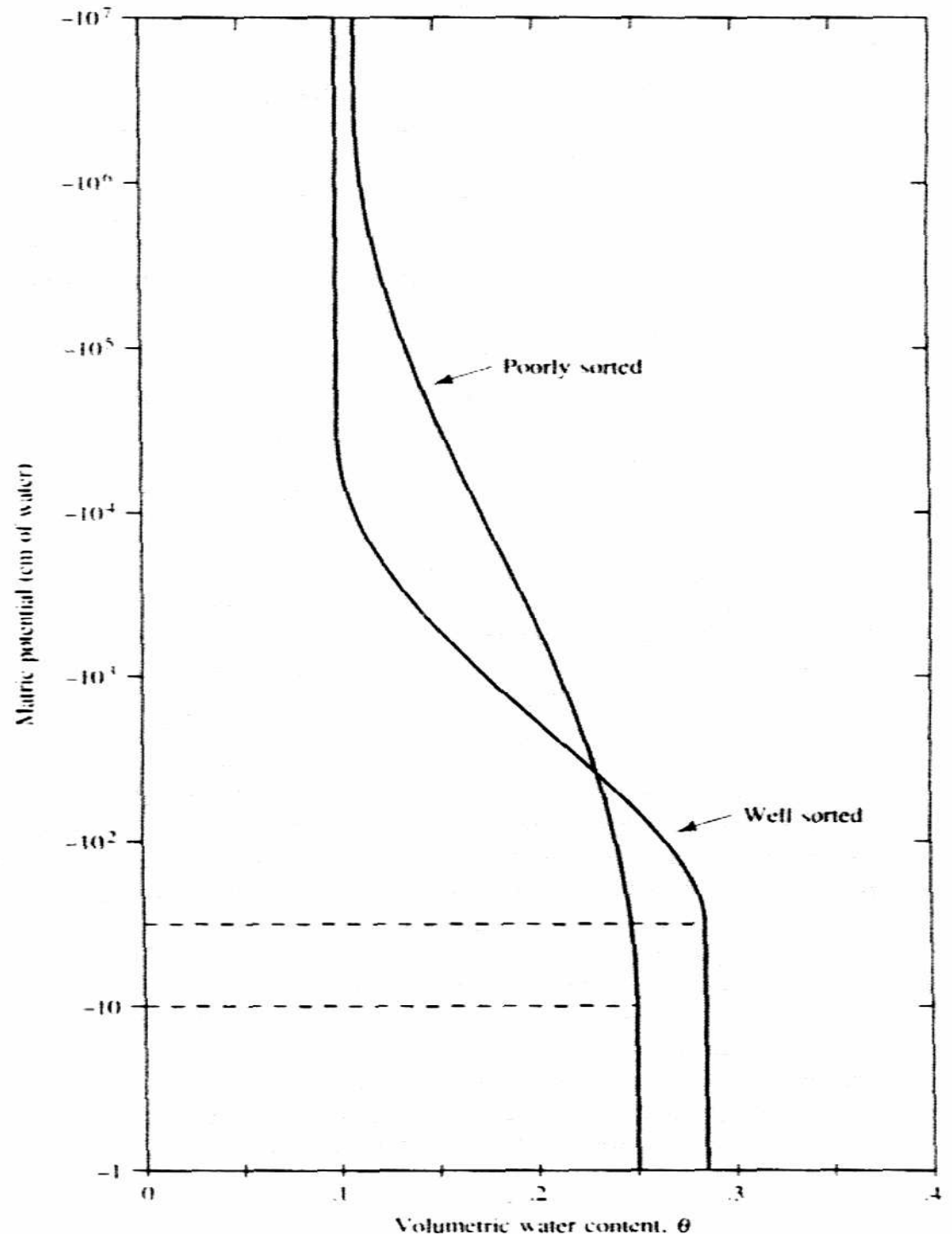
- atmosféry – 1 atm
- pascaly – 1 Pa (kPa)
- centimetry vodního sloupce – h (cm)

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

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

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

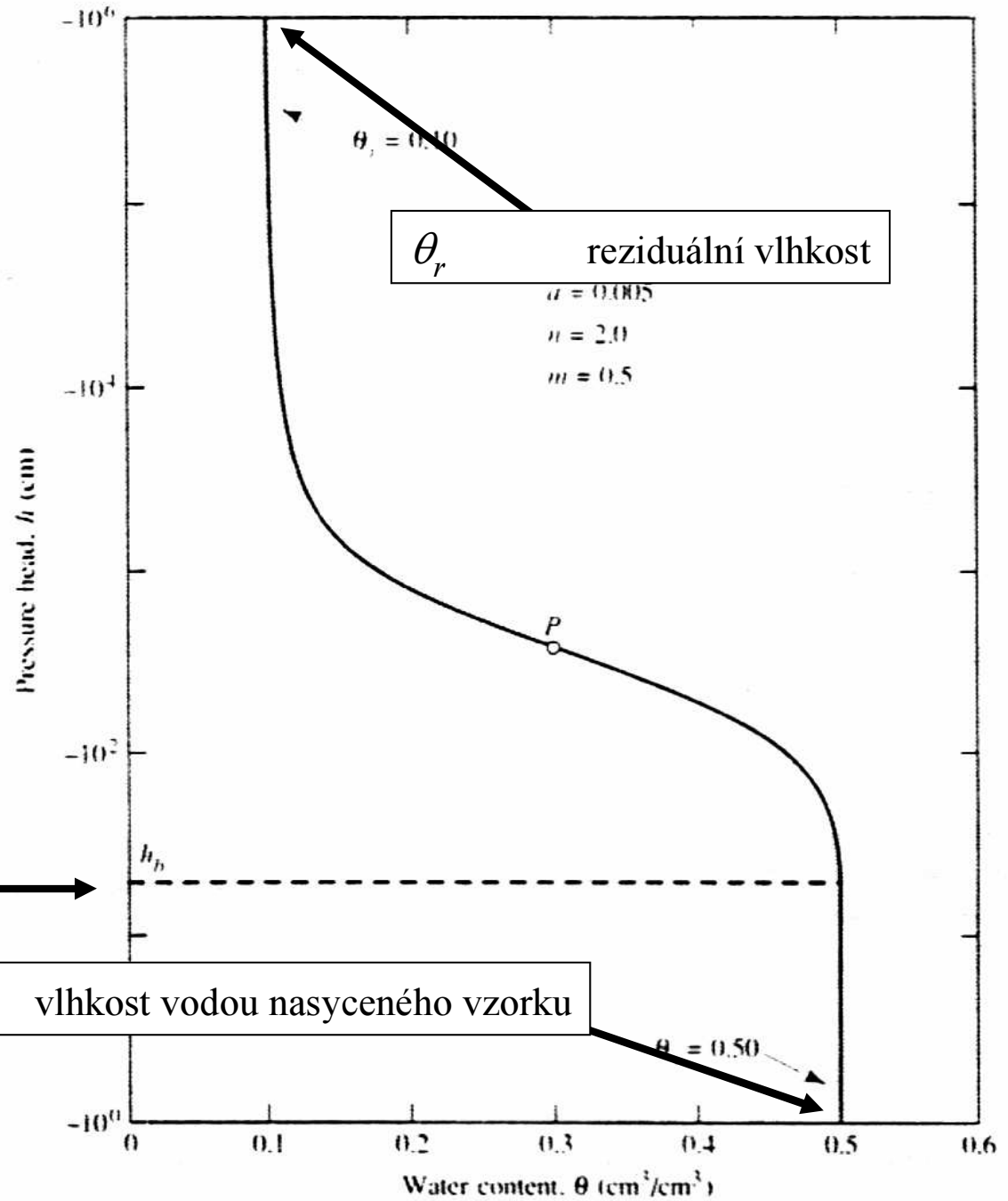
θ	vlhkost
θ_s	vlhkost vodou nasyceného vzorku
θ_r	reziduální vlhkost
ψ	kapilární tlak
ψ_b	vstupní tlak vzduchu (bubbling pressure)
λ	experimentálně odvozený parametr pro daný typ půdy

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

$$S_w = \theta / \theta_s$$

S_e	efektivní nasycení
θ_r	reziduální vlhkost

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



ψ_b

vstupní tlak vzduchu
(bubbling pressure)

θ_s

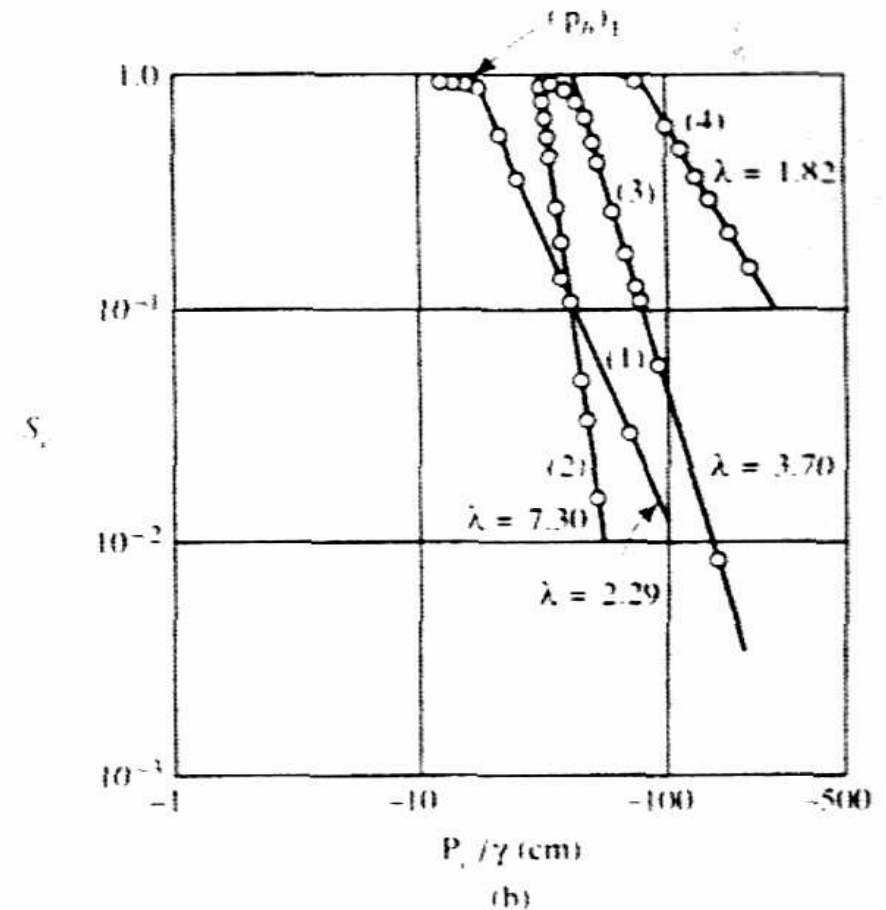
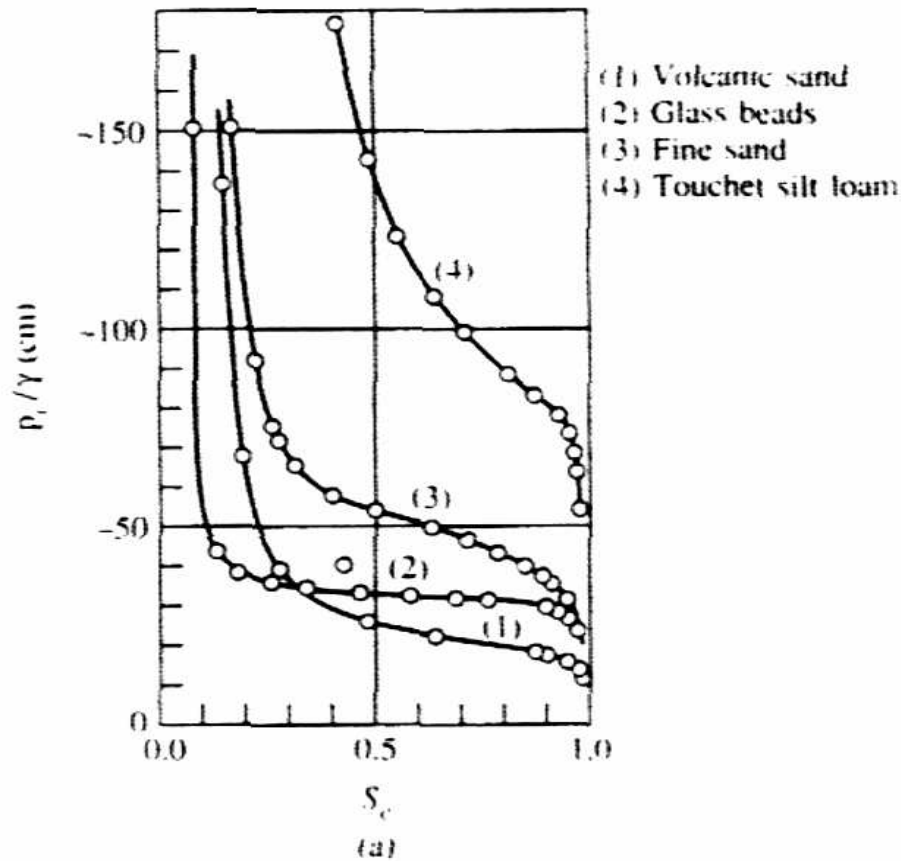
vlhkost vodou nasyceného vzorku

určení parametru λ do rovnice Brooks-Corey

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

v bilogaritmickém měřítku se křivky promítnou jako přímky

sklon těchto přímek odpovídá parametru λ



rovnice van Genuchtena

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

θ	vlhkost
θ_s	vlhkost vodou nasyceného vzorku
θ_r	reziduální vlhkost
ψ	kapilární tlak
α, 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 θ_s a θ_r (odpovídá tlaku – 15 000)

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

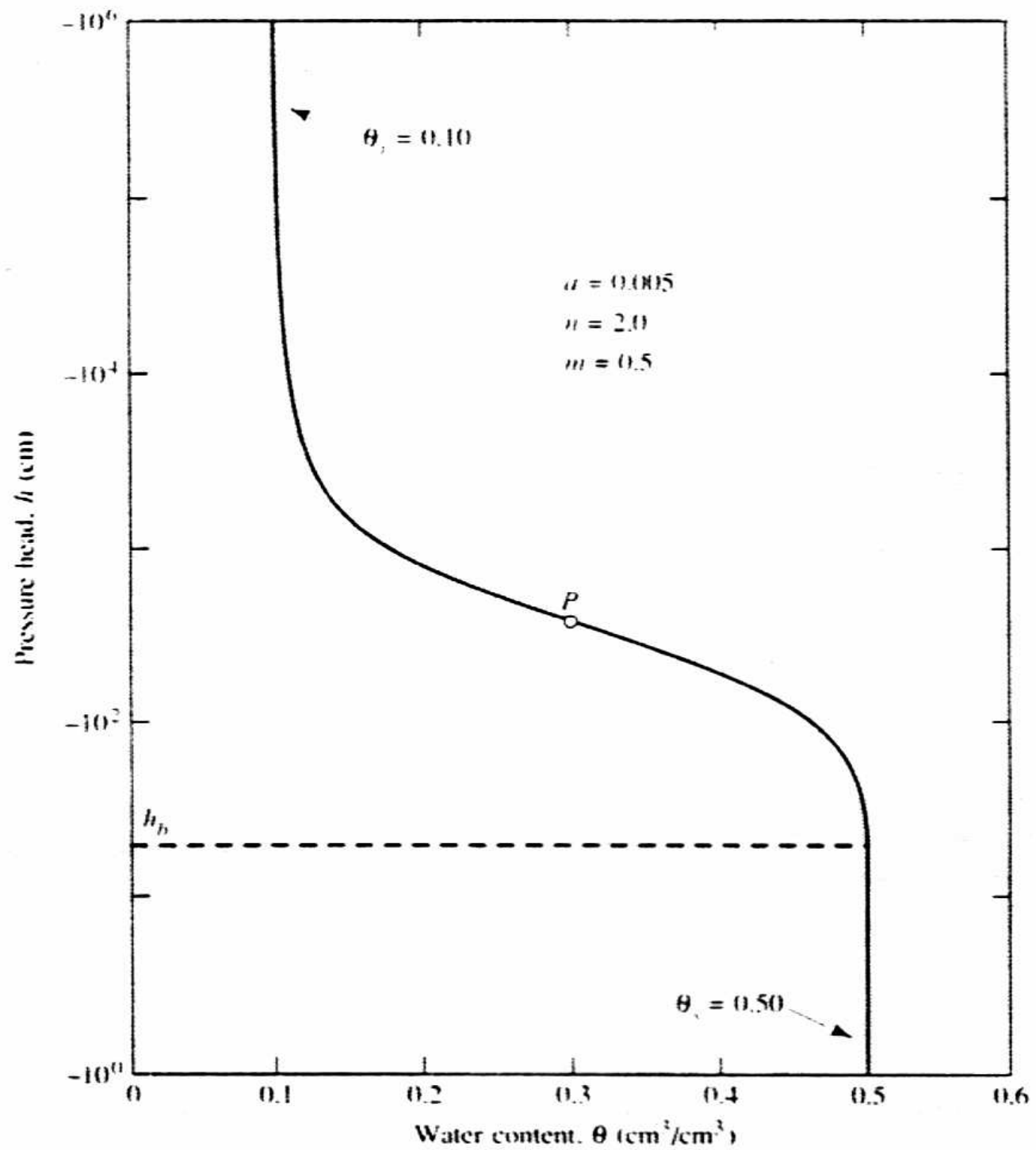
sklon S odpovídá sklonu přímky v bodě P

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

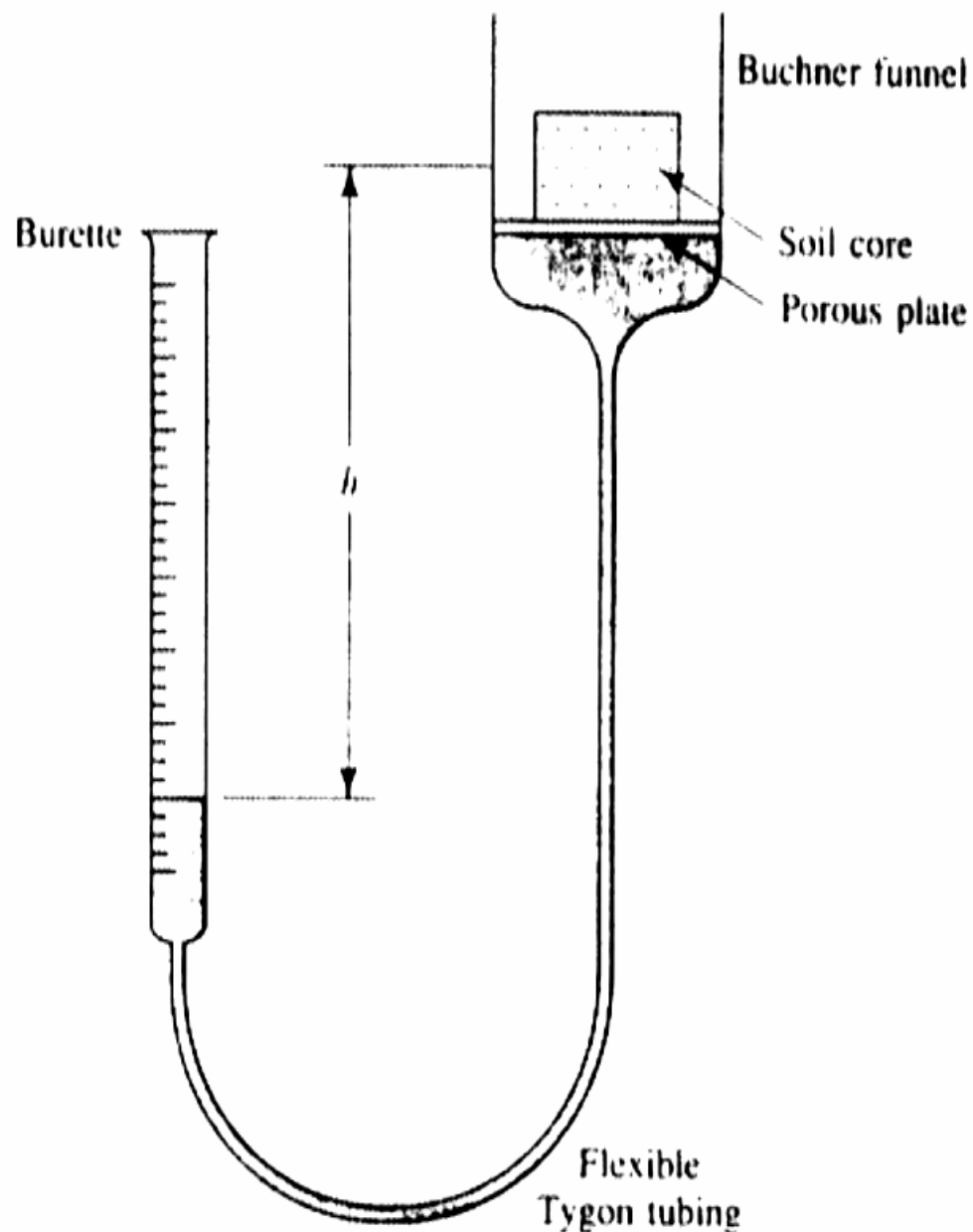
pohyb burety dolů a nahoru vede ke změně tlakové výšky, což způsobuje uvolnění určitého objemu vody

po ustanovení rovnováhy se odečte hodnota

použitelný postup do -300 cm vody

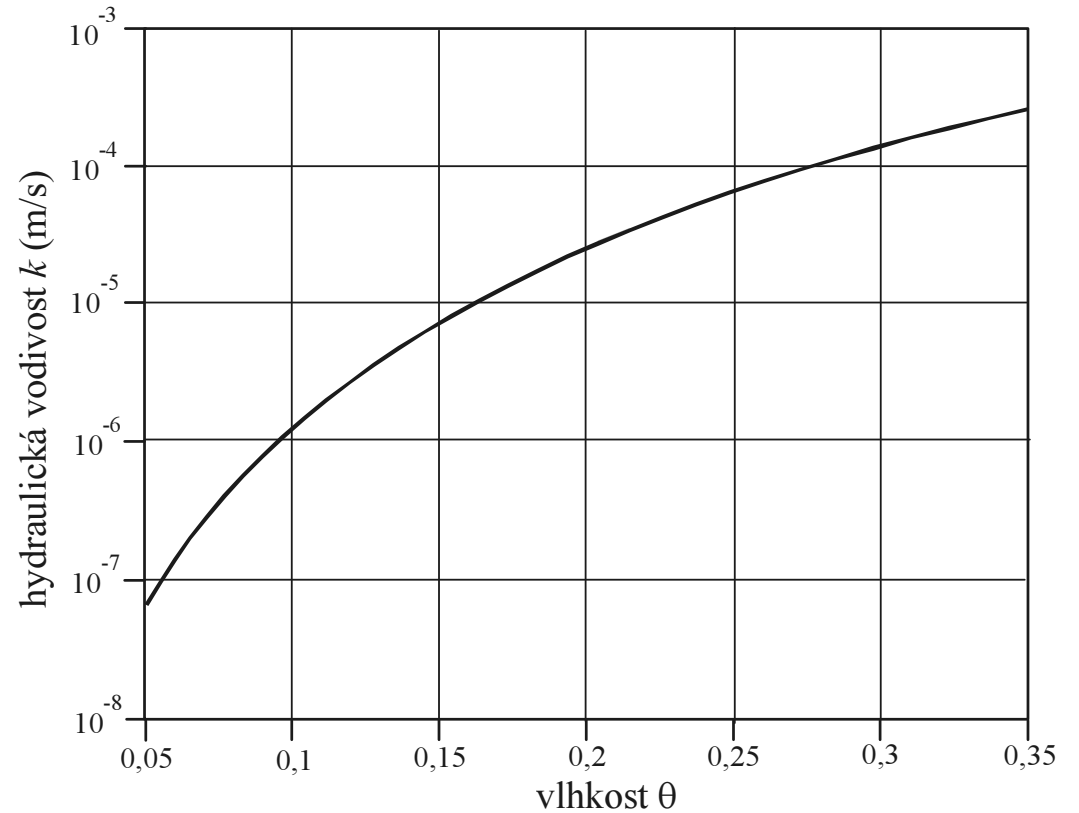
pod -300 cm vody je nutné použít přetlak v prostoru nad nasyceným vzorkem (0,3 – 15 atm)

podobné zařízení i pro konstrukci retenčních křivek



Hydraulická vodivost v nenasurované 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 θ

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

vzorec pro výpočet hydraulické
vodivosti zeminy v nenasycené
zóně při vlhkosti θ

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

(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.

