

# Hydropedologie

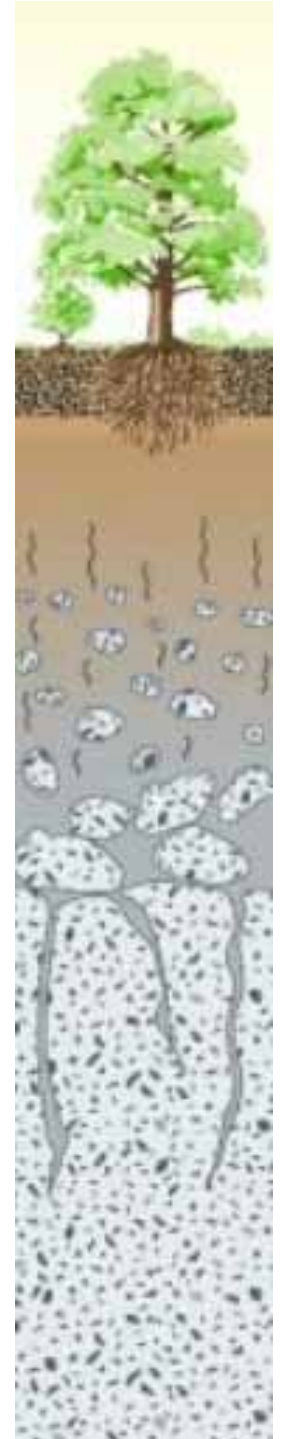
## *Přednáška 6*

### **Potenciál půdní vody**

definice, složky, měření

### **Retenční čára půdní vlhkosti**

definice, vlastnosti, měření



# Potenciál půdní vody

*pohyb vody v půdě je způsoben přítomností hnacích sil  
= rozdílem potenciálů*

potenciál půdní vody je **skalární veličina**

pro jeho objasnění je výhodné studovat **rovnovážný stav**

## **příklad:**

- ve sloupci půdy ponořeném do vody spodním koncem **voda vzlíná**,
- **voda je půdou přitahována**, bez něj by voda do sloupce nevystoupila, “*nezalili bychom květináč z podtácku*”
- v podtácku je ihned po zalití **vyšší potenciál než v půdě květináče**

## Slide 2

---

M.S.1

V rovnovážném stavu jsou si potenciály rovny ve všech bodech systému. Gradient potenciálu je roven nule.

Michal Snehota; 26.10.2005

# Potenciál půdní vody

Voda je vystavena působení mnoha různých typů sil.

**nejdůležitější:**

- **gravitační**  $\varphi_g$  – účinky tíhového pole
- **vlhkostní**  $\varphi_w$  – (kapilární) na fázovém rozhraní v kapilárách mezi plynnou, kapalnou a pevnou fází

**celkový potenciál:  $\phi = \varphi_w + \varphi_g$  [J/kg]**

často se zanedbává:

- **pneumatický**  $\varphi_a$  – tlak vzduchu v půdě je odlišný od atmosferického tlaku
- **osmotický**  $\varphi_o$  – roztok přijímá čistou vodu např. přes polopropustnou membránu (voda proniká, nikoliv rozp. látky)
- **zátěžový**  $\varphi_e$  – zatížení vody stlačené půdou

*celkový potenciál exaktně*

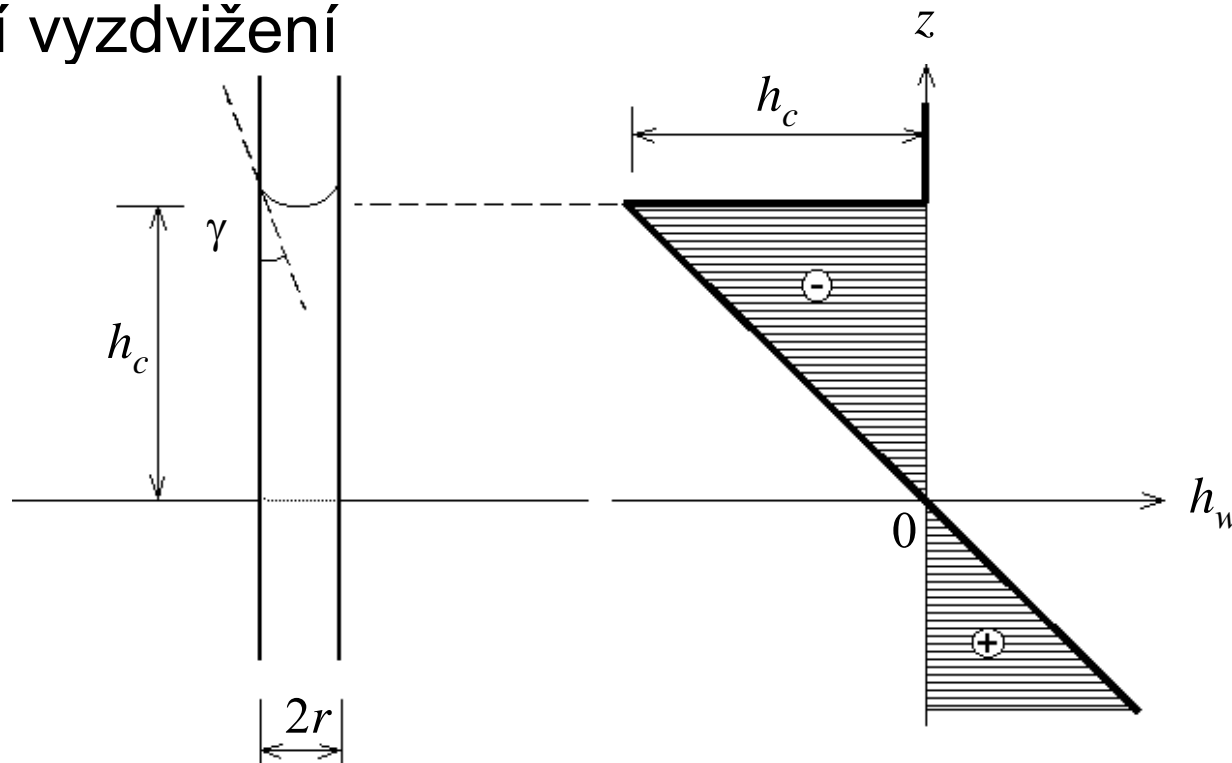
$$\phi = \varphi_g + \varphi_o + \varphi_w + \varphi_a + \varphi_e \text{ [J/kg]}$$

*exaktní definice vyplývá z termodynamické formulace potenciálu, ztotožněného s Gibsonovou volnou entalpií (volnou energií)*

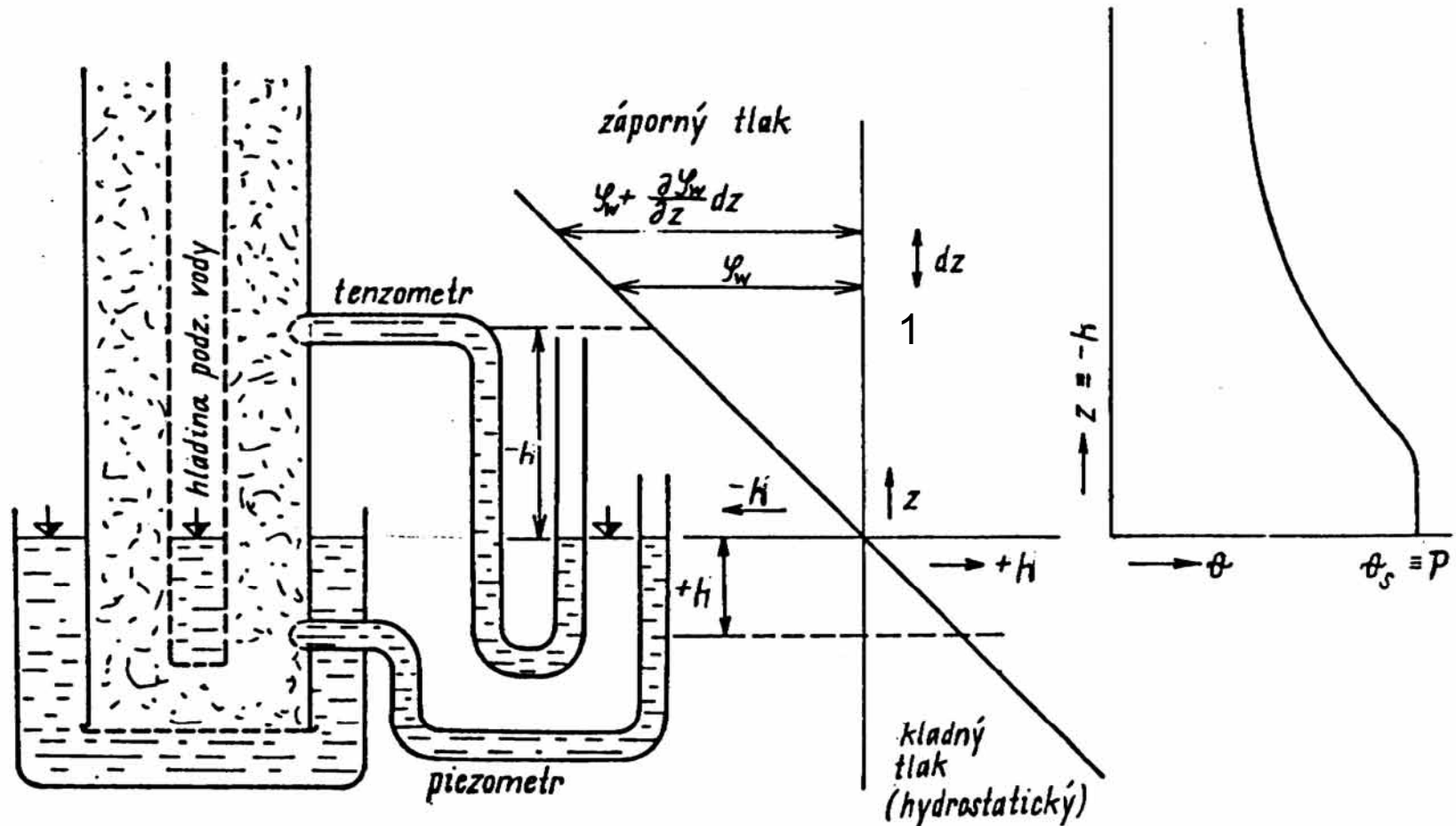
# (Vlhkostní) potenciál vody v kapiláře

zvolena referenční hladina s nulovým potenciálem  $h_w$  (~  
hladině podzemní vody)

voda v kapiláře nad touto hladinou na úrovni  $h_c$  má  
záporný vlhkostní potenciál  $\phi_w$ , byla vynaložena práce na  
její vyzdvižení



# Vlhkostní potenciál půdní vody



system je v rovnováze, vlhkost půdy klesá s výškou podle grafu vpravo  
vlhkostní potenciál  $\psi_w$  je přímo úměrně závislý na výšce nad hladinou  
volné vody

# Vlhkostní potenciál půdní vody

**Vlhkostní potenciál** ve výšce  $z$  nad hladinou volné vody je  $\varphi_w$

Práce pro převedení vody o hmotnosti  $dm$  do výšky  $z$  nad hladinu volné vody vykonaná **silou působící proti** kapilárním silám je  $\varphi_w \cdot dm$ .

**Vlhkostní potenciál** ve výšce  $(z + dz)$  je  $\varphi_w + (\partial\varphi_w/\partial z) \cdot dz$

Práce pro převedení vody o hmotnosti  $dm$  do výšky  $(z + dz)$  nad hladinu volné vody vykonaná **silou působící proti** kapilárním silám je  $[\varphi_w + (\partial\varphi_w/\partial z) dz]dm$

*Pak tedy celková práce vykonaná použitím síly proti kapilaritě při přemístění vody hmotnosti  $dm$*

$$W_1 = \varphi_w dm - \left( \varphi_w + \frac{\partial \varphi_w}{\partial z} dz \right) dm = \boxed{-\frac{\partial \varphi_w}{\partial z} dz dm}$$

# Vlhkostní potenciál půdní vody

Protože se zároveň přemístila hmotnost  $dm$  o výšku  $dz$ , **proti působení gravitace**, byla vykonána práce v gravitačním poli

$$W_2 = g \cdot dm \cdot dz.$$

Protože při rovnováze musí platit  $W_1 + W_2 = 0$ , bude

$$\frac{\partial \varphi_w}{\partial z} = g$$

Integrací získáme

$$\varphi_w = g \cdot z + B$$

Při  $z = 0$  je  $\varphi_w = 0$  je i  $B = 0$

$$\varphi_w = g \cdot z$$

Kapilární potenciál je tedy **přímo úměrný** výšce nad vodní hladinou



# Potenciál půdní vody - jednotky

Energie na jednotkovou hmotnost: jednotkou je  $\text{J.kg}^{-1}$  [ $\text{L}^2.\text{T}^{-2}$ ]  
-je základním způsobem definice potenciálu.

Energie na jednotkový objem: voda je prakticky nestlačitelná kapalina a její hustota je prakticky nezávislá na potenciálu  
Po dosazení se obdrží rozměr tlaku [ $\text{ML}^{-1}.\text{T}^{-2}$ ], jako jednotka se užívá  $\text{Pa} = \text{N.m}^{-2}$  (dříve bar). Někdy se pro tuto jednotku potenciálu užívá i termín **tlak** (např. **sací tlak**).

Energie na jednotkovou tíhu: z hydrostatiky - převod tlakových jednotek  $p$  na hydraulické výšky  $h$  při použití měrné tíhy,  $p = \rho_w g \cdot h$  (konstantní hodnota měrné hmotnosti vody). Má rozměr **délky** [ $\text{L}$ ], obvykle **cm** - symbol je **h**, název - (**sací**) **tlaková výška** – v praxi nejčastější

# Jednotky vlhkostního potenciálu půdní vody, vztahy k fyz. veličinám

|                          | J/Kg     | cm H <sub>2</sub> O | pF=log <sub>10</sub><br>(abs<br>(cm H <sub>2</sub> O)) | Mpa    | Bar<br>(atm) | relativní<br>vlhkost par | bod tání<br>°C | ekv.<br>poloměr<br>pórů (um) |
|--------------------------|----------|---------------------|--|--------|--------------|--------------------------|----------------|------------------------------|
|                          | -1       | -10                 | 1.01   | -0.001 | -0.01        | 0.999993                 | -0.0008        | 290.08                       |
|                          | -10      | -102                | 2.01   | -0.01  | -0.1         | 0.999926                 | -0.0076        | 29.01                        |
| <b>polní kapacita</b>    | -33      | -336                | 2.53   | -0.033 | -0.33        | 0.999756                 | -0.0252        | 8.79                         |
|                          | -100     | -1019               | 3.01   | -0.1   | -1           | 0.999261                 | -0.0764        | 2.9                          |
|                          | -1000    | -10194              | 4.01   | -1     | -10          | 0.992638                 | -0.7635        | 0.29                         |
| <b>bod vadnutí</b>       | -1500    | -15291              | 4.18   | -1.5   | -15          | 0.988977                 | -1.1453        | 0.19                         |
|                          | -10000   | -101937             | 5.01   | -10    | -100         | 0.928772                 | -7.6352        | 0.03                         |
| <b>vysušeno vzduchem</b> | -100000  | -1019368            | 6.01   | -100   | -1000        | 0.477632                 | -76.3519       |                              |
| <b>vysušeno v peci</b>   | -1000000 | -10193680           |  | -1000  | -10000       | 0.000618                 |                |                              |

**Další jednotky:** torr (1 J/kg = 7,5 torr) – rtuťový sloupec  
psi (libry na čtvereční palec – angl. míry)

# Tenzometrický potenciál půdní vody – sací tlak

exaktně tenzometr měří součet potenciálů  $\varphi_w + \varphi_a + \varphi_e$

Prakticky se uvažuje že tenzometr měří pouze  $\varphi_w$  -

kapilární potenciál (sací tlak nebo tlakovou výšku)

zanedbává se pneumatická  $\varphi_a$  a zátěžová  $\varphi_e$  složka potenciálu

tenzometr se skládá z porézní keramické nádoby, jejíž stěny umožňují hydraulické spojení mezi půdní vodou a manometrem.

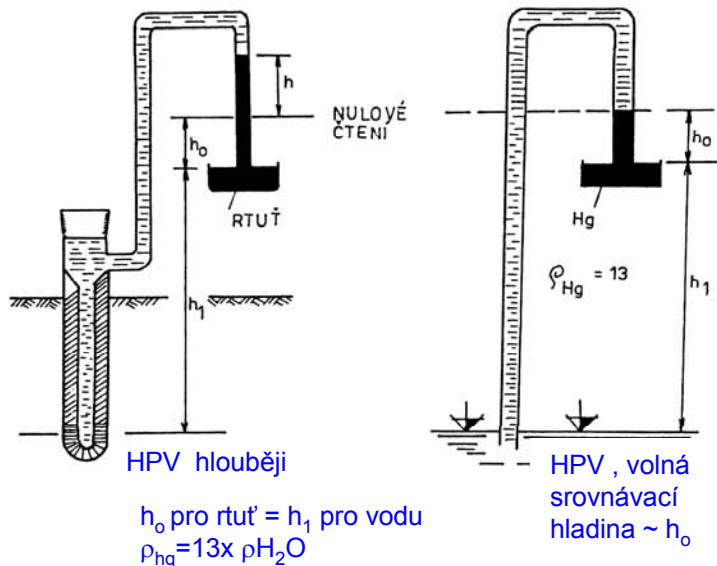
tlaky, vyskytující se v půdní vodě, jsou přenášeny pomocí vodního sloupce a měřeny pomocí manometru (dříve rtuťový, dnes častěji vakuový manometr a především tlaková čidla-transducery)

Nastavení - nulová hodnota sacího tlaku měřeného tenzometrem:

- tak aby HPV v úrovni porézní keramiky = 0

# Potenciál půdní vody – měření

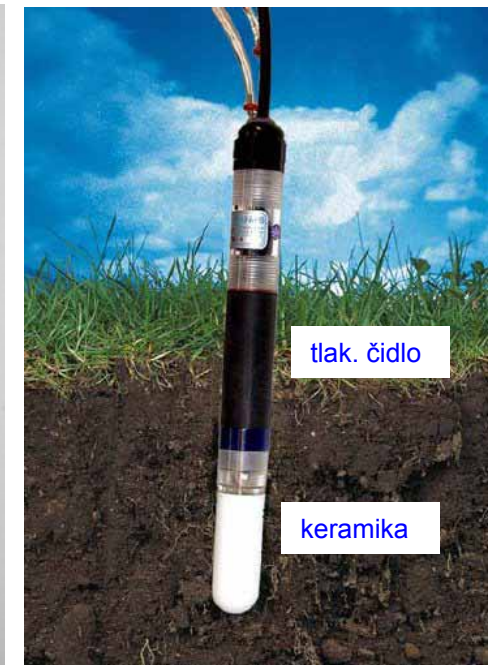
Do půdy je instalována **trubice s porézní keramikou**, s rtuťovým manometrem. Ve volném rameni se ustaví **rovnovážná hladina rtuťi ve výšce  $h + h_0$** . Tlaková výška vody  $h_1$  odpovídající  $h_0$  rtuťi je „**nulové čtení**“ tj. stav při kterém by byla HPV v úrovni keramiky. Tlaková výška vody odpovídající  $h$  rtuťi je **tenzometrický potenciál (sací tlaková výška)** v úrovni keramiky. Sací tlakové výšky lze vztahnout i k jiné výškové úrovni např. k povrchu terénu. Celkový potenciál (v tlak. výškách) je pak  $H = h - z$ .



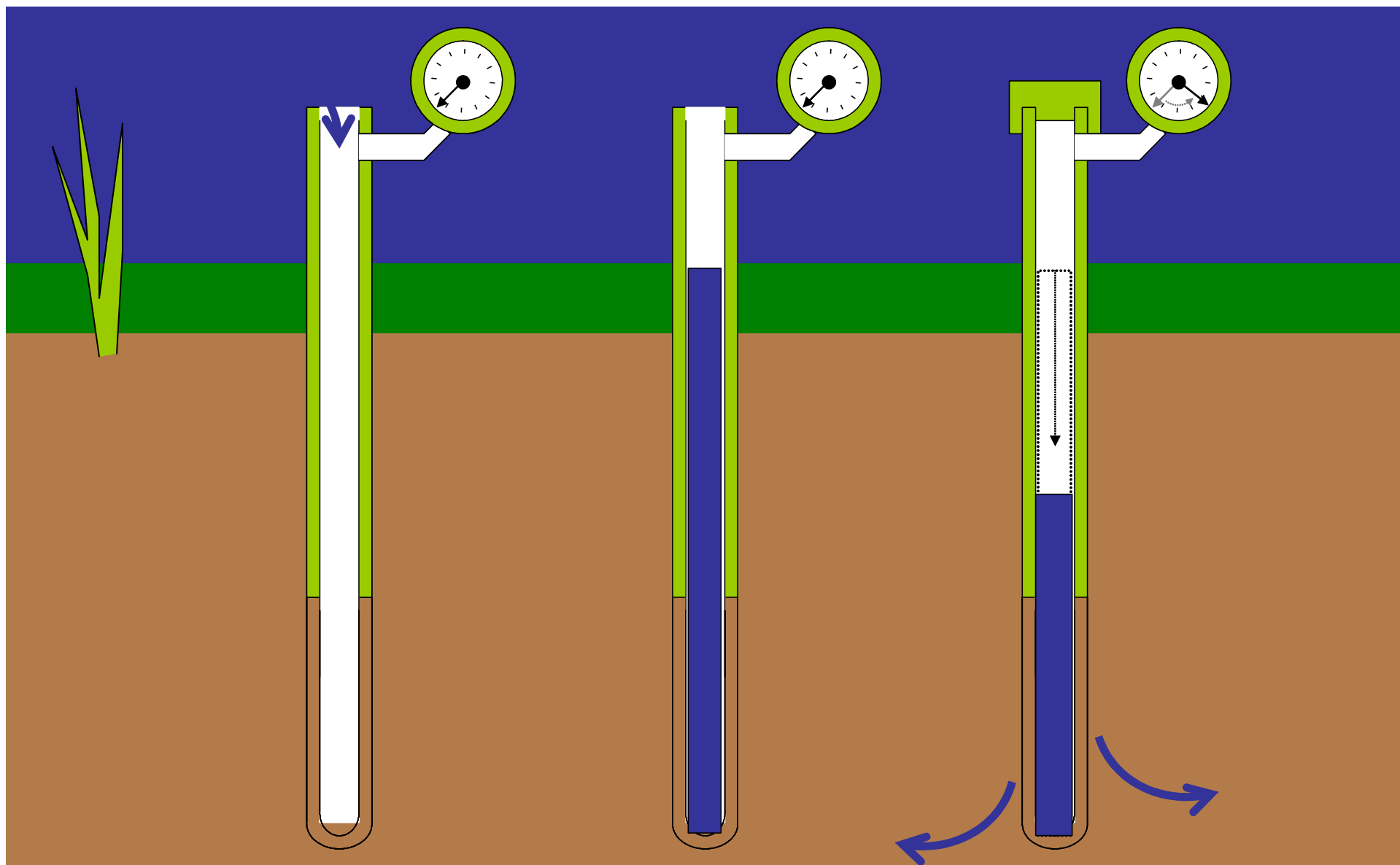
tenzometr s manometrem rtuťovým



s ručičkovým manometrem



s tlakovým čidlem tzv. transducerem

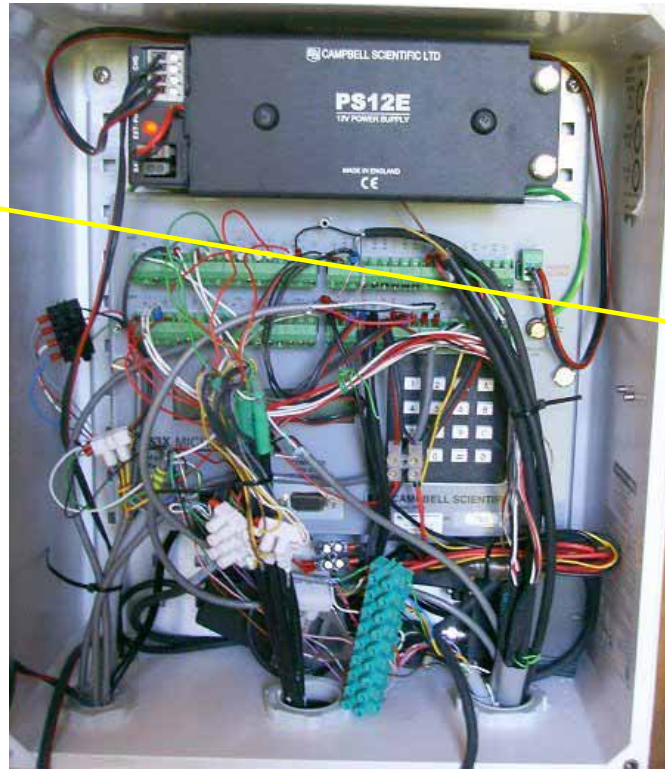


změna tlaku v tenzometru je provedena pomocí změny objemu vody v tenzometru – přetékáním mezi tenzometrem a půdou přes keramickou čepičku na špičce tenzometru

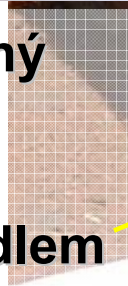


# Měření půdního sacího tlaku

Tenzometr s tlakovým čidlem a napojením na samočinný datový záznamník (datalogger)



Ruční tenzometr opatřený silikonovým těsnícím septem a měřený přenosným tlakovým čidlem s napojením na ruční digitální jednotku



# Retenční čára půdní vlhkosti

vztah půdního kapilární tlakovou výškou (vlhkostního potenciálu  $\phi_w$ ) a objemové vlhkosti půdy  $\theta_v$  (nebo stupně nasycení)

$$\theta_v = \theta(h_v) \text{ nebo } S = S(h_v) \text{ nebo } \theta_e = \theta_e(h_v)$$

**průběh je úzce spjat se zrnitostním a mineralogickým složením, obsahem humusu a výměnných kationtů, s půdní strukturou a objemovou hmotností**

## **Kapilární model pórovitého prostředí**

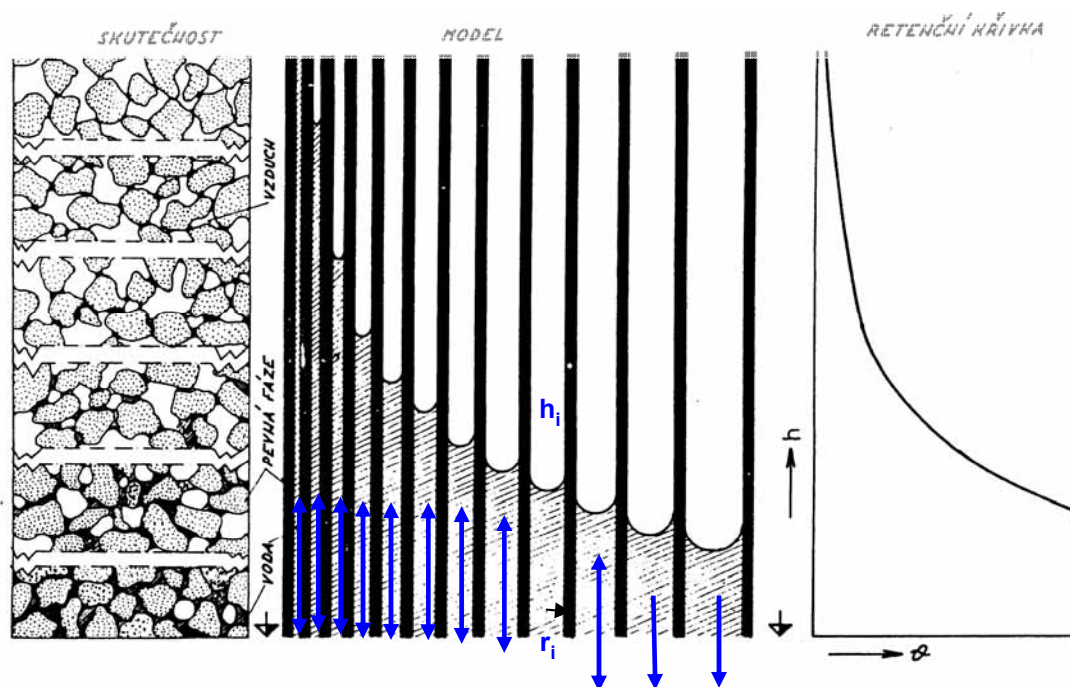
půdní pórová struktura je idealizována jako sada různě širokých kapilár, kde každý kapilární průměr je zastoupen s různou četností

### **Předpoklady kapilárního modelu:**

- pórovité prostředí sestává pouze z kapilárních pórů (~ póry < 1 mm)
- póry tvoří spojitě síť (navzájem dokonale propojeny)
- při zvlhčování se póry plní postupně od nejmenších k největším
- póry se prázdní od největších k nejmenším
- každé vlhkosti odpovídá určité zakřivení kapilárních menisků a tím kapilární tlak

# Retenční čára půdní vlhkosti

aplikujeme-li na sadu kapilár sílu opačného směru než je síla kapilární (udržující v nich vodu) o velikosti odpovídající tlakové výšce  $h_i$  všechny kapiláry o poloměru větším než je odpovídající poloměr  $r_i$  se úplně odvodní, všechny kapiláry o poloměru menším než  $r_i$  zůstanou zaplněny vodou



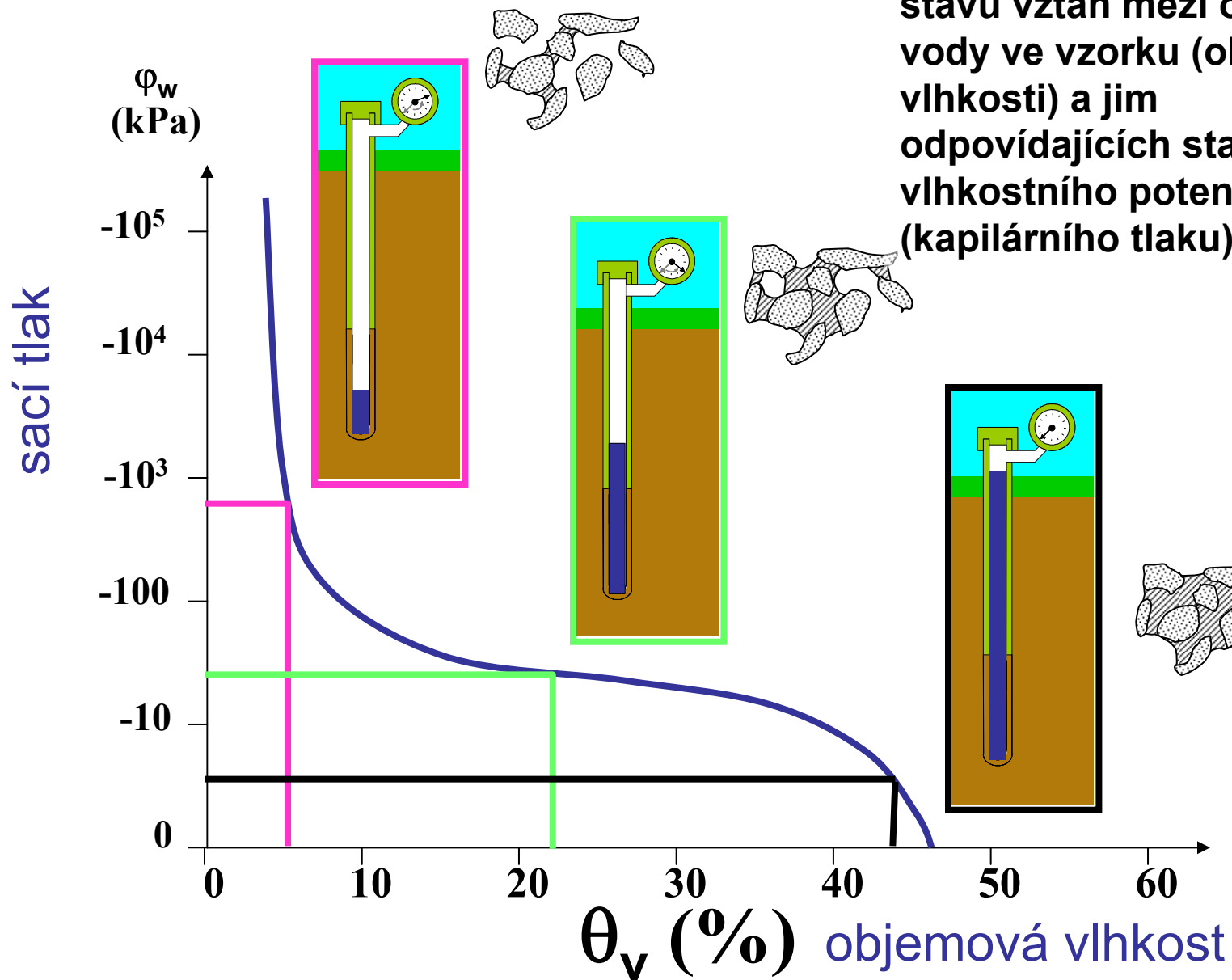
voda v pórech nenasyceného prostředí je poutána kapilárními a adsorpčními silami jejichž intenzita je nepřímo úměrná vlhkosti  
při úplném nasycení vymizí kapilární síly (a vliv adsorpčních sil zanedbatelný)



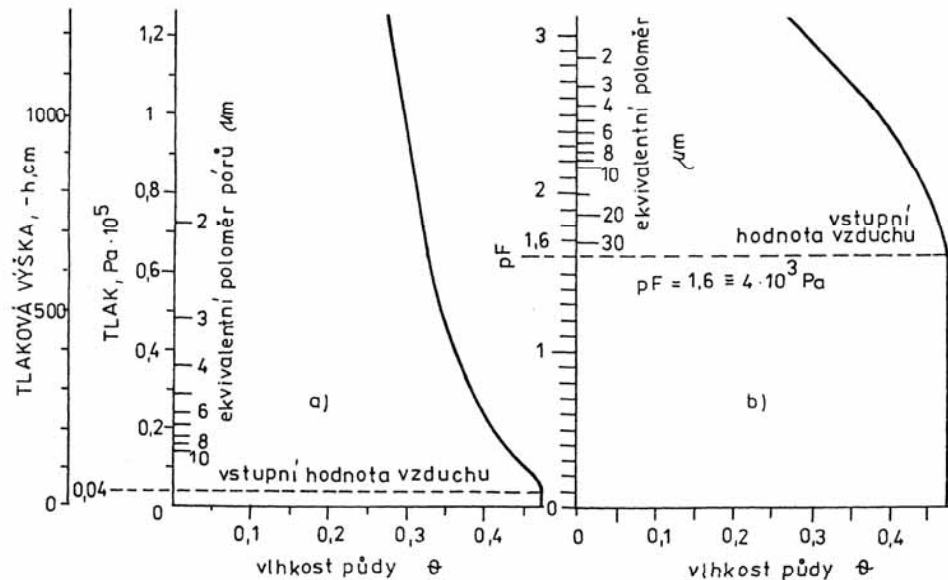
# Retenční čára půdní vlhkosti

převod sacího tlaku na vlhkost

je **série rovnovážných stavů** vztah mezi objemem vody ve vzorku (obj. vlhkosti) a jim odpovídajících stavů vlhlostního potenciálu (kapilárního tlaku)



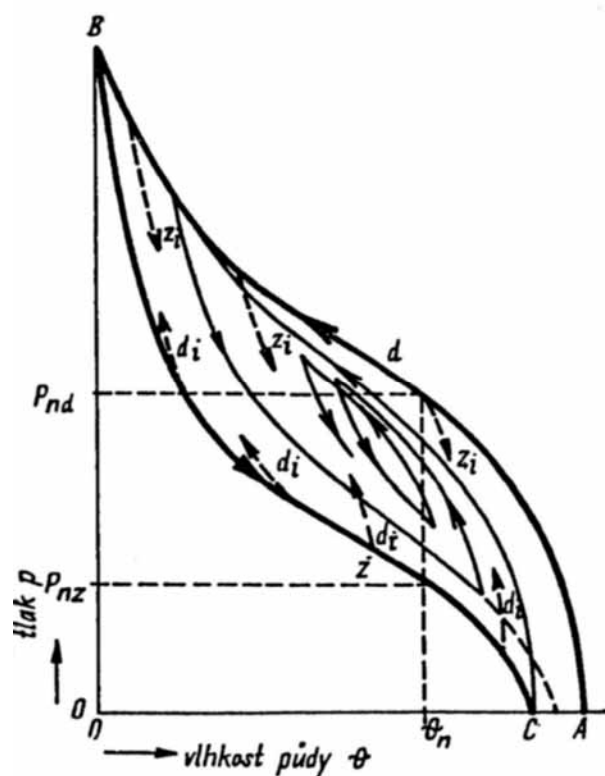
# Retenční čára půdní vlhkosti



Retenční čára má logaritmickou povahu – zobrazuje se v logaritmickém měřítku, dříve též jako pF čára, kde  $pF = \log_{10}(|h[\text{cm}]|)$

- vlhkostní potenciál (tlaková výška), při němž se půda **začne odvodňovat**, a do půdy začne pronikat vzduch, se nazývá **vstupní hodnota vzduchu**, značeno  $h_v$  (en: *air entry value*, nebo *bubbling pressure*)
- vstupní hodnota vzduchu** odpovídá kapilárnímu **tlaku v nejširší kapiláře** (v reálném systému musí být některý pór nejširší)
- je rozdílná pro různé druhy půd, její absolutní hodnota roste s klesající velikostí pórů (prakticky i zrn a půdních agregátů): šterky  $h_v \sim 0$  cm; písek-prach:  $h_v \sim$  jednotkové cm; jíly m – 10x m
- v oblasti  $h=0$  až  $h_v$  (v praxi těsně nad hladinou podz. vody) je půda plně nasycena, přestože kapilární tlak je nenulový, tzv. kapilární lem, tráseň

# Retenční čára půdní vlhkosti - hystereze



průběh retenční čáry je pro odvodňování původně vlhké půdy je **odlišný** od průběhu čáry pro zvlhčování ze suššího stavu průběh retenční čáry je **závislý na cestě**, kterou jsme dosáhli rovnovážného stavu vlhkosti

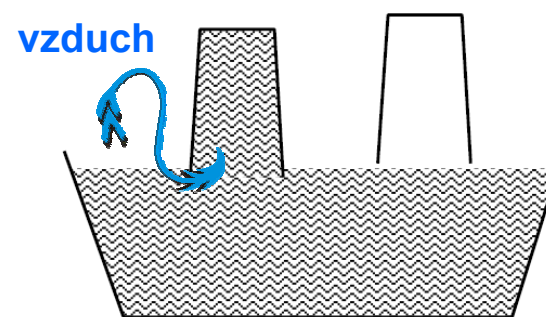
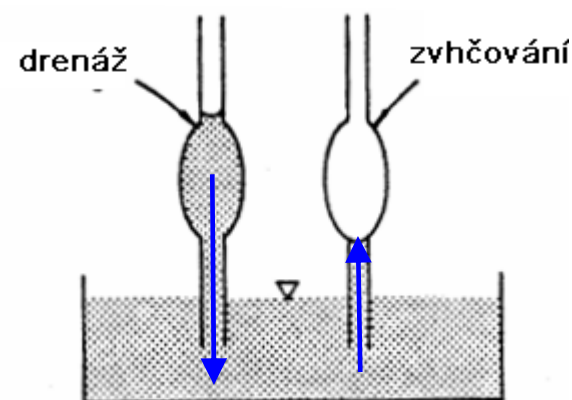
z plného nasycení (nasycená objemová vlhkost) (bod A) je vzorek drénován po čáře **d** do bodu B s téměř nulovou vlhkostí – **hlavní drenážní větev** z bodu B je vzorek sycen po čáře **z** do bodu C – **hlavní zvlhčovací větev**

hlavní větve tvoří obalový prostor – z libovolného bodu při drenáži může nastat zvlhčování (a naopak) – tzv. přechodové větve retenční čáry – tzn. přírodní procesy stejné vlhkosti pak odpovídá rozmezí hodnot vlhkovního potenciálu, (ev. jednomu potenciálu rozmezí hodnot vlhkostí)

# Retenční čára půdní vlhkosti - hystereze

důvodem je několik procesů

- uzavírání vzduchu ve slepých pórech (v dostatečně dlouhém čase se ale vzduch ve vodě rozpustí)
- proměnlivost průřezu pórů (systém kapilár není zdaleka ideální) – “ink bottle effect” – kapilára o proměnlivém poloměru – drenáž se odehrává podle nejmenšího průřezu, zvlhčování podle nejširšího
- různá hodnota smáčecího úhlu při vstupu do suchého prostředí a ústupu z vlhkého prostředí (jen při vyšších rychlostech proudění)
- dostupnost pórové sítě: dva kelímky širokého průměru – bez kapilár. sil - pór se oddrúnuje jen tehdy, když je umožněno vzduchu vstoupit do něj jinou cestou, která je spojitá a zaplněná vzduchem



# Retenční čára půdní vlhkosti – měření

tlaková výška půdní vody  $h$  je měřitelná při zachování hydraulické spojitosti mezi půdou a referenční (tj. srovnávací) hladinou volné vody – kontaktem je pórezní destička či kaolínová vrstva (nebobtnající jííl, vysoká vstupní hodnota vzduchu)

tlaková výška  $h$  působící na půdní vodu je svislá vzdálenost mezi hladinou volné vody a středem měřené vrstvičky půdy

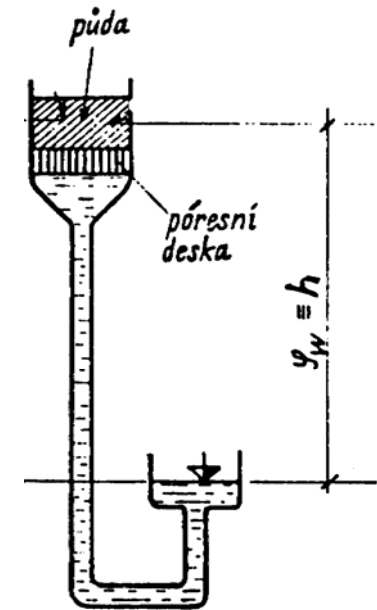
## princip podtlakového přístroje

když se zvětšuje  $|h|$  (tj. snižuje se nádoba s volnou hladinou), zemina se stále více odvodňuje, její vlhkost se snižuje

pokud je po delší dobu  $h = 0$ , zaplní se všechny póry vodou, vlhkost bude maximální, výška  $h$  odpovídá vlhkostnímu potenciálu  $\phi_w$ .

zároveň s měřením  $h$ , měříme vlhkost půdy (obvykle gravimetricky) – váženým a následným vysušením

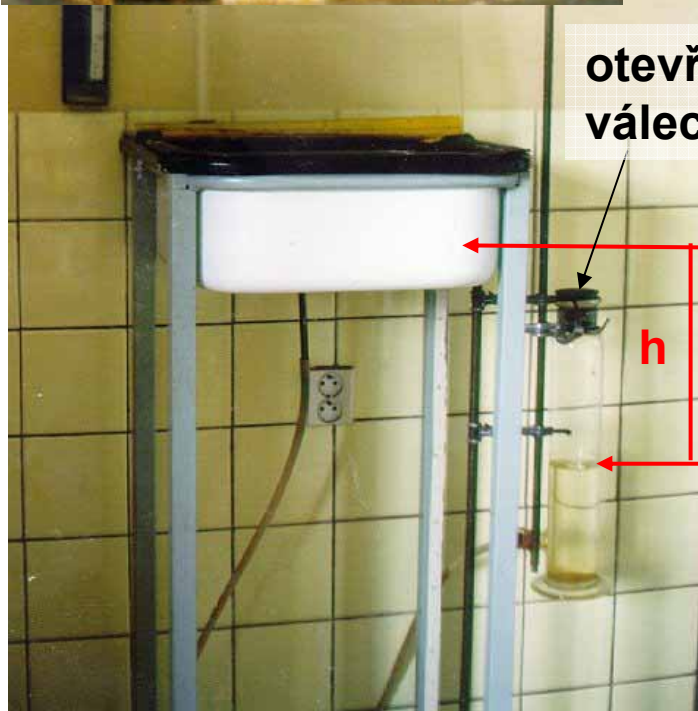
tento proces se opakuje pro několik hodnot  $h$  (zvětšováním  $|h|$ ) po dostatečnou dobu pro každé  $h$ , tak aby byla dosažena rovnováha mezi půdní vlhkostí a kapilárním tlakem – **drenážní větev**



# Meření drenážní větve retenční čáry - pískový (jílový) tank



pro tlaky do 0-100 (max.200) cm vodního sloupce (v.s.), omezeno (jen) světlou výškou místnosti, teoreticky funkční do cca 10 m v.s.



otevřený válec

volná hladina

rozdílem hladin  $h$  ve spojitých nádobách tanku a válce s vodou je vyvoláno sání-podtlak, voda se drénuje ze vzorku



uzavřený válec

volný výtok



# Retenční čára půdní vlhkosti – měření

v rozmezí sacích tlaků  $10^4$  až  $1,5 \cdot 10^6$  Pa a i více se používá **přetlakový aparát**

místo podtlaku pod porézní destičkou se používá přetlaku vzduchu nad vzorkem a nad porézní destičkou – daleko **snadnější** než vytvořit podtlak je **vyvolat přetlak**

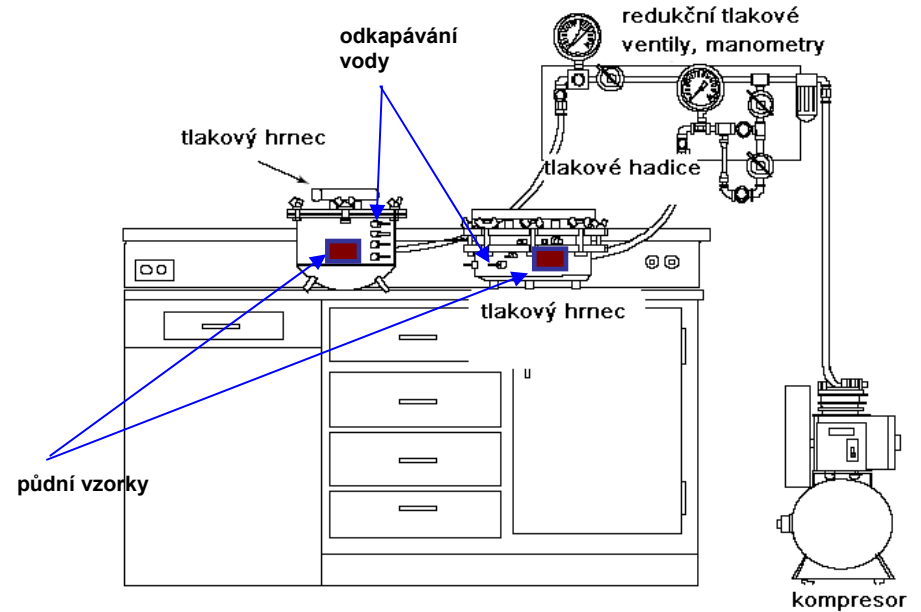
voda je z půdy odstraněna vytlačáním a výsledný efekt je stejný jako při stejně velkém podtlaku (sání). Důležitý je pouze rozdíl tlaku vzduchu a kapilárního tlaku.

měřicí aparatura uzpůsobena vysokým přetlakům a dlouhé době trvání experimentu. Masivní konstrukce tlakových nádob, těžké díly vysoce kvalitní kompresory.

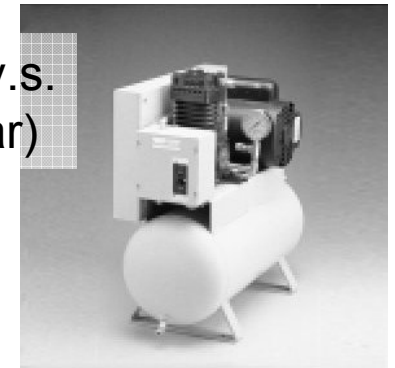
**předpoklad dokonalého hydraulického** spojení porézní destičky a půdy. Porézní destička musí mít vysokou vstupní hodnotu vzduchu tj. neztrácí vodu při rozsahu pracovních přetlaků do ní nesmí pronikat vzduch

*pro velmi vysoké hodnoty sacích tlaků proto se užívá rovnovážného vztahu mezi vlhkostí půdy a relativní vlhkostí vzduchu – stavová rovnice ideálního plynu*

# Meření drenážní větve retenční čáry - přetlakový aparát



pro tlaky 100-15000 cm v.s.  
(0.01-1.5 MPa, 0.1-15 Bar)



pro vyloučení vody ze vzorku  
je identické aplikovat jak přetlak v  
uzavřené komoře, tak jako podtlak



# Odběry neporušených vzorků pro měření retenční čáry



**Odběrák s padacím  
kladivem, demontovatelným  
břitem a kroužky na  
zhuťnou zeminu**

# Odběry neporušených vzorků pro měření retenční čáry



**Standardní odběr Kopeckého válečků – 100 cm<sup>3</sup>**

**hlava – zatlukání před dřevěnou desku kladivem**



# Postup přípravy vzorků na měření retenční čáry



**očištění vzorků,**

**zaříznutí na rozměry  
válečku**

**dno vzorku opatřeno  
filtračním papírem  
nebo silonovou  
membránou**

**nasycení ve vodní  
lázni**

**-> měření v přístrojích**

# Retenční čára půdní vlhkosti - vyhodnocení

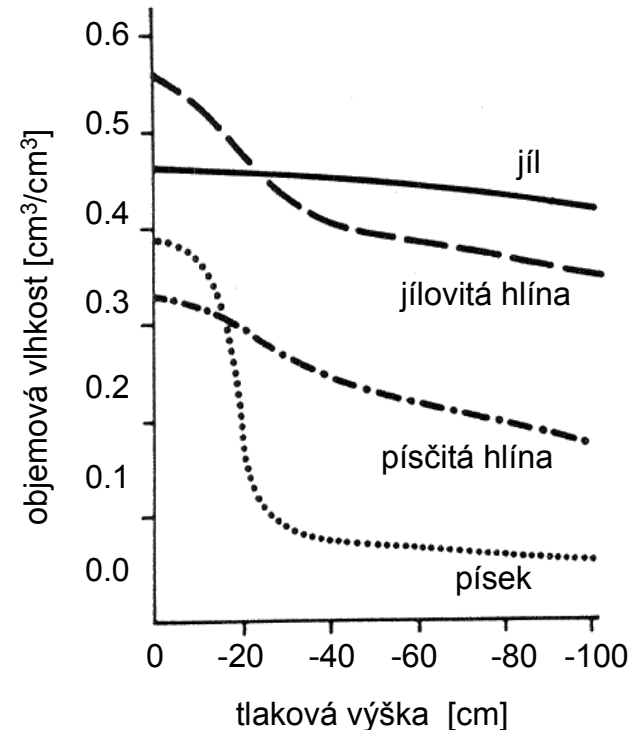
změřením rovnovážných stavů získáme sadu hmotností vzorku (po skončení všech měření je vzorek vysušen v peci při 105 °C - zpětně určena vlhkost gravimetrická vlhkost)

sada bodů je spojena do čáry a vynesena

proložení měřených funkční závislosti s nejmenší možnou odchylkou (metoda nejmenších čtverců)

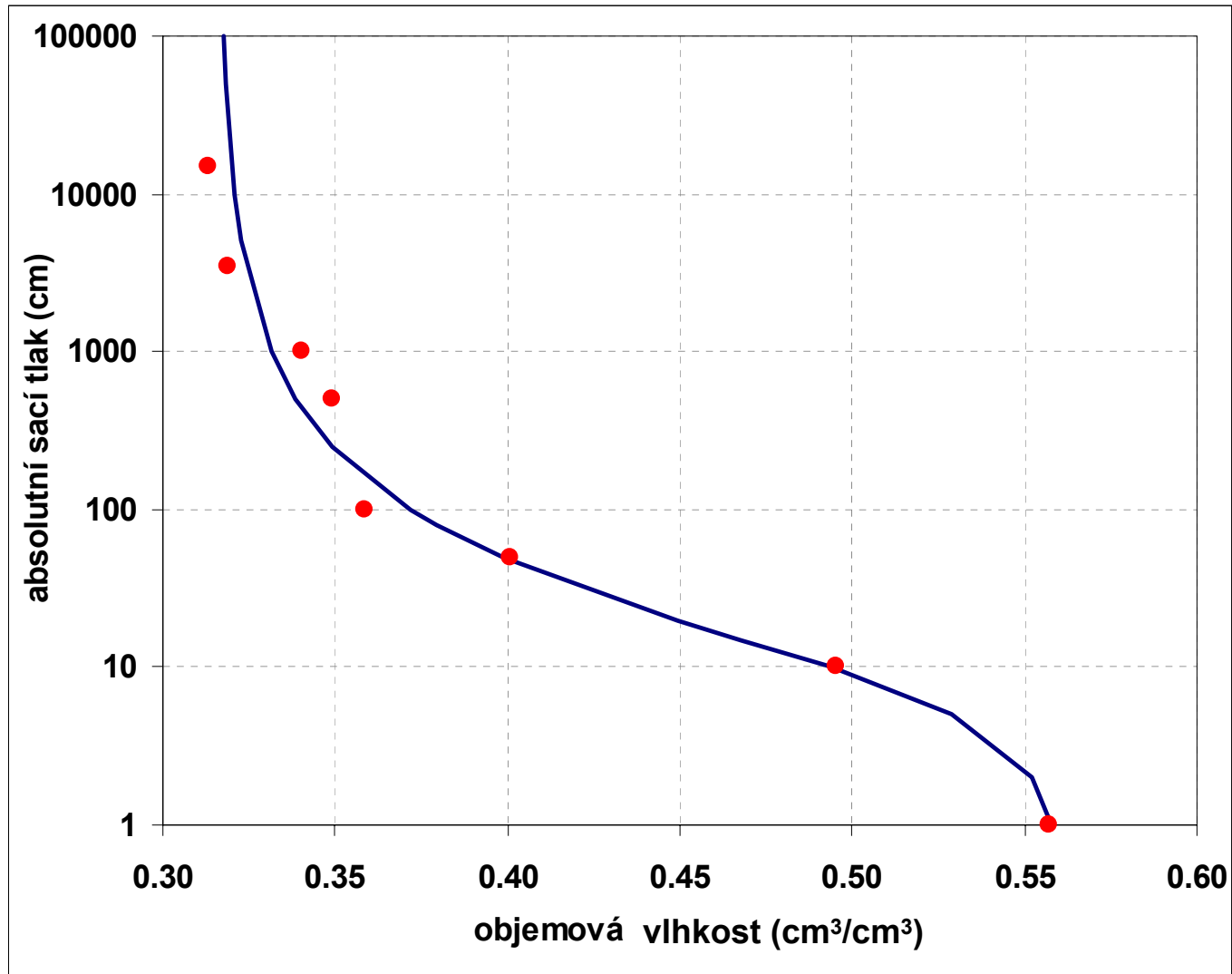
funkce je vhodná pro matematické modelování, lze určit libovolný bod kapilárního tlaku a odpovídající vlhkosti – ev. naopak

funkční závislost je retenční **křivkou**

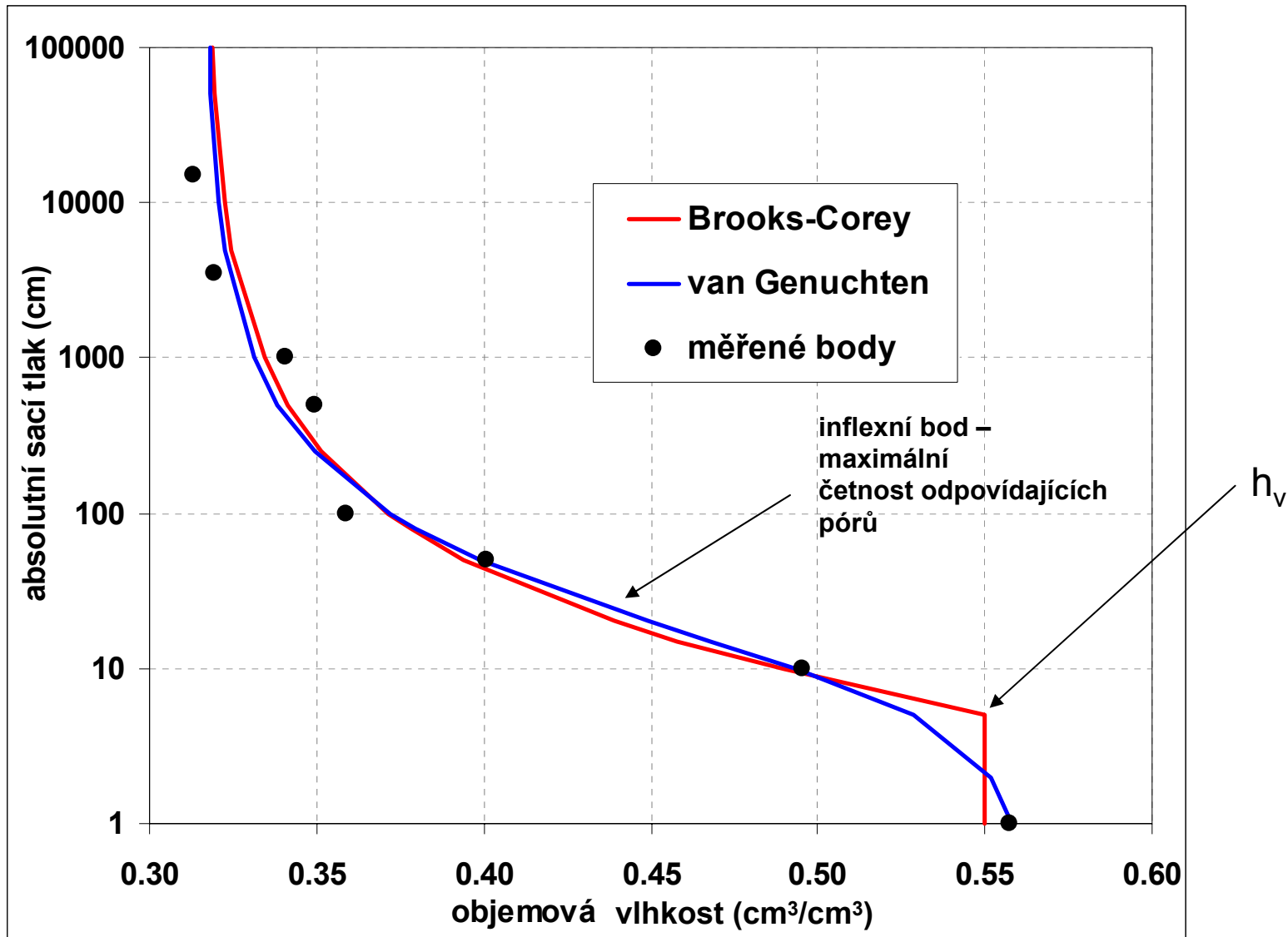


# Retenční křivka

vzniká proložení měřených bodů funkčním vztahem



# Retenční křivka - modely



# Retenční křivka - modely

Retenční čáry půdní vlhkosti jsou empiricky popisovány různými rovnicemi jimiž se snažíme nejlépe vystihnout závislost  $\theta(h)$ .

$$\theta_E = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$\theta_E$  je efektivní vlhkost,  
 $\theta$  je vlhkost  
 $\theta_s$  je nasycená vlhkost,  
 $\theta_r$  je reziduální vlhkost,

## Brooks-Corey (1964)

pro  $|h| > |h_v|$  platí

$$\theta_E = \left( \frac{h_v}{h} \right)^\lambda$$

pro  $|h| < |h_v|$  platí  $\theta_E = \theta_s$

$h$  [m] je kapilární tlak  
 $h_v$  [m] vstupní hodnota vzduchu  
 $\lambda$  je empirický koeficient

## van Genuchten (1976)

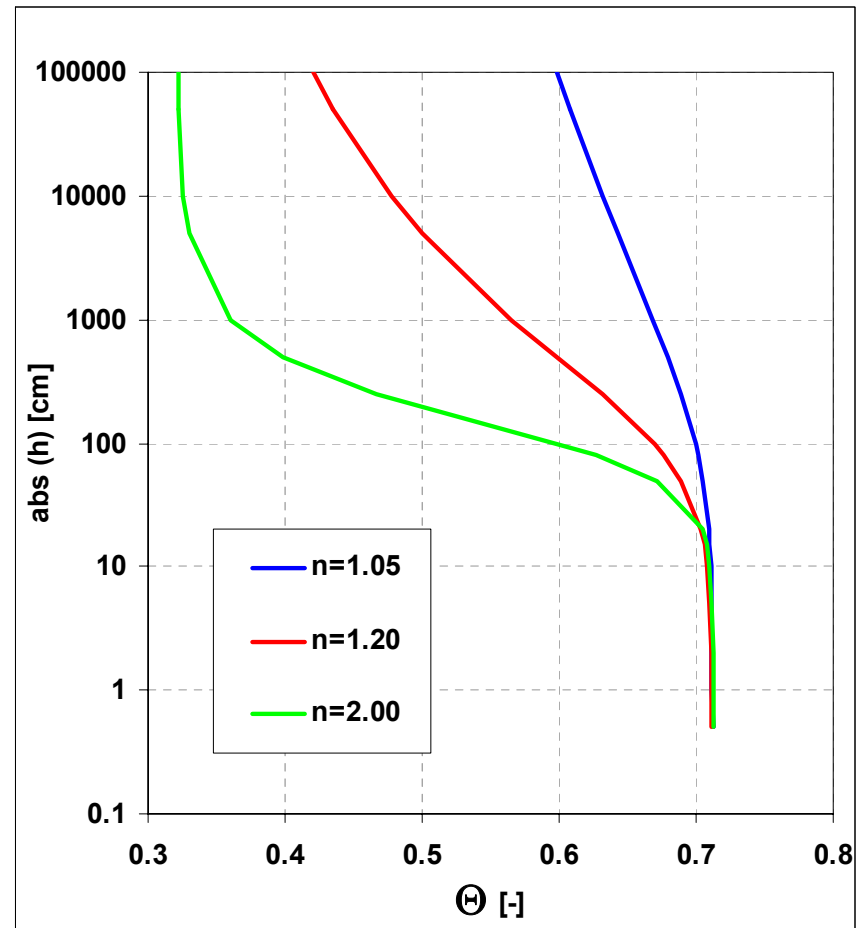
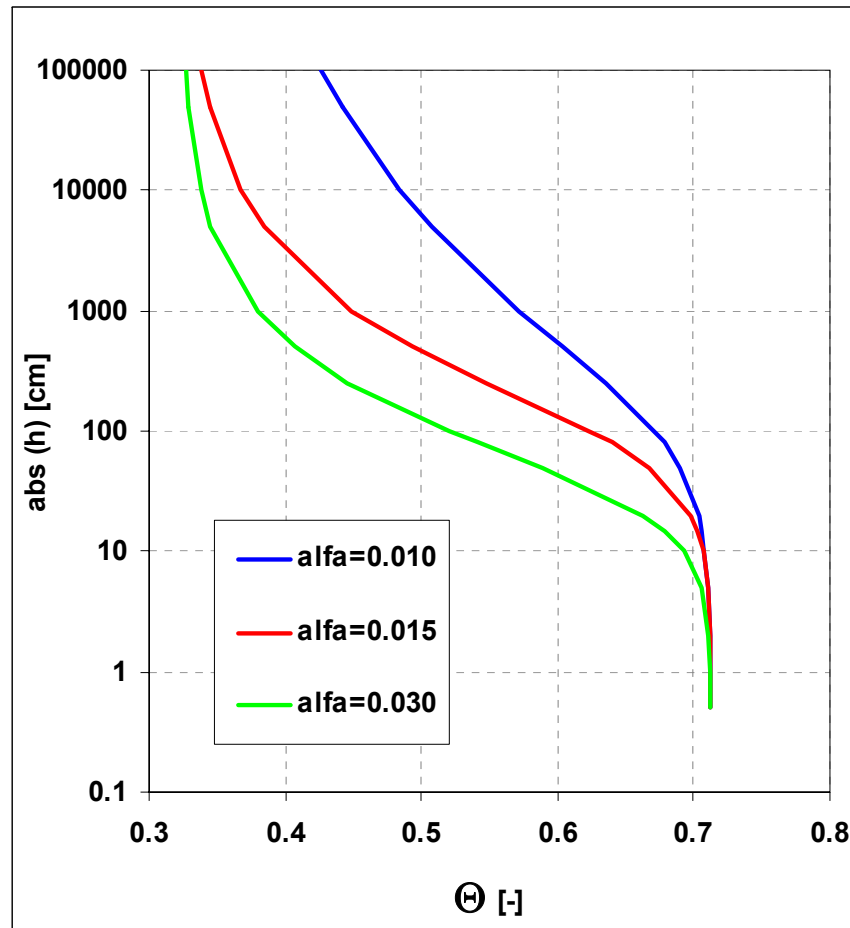
$$\theta_E = \frac{1}{\left( 1 + \left( \alpha |h|^n \right) \right)^m}$$

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

$h$  [m] je kapilární tlak,  
 $\alpha$  [m<sup>-1</sup>],  $n$  a  $m$  jsou optimalizační parametry

# Proložení retenční křivkou

flexibilita van Genuchtenova vzorce



van Genuchtenův vztah je vhodný pro matematické modelování, retenční křivka je hladká funkce – derivovatelná (na rozdíl od Brook-Corey) fyzikální význam vstupní hodnoty vzduchu je mírně znevýrazněn

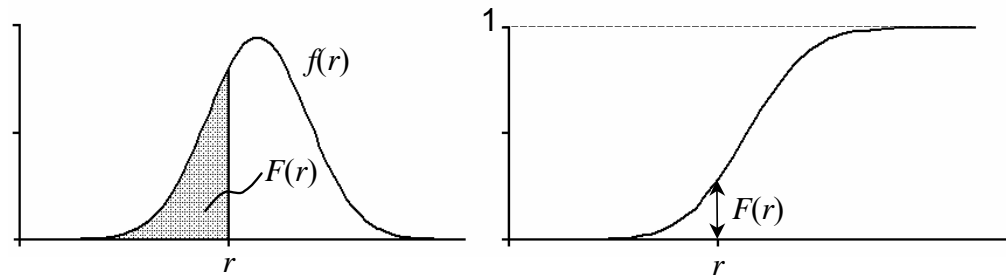


# Retenční křivka a statistické rozdělení pórů

Statistické rozdělení velikosti pórů - distribuční funkce  $F(r)$ :

$$F(r) = \int_0^r f(r) dr$$

kde  $f(r)$  frekvenční funkce relativního zastoupení pórů různých poloměrů



Platí:

$$F(r) = S(r)$$

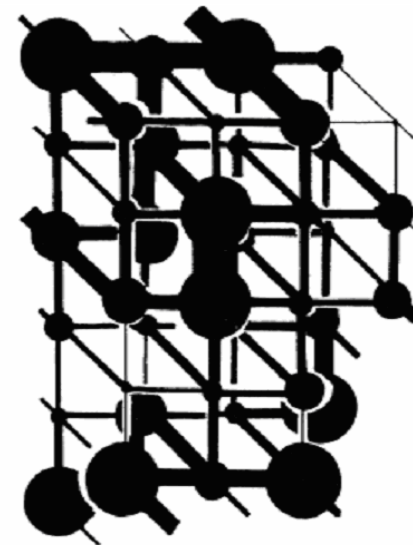
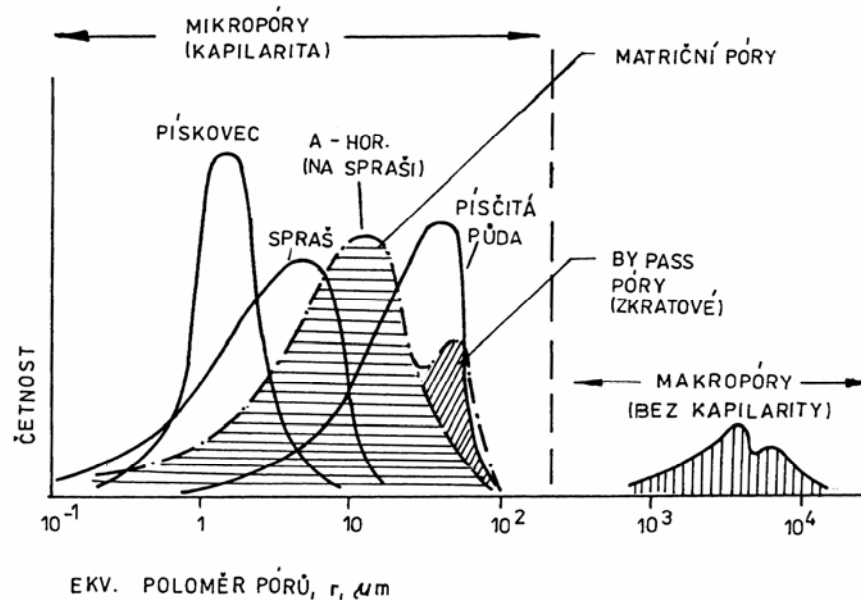
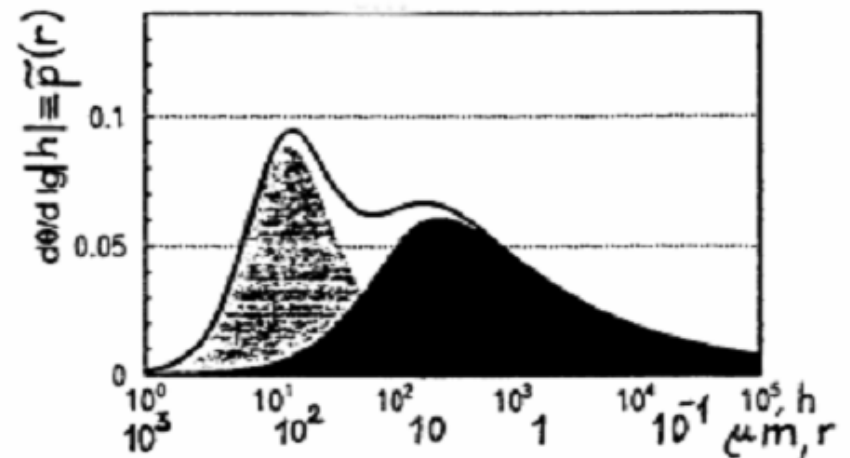
kde  $r$  je poloměr pórů (póry s poloměry  $< r$  zaplněné vodou)

Složením  $S(r)$  a  $h_c(r)$  - retenční křivka:

$$\left. \begin{array}{l} S = S(r) \\ h_c = h_c(r) \end{array} \right\} S = S(h_c)$$

# Retenční křivka a rozdělení pórů

jestliže jsou na měření čáře 3 inflexní body, obdržíme derivační čáru o dvou vrcholech, světlejší část platí pro hrubší meziagregátové póry, tmavší část pro vnitroagregátové – matriční póry

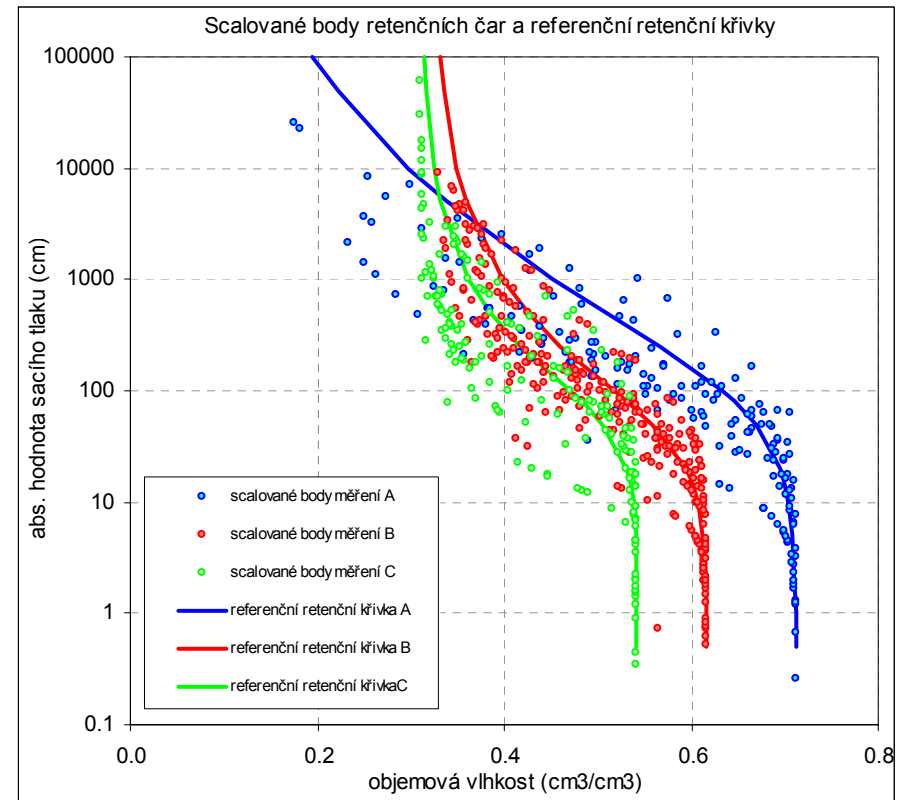
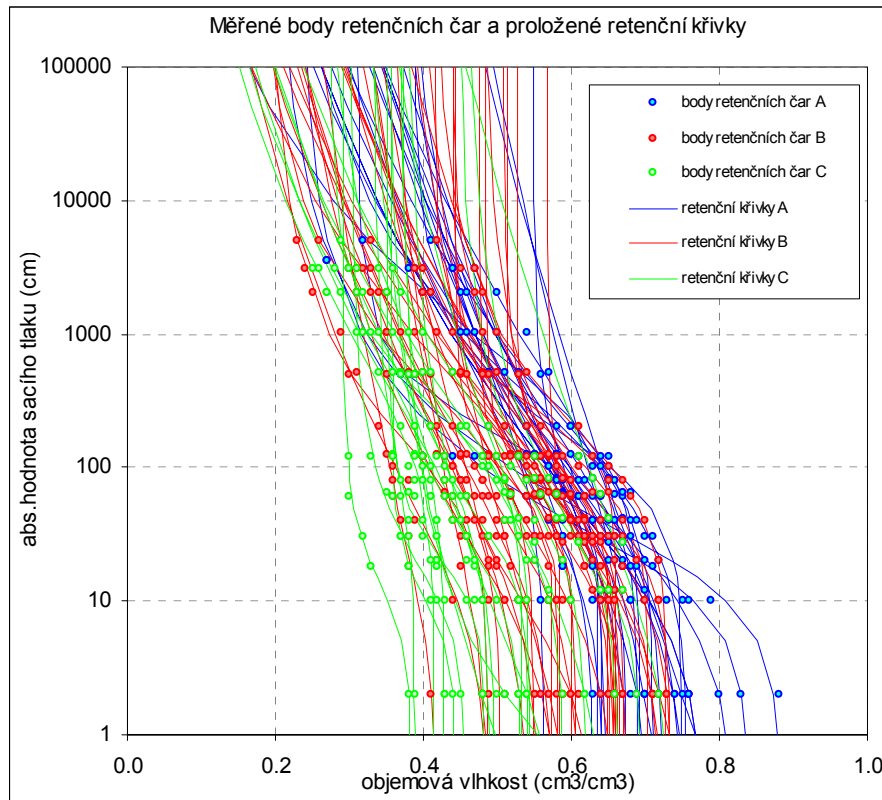


Pórové systémy v púdách a horninách podle retenčních čar

příklad 3D interpretace pórové struktury

# Retenční křivka - scaling

kurz Inženýrské hydroopedologie



“chytré průměrování”

# Použitá literatura

Kutílek, M., Kuráž, V., Císlarová, M. Hydropedologie, skriptum ČVUT 1994

Císlarová, M. Inženýrská hydropedologie, skriptum ČVUT 2001

Císlarová M., Vogel T. Transportní procesy, skriptum ČVUT

Jury, W.A. and R. Horton, Soil Physics. Sixth Edition, 2004.

*Přednášky kurzu Hydropedologie vznikly v autorském kolektivu:  
Ing. Martin Šanda, PhD a Ing. Michal Sněhota, PhD  
Kat. hydromeliorací a krajinného inženýrství, F. stavební ČVUT*