

# Hydropedologie

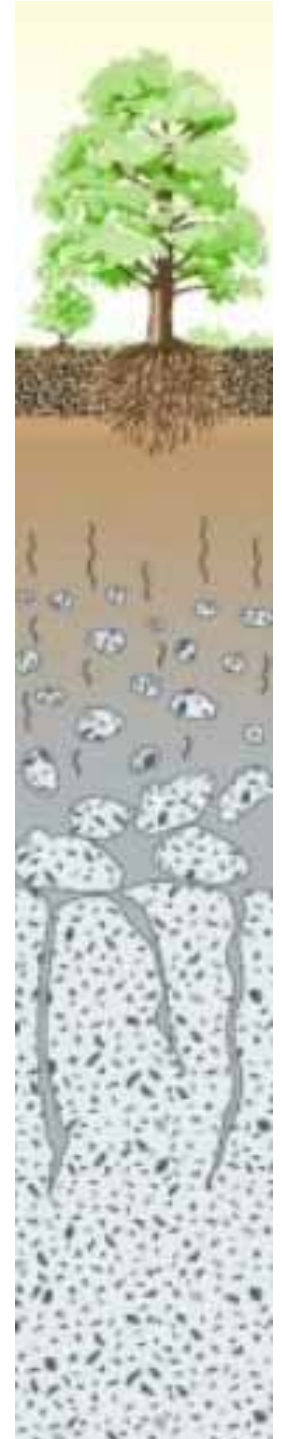
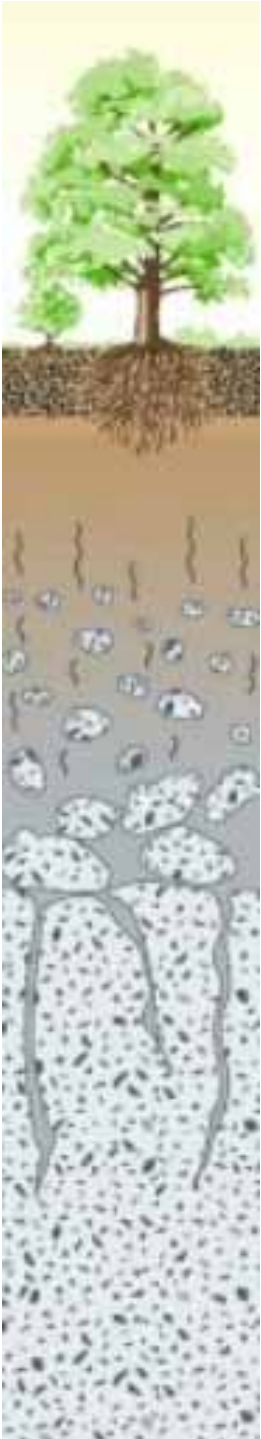
## *Přednáška 5*

### **Charakteristiky pórovitého prostředí**

Makroskopické charakteristiky pórovitého prostředí, REV, voda a vzduch v pórovitém prostředí, vlhkost

### **Kapilarita**

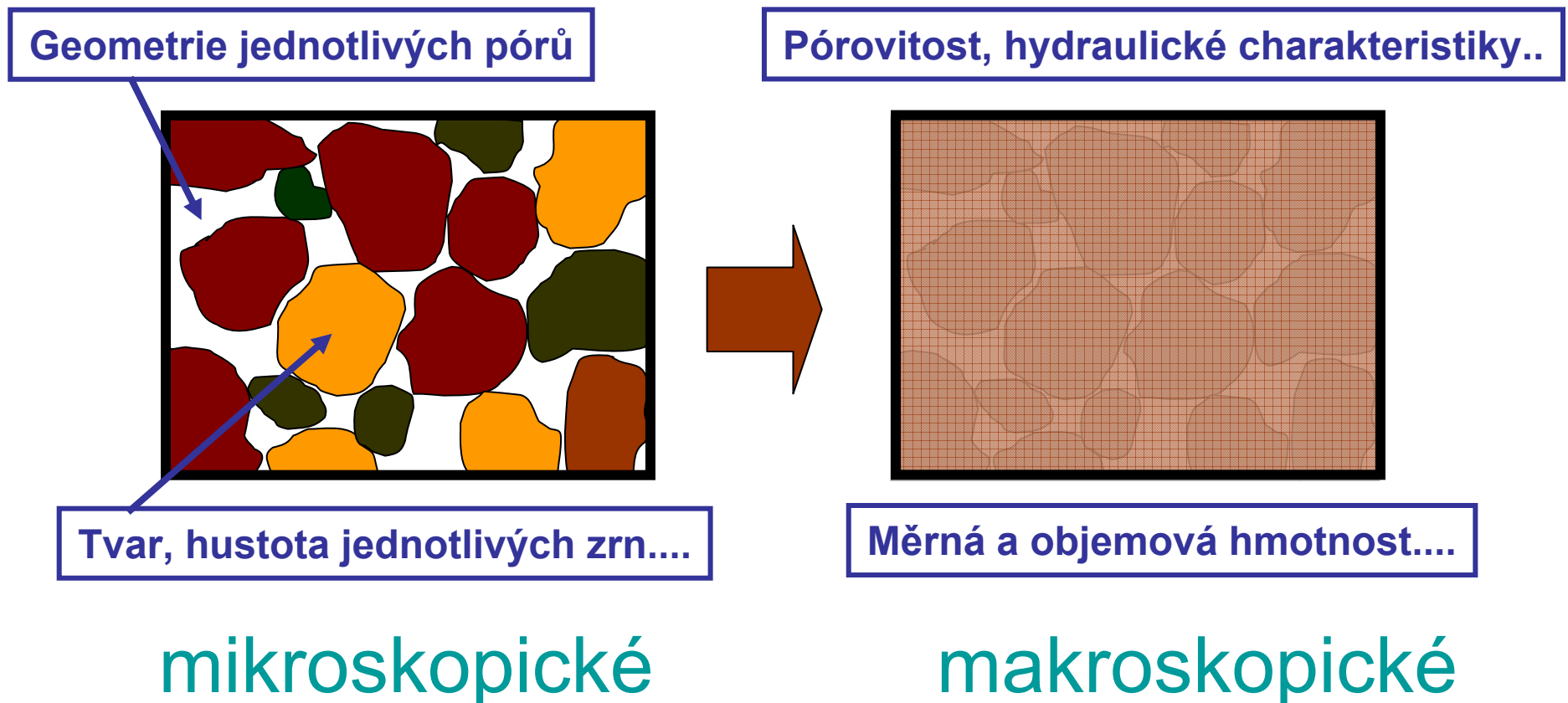
Povrchové napětí, smáčecí úhel, kapilarita na úrovni jedné kapiláry



# Makroskopický přístup

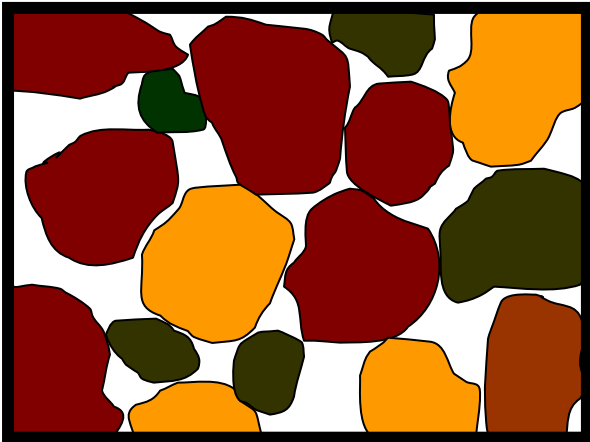
Proudění vody, transport tepla, transport látek v půdě = pórovitém prostředí nejsme schopni popsat na úrovni jednotlivých pórů.

Pro řešení takových úloh používáme **makroskopický přístup**



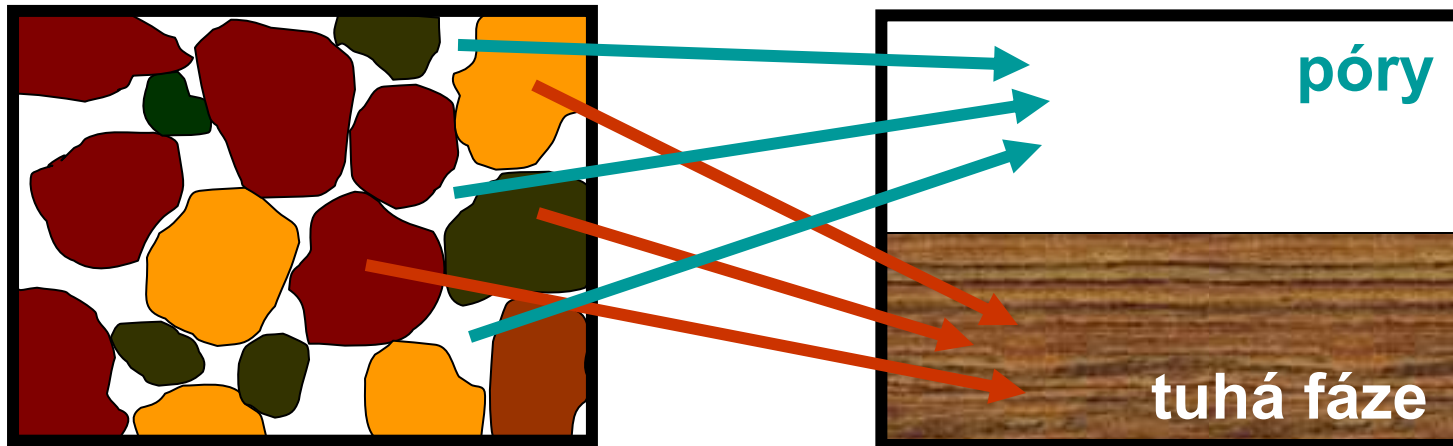
# Objemová a měrná hmotnost

Makroskopické charakteristiky **tuhé fáze**



# Objemová a měrná hmotnost

Makroskopické charakteristiky **tuhé fáze**



# Objemová a měrná hmotnost

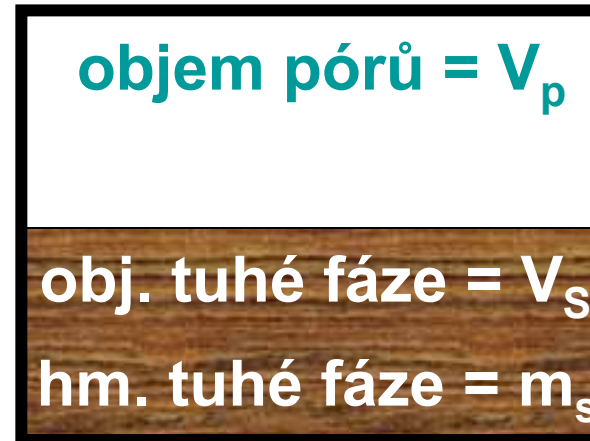
## Makroskopické charakteristiky **tuhé fáze**

Objemová hmotnost  
(EN: *bulk density*)

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad [M/L^3]$$

Měrná hmotnost  
(EN: *particle density*)

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad [M/L^3]$$

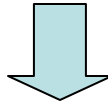


$$V = V_s + V_p$$

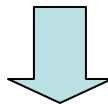
Celkový objem =  $V$

# Měření objemové hmotnosti $\rho_d$

Neporušené vzorky (např. do Kopeckého válečků)



Vysušení při 105° C (60 ° C pro půdy s vysokých obsahem organické hmoty)



Zjištění hmotnosti vysušené půdy  $m_s$ . Výpočet  $\rho_d$  z  $m_s$  a známého objemu válečku  $V$ . Jednotky obvykle g/cm<sup>3</sup>.

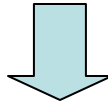
---

## Typické hodnoty $\rho_d$

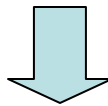
- většina půd 1.2 – 1.8 g/cm<sup>3</sup>.
- půdy s vysokým podílem org. hm. 0.5 g/cm<sup>3</sup>.
- horní limit 2.65 g/cm<sup>3</sup>.

# Měření měrné hmotnosti $\rho_s$

Porušené vzorky



Vysušení při 105° C (60 ° C pro půdy s vysokým obsahem organické hmoty)



Zjištění hmotnosti vysušené půdy  $m_s$  vážením. Zjištění objemu tuhé fáze pyknometrem.

---

**Typické hodnoty  $\rho_s$**

- většina *minerálů* 2.65 g/cm<sup>3</sup>.

# Měření měrné hmotnosti $\rho_s$ - pyknometr

“princip Archimédova zákona” – vytlačení vody zeminou

- porušený vzorek vysušíme a určíme jeho hmotnost  $m_s$
- ze vzorku je vařením odstraněn vzduch – suspenze zeminy ve vodě
- zvážíme pyknometr naplněný destilovanou vodou (nesmí v něm být vzduch) –  $m_w$
- do stejného, ale prázdného pyknometru vlijeme vodní suspenzi vzorku zeminy a pyknometr doplníme destilovanou vodou a zvážíme -  $m_z$

rozdíl hmotnosti  $m_r$  pyknometru s vodou ( $m_w$ ) a zeminou suspenzí ( $m_z$ ) odpovídá objemu vzorku  $V_z$  (vytláčíme vodu o  $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ )

$$V_z \sim m_r = m_z - m_w$$

měrná hmotnost je pak poměr suchého vzorku zeminy a “vytlačené” objemu vody z pyknometru ( $V_z \sim m_r$ )

$$\rho_s = m_s / V_z$$





# Charakteristiky pórů

Pórovitost  
(EN: porosity)

$$p = \frac{V_p}{V} \quad [-]$$

Vztah mezi  $p$ ,  $\rho_d$ ,  $\rho_s$

$$p = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

Číslo pórovitosti

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{p \cdot V}{p \cdot (1 - p)} = \frac{p}{(1 - p)} \quad [-]$$

objem pórů =  $V_p$

obj. tuhé fáze =  $V_s$

hm. tuhé fáze =  $m_s$

Celkový objem =  $V$

$$V = V_s + V_p$$

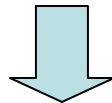
# Měření pórovitosti

- Výpočtem z měřených  $\rho_s$  a  $\rho_d$
- 

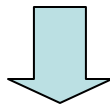
nebo

---

- Neporušený vzorek **dokonale** nasytit vodou Zjištění hmotnosti vody a půdy ( $m_{wsat} + m_s$ ) *vážením*



Vysušení při 105° C (65 ° C pro půdy s vysokým obsahem organické hmoty)



Zjištění hmotnosti vysušené půdy  $m_s$  *vážením*. Výpočet objemu vody = objemu plně nasycených pórů  $V_p = m_{wsat} / \rho_w$

---

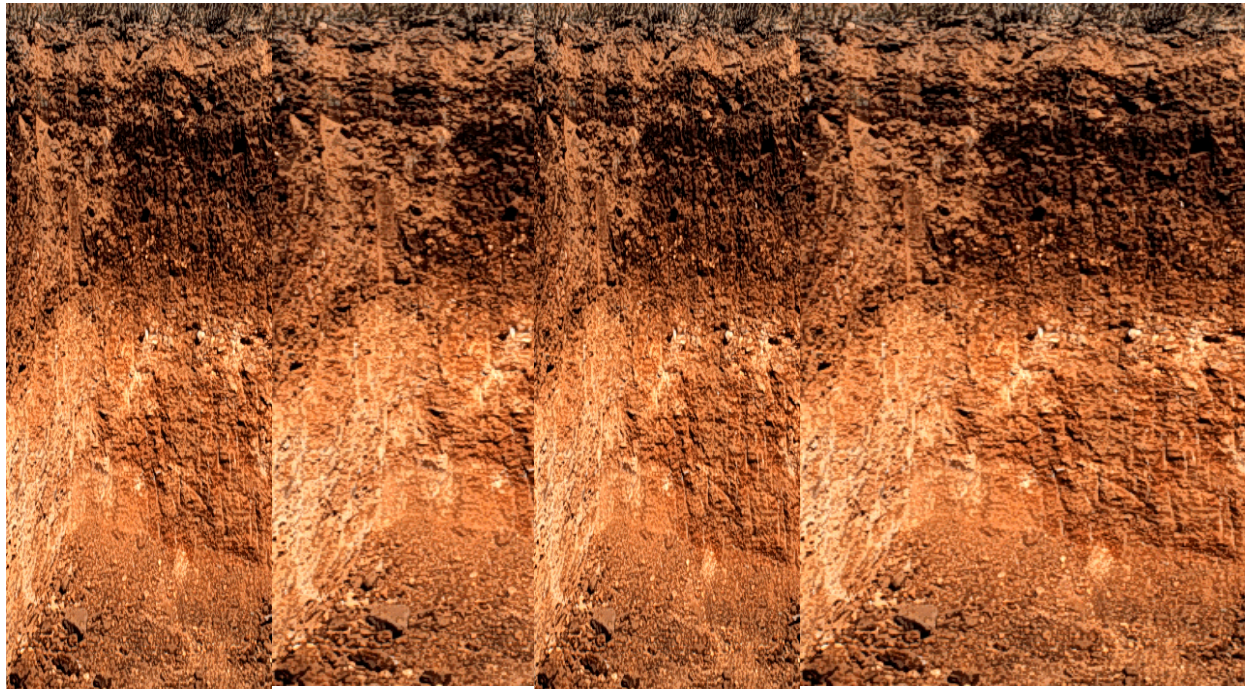
**Hodnoty p:** teoreticky  $0 < p < 1$

**minerální půdy 0.26 – 0.8**

**organogenní půdy až 0.9**

---

# Kontrolní otázka: pokud dojde ke zhutnění půdy např. pojezdem zemědělské techniky



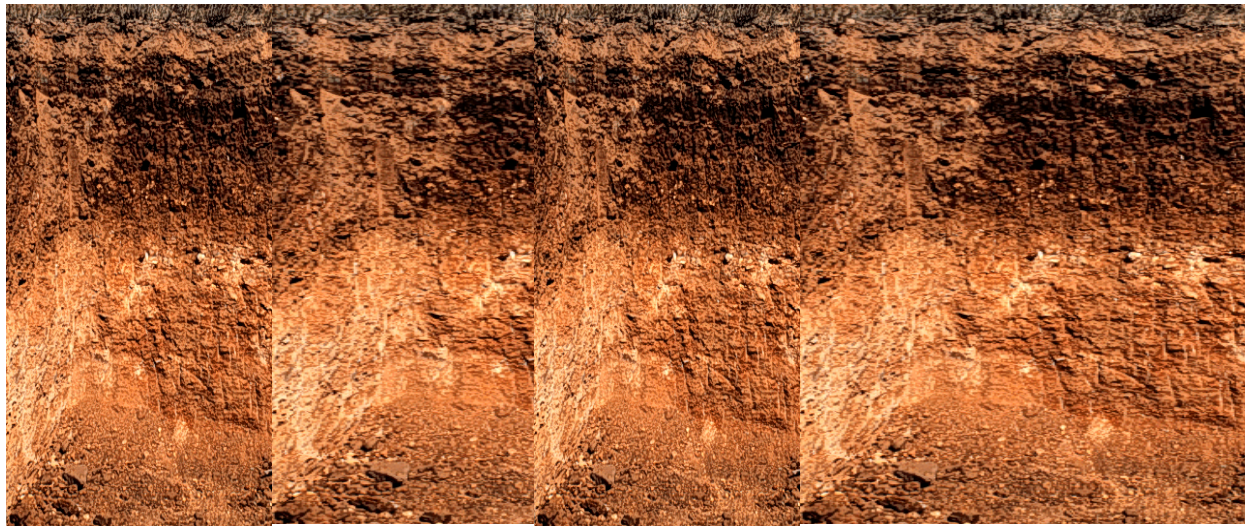
# Kontrolní otázka: pokud dojde ke zhutnění půdy např. pojezdem zemědělské techniky

Dojde ke změně  $\rho_s$ ?

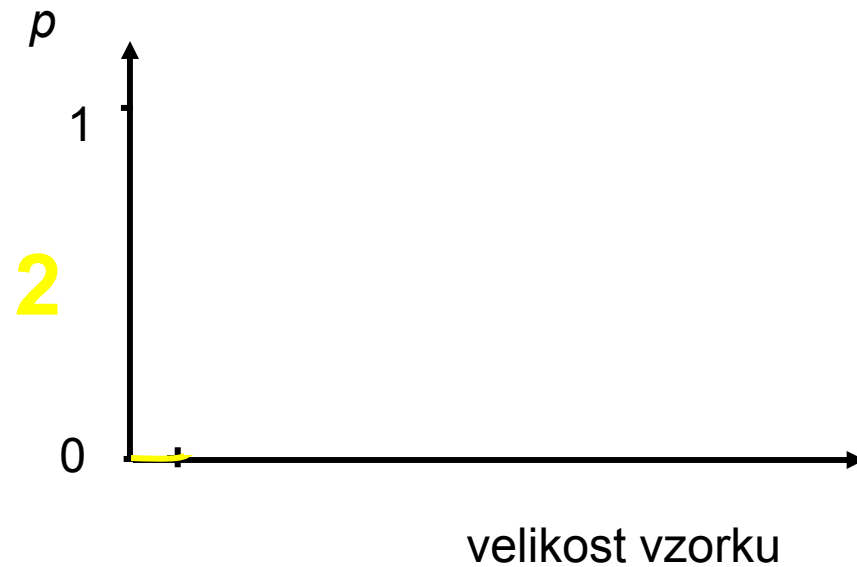
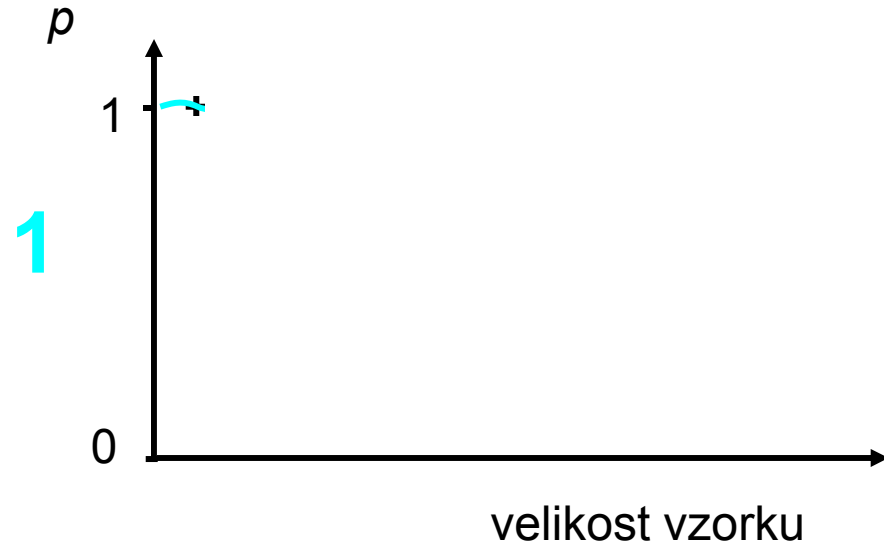
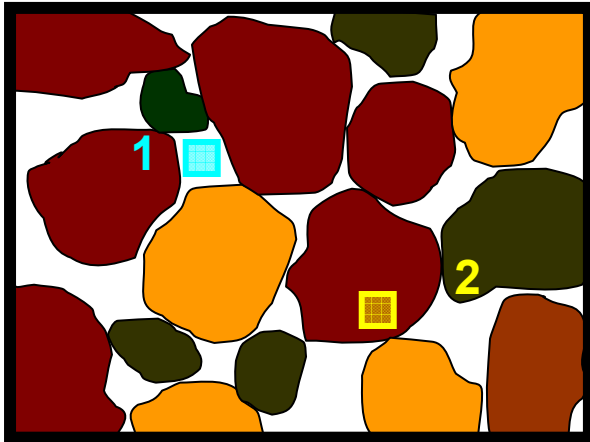
NE

Dojde ke změně  $\rho_d$ ?

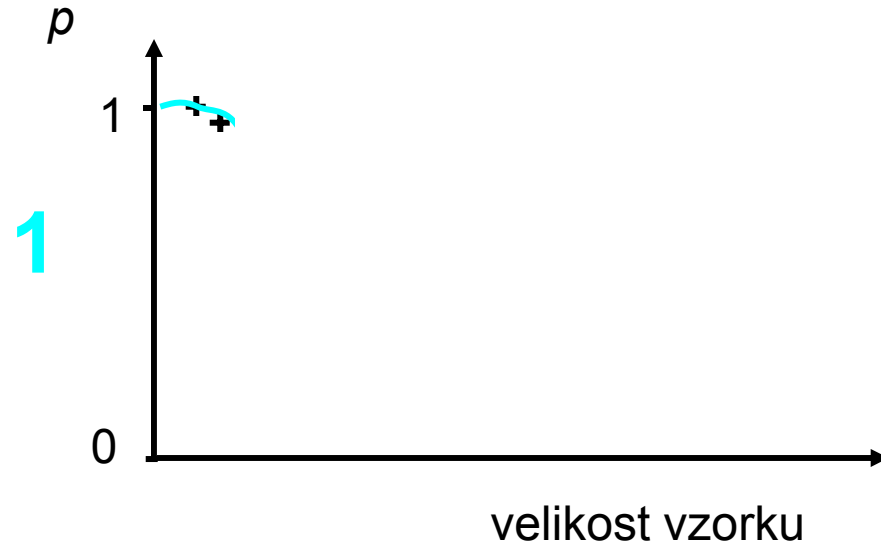
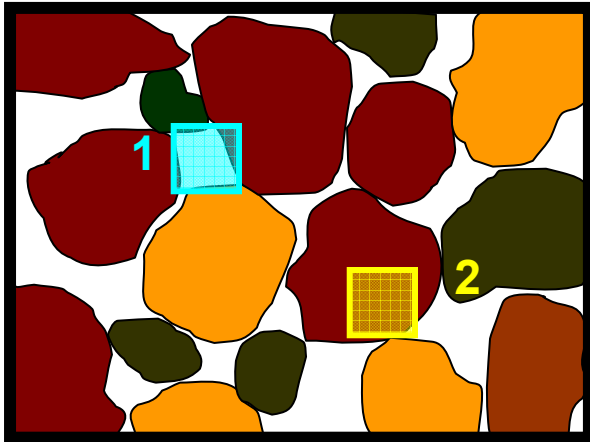
ANO



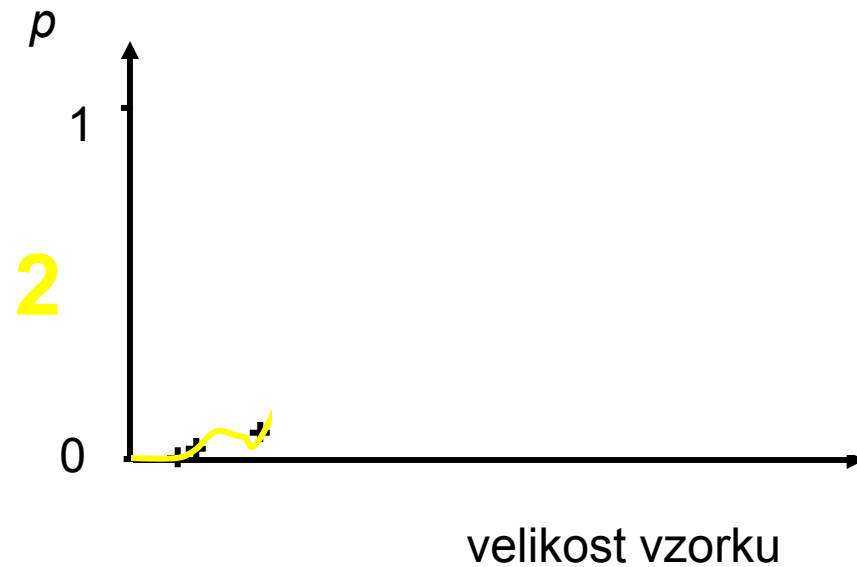
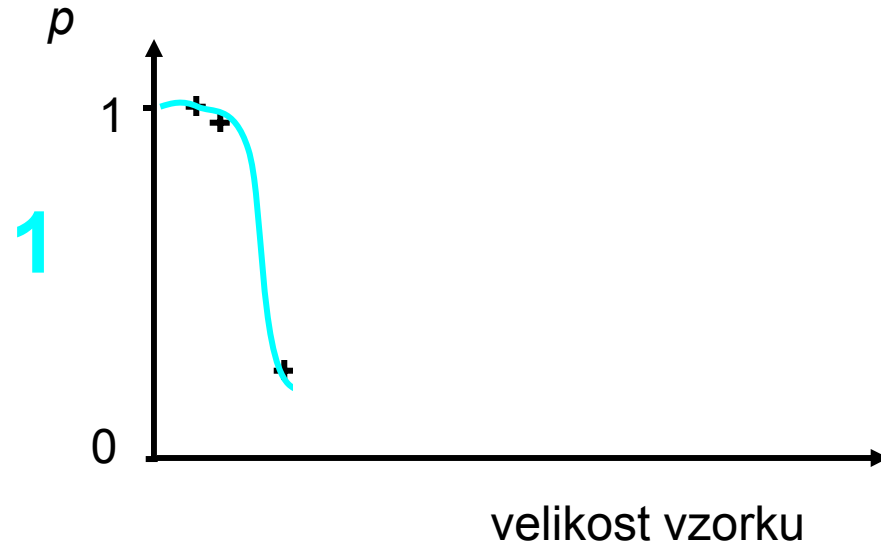
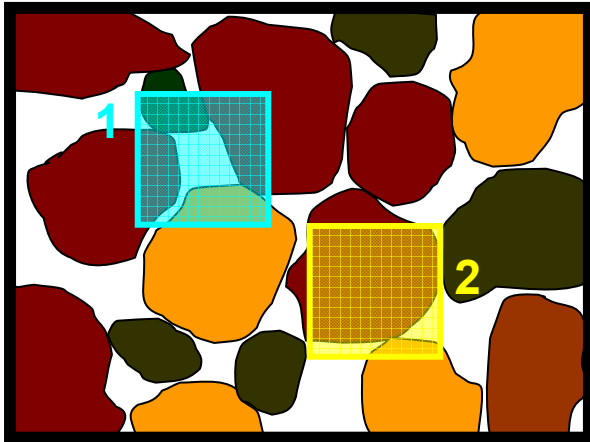
# Reprezentativní elementární objem (REV)



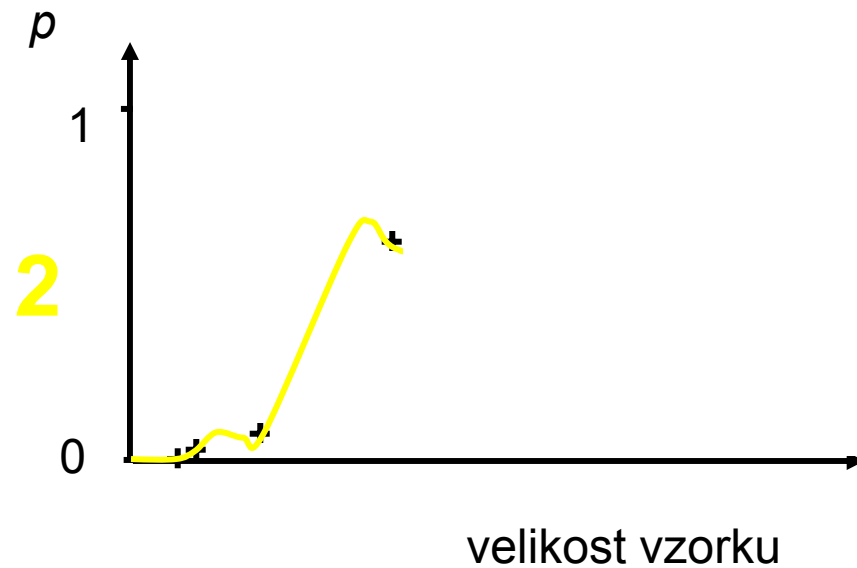
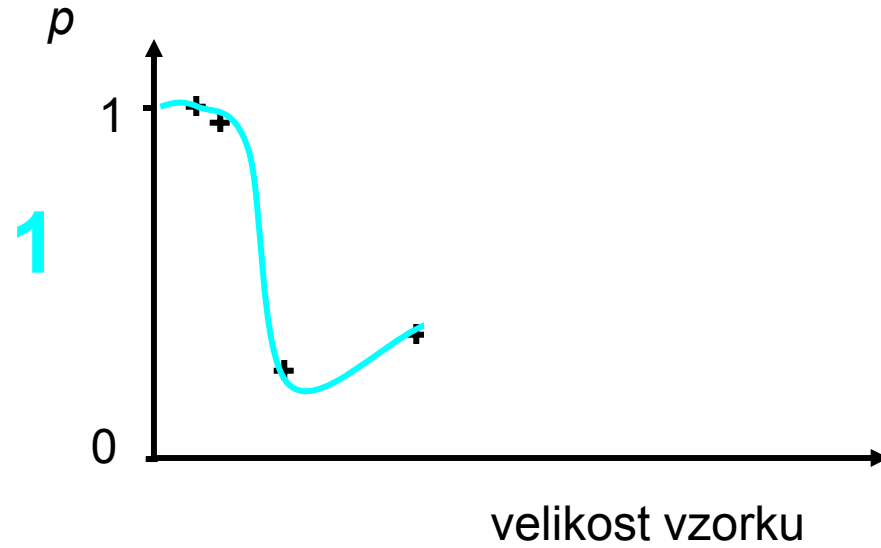
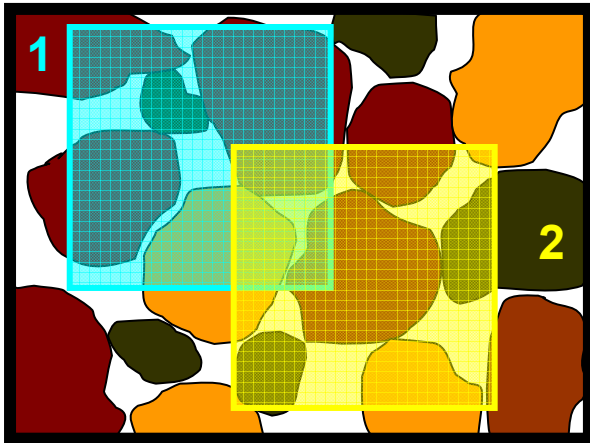
# Reprezentativní elementární objem (REV)



# Reprezentativní elementární objem (REV)

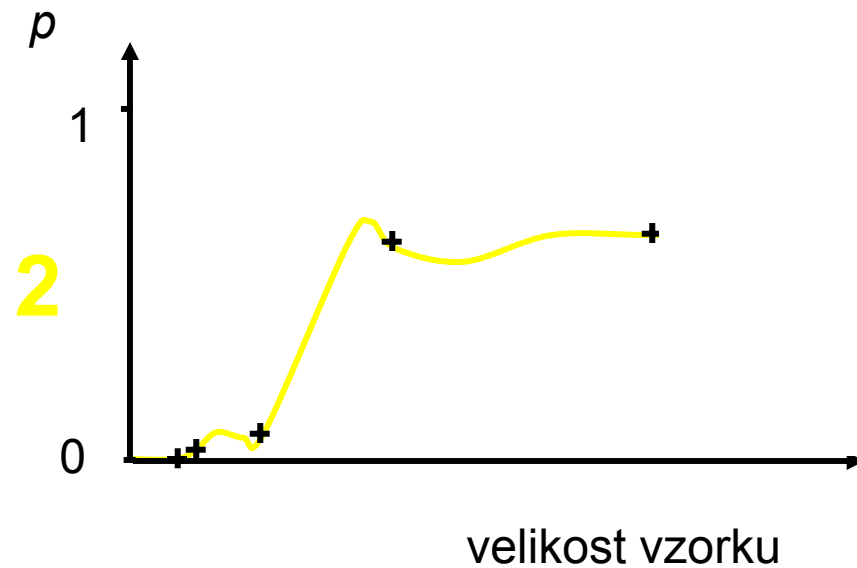
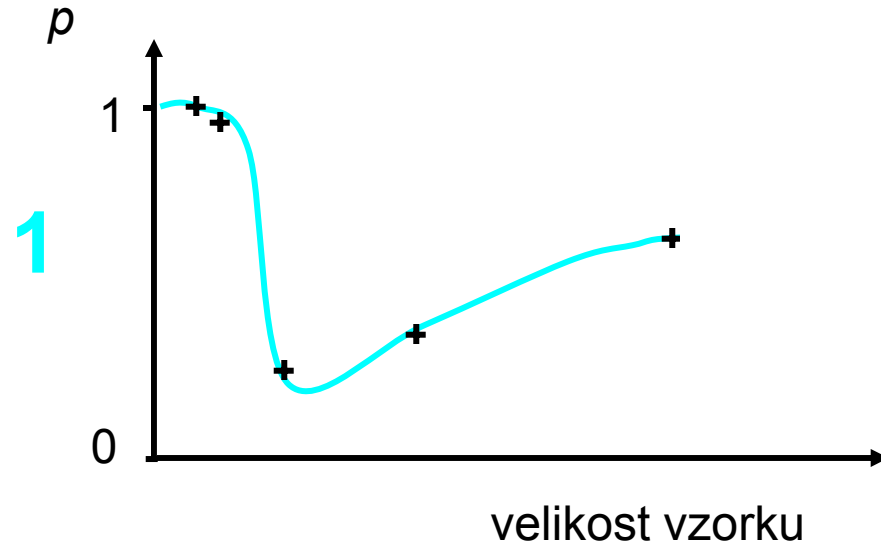
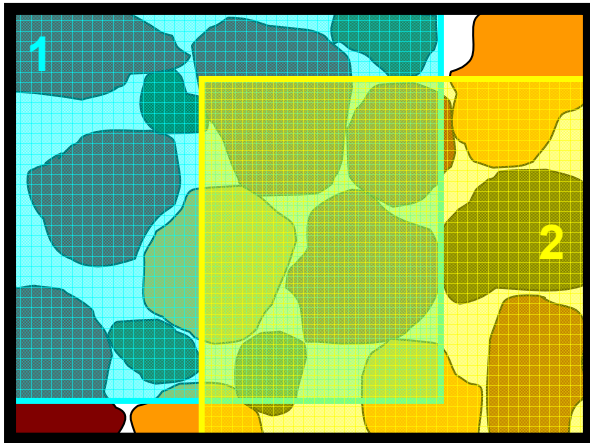


# Reprezentativní elementární objem (REV)





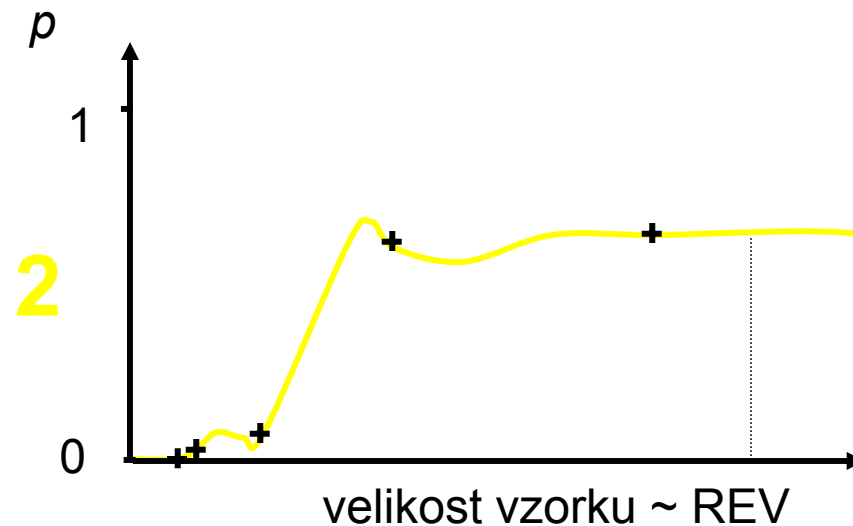
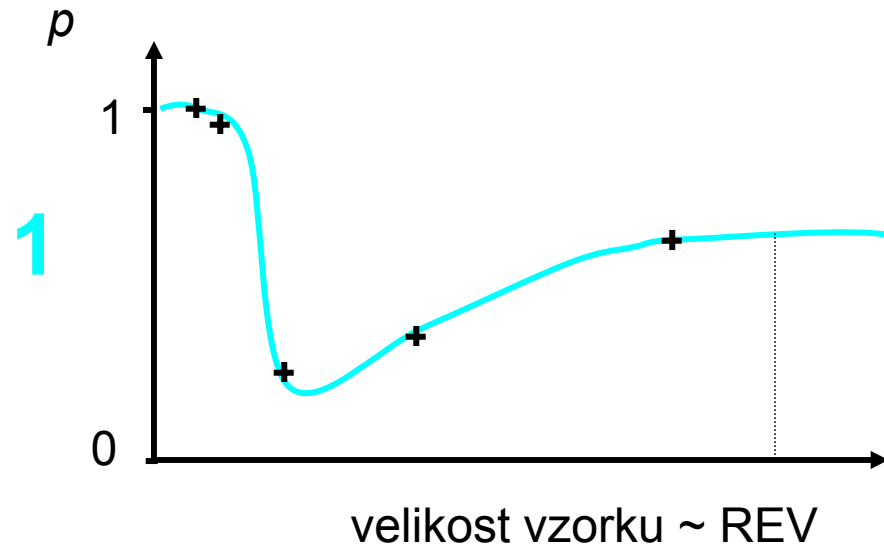
# Reprezentativní elementární objem (REV)



# Reprezentativní elementární objem (REV)

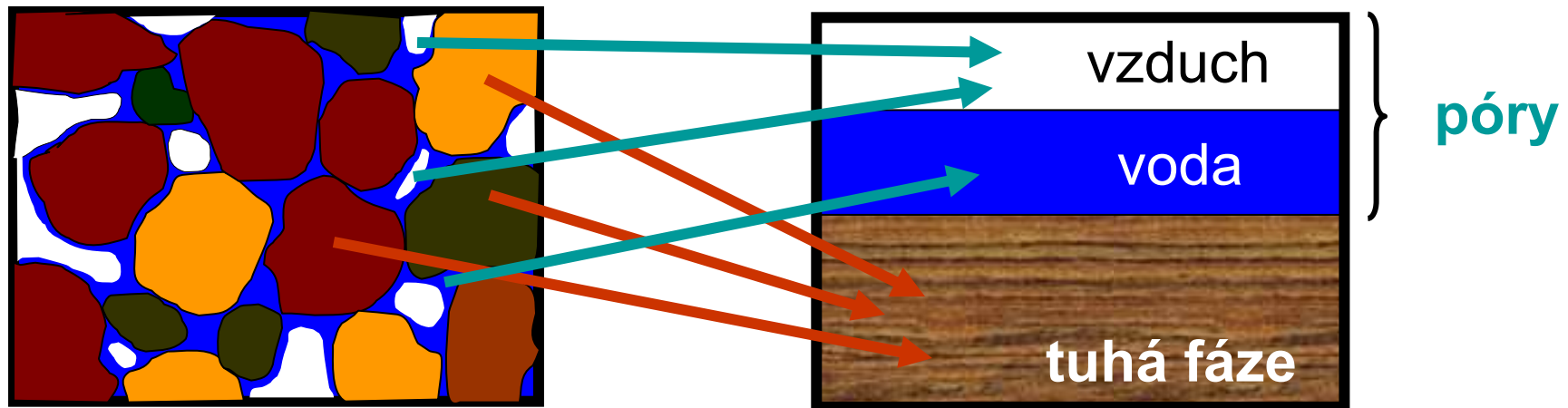
**REV (Representative Elementary Volume)** je takový objem vzorku, kterým získáme shodné makroskopické veličiny i při změně jeho umístění nebo jeho zvětšení.

REV závisí na typu pórovitého prostředí.  
Pro půdy velmi zhruba  $10^2 - 10^3 \text{ cm}^3$ .



# Voda v půdě

## Vlhkost pórovitého prostředí



# Voda v půdě

## Vlhkost pórovitého prostředí (EN: water content, moisture)

Hmotnostní vlhkost  $w$   
(EN: gravimetric water content)

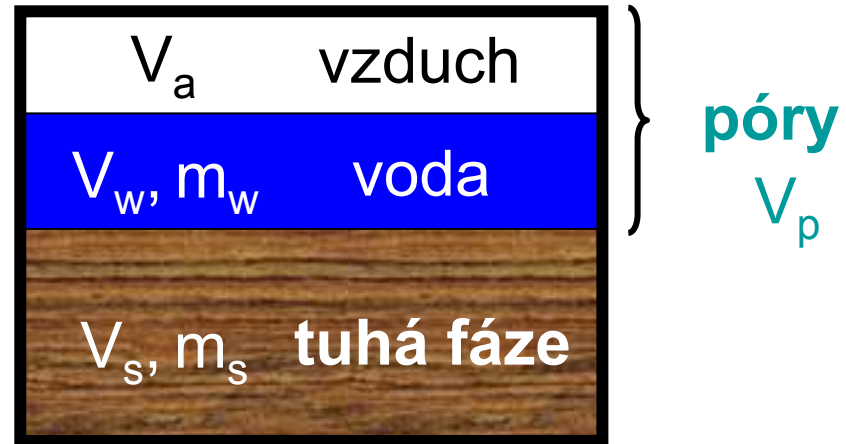
$$w = \frac{m_w}{m_s}$$

[-]

Objemová vlhkost  $\theta$  (EN: volumetric water content)

$$\theta = \frac{V_w}{V}$$

[-]



Vztah mezi  $w$  a  $\theta$

pro  $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ :

$$w \cdot \rho_d = \theta \cdot \rho_w$$

$$\theta = \frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w}$$

$$\theta = w \cdot \rho_d$$

# Voda v půdě

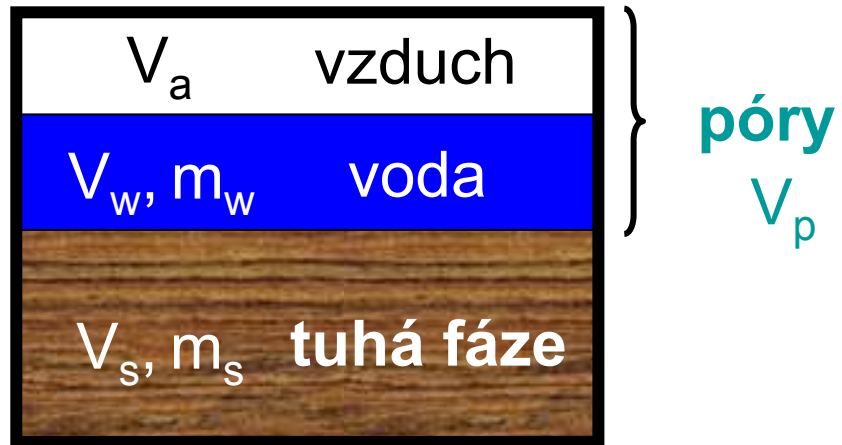
## Vlhkost pórovitého prostředí pokračování.....

Číslo vlhkosti (pro bobtnavé půdy)

$$v = \frac{V_w}{V_s} \quad [-]$$

Zásoba vody v půdě

$$W = \int_0^z \theta \, dz \quad [L]$$



kde  $z$  je vertikální poloha. Pro  $\theta = konst$  v celém půdním profilu platí  $W = \theta \cdot z$ . (Pozor, většinou je to velké zjednodušení)

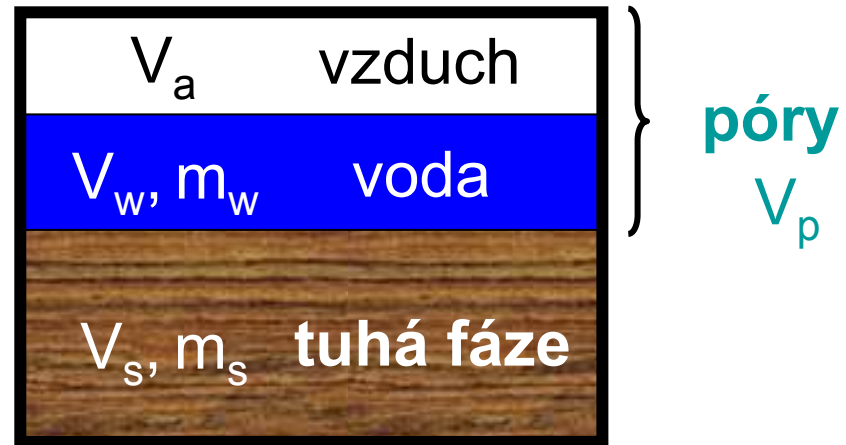
# Voda v půdě

## Vlhkost pórovitého prostředí pokračování.....

Stupeň nasycení  
(EN: Saturation)

$$S = \frac{V_w}{V_p}$$

[-]



Provzdušnění

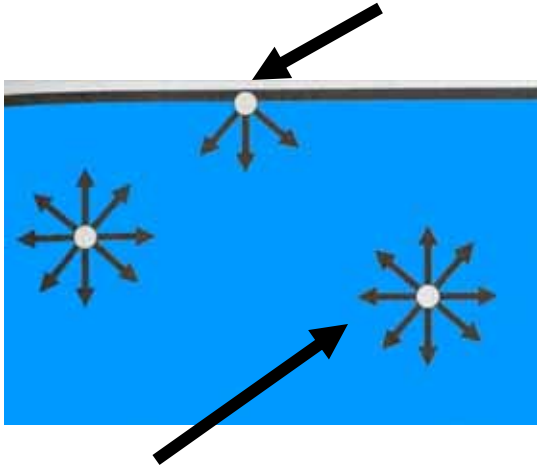
$$P_a = \frac{V_a}{V} = p - \theta \quad [-]$$

## Mezní hodnoty provzdušnění půdy (Kutílek a kol., 1993)

plodina	Provzdušnění (%)	
	minimální	optimální
Louky	<b>5</b>	<b>10</b>
Pšenice, oves	<b>10 – 15</b>	<b>15 – 20</b>
Ječmen, okopaniny	<b>15 - 20</b>	<b>18 - 24</b>

# Kapilarita

Molekuly vody na **povrchu** jsou přitahovány pouze **jednostranně**. Energie, která je třeba k udržení molekul vody na povrchu se nazývá **povrchová energie** nebo **povrchové napětí**  $\sigma$ .



Molekuly vody na sebe navzájem působí přitažlivými silami. Účinek těchto sil se **uvnitř kapaliny** ruší.

## Povrchová energie

*Práce vynaložená na zvětšení povrchu*

$$7,28 \cdot 10^{-2} \text{ J.m}^{-2}$$

## Povrchové napětí

*Síla působící na jednotku délky povrchu kapaliny*

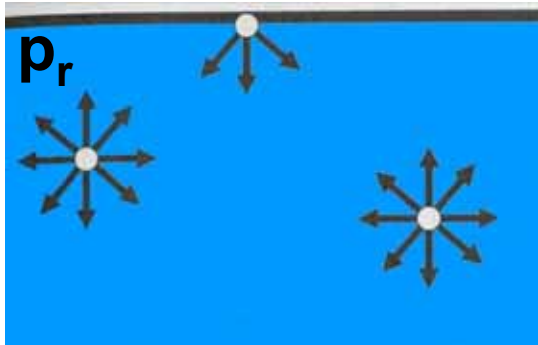
$$7,28 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}$$



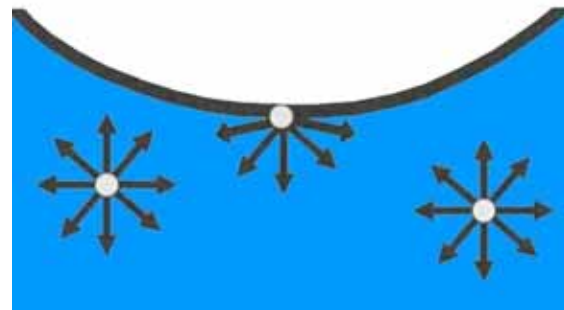
# Kapilarita

Pro kulovou plochu je dodatkový (kapilární) tlak na kapalinu  $p_\sigma$  vlivem zakřivení:

$$p_\sigma = \frac{2\sigma}{R}$$



Na rovinném rozhraní  
voda – plyn je tlak na  
povrchu  $p_r$

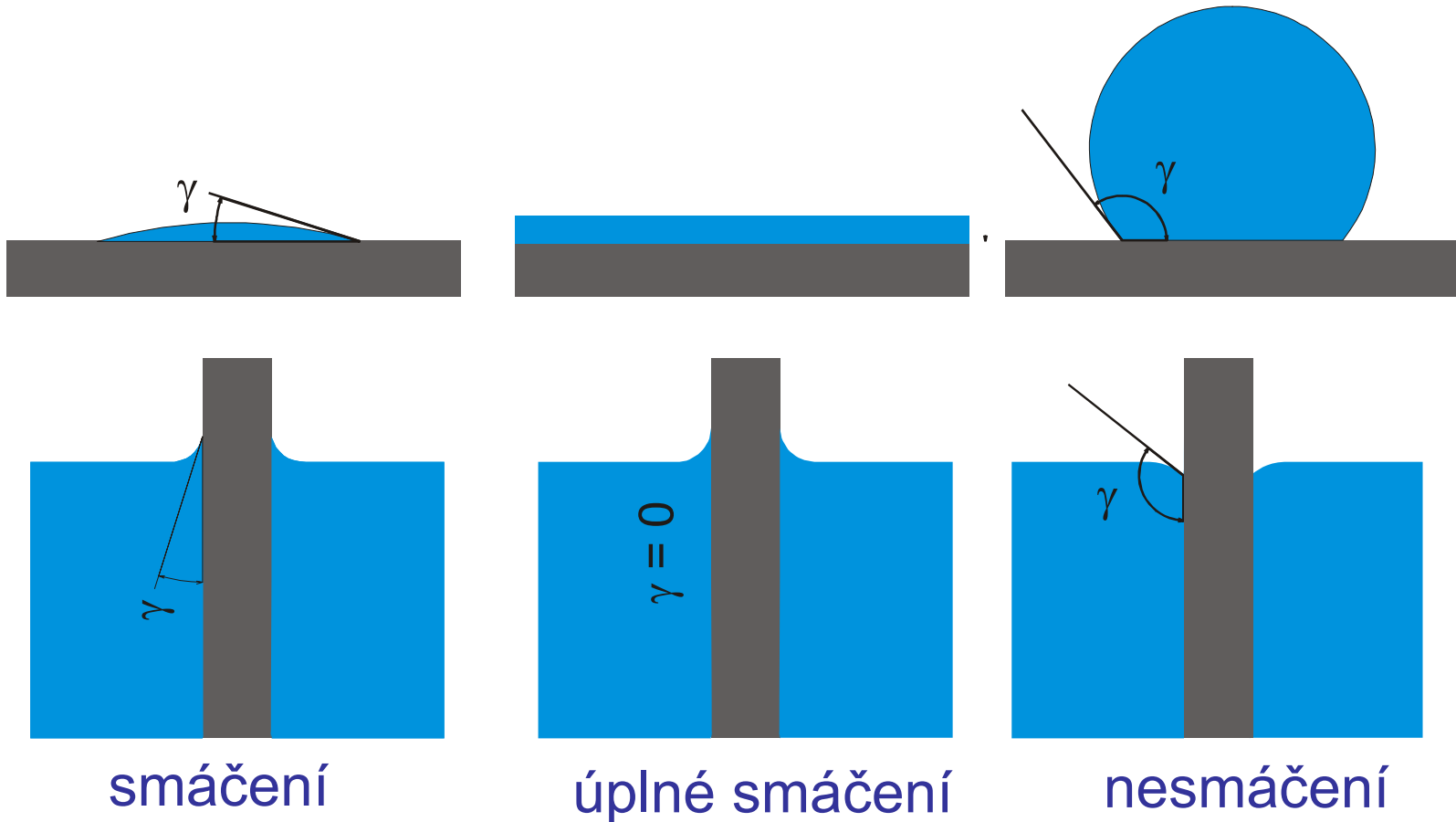


Na zakřiveném rozhraní  
je tlak v kapalině

$$p = p_r \pm p_\sigma$$

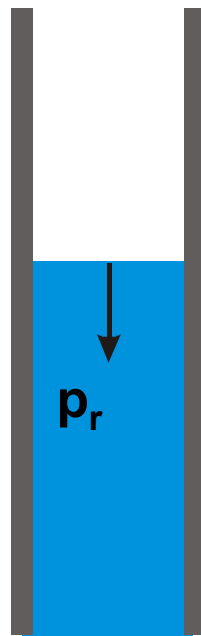
# Kapilarita

V na rozhraní voda-plyn-tuhý látka dochází se objevuje **smáčecí úhel  $\gamma$**

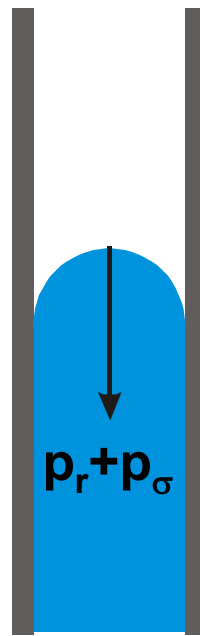


# Kapilarita

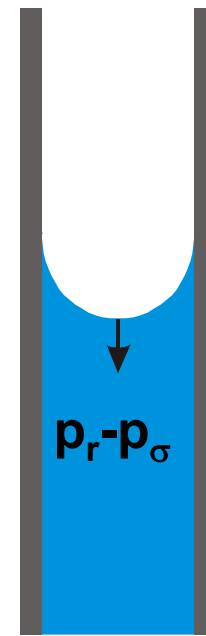
Povrchový tlak  $p = p_r \pm p_\sigma$



rovinný povrch

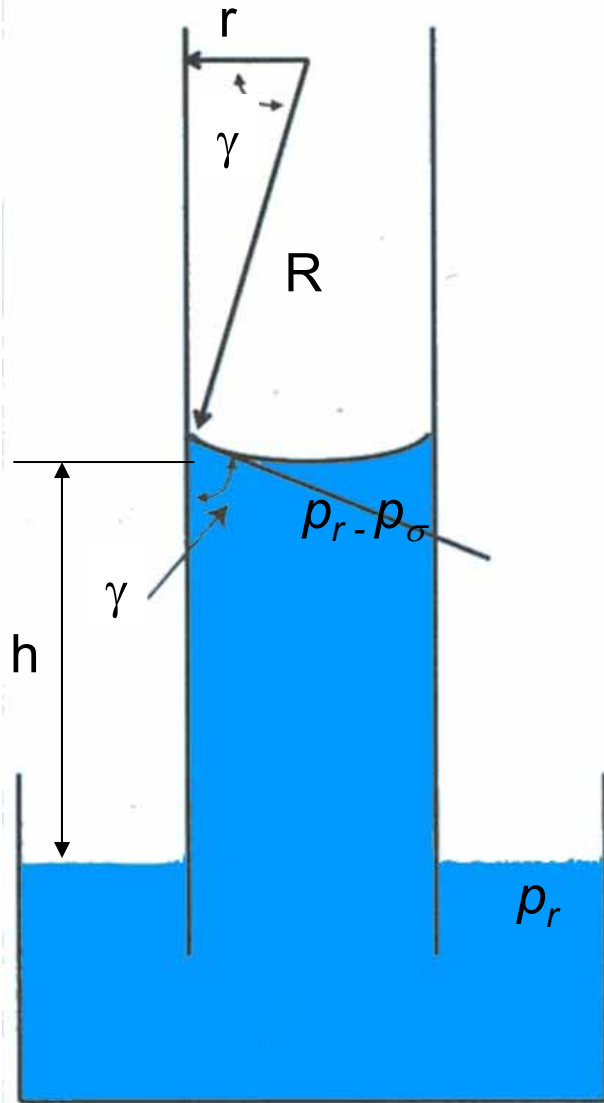


konkávní



konvexní

# Tlakové poměry v kruhové kapiláře



Dodatkový (kapilární) tlak působící na povrch vody v kapiláře

$$p_{\sigma} = \frac{2 \sigma}{R} \quad R = r / \cos \gamma$$

$$p_{\sigma} = \frac{2 \sigma \cos \gamma}{r}$$

Síla způsobená kapilárním tlakem (vzhůru)

$$F_{\sigma} = A p_{\sigma} = \pi r^2 p_{\sigma} = 2 \pi r \sigma \cos \gamma$$

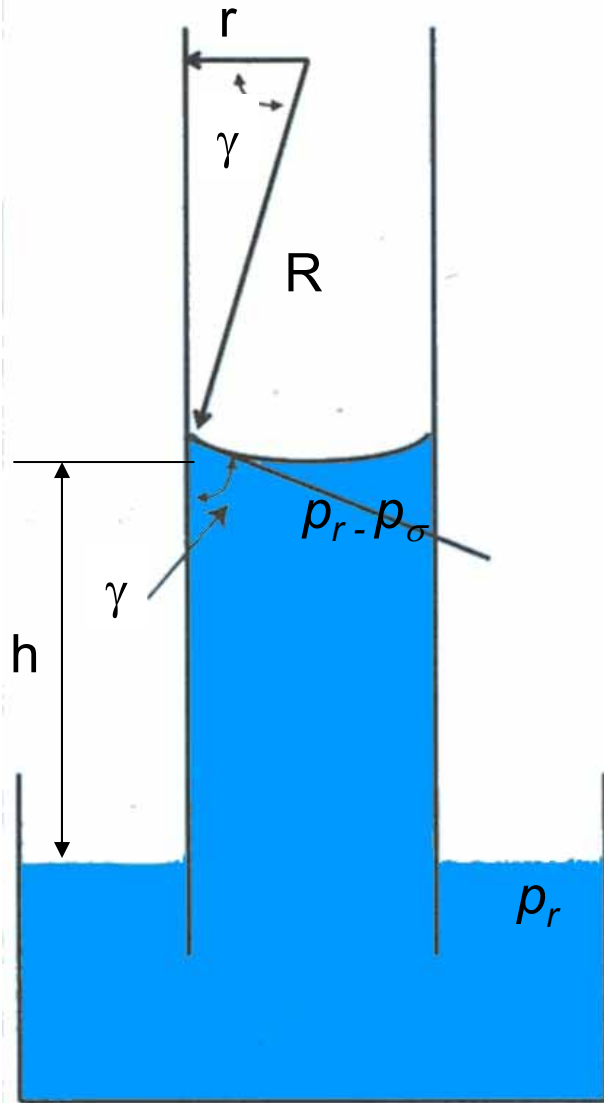
Gravitační tíha působící dolů

$$F_g = \rho_w V g = \rho_w \pi r^2 h g$$

V rovnováze jsou  $F_{\sigma}$  a  $F_g$  shodné a tedy:

$$h = \frac{2 \sigma \cos \gamma}{r \rho_w g}$$

# Tlakové poměry v kruhové kapiláře



Dodatkový (kapilární) tlak působící na povrch vody v kapiláře

$$p_{\sigma} = \frac{2 \sigma}{R} \quad R = r / \cos \gamma$$

$$p_{\sigma} = \frac{2 \sigma \cos \gamma}{r}$$

Síla způsobená kapilárním tlakem (vzhůru)

$$F_{\sigma} = A p_{\sigma} = \pi r^2 p_{\sigma} = 2 \pi r \sigma \cos \gamma$$

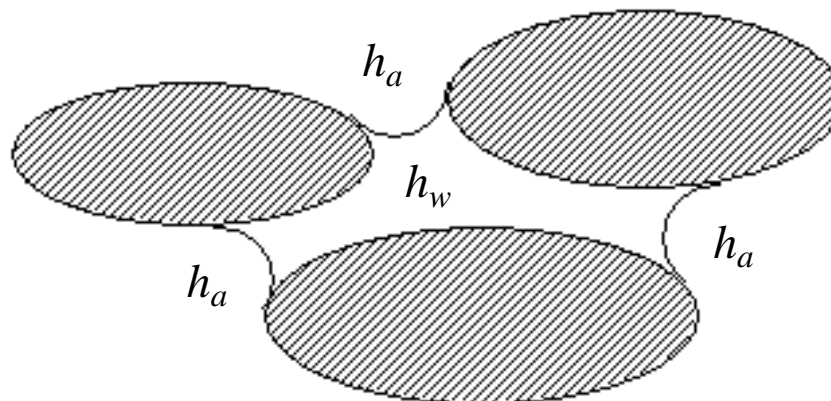
Gravitační tíha působící dolů

$$F_g = \rho_w V g = \rho_w \pi r^2 h g$$

V rovnováze jsou  $F_{\sigma}$  a  $F_g$  shodné a tedy:

$$h = \frac{2 \sigma \cos \gamma}{r \rho_w g} \quad h \cong 0,15 / r \text{ (cm) pro } \gamma=0$$

# Kapilární síly v pórovitém prostředí



Velikost kapilárních sil určují

- složení přítomných fází
- geometrie rozhraní
- teplota

Účinek kapilárních sil (kapilární tlak  $p_c$ )

- kapilární tlaková výška  $h_\sigma = p_\sigma / \rho g$

(rozdíl tlakových výšek v kapiláře na rozhraní mezi vodou a vzduchem)

$$h_\sigma = h_a - h_w$$

# Použitá literatura

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

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

Fitzpatrick, Soils: Their formation, classification and distribution

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