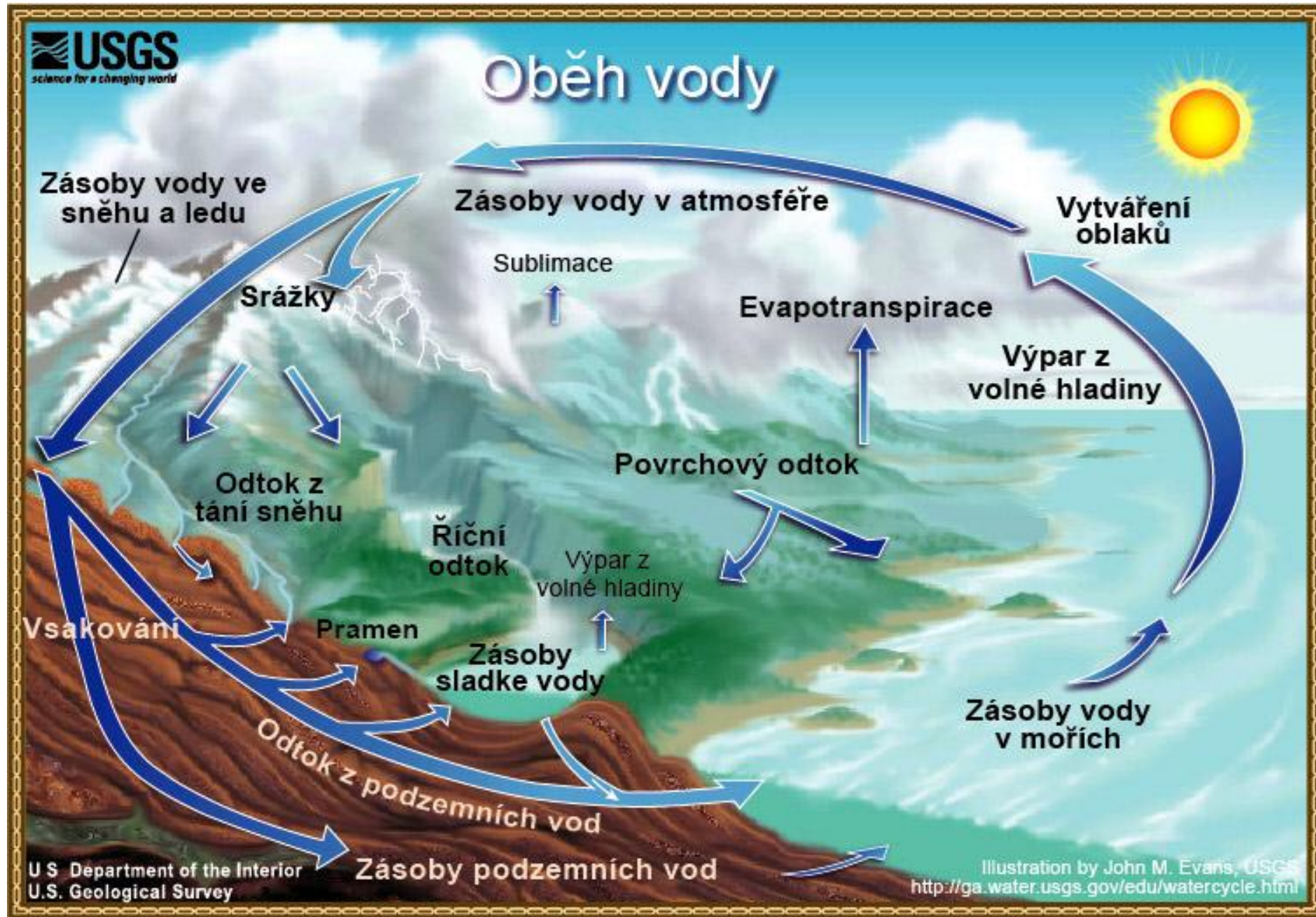
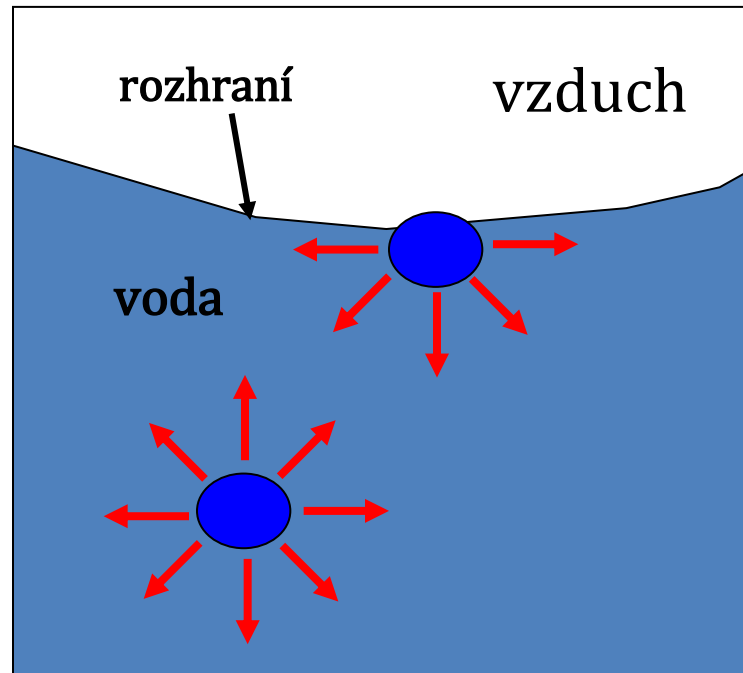


# **TRANSPORTNÍ PROCESY V PODZEMNÍCH VODÁCH**

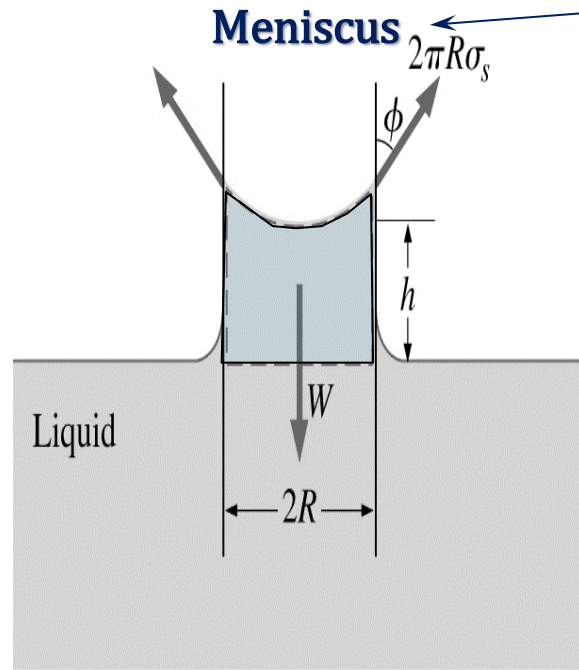
# HYDROLOGICKÝ CYKLUS



# Povrchové napětí kapilarita



# Povrchové napětí kapilarita



- **Kapilarita** – výstup kapaliny v úzké trubici
- Zakřivený meniskus uvnitř trubice
- **Voda** – smáčí pevné stěny – úhel  $\phi$
- Rovnováha **gravitační síly** a **kapilární síly** (tečné napětí x délka)

$$2 \pi R \sigma \cos \phi = \pi R^2 h \gamma$$



$$h = \frac{2 \sigma \cos \phi}{\gamma R}$$

- $\sigma$  tečné napětí
- $\phi$  úhel smáčení... kapalina..stěna
- $\gamma$  měrná tíha kapaliny
- R** poloměr trubice

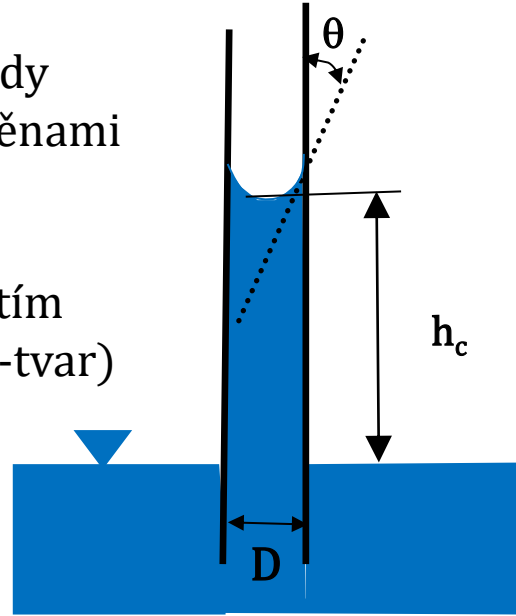
Typ zeminy	Kapilární výška(m)
jíl	>10
Jemná hlína	7.5
Hrubá hlína	3.0
Velmi jemný písek	1.0
Jemný písek	0.50
Střední písek	0.25
Hrubý písek	0.15
Velmi hrubý písek	0.04
Jemný štěrk	0.015

## KAPILARITA

je povrchový jev – v porézním prostředí způsobený dvěma druhy sil:

- kohezími mezi molekulami vody
- adhezími – mezi kapalinou a stěnami pórů

-Kapilarita souvisí s povrchovým napětím  
-minimalizace povrchu.... výsledkem U-tvar)



## KAPILÁRNÍ VÝŠKA VODY V ZEMINÁCH

Typ Zeminy	Kapilární výška(m)
jíl	>10
Jemná hlína	7.5
Hrubá hlína	3.0
Velmi jemný písek	1.0
Jemný písek	0.50
Střední písek	0.25
Hrubý písek	0.15
Velmi hrubý písek	0.04
Jemný štěrk	0.015

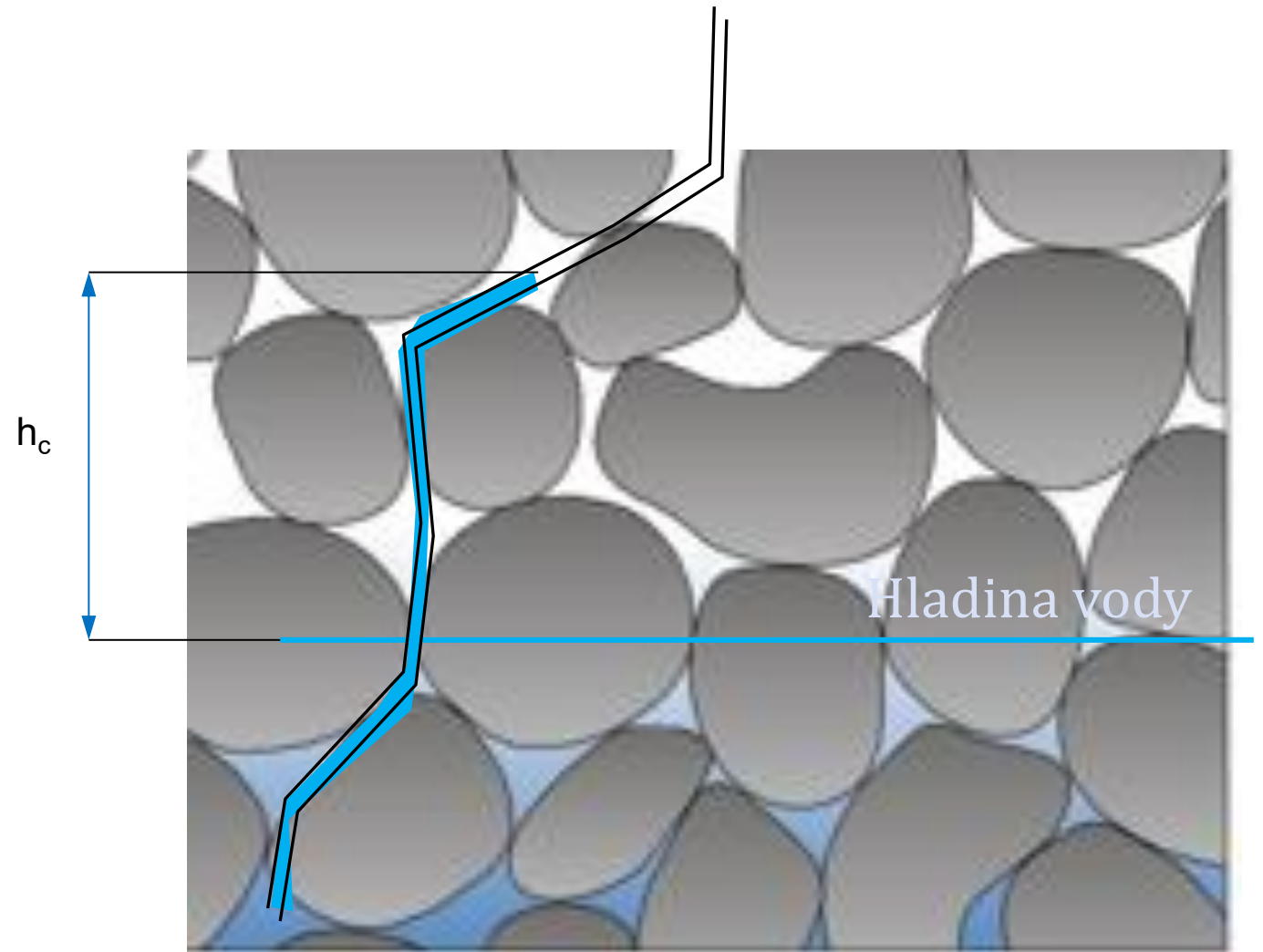
## KAPILÁRNÍ VÝŠKA

$$h_c = 4\sigma \cos(\theta) / \gamma_w D$$

Povrchové napětí pro vodu 20°C je  $7.3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$  a  $\gamma_w = 9.81 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ .

KAPILÁRNÍ VÝŠKA  
(porézní prostředí)

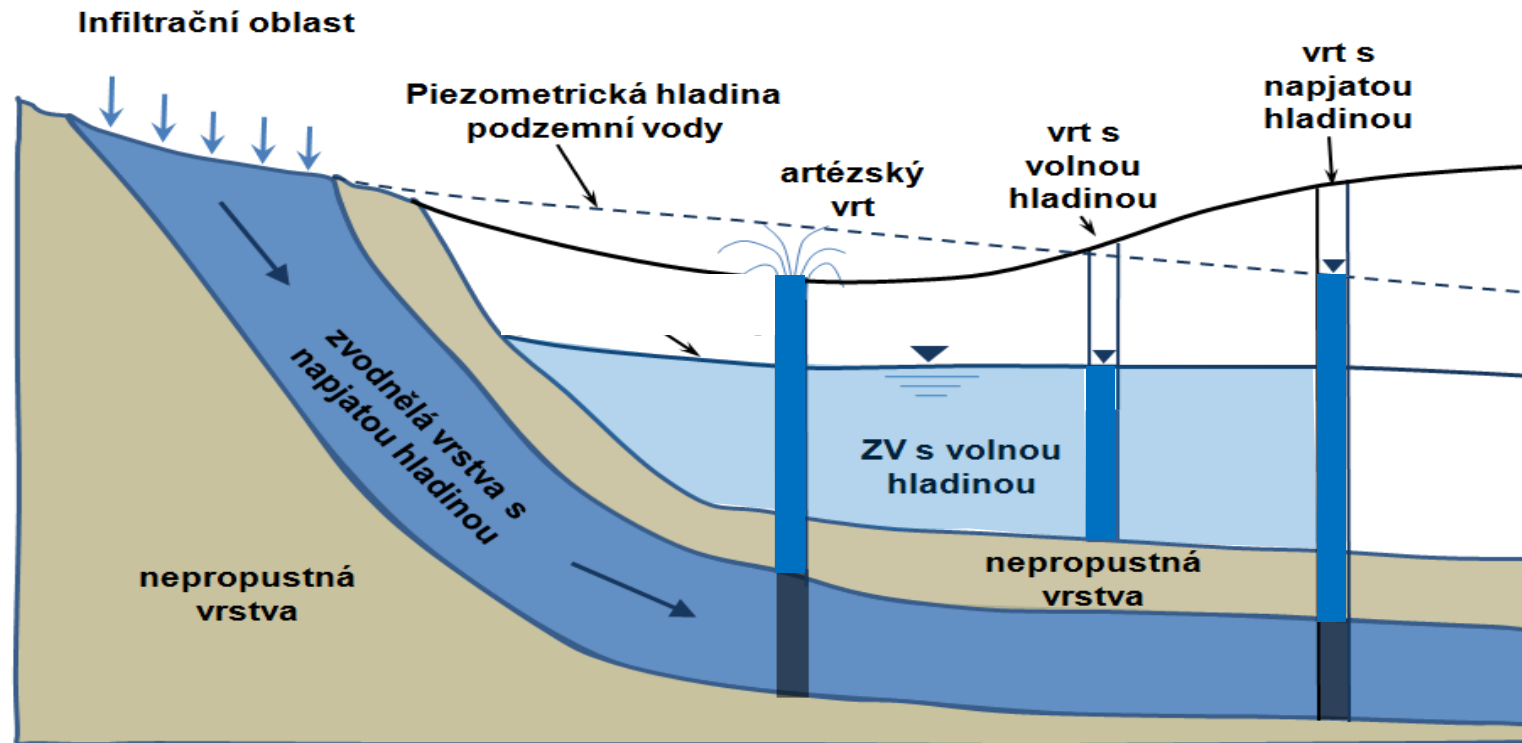
$$h_c = 4\sigma \cos(\theta) / \gamma_w d$$



# KLASIFIKACE PODZEMNÍCH VOD

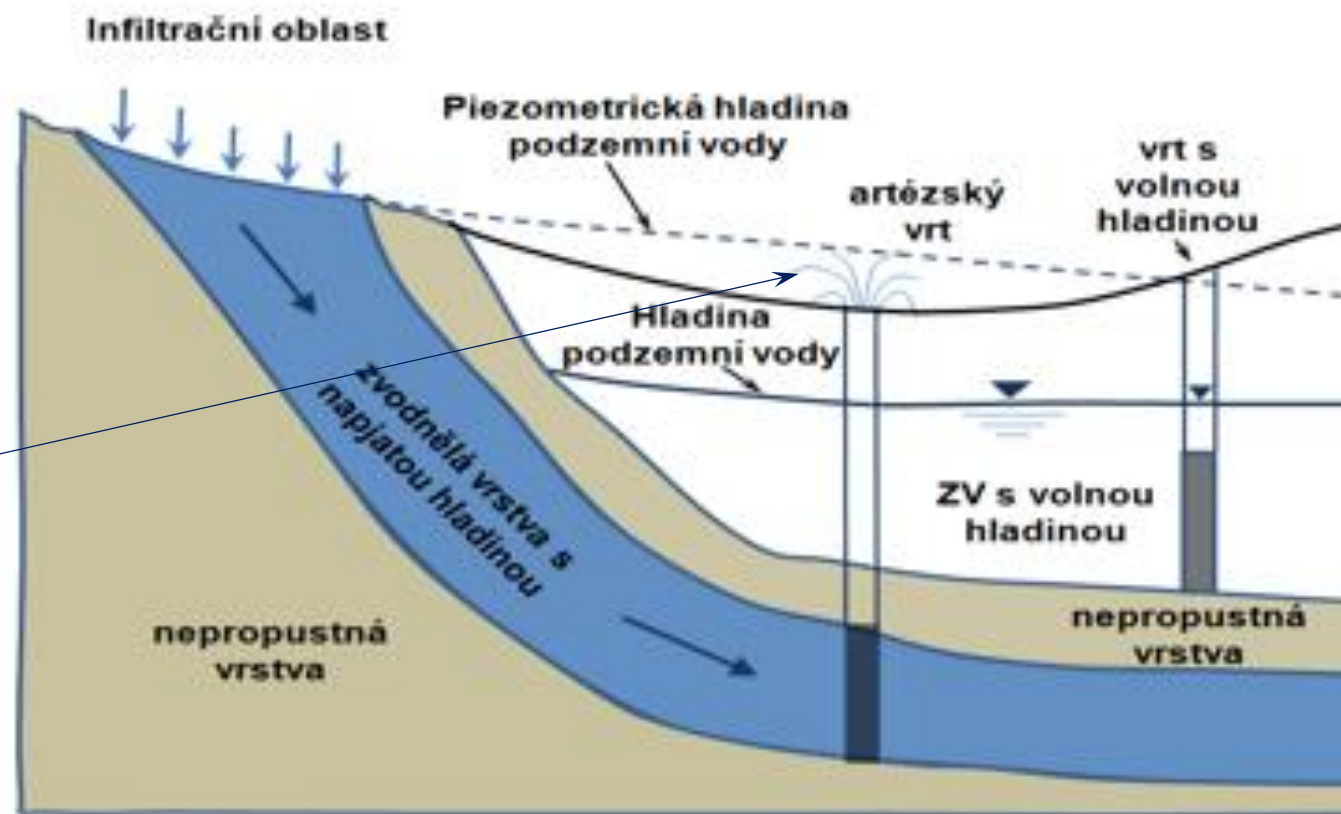
Podle hydraulických poměrů ve zvodnělé vrstvě

- a) **PV s napjatou hladinou**
  - PV s napjatou hladinou – **artézská PV**
- b) **PV s volnou hladinou**



# ARTÉZSKÁ ZVODEŇ

Zvodněná vrstva (zvodeň) s piezometrickou výškou vystupující nad terén  
.... artézské studny ... bez čerpání



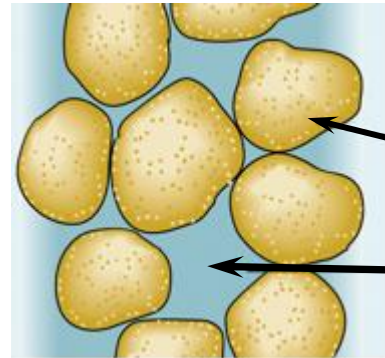
## VELIKOST ZRN ZEMIN

<b>Materiál</b>	<b>velikost zrn (mm)</b>
Jíl .....	<0,004
Hlína .....	0,004 – 0,062
Velmi jemný písek .....	0,062 – 0,125
Střední písek .....	0,125 – 0,25
Hrubý písek .....	0,5 – 1,0
Velmi jemný štěrk .....	2,0 – 4,0
Střední štěrk .....	8,0 – 16,0
Velmi hrubý štěrk .....	32,0 – 64,0.

# KLASIFIKACE PODZEMNÍCH VOD

Podle **propustnosti horninového prostředí**

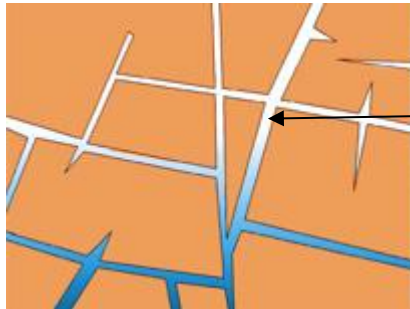
a) **průlinovou**



pevná zrna

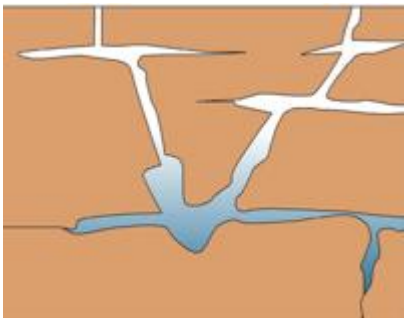
pórový prostor

b) **puklinovou**



systém puklin

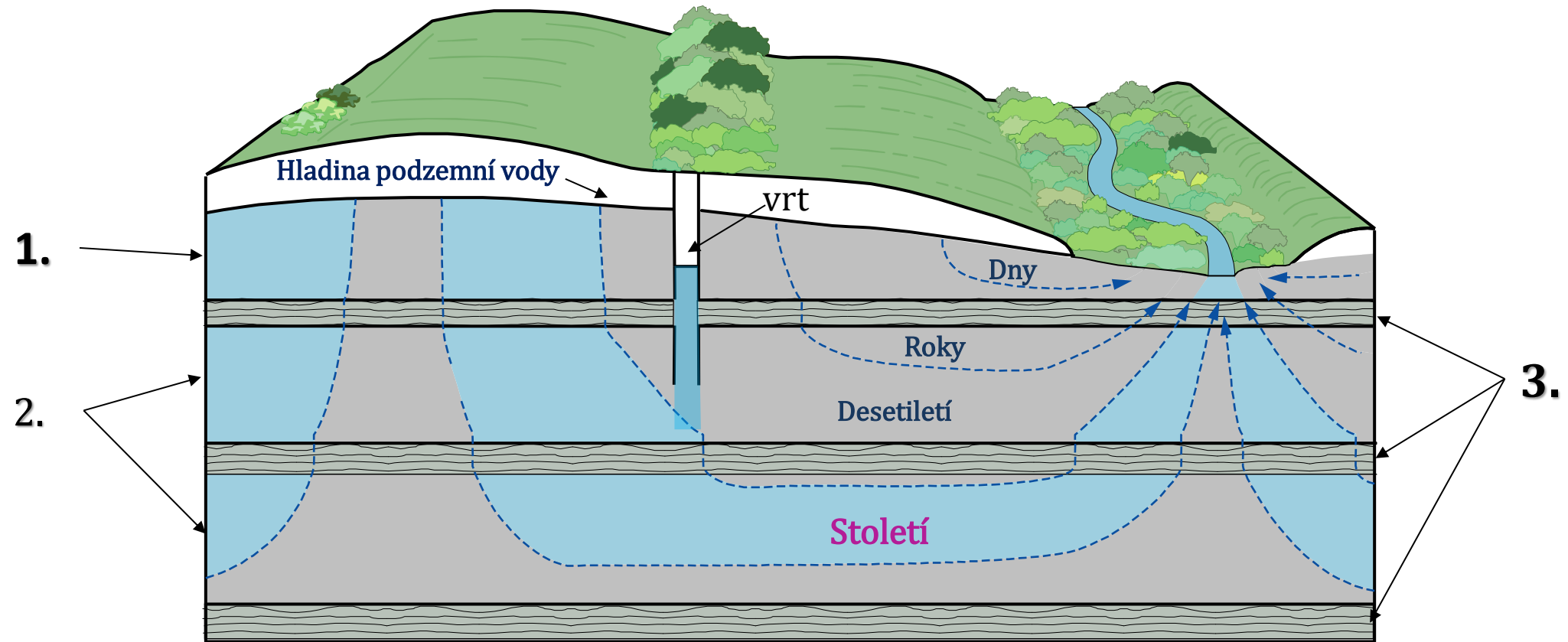
c) **krasovou**



systém krasových prostorů  
(vzniklý rozp. např. vápence)

# KLASIFIKACE PODZEMNÍCH VOD

1. ZV s volnou hladinou
2. ZV s napjatou hladinou
3. Nepropustná vrstva



# REV

## Makroskopický přístup

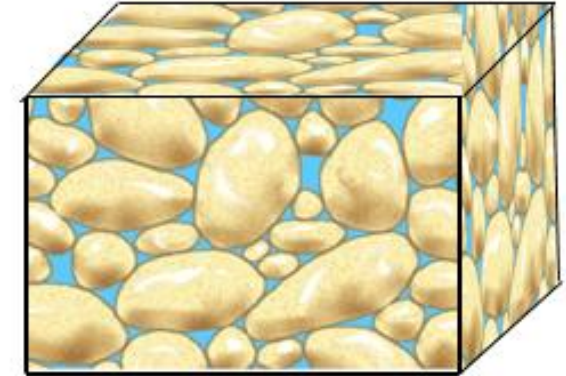
Procesy spojené s pohybem látek v porézním prostředí na různých úrovních rozlišení

### Měřítko

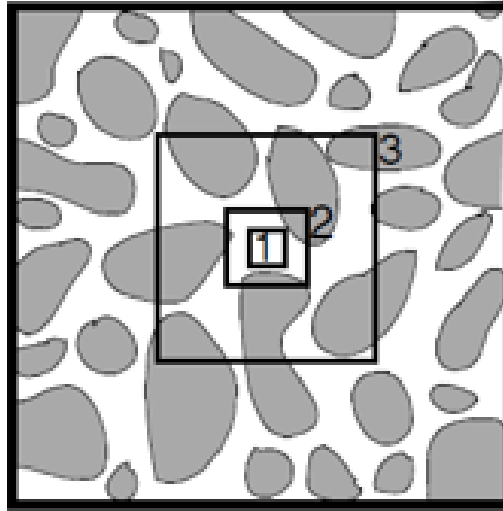
- **molekulární**
- **mikroskopické** – (nevýhoda – detailní, komplikované)
- **makroskopické** - (překrývající se fiktivní makrokontinua)

**REV** – malý objem – mnohonásobně větší než je charakteristický rozměr pórů, ale zároveň mnohonásobně menší než je zkoumaná oblast pórovitého prostředí

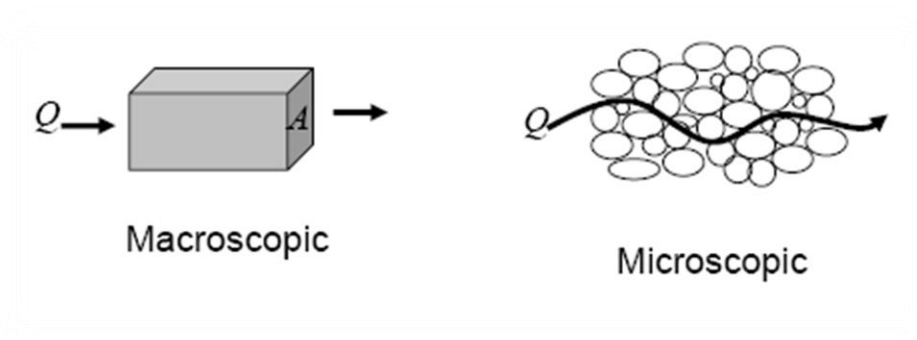
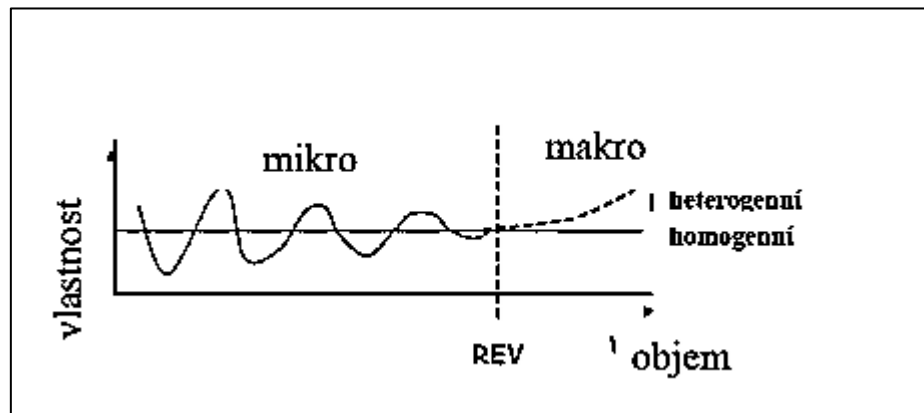
**AEV** - libovolný malý elementární objem zkoumaného prostředí



# REV



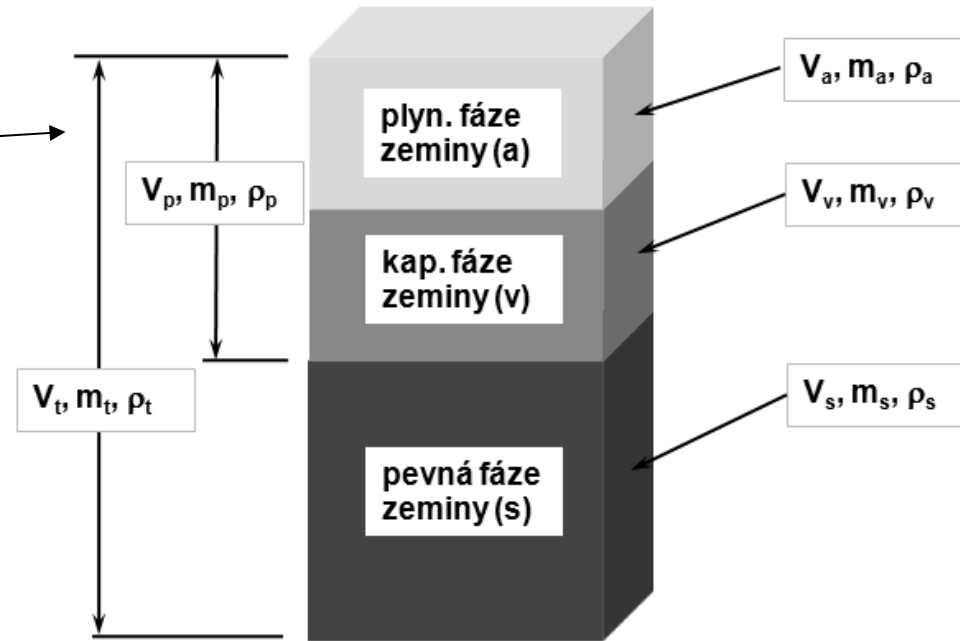
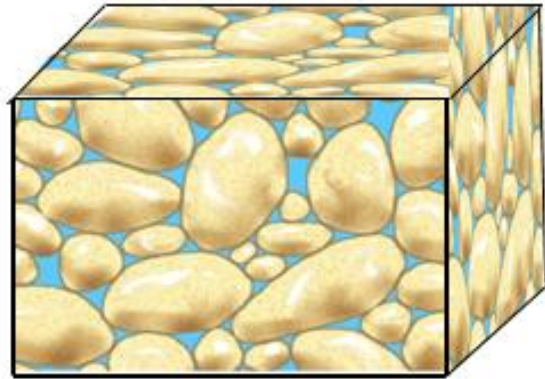
- Teoretické určení velikosti **REV** z postupného průměrování přes AEV (libovolný elementární objem)
- **REV** - je takový AEV, při jehož zvětšení se hodnota makroskopické veličiny už prakticky nemění



## CHARAKTERISTIKY ZVODNĚ

1. Typ zeminy
2. Volná x nebo napjatá hladina
3. Vertikální uložení
4. **Pórovitost (n, p)**
5. **Hydraulická vodivost (K)**
6. **Propustnost (permeabilita) (k)**
7. **Transmisivita (T)**
8. **Storativita(S)**
9. **(An)Izotropie**
10. **(Ne) homogenita**

# MĚRNÁ HMOTNOST



měrná hmotnost pevné části:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad \dots 2600-2700 \text{ kg.m}^{-3}$$

měrná hmotnost suché půdy:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_t}$$

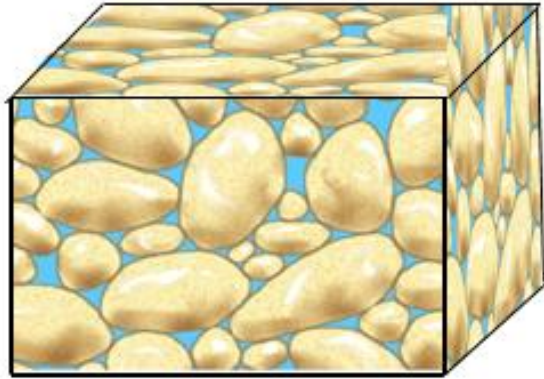
měrná hmotnost vlhké půdy:

$$\rho_{wd} = \frac{m_t}{V_t}$$

měrná hmotnost kapaliny:

$$\rho_k = \frac{m_v}{V_v}$$

# PÓROVITOST



**pórovitost zeminy:**

$$p = \frac{V_p}{V_t} \quad (L^3/L^3) \dots (-)$$

**aktivní pórovitost:**

$$p_a = \frac{V_{pa}}{V_t}$$

**kapilární pórovitost:**

$$p_k = \frac{V_{pk}}{V_t}$$

zemina	Pórovitost (%)
šterk	25 ÷ 50
písek	20 ÷ 30
hlína	35 ÷ 50
jíl	40 ÷ 70

**efektivní pórovitost:**

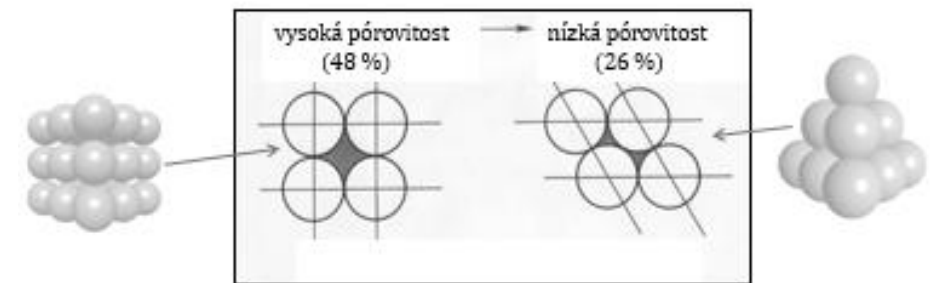
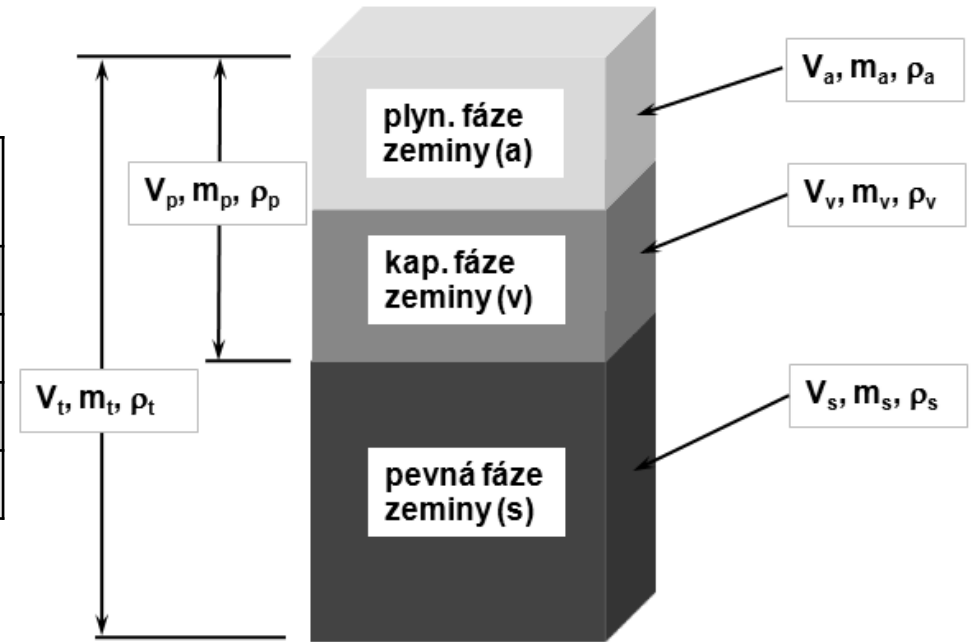
$$p_{ef} = \frac{V_{pef}}{V_t}$$

$V_p$  - objem všech pórů

$V_{pa}$  - objem pórů, ze kterých odteče voda vlivem gravitace

$V_{pk}$  - objem pórů s kapilární vodou

$V_{pef}$  - objem pórů, ve kterých se při pohybu voda pohybuje



## PÓROVITOST $\alpha$ EFEKTIVNÍ PÓROVITOST

<b>Materiál</b>	<b>Pórovitost (%)</b>	<b>Efektivní pórovitost (%)</b>
Jemná hlína (bahno)	34-61	0,1-10
jíl	34-65	0,1-10
Písek/štěrk	24-55	10-30
vápenec	5-15	0,1-5
Jílovitá břidlice	1-10	0,5-5
pískovec	5-15	0,5-10

## PERMEABILITA (PROPUSTNOST) - $k_p$

- Schopnost zeminy propouštět kapalinu póry a puklinami
- propojení pórových prostorů (většina zemin a rozpukaných hornin jsou porézní a propustné)

Tj. propustnost je *míra zeminy* (horniny) *propouštět vodu vzájemně propojenými póry a puklinami*

- Je to charakteristika, jaká je míra snadnosti průchodnosti vody zeminou
- různé zeminy mají různou propustnost

Některé zeminy (horniny) mají vysokou pórovitost, ale nízkou propustnost

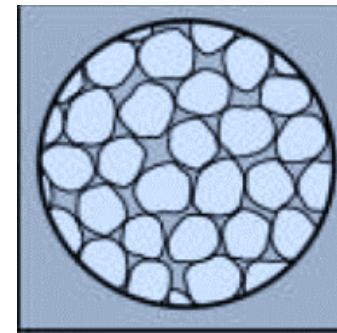
$k_p (m^2)$  – závisí pouze na vlastnostech zeminy

$$k_p = \frac{p_{ef} \cdot D^2}{32}$$

$p_{ef}$  - efektivní pórovitost (-)

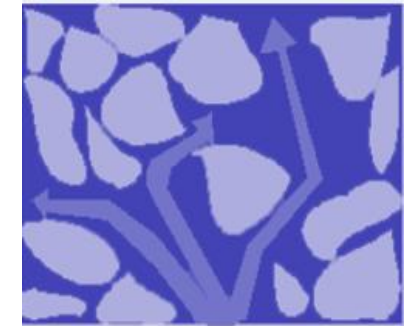
D - průměrný průměr

pórovitost



schopnost **zadržovat** vodu

propustnost



schopnost **vést** vodu  
Velikost, tvar,  
propojení pórů  
(puklin)

## HYDRAULICKÁ VODIVOST – $K$ ( $m.s^{-1}$ )

- vyjadřuje schopnost zeminy (horniny) propouštět vodu, a vyjádříme ho vztahem:

$$K = \frac{k_p \rho g}{\mu}$$

$k_p$  - propustnost

$\rho$  - měrná hmotnost vody

$g$  - tíhové zrychlení

$\mu$  - dynamická viskozita vody

Druh zeminy	Koeficient hydraulické vodivosti $K(m.s^{-1})$
Jíl	$< 10^{-8}$
Písčitá hlína ulehlý hlinitý písek	$< 10^{-6}$
Písek s jílovými částicemi	$(1 \div 2) \cdot 10^{-6}$
Nakypřený hlinitý písek a jemná písek	$(1 \div 5) \cdot 10^{-5}$
Hrubozrnný písek	$(1 \div 5) \cdot 10^{-4}$
Štěrkopísek	$(2 \div 10) \cdot 10^{-4}$
Štěrk	$(1 \div 5) \cdot 10^{-3}$

## KOEFICIENT PRŮTOČNOSTI (TRANSMISIVITY) – $T$ ( $m^2.s^{-1}$ )

- vyjadřuje propustnost homogenní a izotropní zvodněné vrstvy (konstantní výšky,  $b$ ) jako celku

$$T = b \cdot K$$

$b$  - výška zvodněné vrstvy

$K$  - koeficient hydraulické vodivosti

## STORATIVITA (zásobnost)

### - Zvodněná vrstva s volnou hladinou

- Schopnost zvodněné vrstvy přijímat nebo uvolňovat kapalinu vlivem změny hydrostatického tlaku (volná x pružná)

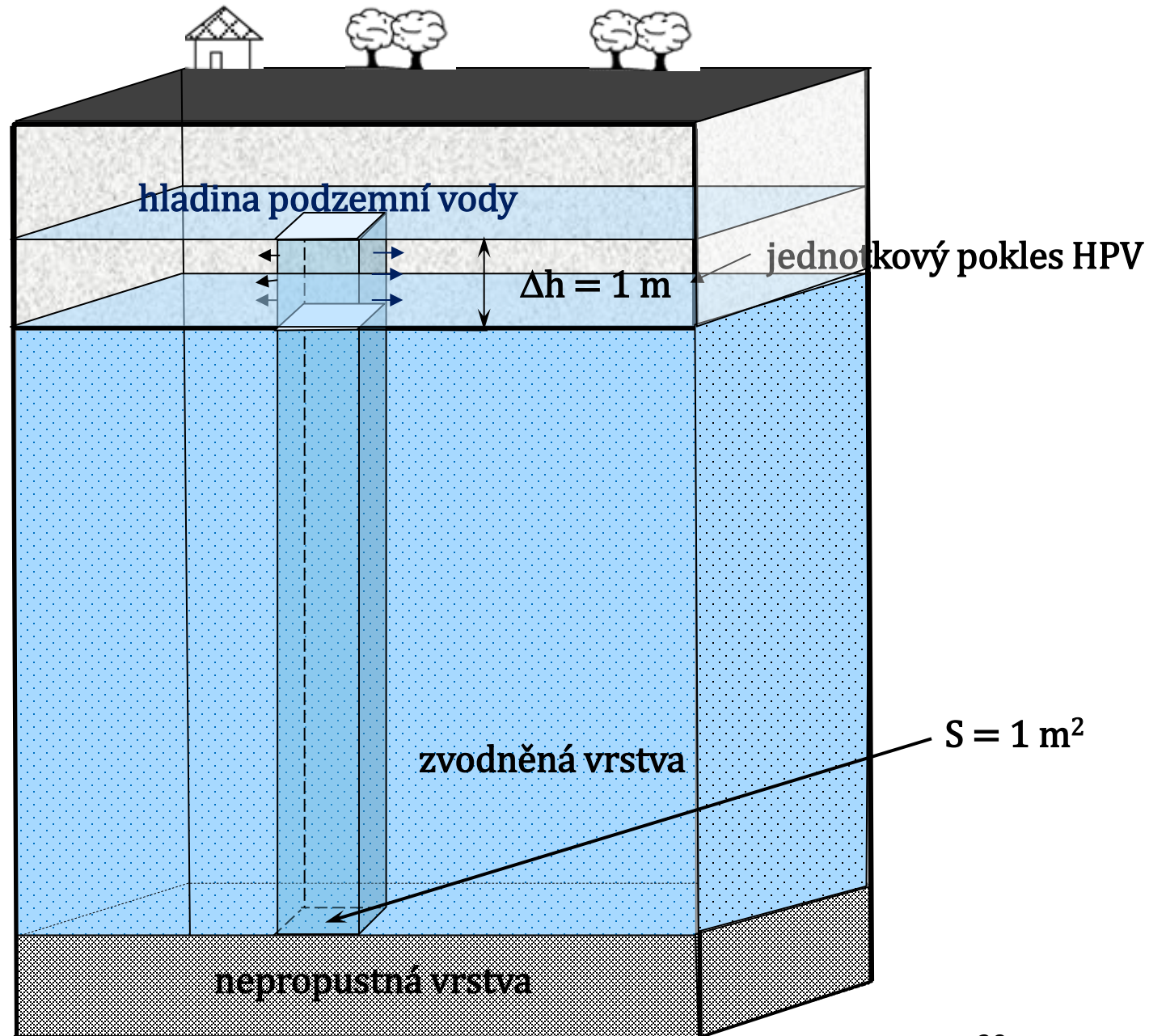
$$\text{Volná storativita} = S_y$$

$$S_v = \frac{\Delta V}{S \Delta h}$$

$\Delta V$  – objem vody, která odteče z vytčeného objemu při poklesu HPV o 1m vlivem gravitace ( $L^3$ )

$S$  – plocha podstavy vytčeného objemu ( $L^2$ )

$\Delta h$  – jednotkový pokles HPV (L)



# VOLNÁ STORATIVITA x SPECIFICKÁ RETENCE

## „SPECIFICKÁ VOLNÁ STORATIVITA“

-je poměr objemu vody odteklé vlivem gravitace k celkovému objemu nasycené zeminy

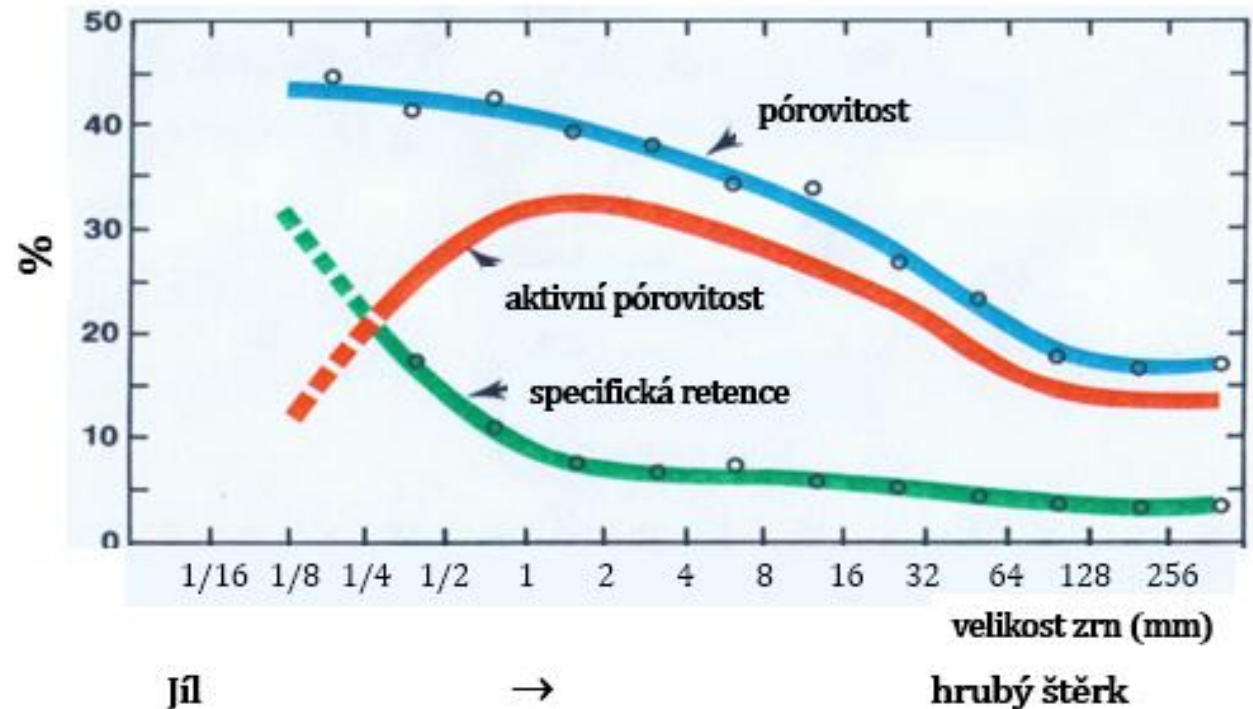
$$S_y = \frac{\text{drénovaný objem } (V_d)}{\text{celkový objem } (V_t)}$$

## „SPECIFICKÁ RETENCE“

- je poměr objemu vody, který po odtoku vlivem gravitace zůstává v zemině ku celkovému objemu nasycené zeminy

$$S_r = \frac{\text{zůstatkový objem vody v zemině } (V_r)}{\text{celkový objem } (V_t)}$$

$$p = S_y + S_r$$



## STORATIVITA (napjatá zvědeň)

- Zvodněná vrstva s  
napjatou hladinou

**Pružná storativita** =  $S_p$

$$S_p = \frac{\Delta V}{S \Delta h}$$

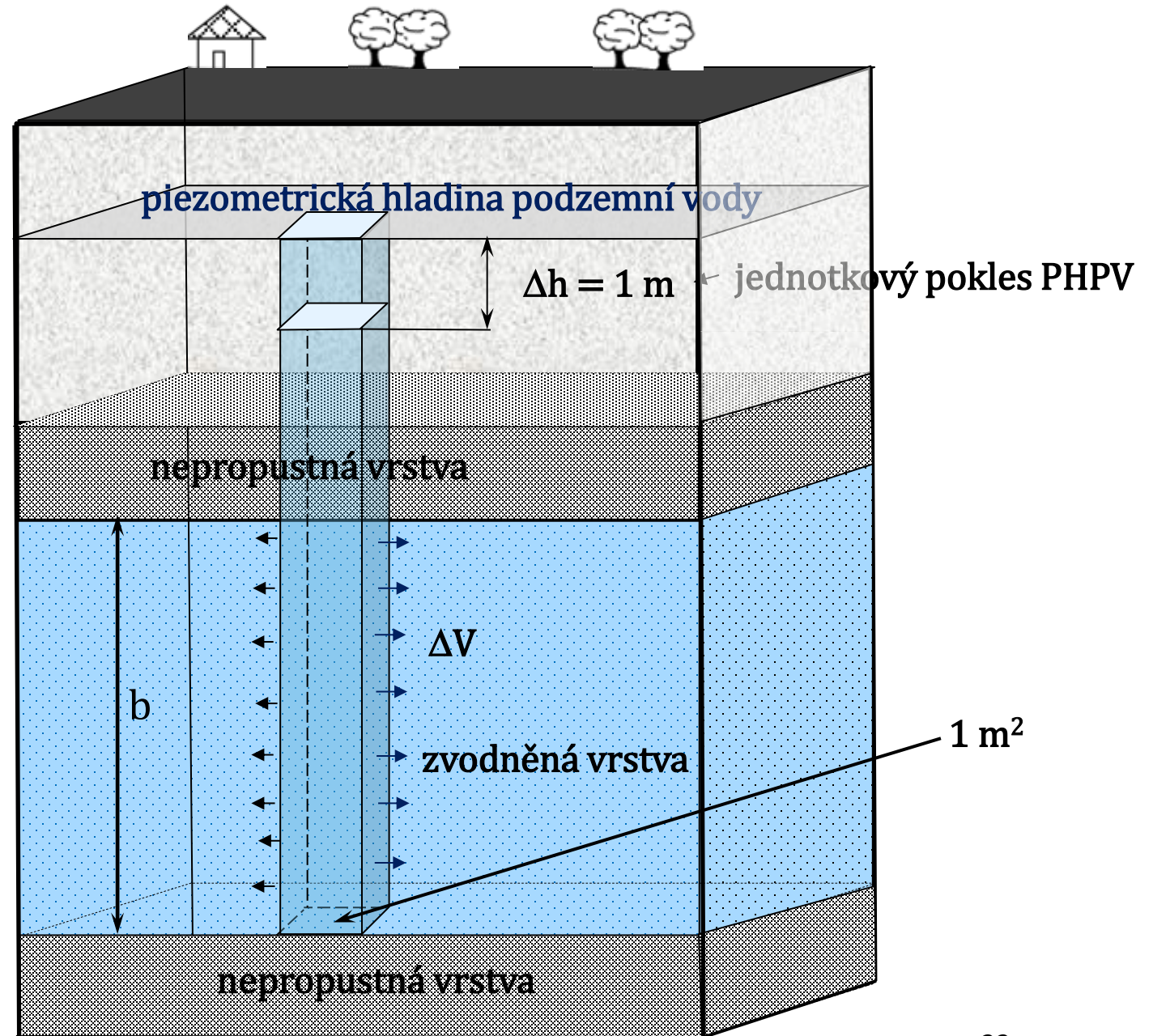
$\Delta V$  – objem vody, která odteče  
z vytčeného objemu při  
poklesu PHPV o 1m ( $L^3$ )

$S$  – plocha podstavy vytčeného  
objemu ( $L^2$ )

$\Delta h$  – jednotkový pokles PHPV (L)

Způsobují dva mechanismy

- 1) **expanzí vody způsobené poklesem p**
- 2) **zhutněním ZV vlivem**



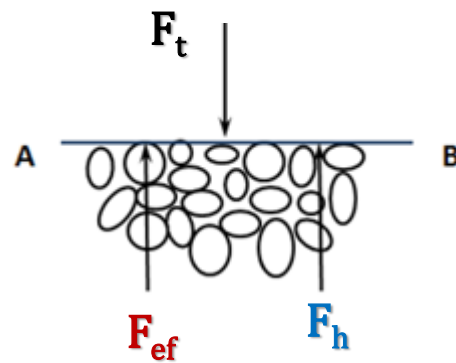
# SPECIFICKÁ STORATIVITA- $S_s$

## Zvodněná vrstva s **napjatou hladinou**

Napětí uvnitř zvodnělé vrstvy – **Terzaghi**, 1925 – zavedení **efektivního napětí  $\sigma_{ef}$**  – mezi pevnými zrny porézného prostředí



Karl von Terzaghi



Síly působící na vodorovný řez zvodnělou vrstvou (A) – (B)

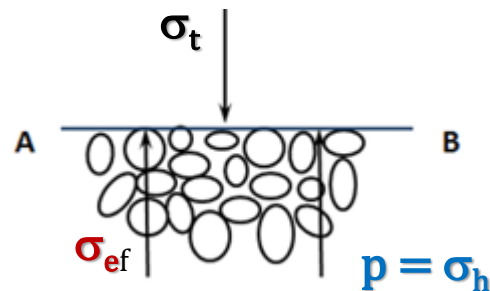
$$F_t = F_{ef} - F_h$$

$F_t$  – celková síla nadloží nad (A) – (B)

$F_{ef}$  – síla uvnitř pevných zrn pod (A) – (B)

$F_h$  – hydrostatická síla pod (A) – (B)

Vyjádříme síly na jednotku plochy (celkové napětí, efektivní napětí a tlak), potom:



$$\sigma_t = \sigma_{ef} + p$$

Pro elementární veličiny:

$$d\sigma_t = d\sigma_{ef} + dp$$

Předpokládá se, že celkové napětí od nadloží se mění zanedbatelně (při malých změnách hydrostatického tlaku). Potom každá změna v tlaku způsobuje opačnou změnu v efektivním napětí

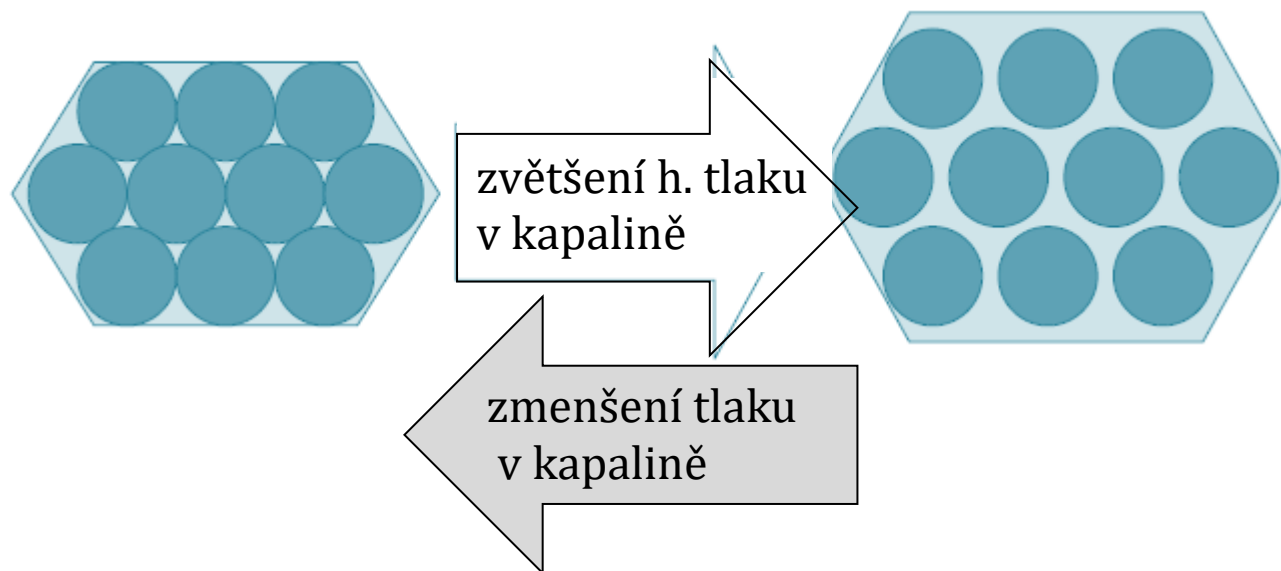
$$d\sigma_t \rightarrow 0$$

$$d\sigma_t = d\sigma_{ef} + dp \rightarrow d\sigma_{ef} + dp = 0$$

Pokles v hydrostatickém tlaku způsobí, že na pevná zrna působí větší efektivní napětí:

$$dp = - d\sigma_e$$

Zvýšení hydrostatického tlaku způsobí, že se zrna přeskupí



# SPECIFICKÁ STORATIVITA, $S_s$

A. Stlačitelnost vody  $dV_w = -\beta_w \cdot V_w dp$

$n$ - pórovitost

$dV_w$  - změna objemu při zvýšení tlaku o  $dp$

$V_w$  - objem za tlaku  $p$

Pro zvodněnou porézní vrstvu je pórovitost

$n = \frac{V_w}{V_t} \Rightarrow$  odkud vyjádříme objem vody ve vzorku  $V_w = nV_t$

$p = \rho g h \dots dp = \rho g dh$

$dV_w = -\beta_w \cdot V_w dp = -\beta_w (n V_t)(\rho g dh)$

Pro jednotkový objem a jednotkový pokles piezometrické hladiny  $V_T = 1$  a  $dh = -1$

$dV_w = -\beta_w (n V_t)(\rho g dh) = \beta_w n \rho g$

$dV_w$  = objem vody „produkovaný“ expanzí vody způsobené snížením hydrostatického tlaku  $p$

# SPECIFICKÁ STORATIVITA, $S_s$

## B. STLAČITELNOST ZVODNĚNÉ VRSTVY

$$-dV_t = \alpha V_t d\sigma_{ef}$$
$$V_t = V_w + V_s$$
$$dV_t = dV_w + dV_s$$

$dV_s \rightarrow 0$   
pevná část

$dV_t = dV_w$  Pro napjatou zvodněnou vrstvu  $dV_w = -dV_t$

Záporné znaménko, protože objemová redukce  $dV_t$  je záporná, ale množství vody produkované  $dV_w$  je kladné

$$dV_w = \alpha V_t d\sigma_{ef}$$
$$d\sigma_{ef} = -\rho g dh$$

$$dV_w = \alpha V_t d\sigma_{ef} = -\alpha V_t \rho g dh$$

Jednotkový objem zvodněné vrstvyifer  $V_T = 1$  Jednotkový pokles piez. hladiny  $dh = -1$

$$dV_w = \alpha \rho g$$

## SPECIFICKÁ STORATIVITA, $S_s$

$$dV_w = \alpha \rho g \quad dV_w = \beta_w n \rho g$$

Voda je z vytčeného objemu uvolněna při poklesu piezometrické výšky  $h$  dvěma mechanismy **1) expanzí vody způsobené poklesem  $p$**  **2) zhutněním ZV vlivem nárůstu efektivního napětí  $\sigma_{ef}$**

$$S_s = \alpha \rho g + \beta_w n \rho g$$

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta_w) \quad (L^{-1})$$

where  $\alpha$  - koeficient stlačitelnosti ZV,  
 $\beta_w$  - koeficient stlačitelnosti vody  
 $n$  - pórovitost  
 $\rho$  - měrná hmotnost vody  
 $g$  - gravitační zrychlení

Celková storativita potom je. :

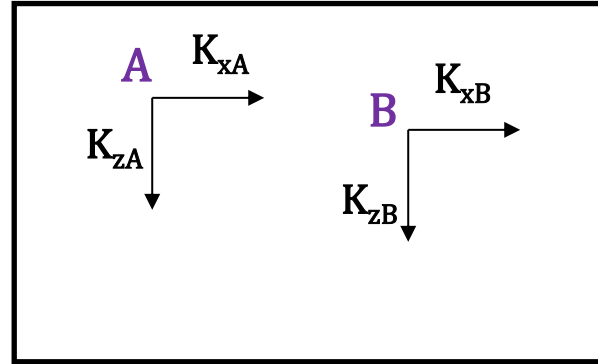
$$S = S_s \cdot b$$

$b$  - výška ZV (kolektoru)

# HOMOGENITA, IZOTROPIE, HETEROGENITA, ANIZOTROPIE

- **Homogenní zvodněná vrstva**
  - Vlastnost stejná ve všech bodech
- **Heterogenní ZV**
  - Vlastnost je různá ve všech bodech
- **Izotropní ZV**
  - Vlastnost je stejná v různých směrech
- **Anizotropní ZV**
  - Vlastnost je různá v různých směrech
- Často výsledkem stratifikace během sedimentace

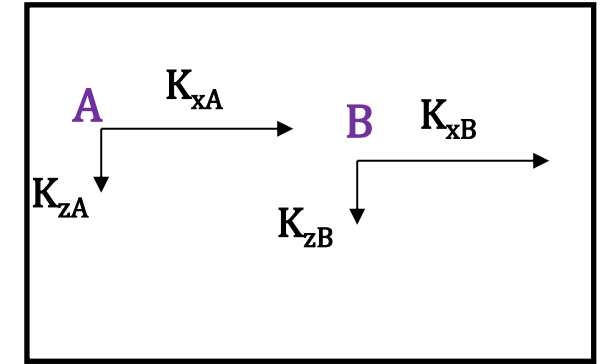
$$K_{\text{horizontální}} > K_{\text{vertikální}}$$



### 1. Homogenní, izotropní

$$K_{xA} = K_{xB} \quad K_{xA} = K_{zA}$$

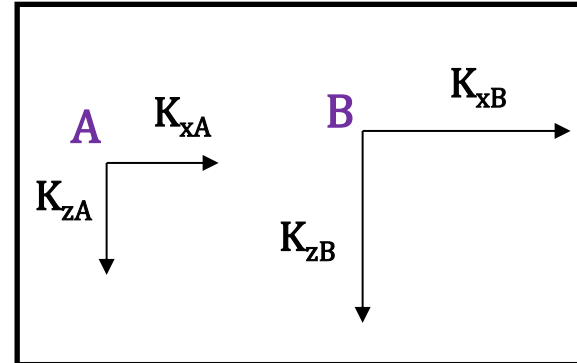
$$K_{zA} = K_{zB} \quad K_{xB} = K_{zB}$$



### 2. Homogenní, anizotropní

$$K_{xA} = K_{xB} \quad K_{xA} \neq K_{zA}$$

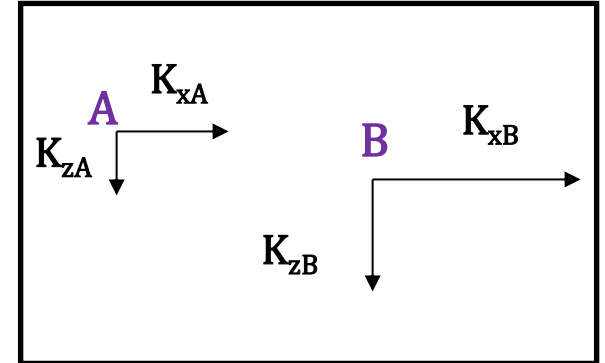
$$K_{zA} = K_{zB} \quad K_{xB} \neq K_{zB}$$



### 3. Heterogenní, izotropní

$$K_{xA} \neq K_{xB} \quad K_{xA} = K_{zA}$$

$$K_{zA} \neq K_{zB} \quad K_{xB} = K_{zB}$$



### 4. Heterogenní, anizotropní

$$K_{xA} \neq K_{xB} \quad K_{xA} \neq K_{zA}$$

$$K_{zA} \neq K_{zB} \quad K_{xB} \neq K_{zB}$$

## **HYDRODYNAMIKA**

# **PROUDĚNÍ KAPALINY V PORÉZNÍM PROSTŘEDÍ**

## CELKOVÁ ENERGIE

$$E = \frac{mv^2}{2} + mgh + mg\left(\frac{p}{\rho g}\right) \quad \Rightarrow \quad E = \frac{mv^2}{2} + mgh + m\frac{p}{\rho}$$

## Bernoulliho rovnice

Proudění ideální kapaliny – součet všech členů je konstantní

$$\frac{v^2}{2g} + h + \frac{p}{\rho g} = \text{konst.}$$

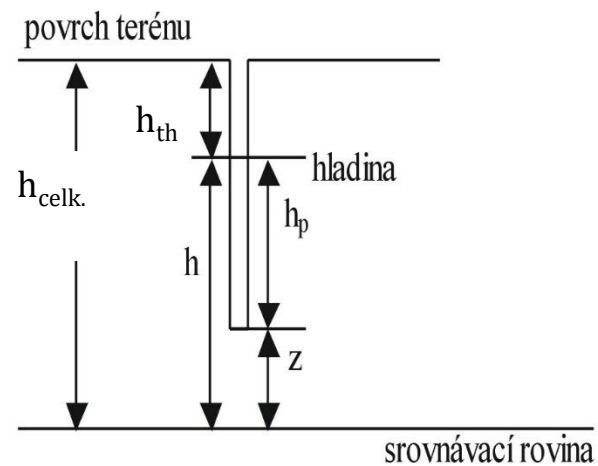
$$p = p_v + \rho gh$$

hydraulická výška

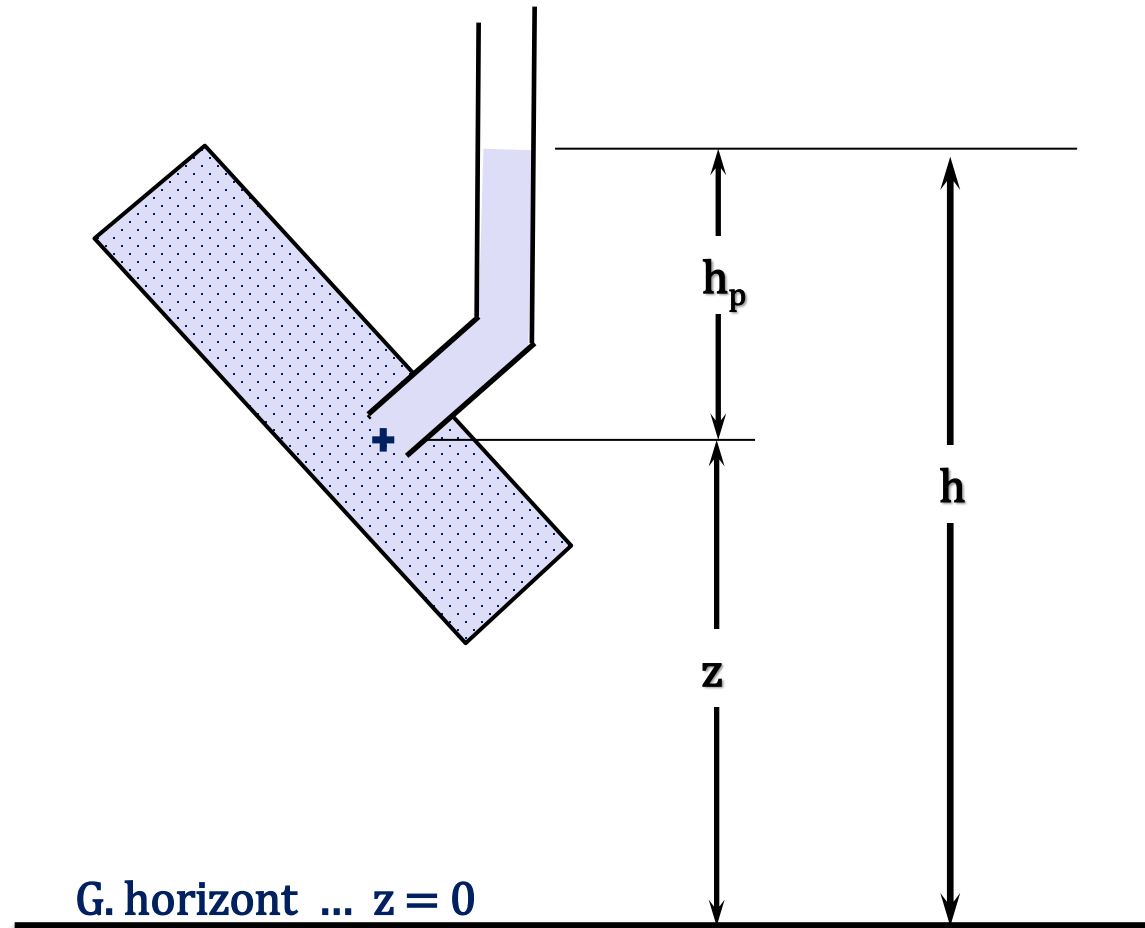
$$h = z + h_p$$

jednotky [ L ] = [ m ]

→ hydraulická výška



# HYDRAULICKÁ VÝŠKA



$h_p$  = tlaková výška ( $p/\rho g$ )

$z$  = polohová  
geodetická výška

$h = h_p + z$  = celková  
(hydraulická) výška

## HYDRAULICKÁ VÝŠKA

celková výška = polohová výška + tlak. výška

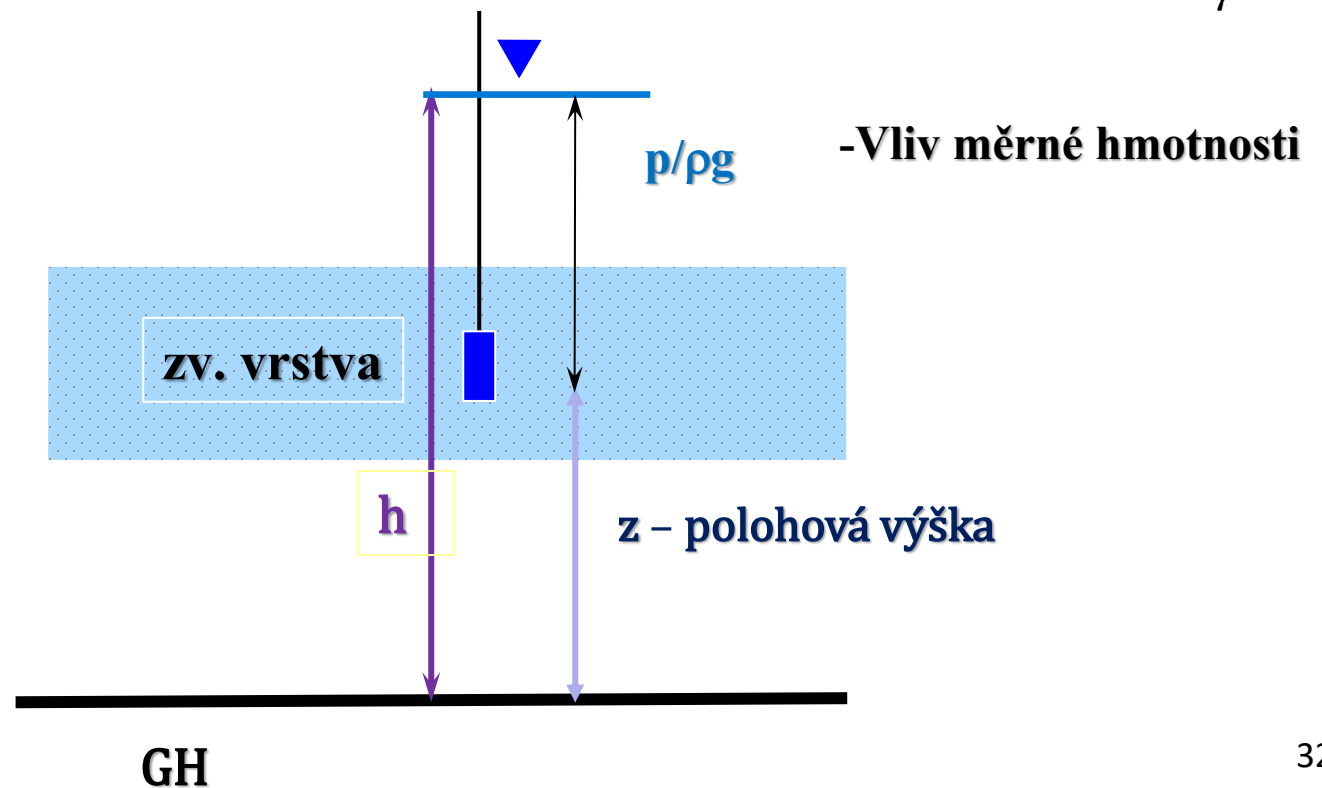
tlak. výška závisí na měrné hmotnosti kapaliny -

$$h = z + h_p$$



$$h = z + \frac{p}{\gamma}$$

$$h = z + \frac{p}{\rho g}$$

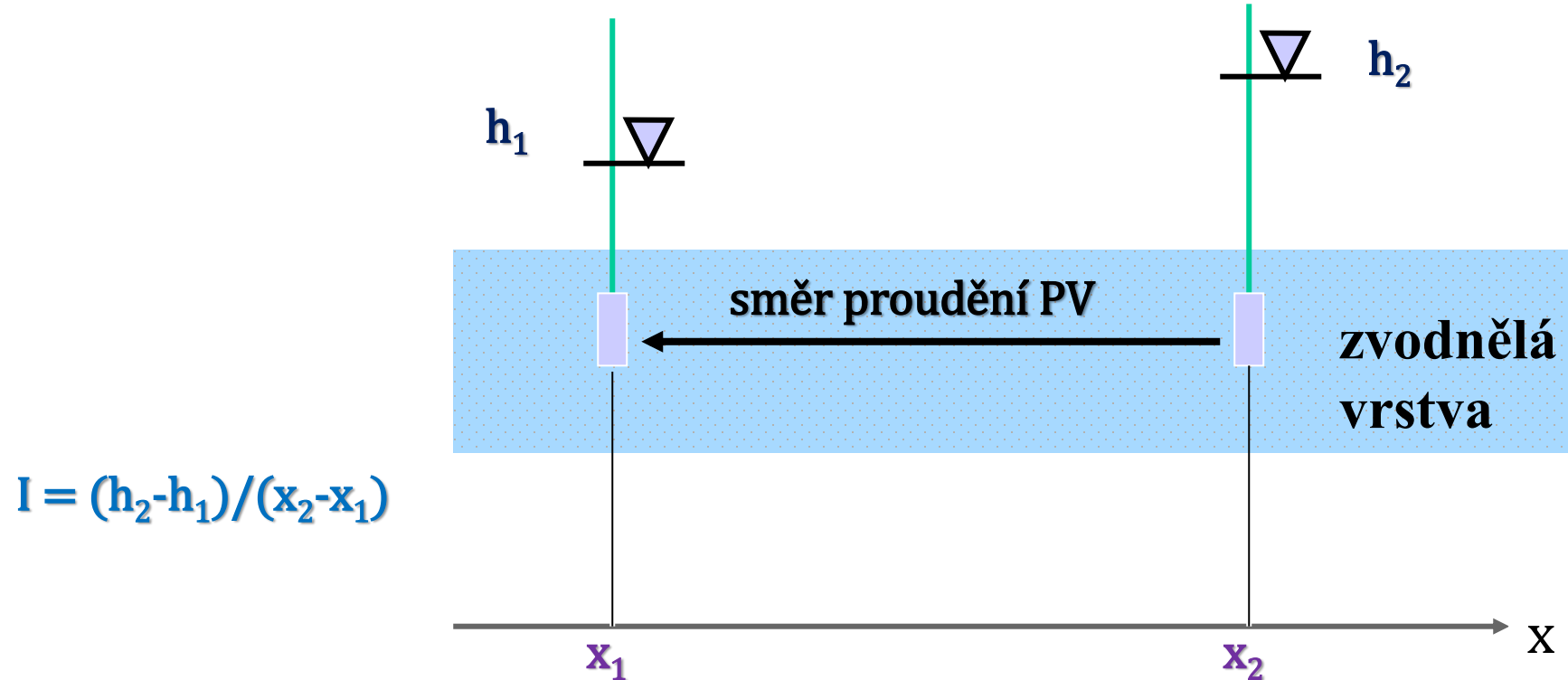


## SMĚR PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

**Hydraulický gradient** ( změna tlak. výšky)

proudění od vyšší hladiny k nižší poloze hladiny

( $dh/dz$ ,  $\partial h/\partial x$ ,  $\nabla h$ )



## ZTRÁTA TŘENÍM V PORÉZNÍM PROSTŘEDÍ

- **Piezometrická** (hydraulická) výška

$$h_1 = \frac{p_1}{\gamma} + z_1$$

- **Energetická ztráta** při proudění v porézním prostředí

$$\cancel{\frac{v_1^2}{2g}} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \cancel{\frac{v_2^2}{2g}} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_f$$

- Energetická rovnice

- **Zanedbáme rychlostní výšku**

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_f$$

- **Proudění** probíhá vždy **od větší hydraulické k menší hydraulické výšce**

$$h_f = \left( \frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) = h_1 - h_2 = \Delta h$$

## LINEÁRNÍ TRANSPORTNÍ ZÁKONY

- **Fourierův z.** – přenos tepla je z místa s větší teplotou do místa s menší teplotou –  $dT/dx$  – teplotní gradient;  $\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti



Jean B. J. Fourier  
1768-1830

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

- **Ohmův z.** – El. Proud je přenášen z místa většího el. napětí do místa menšího el. napětí –  $dV/dx$  – gradient el. napětí



Georg Simon Ohm  
1789-1854

$$I = -\frac{1}{\rho} A \frac{dV}{dx}$$

- **Fickův z.** – hmota je přenášena z místa vyšší koncentrace do místa s menší koncentrací –  $dc/dx$  – koncentrační gradient



Adolf Eugen Fick  
1829-1901

$$J = -D A \frac{dc}{dx}$$

- **Darcyho z.** - ???



Henry Darcy  
1803 - 1858

• ???

# DARYHO ZÁKON

- Proudění vody zvodněnou vrstvou
- Darcyho zákon byl určen na základě experimentálního výzkumu H. Darcyho
- Může být odvozen z Navier-Stokesových rovnic
- Je analogický Fourierovu z., Ohmovu z. a Fickovu z.

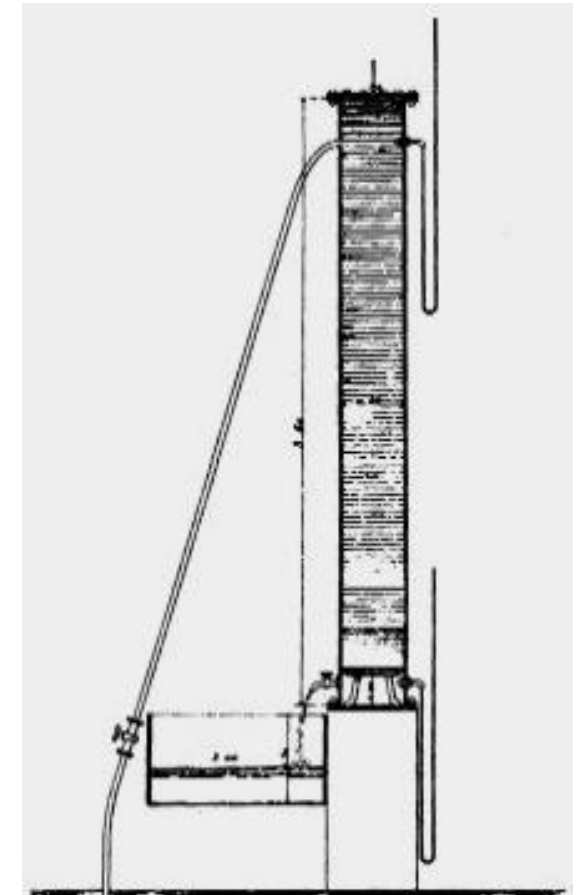


H. Darcy

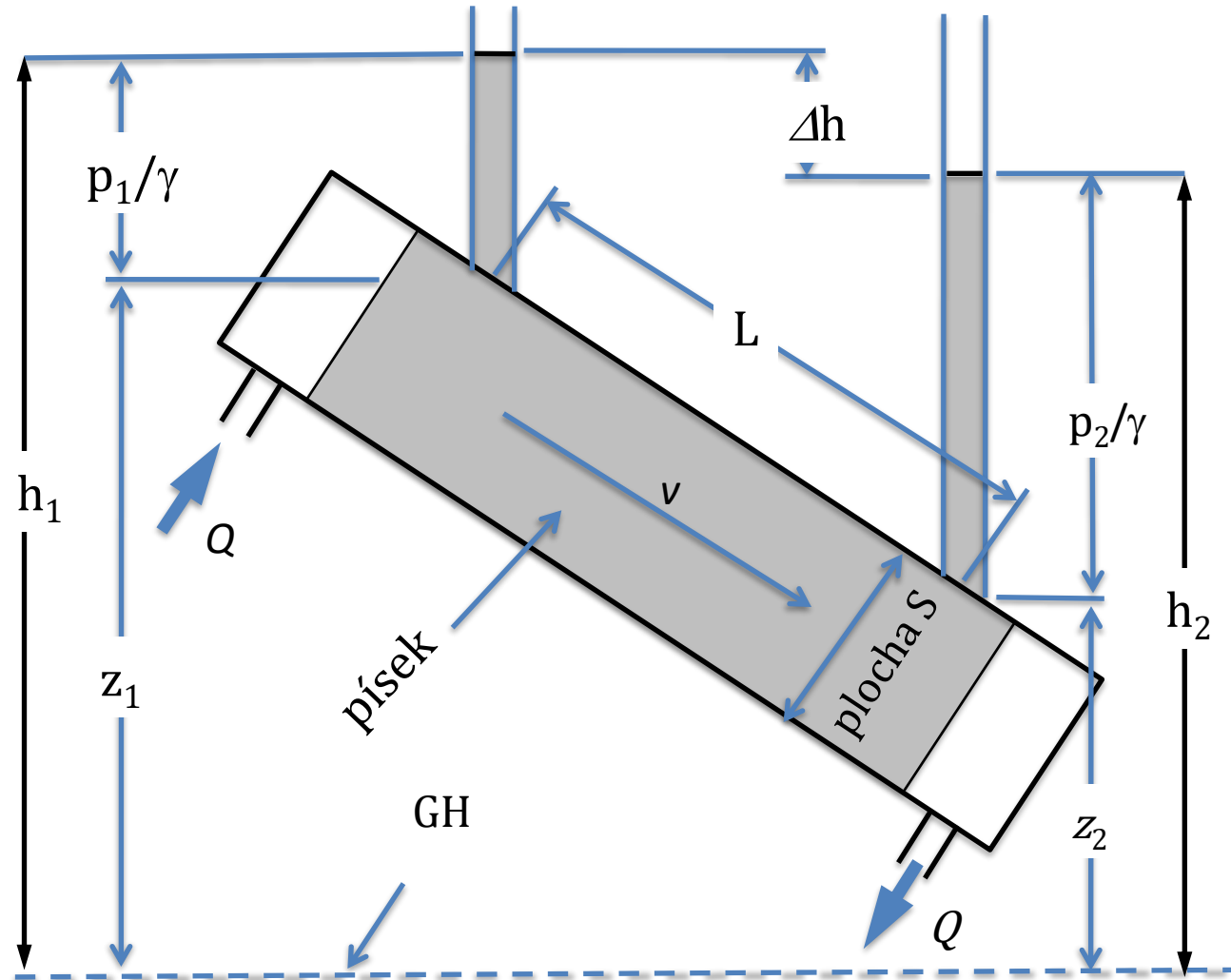
1856 – Zákon pro laminární proudění vody porézním prostředím

Zákon odporu při filtračním proudění (vztah mezi průtokem a piezometrickým spádem)  
Pro rovnoměrné proudění

NUMÉRO de l'EXPÉRIENCE	DURÉE.	DÉBIT MOYEN par minute.	PRESSION MOYENNE		DIFFÉRENCE des pressions.	RAPPORT des VOLUMES sous pressions.	OBSERVATIONS.
			sur le filtre	sous le filtre			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	15'	18,8	P + 9,48	P - 3,60	13,08	1,44	Fortes oscillations dans le manomètre supérieur.
2	15'	18,3	P + 12,88	P 0	12,88	1,42	Id.
3	10'	18,0	P + 9,80	P - 2,78	12,58	1,43	Id.
4	10'	17,4	P + 12,87	P + 0,46	12,41	1,40	Faibles.
5	20'	18,1	P + 12,80	P + 0,19	12,35	1,47	Assez faibles.
6	16'	14,9	P + 8,86	P - 0,83	9,69	1,54	Presque nulles.
7	15'	12,1	P + 12,84	P + 4,40	8,44	1,43	Très-fortes.
8	15'	9,8	P + 6,71	P 0	6,71	1,46	Très-faibles.
9	20'	7,9	P + 12,81	P + 7,03	5,78	1,37	Très-fortes.
10	20'	8,05	P + 5,58	P 0	5,58	1,55	Presque nulles.
11	20'	4,5	P + 9,98	P 0	9,98	1,51	Id.
12	20'	4,15	P + 12,86	P + 9,88	2,98	1,39	Assez fortes. On a déjà expliqué la cause de ces oscillations.



## DARCYHO EXPERIMENT - schéma



- Proudění pískovými filtry
- průtok ( $Q$ ) závisí na
  - $S$  „celá“ plocha průtočného průřezu
  - $h_1 - h_2$  – rozdíl hydraulických výšek
  - $L$  – vzdálenost vstupního a výstupního průřezu

$$Q \propto K \cdot S \frac{h_1 - h_2}{L}$$

rozdíl hydraulických výšek

$$\Delta h = h_2 - h_1$$

specifický průsak resp.  
Darcyho rychlost

$$q = v = \frac{Q}{S} = -K \frac{\Delta h}{L}$$

## DYNAMIKA PODZEMNÍ VODY

- stanovení  $v(x,y,z,t)$ ,  $p(x,y,z,t)$  platí Navier-Stokesovy rovnice - střední rychlost v pórech – statistická hodnota (v plošce  $k$ .)

Skutečná rychlost:

$$v^* = \frac{\Delta Q}{S_p}$$

Filtrační (fiktivní, darcyovská) rychlost

$$v = \frac{\Delta Q}{S} \quad \longrightarrow \quad v = p_a \cdot v^*$$

(při poklesu volné hladiny)

při proudění kapaliny v porézním prostředí

$$\frac{v}{v^*} = \frac{S_p}{S} = p \quad \dots \dots \dots p_{ef}$$

$$\frac{v}{v^*} = p_{ef} \quad \longrightarrow \quad v = p_{ef} v^*$$

$v^*$  - skutečná rychlost ( $L \cdot T^{-1}$ )

$v$  - darcyovská (fiktivní, filtrační rychlost) ( $L \cdot T^{-1}$ )

$p_a$  - aktivní pórovitost

$p_{ef}$  - efektivní pórovitost

$Q$  - průtok ( $L^3 \cdot T^{-1}$ )

$S_p$  - plocha průtočného průřezu (jen póry) ( $L^2$ )

$S$  - celková plocha průtočného průřezu ( $L^2$ )

# LAMINARNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

- laminární
- turbulentní
- Reynoldsovo číslo

$$Re_f = \frac{v d_{10}}{\nu}$$

$v$  - rychlost

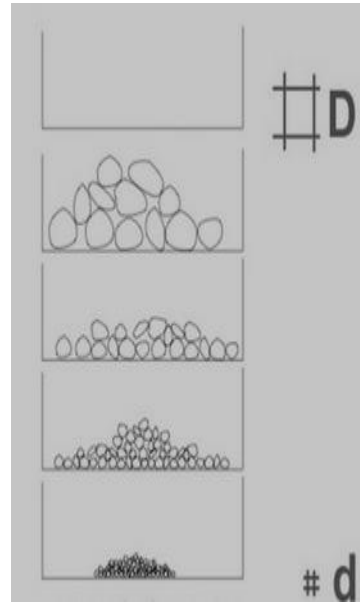
$d_{10(30)}$  = ef. průměr zrna  
 $\nu$  - kinematická viskozita

Kritické Reynoldsovo číslo

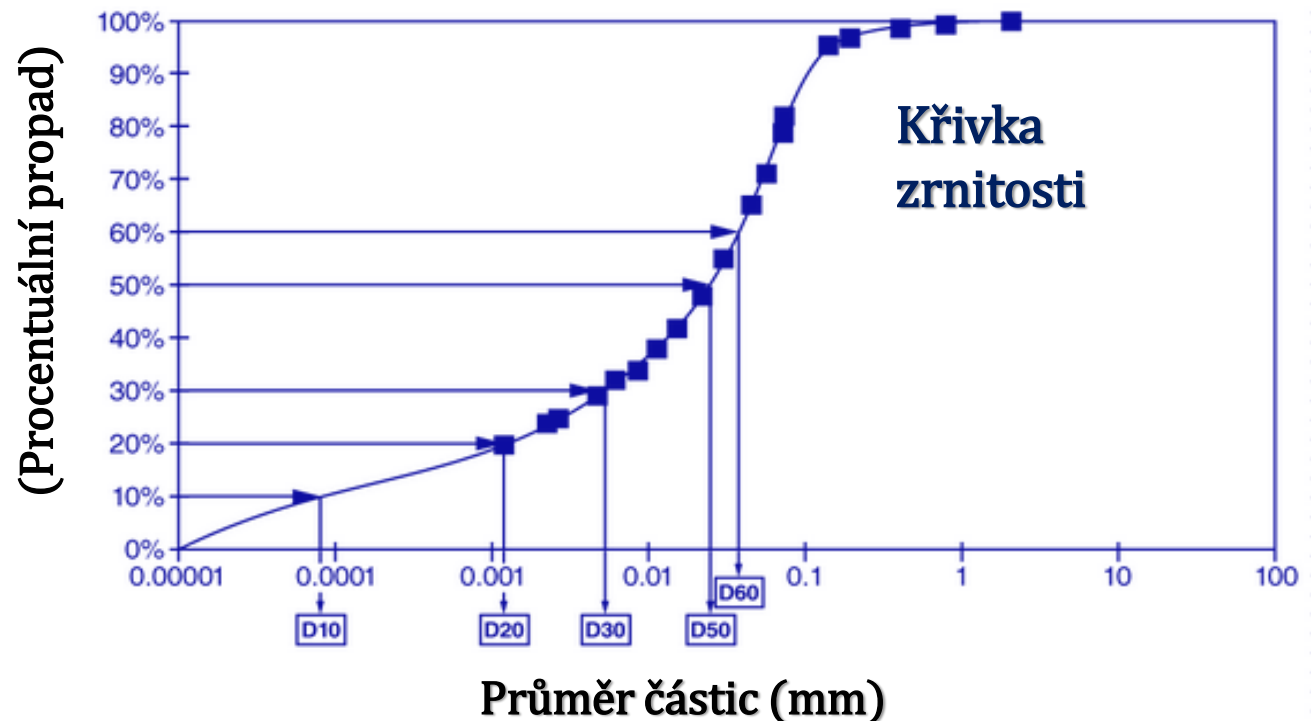
Pro PV  $Re_{KR} = 1$



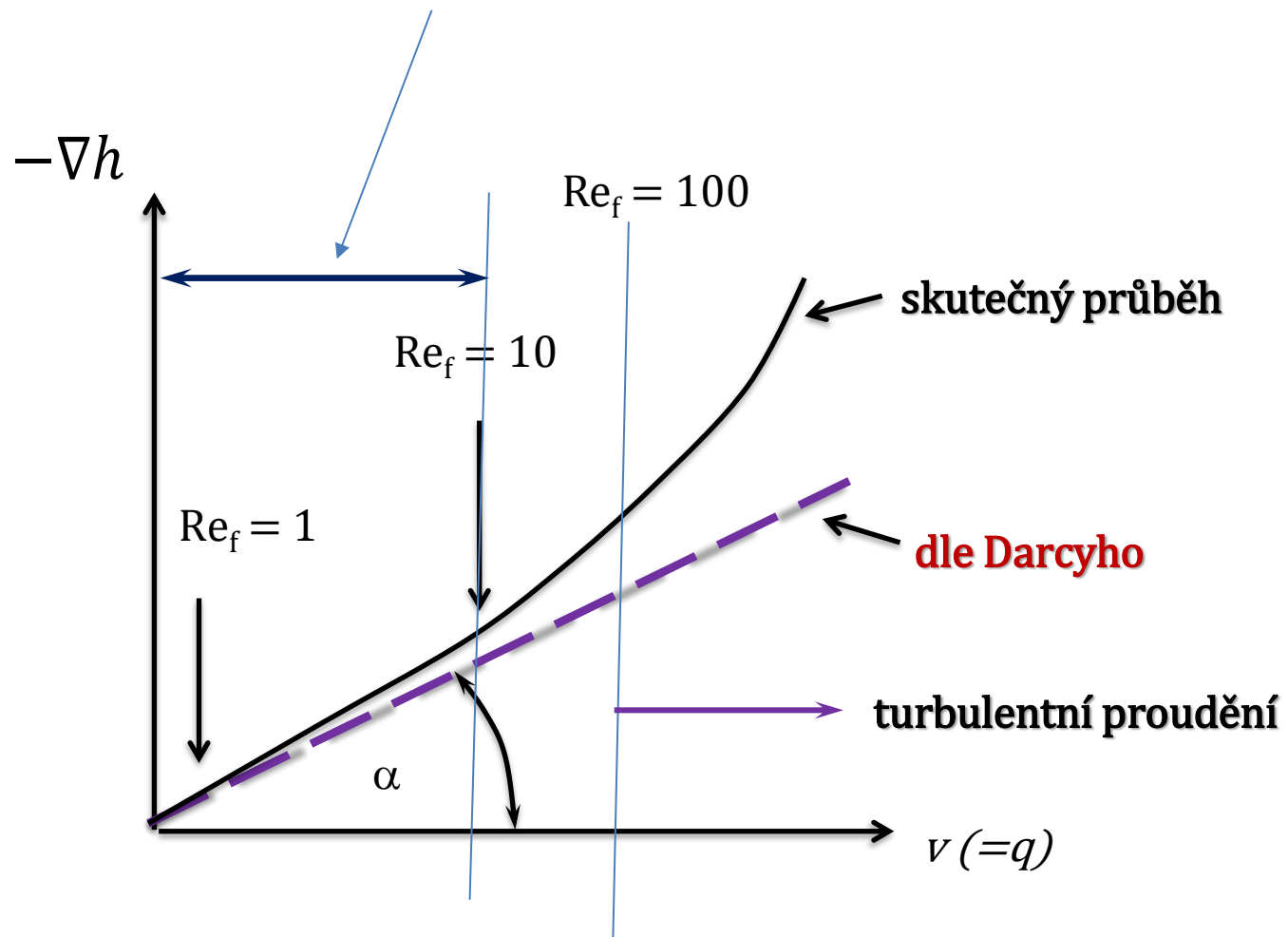
## Sítový rozbor – sada sít s různě velikými oky



- prosévání vzorku o dané hmotnosti sadou normových sít: zváží se zbytky na sítích a určí se hmotnostní podíly. Potom se spočítají jednotlivé propady na sítích. Z těchto hodnot se vykreslí křivka zrnitosti



# PLATNOST DARCYHO VZTAHU



$$Re_f < 10$$
$$\tan^{-1}(\alpha) = (1/K)$$

# PLATNOST DARCYHO VZTAHU

Reynoldsovo filtrační číslo

$$Re_f = \frac{v \cdot d_f}{\mu}$$

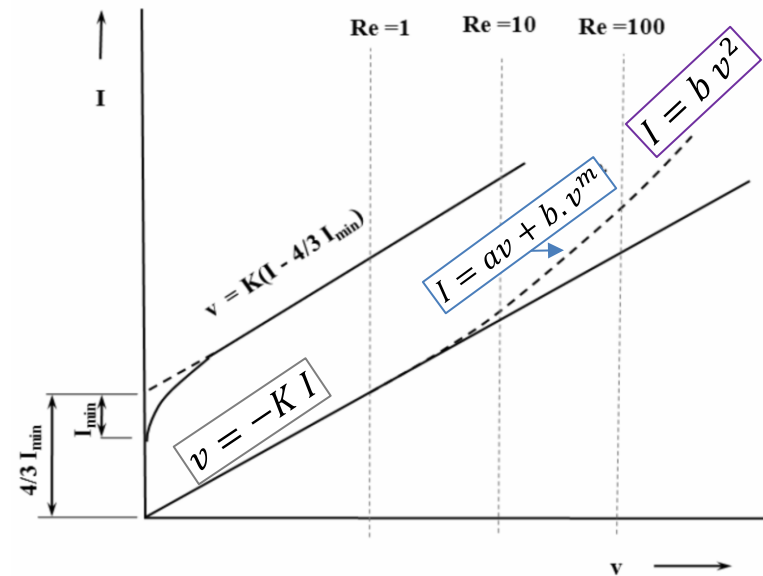
$v$  – rychlost

$d_f$  – specifický průměr pórů (např.  $d_{10}$ )

$\mu$  – dynamická viskozita

$$v = -K I \rightarrow i = -\frac{1}{K} v = av$$

kde  $a = -1/K$



**$Re_f (0 \div 1)$**  – lineární vztah mezi rychlostí a hydraulickým gradientem ... laminární oblast – platí Darcyho vztah  $I = av$

**$Re_f (1 \div 10)$**  ještě lze uvažovat platnost Darcyho vztahu  $I = av$

**$Re_f (10 \div 100)$**  Darcyho vztah neplatí ... jedná se o přechodnou oblast a rovnici je nutné rošířit o nelineární člen

$$I = av + b \cdot v^m$$

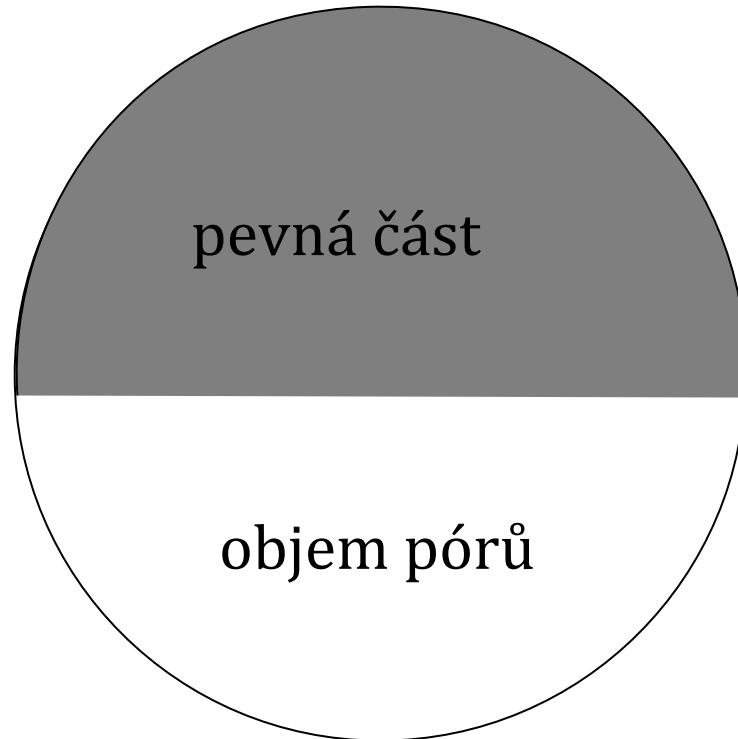
Kde exponent  $m = 1,6 \div 2,0$

Pro  **$Re_f > 100$**  se jedná o turbulentní proudění a vztah mezi hydraulickým gradientem a rychlostí je kvadratický (Darcyho vztah neplatí)

$$I = b v^2$$

# RYCHLOST PROUDĚNÍ KAPALINY V PORÉZNÍM PROSTŘEDÍ

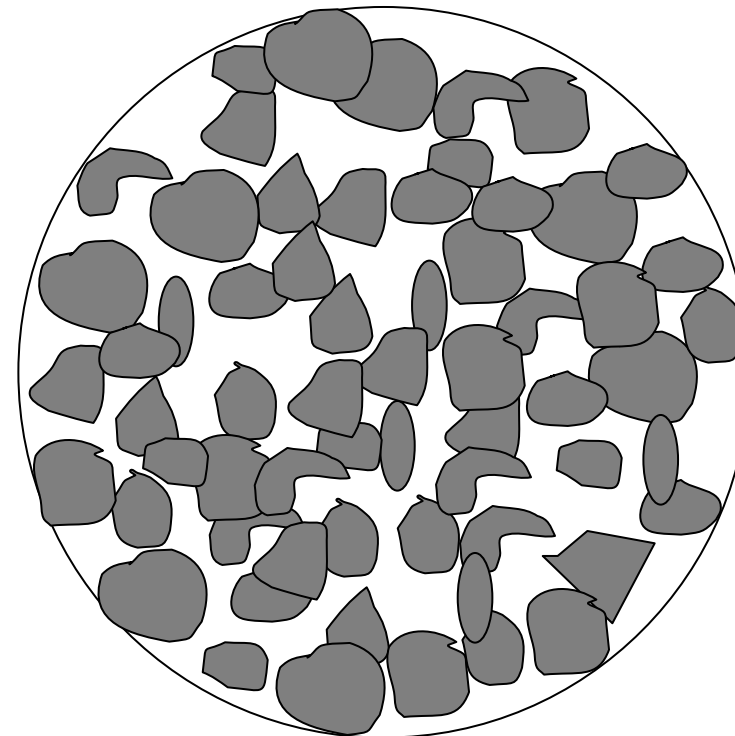
potrubí



“pórovitost” = 0.5

$$v = \frac{Q}{S_x}$$

porézní prostředí



pórovitost = 0.5

$$v = \frac{q}{p_{ef}}$$

## POČÁTEČNÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Řadu jevů v hydraulice podzemních vod popisují základní rovnice:

**rovnice kontinuity a Darcyho zákon**

- Každá rovnice má nekonečné množství řešení
- Pro vybrání jednoho řešení pro daný problém – je nutné doplnit informace neobsažené v rovnici

Jedná se o

- Geometrii oblasti
- Hodnoty fyzikálních parametrů
- Počáteční a okrajové podmínky

Řešíme problém proudění podzemní vody v oblasti  $D$ , hranici tvoří plocha  $S$  (při dvourozměrném proudění se jedná o křivku)

**Počáteční podmínky:**

- Charakterizují stav proudění v oblasti pro počáteční čas  $t=0$

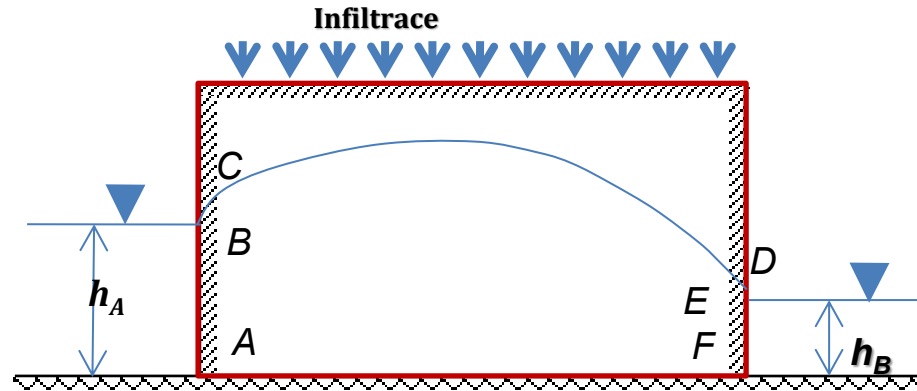
$$H = f(x,y,z,0)$$

( $f$  – známá funkce)

Uplatní se při řešení neustáleného proudění

## OKRAJOVÉ PODMÍNKY

### Vliv okolního prostředí na proudění uvnitř oblasti



**A) stabilní p.** (předepsaná hodnota hydraulické výšky)

$$H = f(x, y, z) \quad \text{nebo} \quad H = g(x, y, z, t) \quad \text{na ploše } S$$

$f, g$  – známé funkce

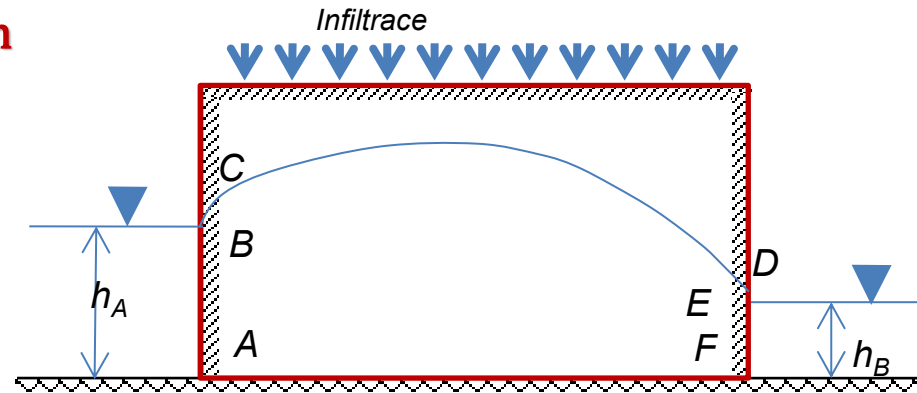
$f$  – stacionární okrajová podmínka;  $g$  – okrajová podmínka závislá na čase

- **Okr. podmínka 1. druhu** – Dirichletova okrajová podmínka

(AB) a (EF)

**B) Hranice s předepsaným tokem**  
( známá hodnota toku ve směru kolmém na hranici)

$v_n = f(x,y,z,t)$  na S  
 $v_n$  - složka rychlosti kolmá k hranici



**Okr. podmínka 2.druhu – Neumanova okrajová podmínka**

(speciálním případem je nepropustná hranice – složka hustoty toku kolmá k hranici)

Je rovna nule (AF)

**C) Polopropustná hranice**

Tam kde oblast proudění je v kontaktu s otevřeným vodním zdrojem, nebo jiným porézním prostředím, ale je oddělena polopropustnou vrstvou

**Smíšená okrajová podmínka – Cauchyho (Newtonova)**

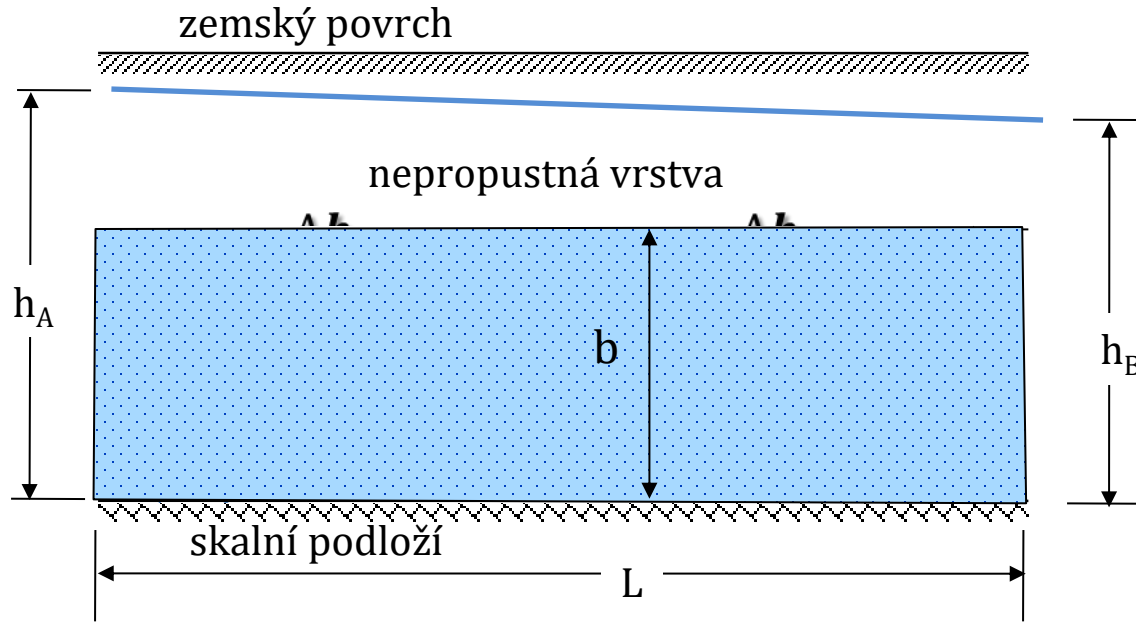
H – hydraulická výška uvnitř oblasti a  $H_0$  – hydraulická výška vně oblasti

Velikost toku kolmo k hranici řešené oblasti je

$$v_n = (H_0 - H) / c \quad c = B / K$$

B- šířka polopropustné vrstvy, K je její hydraulická vodivost a c je odpor vrstvy

# USTÁLENÉ PROUDĚNÍ – zvodnělá vrstva s napjatou hladinou



Darcyho zákon:

$$Q = K \cdot S \frac{\Delta h}{L} = K \cdot S \cdot I$$

Hydraulický gradient

$$I = \frac{dh}{dx}$$

Pro **homogenní, izotropní** prostředí:  
spec. průtok vyjádříme:

$$q = -Kb \frac{dh}{dx}$$

Odkud  
vyjádříme

$$dh = \frac{q}{bK} dx$$



$$\int_{h_A}^{h_B} dh = -\frac{q}{bK} \int_0^L dx$$

$$\begin{aligned} x &= 0 \dots X=L \\ h &= h_A \dots h = h_B \end{aligned}$$

Po integraci a dosazení mezí

$$h_B - h_A = -\frac{q}{bK} L$$

Po úpravě – specifický průsak je

$$q = K b \frac{h_A - h_B}{L}$$

## USTÁLENÉ PROUDĚNÍ – zvodnělá vrstva s volnou hladinou

Specifický průtok na 1 m šířky

$$q = vh = \left(-K \frac{dh}{dx}\right)h$$

Po úpravě

$$qdx = -Khdh$$

Integrací - x ..od 0 do  $x_i$   $h(x)$

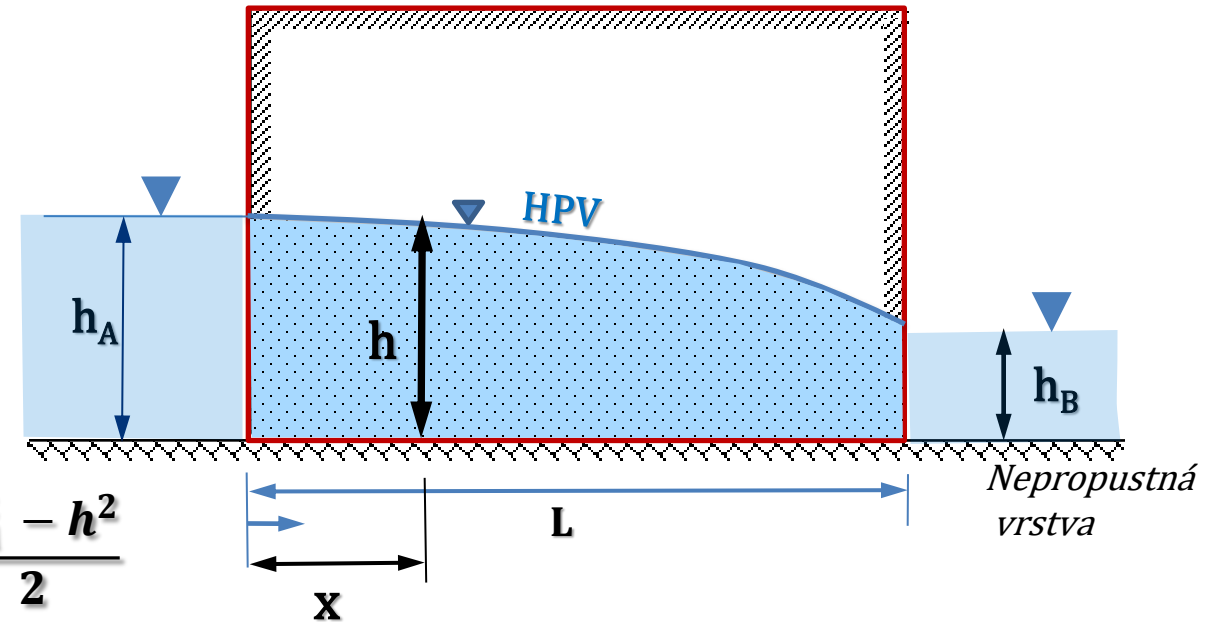
$$q \int_{x=0}^x dx = -K \int_{h=h_A}^h h dh \quad \Rightarrow \quad qx = -K \frac{h_A^2 - h^2}{2}$$

Po úpravě dostáváme vztah pro průběh hladiny

$$h^2 = h_A^2 - \frac{2qx}{K} \quad \Rightarrow \quad h = \sqrt{h_A^2 - \frac{2qx}{K}}$$

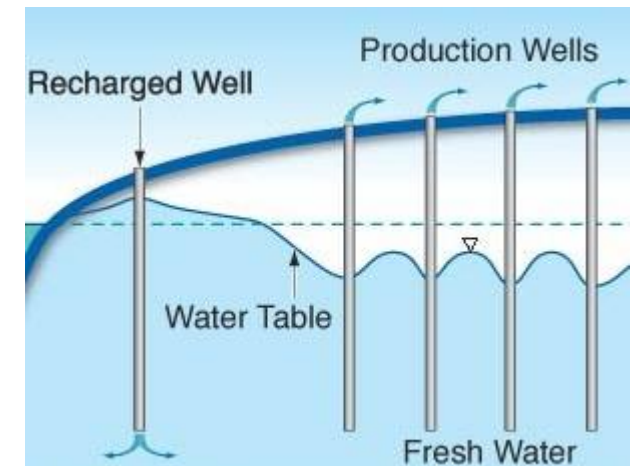
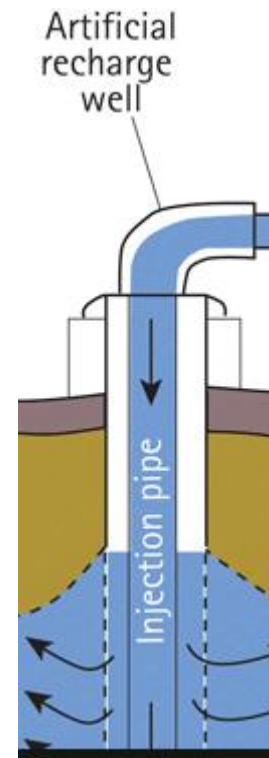
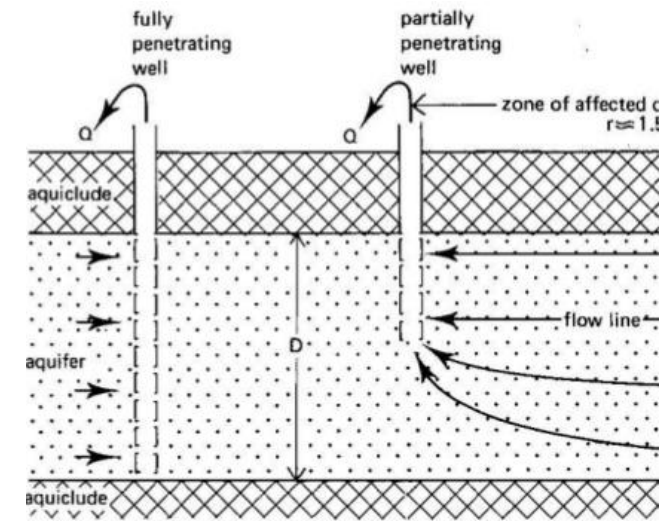
A pro specifický průtok dostáváme z  $x = L$   $h = h_B$

$$q = K \frac{h_A^2 - h_B^2}{2L}$$



## Vrty, studny - dělení

- A) Odebírající vodu z-
- **napjaté ZV**
  - **artézské**
  - **ZV s volnou hladinou**
- A) – **úplné** (zasahují na nepropusné podloží)
- B) - **neúplné** (nezasahují na nepropusné podloží)
- C) (dle technologie zhotovení)
- **kopané**
  - **vrtané**
- D) – **čerpané** (odčerpáváme vodu z vrtu)
- **vsakovací** (načerpáváme vodu do vrtu)
- E) Dle průměru
- **piezometry** 2,5-5cm
  - **pozorovací vrty** 5-10 cm
  - **vrty pro zásobování domácností** 10-40 cm



## Rovnice kontinuity (neustálené proudění)

### Předpoklady:

- plně **nasycená zvodnělá vrstva**

- **homogenní, izotropní** PP

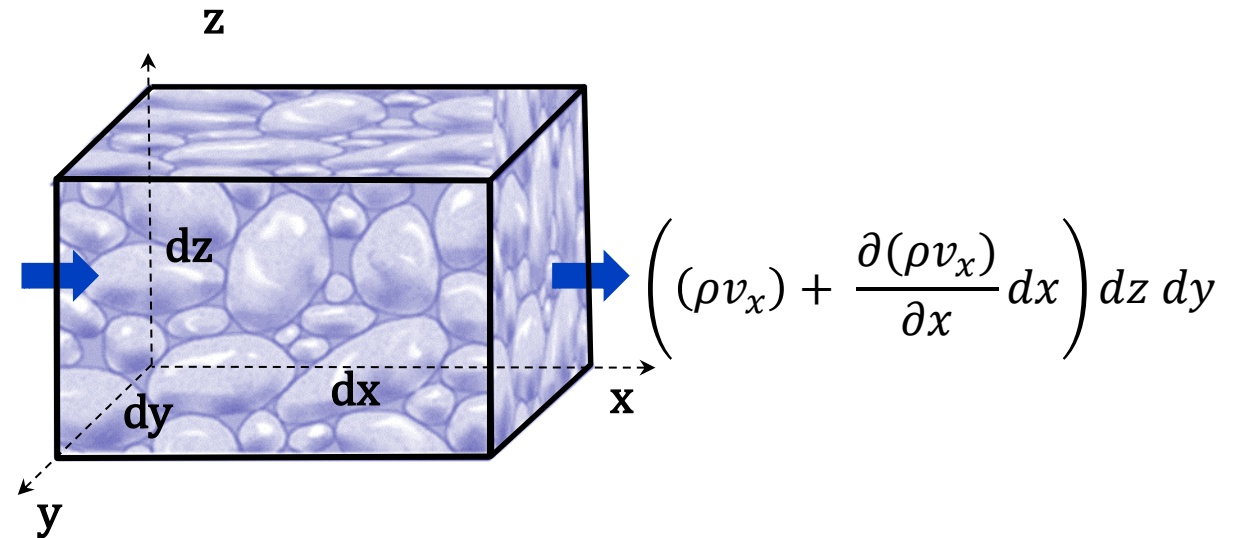
- uvnitř kontrolního objemu není

**zdroj** ani **propad** hmoty  $(\rho v_x) dy dz$

- platí **Darcyho vztah**

- platí **zákon zachování hmoty**

- vše, co vstupuje do kontrolního objemu musí i vystoupit – nebo musí dojít ke změně akumulace



Vstup-výstup=0 (tok hmoty) – pro ustálené proudění

Vstup – výstup = (+/-) změna hmoty vody uvnitř kontrolního objemu

$$(\rho v_x) dy dz - \left( (\rho v_x) + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx \right) dz dy$$

## Rovnice kontinuity (neustálené proudění)

Rozdíl mezi vstupujícím a vystupujícím množstvím vody musí být roven změně množství vody  $m$  v rovnoběžnostěnu, což je způsobeno změnou měrné hmotnosti vody,  $\rho$  v důsledku stlačitelnosti

$$-\left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] dx dy dz dt = \frac{\partial m}{\partial t} dt$$

Změna hmoty uvnitř rovnoběžnostěnu

Pro konstantní výšku zvodnění  $b$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

nebo pro snížení

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

# Radiálně-symetrické proudění k vrtu

Cylindrické souřadnice:  $r, \phi, z$

Souvislost s pravoúhlými souřadnicemi:

$$x = r \cos \phi$$

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2}$$

$$y = r \sin \phi$$

$$\operatorname{tg} \phi = (y/x)$$

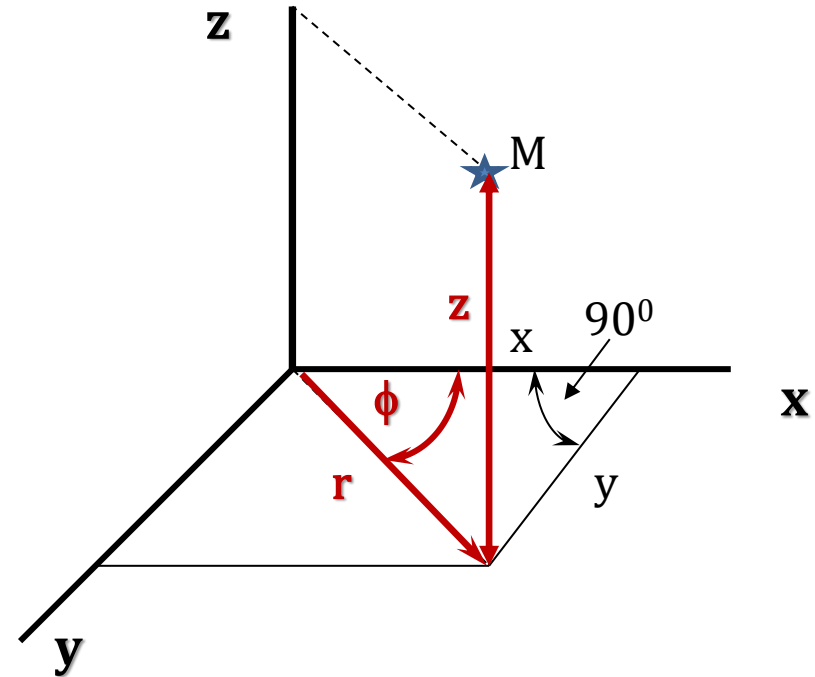
$$z = z$$

$$z = z$$

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t}$$



$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t}$$



## Radiálně-symetrické proudění k vrtu

### Theisovo řešení pro “ideální vrt“

- neuvažujeme **dodatečné odpory** na vrtu a jeho blízkém okolí
- **poloměr** vrtu je nekonečně malý

### Základní rovnice

Parciální diferenciální rovnice axiálně-symetrického proudění podzemní vody s napjatou hladinou v cylindrických souřadnicích

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t}$$

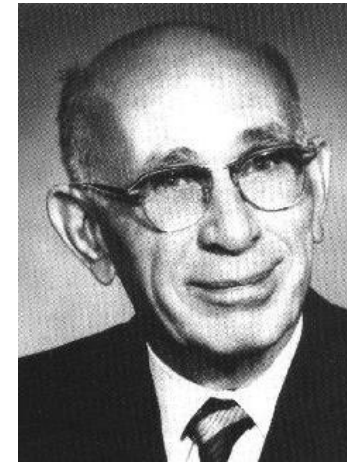
**s** – snížení

**r** – radiální parametr

**S** – storativita

**T** – transmisivita

**t** - čas



**C.V. Theis, 1935**

## Theisovo řešení – základní rovnice neustáleného radiálně-symetrického

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t}$$

### Theis (1935) - předpoklady řešení

- úplný vrt
- napjatá zvodněná vrstva
- jedná se o **homogenní** a **izotropní** zvodnělou vrstvu
- platí **Darcyho vztah** pro filtrační rychlost
- vrt se nachází v **neomezené zvodnělé porézní vrstvě**
- výška zvodnělé vrstvy, **b je konstantní** v celé oblasti
- v čase **t = 0** je **piezometrická výška** hladiny podzemní vody ve všech místech zvodnělé vrstvy **konstantní** a je rovna  $H$ , a rovněž ve vrtu je výška vody  $H$
- **stlačitelnost** kapaliny je **zanedbatelná**
- **koeficienty transmisivity a storativity** jsou **konstantní** v čase a prostoru
- **objem vrtu je zanedbatelně malý** a nemusí být při řešení brán v úvahu
- na vrtu ani v jeho blízkém okolí **nepůsobí dodatečné odpory** (jedná se o tzv. “ideální” vrt)
- **odčerpávané množství vody** z vrtu je **konstantní**

## Řešení základní rovnice neustáleného radiálně symetrického proudění k vrtu: C.V. THEIS, 1935

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad \longrightarrow \quad s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} (-E_i(-u))$$

**r**- radiální vzdálenost od odčerpávaného vrtu

**t**- čas

**s** - snížení

**S** - storativita ZV

**T**- transmisivita ZV

$(-E_i(-u))$   $\implies$  Integrální exponenciální funkce - **W(u)** - Theisova studňová funkce

**u** ... argument studňové funkce

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

**Theisovo řešení**

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$\gamma$  - Eulerovo číslo (0,5776)

$$-E_i(-u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = W(u) = -\gamma - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

## Theisovo řešení

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$-E_i(-u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = W(u) = -0,577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

Pro hodnoty  $1/u > 100$  s chybou menší než 0,25 % lze Theisovu studňovou funkci zjednodušit zanedbáním třetího, čtvrtého a dalších členů na pravé straně na semilogaritmickou aproximaci studňové funkce dle Jacoba (1946)

## Cooper - Jacobova semilogaritmická metoda

$$W(u) \cong -0,577216 - \ln u$$



$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,246Tt}{r^2S}$$

Při převodu na dekadické logaritmy dostáváme tvar

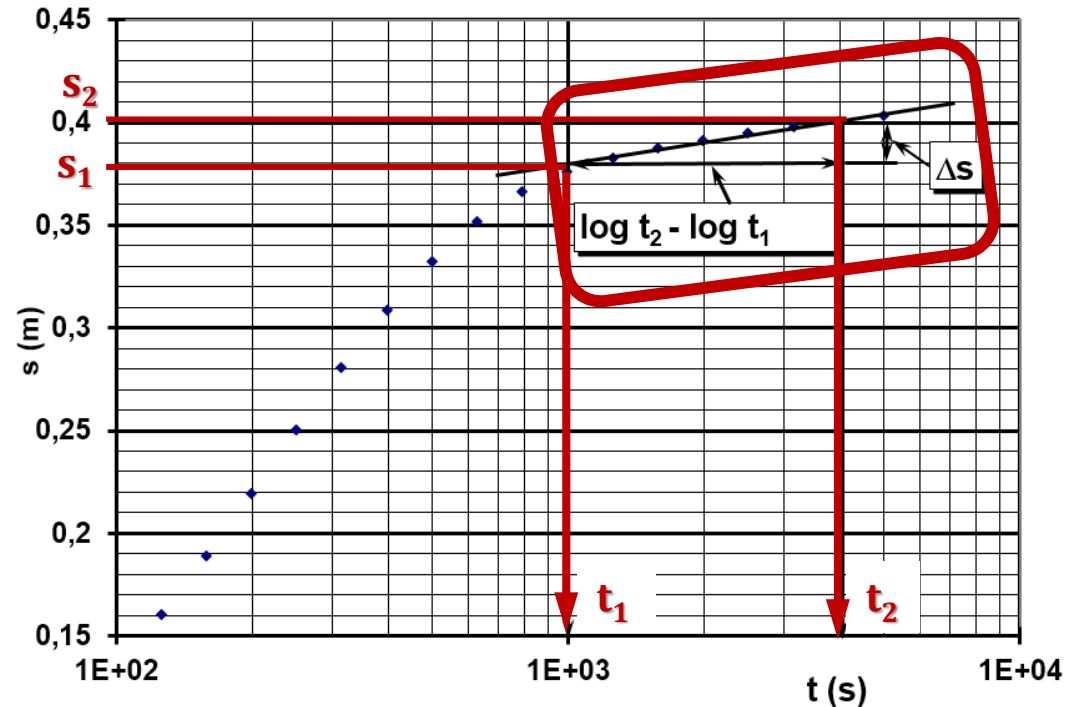
$$s = \frac{2,3 Q}{4\pi T} \log \frac{2,246Tt}{r^2S}$$

nebo

$$s = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,246Tt}{r^2S}$$



## Cooper- Jacobova semilogaritmická metoda (čerpaný vrt)



$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,246Tt}{r^2 S}$$

Použitím dekadických logaritmů

$$s(r, t) = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,246Tt}{r^2 S}$$

**Výpočet transmisivity, T**

Zvolíme 2 časy ( $t_1$  a  $t_2$ ) na Cooper-Jacobově přímkovém úseku a odečteme jim odpovídající snížení  $s_1$  a  $s_2$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,246Tt_2}{r^2 S} - \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,246Tt_1}{r^2 S}$$

$$i = (s_2 - s_1) / (\log t_2 - \log t_1) \quad \Rightarrow \quad T = \frac{0,183Q}{i}$$

## Cooper-Jacobova metoda - určení storativity, $S$ (z dat čerpací zkoušky na pozorovacím vrtu)

$$s(r_p, t) = \frac{0.183Q}{T} \log_{10} \frac{2.246 T t_0}{r_p^2 S}$$

$$0 = \frac{0.183Q}{T} \log_{10} \frac{2.246 T t_0}{r_p^2 S}$$

$$\parallel \quad \parallel$$

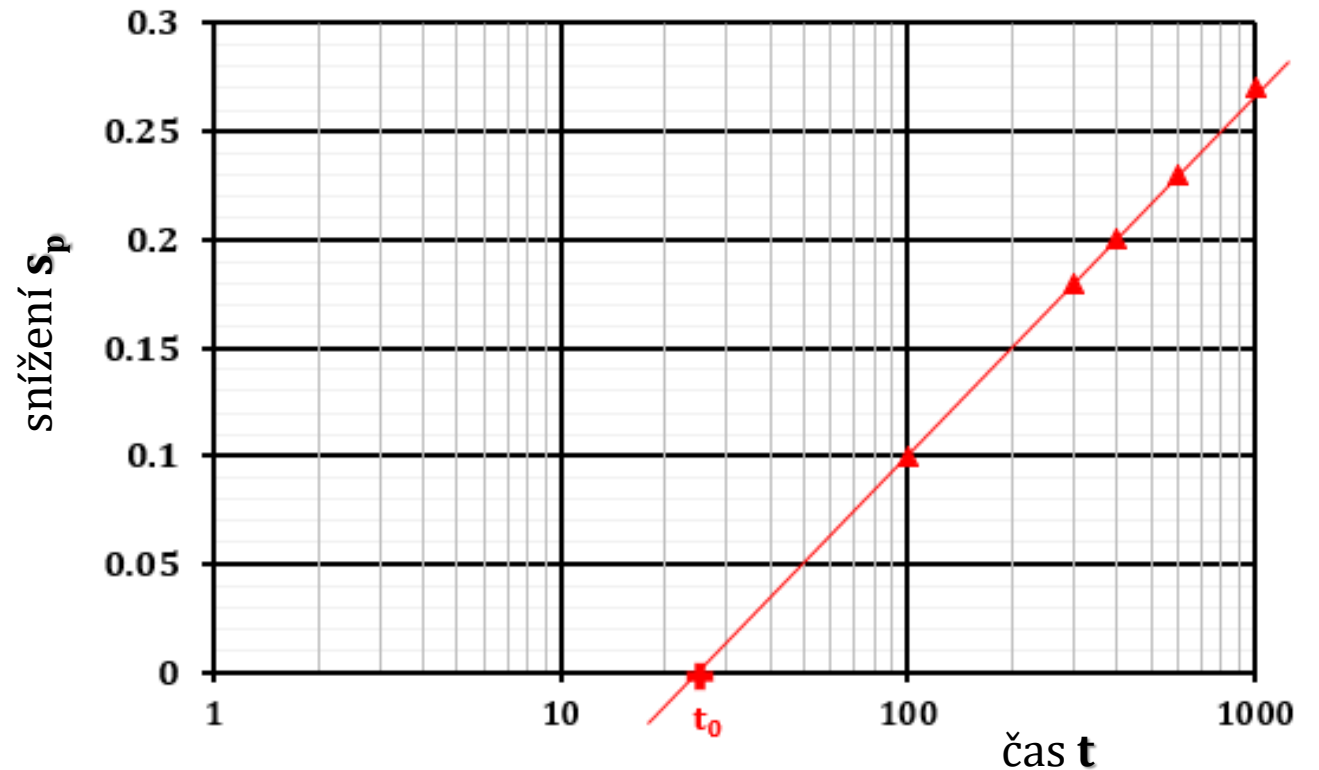
$$0 \quad 0$$

$$0 = \log_{10} \frac{2.246 T t_0}{r_p^2 S}$$

$$1 = \frac{2.246 T t_0}{r_p^2 S}$$

$$S = \frac{2.246 T t_0}{r_p^2}$$

Pozorovací vrt - data z čerpací zkoušky



# **TRANSPORTNÍ PROCESY V HPV**

## **Základní a dlouhodobě znečišťovanou oblastí žp je voda povrchová i podzemní**

Golfský proud- zakalená voda plankton - atmosférický kyslík

**Voda** - poživatina - epidemie chorob

- dodnes 5 mil./rok lidí umírá následkem infekce z vody

Zhoršování čistoty vod - vliv antropogenního tlaku na ŽP ⇒ mezinárodní problém

... existuje horní hranice znečištění - nelze překročit, aby nebyla porušena ekologická rovnováha

### **Vodní problém :**

nerespektuje hranice.. Řešení vyžaduje zvládnout hlediska:

- \* vodohospodářská hlediska
- \* ekologická
- \* technicko-ekonomická
- \* sociálně-politická

Některé typy znečištění vod regionální až globální charakter - řešení jen spoluprací států

mezinárodní smlouvy o ochraně moří a oceánů před znečištěním, dohody o hraničních vodách, [Evropská vodní charta](#).

**Rýn, Temže** (těžké znečištění)

**Labe** - finance vláda (MŽP)

+ projekty sanace zdevastovaných území povrchových dolů, oblastí s chem. těžbou uranové rudy, oblasti s narušeným režimem podz. vod

**ČR - 50% obyv. pitná voda z podzemních zdrojů** - zhoršování kvality - zneč. prům. a zemědělskou činností, rozsáhlé havárie

„ČSSR“ :

- znečištění vod Žitného ostrova **Slovnaft**
- letiště **Ruzyň**
- odkaliště pro ukládání popelovin u tepelných elektráren
- vojenské základny

Od 80. let rozvoj moderních vědních oborů založených plně na poč. technice

- v hydrologii k popisu vodní bilance **SIMULAČNÍ MODELY .. SIM**

na rozdíl od klasických metod

- umožňují **komplexní přístup** k řešené problematice
- **podrobná analýza** působení všech důležitých faktorů
- **variantnost řešení** (+ očekávané dlouhodobé důsledky)

## Zdroje znečištění:

- **bodové** - přímo produkují škodlivé látky ( zdroje se soustředěným odváděním škodlivých látek ( výpust kanalizace, únik ropných látek)
- **liniové** - silniční a železniční tahy, dálkové produktovody, kanalizační stoky
- **plošné (maloplošné, velkoplošné)** :  
přímo neodvádí škodlivé látky ... přispívá ke zhoršení jakosti vod ( zdroje rozptýlené - eroze, splachy terénu, zemědělství a rekreace, exhaláty, skládky, srážky, )

**působení v čase:** - **jednorázové** ( havárie cisteren)

- **trvající zátěž** ( havárie podzemních zásobních rezervoárů)

**další rozlišení:**

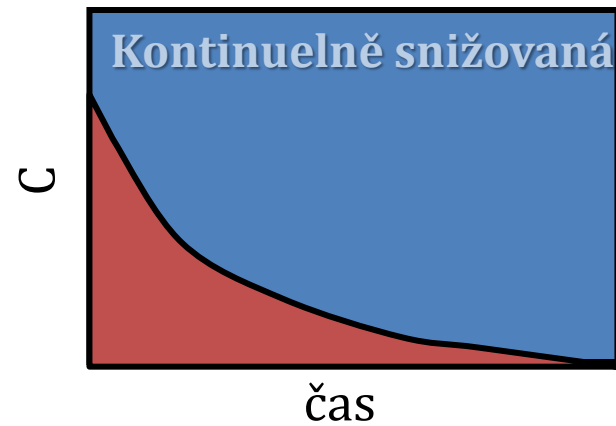
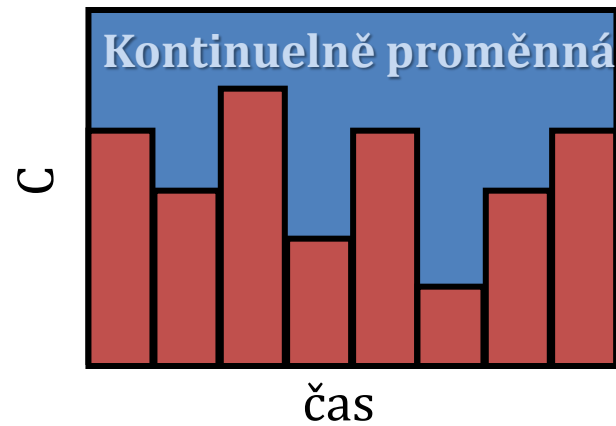
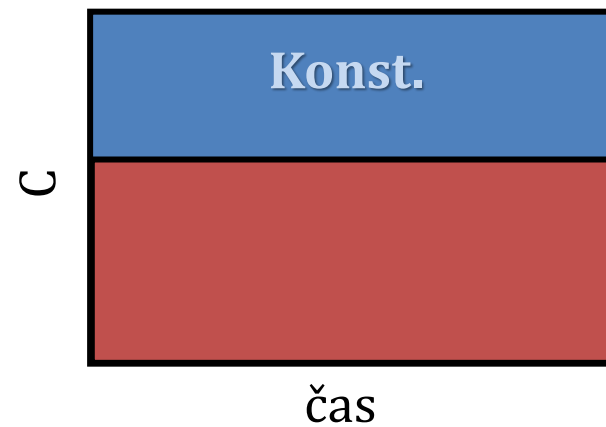
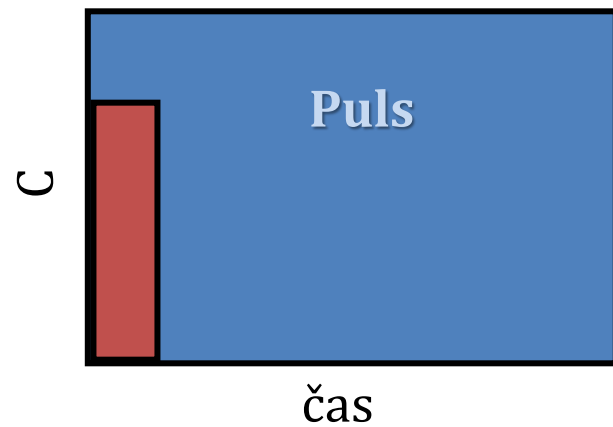
- **z minulosti**
- **současné**
- **predikce** budoucího znečištění

**poloha, umístění a původ zdroje:**

- **známé**
- **neznámé** ( ve směru i proti směru proudění)

# Historie kontaminace

- Změna koncentrace zdroje jako funkce času



- Zdroje znečištění :**
- 1) **odpadní vody**
  - 2) **škodlivé látky** (ropné, pesticidy, hnojiva)
  - 3) **průsaky zneč. vod** ze skládek, odkališť
  - 4) **znečištěné povrchové vody**
  - 5) **zneč. srážkové vody**

**Hlavní způsoby znečištění** - úniky odpad. vod z **kanalizace**

- **provozní, havarijní** a jiné úniky škodlivých látek (při přepravě, skladování, manipulaci a použití)
- **průsaky nedostatečně zabezpečených skládek** komunálních a průmyslových odpadů, odkališť , skladů hnojiv
- úniky kapalných odpadů **ze zemědělské výroby**
- průsaky ze zemědělsky obhospodařovaných ploch
- **úniky roztoků** používaných při těžbě, průzkumu atd.
- **vymývání látek z půdy**
- infiltrace znečištěných **srážek**
- infiltrace zneč. **povrchových vod**

## Proudění podzemní vody

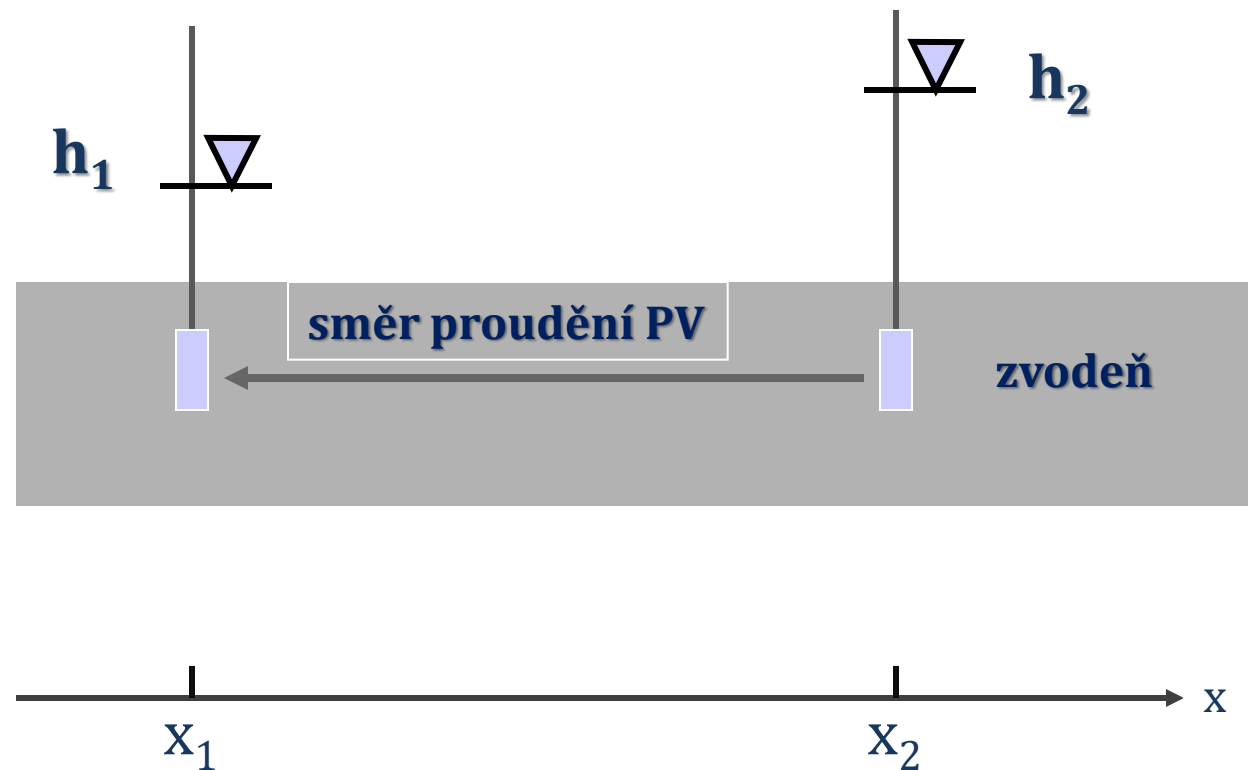
**směr proudění** - ovlivněn *hydraulickým gradientem*

- množství proudící vody závisí gradientu a hydraulické vodivosti

**hydraulický gradient** (změna tlak. výšky)

proudění od vyšší hladiny k nižší

( $dh/dz$ ,  $\partial h/\partial x$ ,  $\nabla h$ )



## **Hlavní procesy při migraci znečištění**

### **Migraci znečištění ovlivňují procesy:**

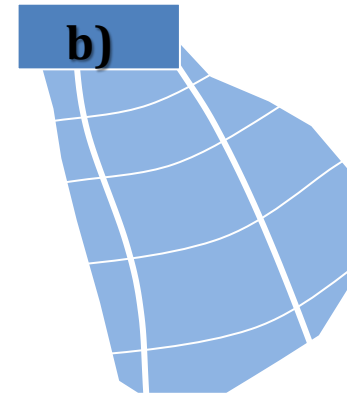
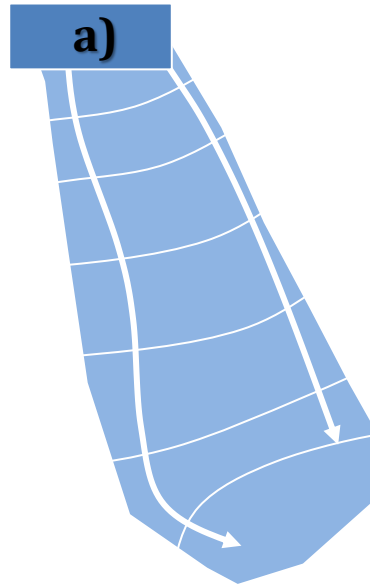
- **advekce (konvekce)**
- **disperze**
- **molekulární difuze**
- **adsorpce (desorpce)**
- **oxidace, iontová výměna**
- **rozpouštění**
- **radioaktivita**

## Transport kontaminace v podzemní vodě

Je nezbytné :

vědět, jak se kontaminace pohybuje v podzemní vodě  
znát dráhy transportu kontaminace  
předvídat budoucí pohyb kontaminantu

**kontaminace se šíří odlišně**



Ve **stejném rychlostním vektorovém poli** dochází k **odlišnému šíření kontaminace**

znalost vektorového pole rychlostí je nedostačující - je nutné  
pochopit procesy šíření kontaminace

## Transport kontaminace v podzemní vodě

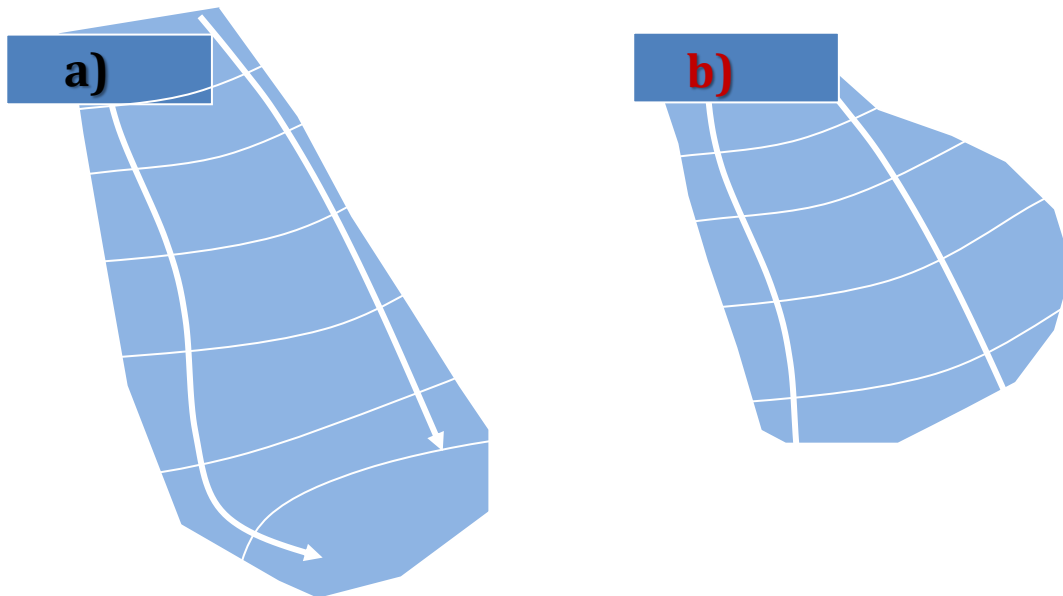
**Předpoklad** – znečištění je rozpuštěno ve vodě

některé znečištění se pohybuje stejnou rychlostí jako podzemní voda , některé pomaleji

### **Konzervativní transport.** (nereagující)

- nereaguje s ostatními druhy zneč. nebo s materiálem zvodnělé vrstvy
- pohybuje se stejnou rychlostí jako podz. voda
- hmotnost kontaminantů je zachována v podz. vodě
- příklad -  $\text{Cl}^-$  , Br

**„Mrak“ konzervativního transportu zneč.**



rozdíl v šíření:

a) rychlostní pole konst

b) rychlostní pole se mění

v různých směrech

## Znečištění reagující

vznikne **složitější mrak kontaminace**, reagující složky  
při proudění podzemní vody - některé části zneč. reagují s :

- **ostatními** druhy zneč.
- **minerály** ve zvodnělé vrstvě
- **plyny** v podz. vodách

**Reakce** zahrnují např.: \***chem. reakce** ( sorpce)

\***bakteriální reakce** ( biodegradace)

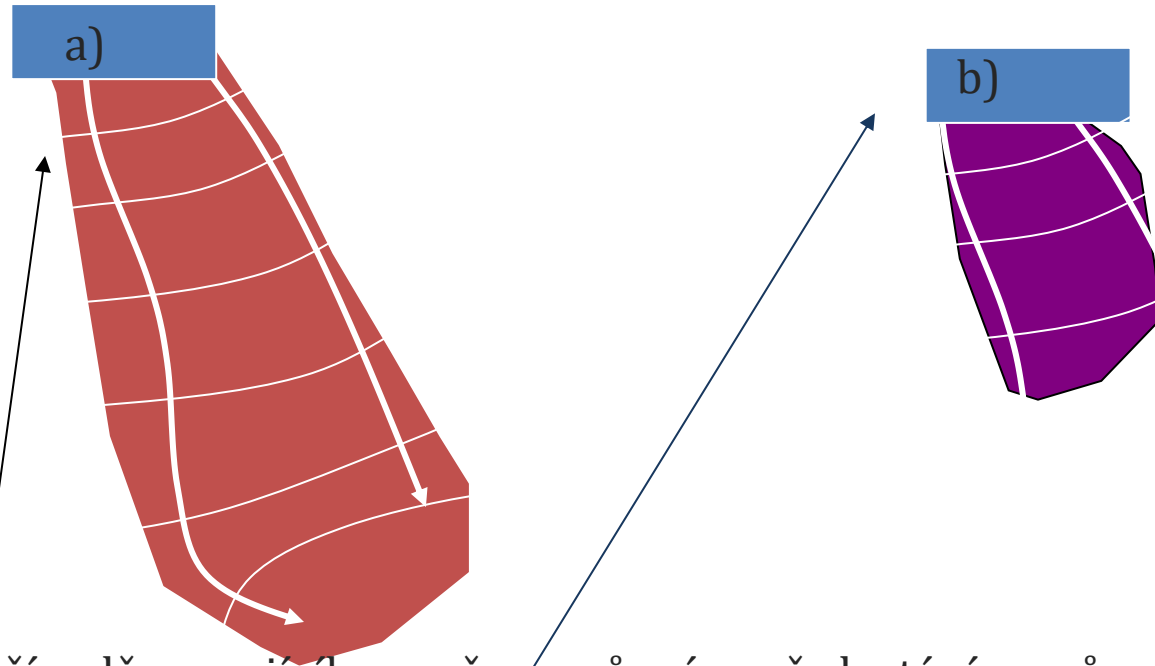
\***radioaktivní** rozpad

**V důsledku reakcí** - zneč. se pohybuje *jinou rychlostí* než PV (podzemní voda) a konzervativní zneč. v PV

**Každý druh kontaminace** se může pohybovat rozdílnou rychlostí  
obvykle pomalejší než pohyb PV

V důsledku reakcí se může **zvětšovat** nebo **zmenšovat** hmotnost specifického zneč. při pohybu zvodnělou vrstvou.

## Kontaminční mrak reagujícího znečištění



V případě reagujícího zneč. pro různé zneč. dostáváme různé mraky v témže rychlostním poli

a) **konzervativní** zneč. b) **nekonzervativní** transport (zneč. reaguje s materiálem zvodnělé vrstvy)

transport zneč. je důsledkem *advekce a disperze*

### ADVEKCE

zneč. se pohybuje průměrnou rychlostí  $v_p$  podzemní vody  
veškeré zneč. přichází v daném čase a prostoru

**Advekce (konvektivní přenos)** - zneč. se pohybuje průměrnou rychlostí  $v_p$  podzemní vody  
veškeré zneč. přichází v daném čase a prostoru

$$J_A = v \cdot c \quad (J_A = n \cdot v_{SK} \cdot c)$$

$J_A$  - advektivní tok

$c$  - koncentrace

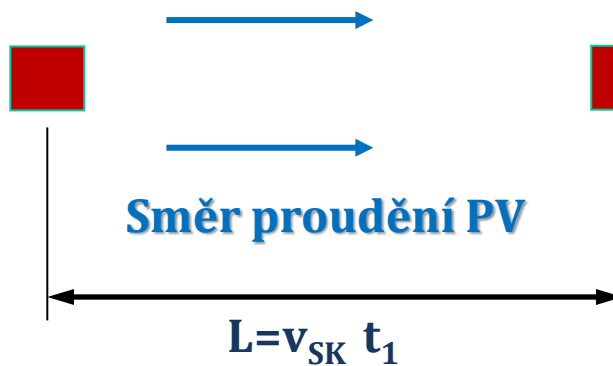
$v_{SK}$  - skutečná rychlost

$n$  - porozita

$$v_{SK} = -K \nabla h / n$$

nešíří se v okolí  
advektivní hranice

Zdroj  
kontaminace  
( $t=0$ )

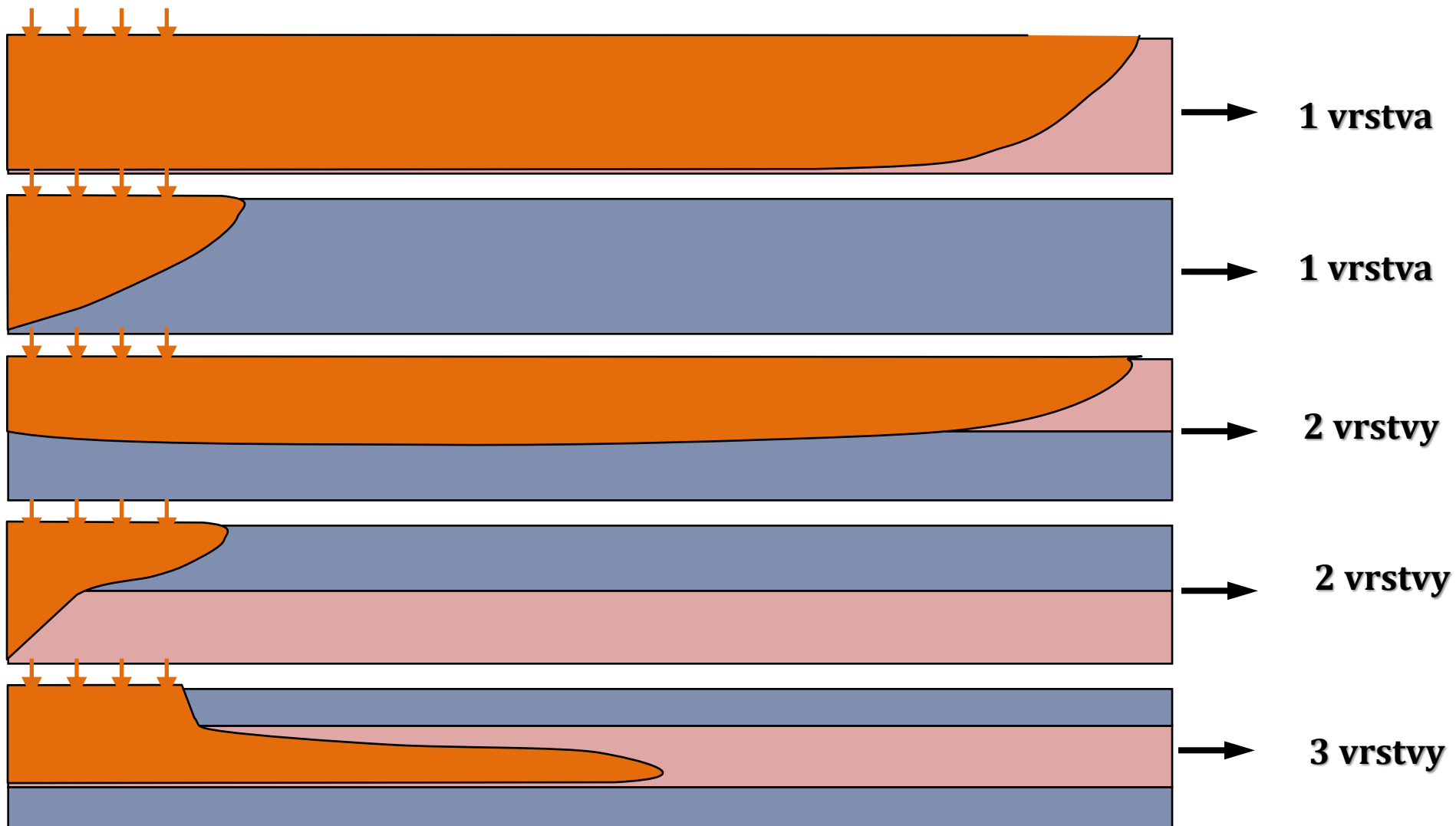


mrak znečištění( $t=t_1$ )  
kontaminační mrak

Vzdálenost dána advekcí ( $v_{SK}$ )  
střed hmotnosti

$v_{SK}$  - průměrná rychlost

# Hydraulická vodivost



**Velká hydraulická vodivost, K**



**Nízká hodnota hydraulické vodivosti, K**

## Hydrodynamická disperze ( $D_x, D_h$ )

způsobuje, že veškeré znečištění v PV se šíří do různých směrů

šíření je způsobeno **2 procesy** :

- **mechanickou disperzí** ( $D_m = \alpha v_l$ )

- **molekulární difuzí** ( $D^*$ )

$$D_h = \alpha v_l + D^*$$

$\alpha$  - vlastnost porézního prostředí - **disperzivita** (m)

### **mechanická disperze ( $D_m$ )**

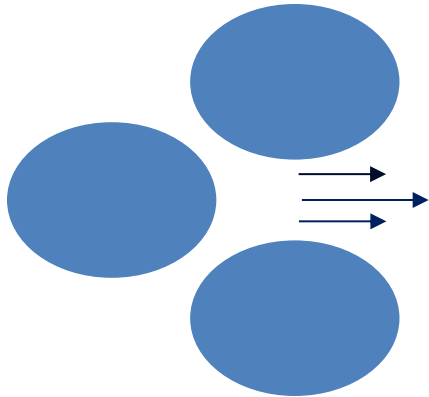
způsobuje šíření v porézním materiálu, dokonce i v homogenním materiálu

**některé znečištění** se šíří **rychleji** než  $v_{SK}$

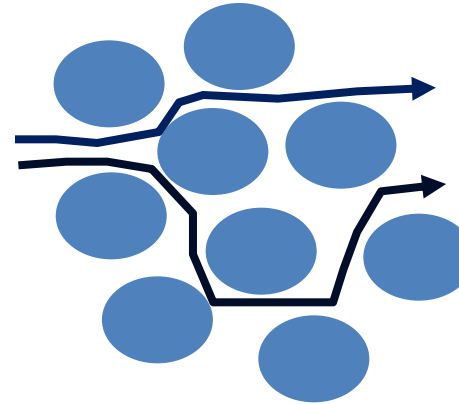
jiné **pomaleji** než  $v_{SK}$

# Mechanická disperze

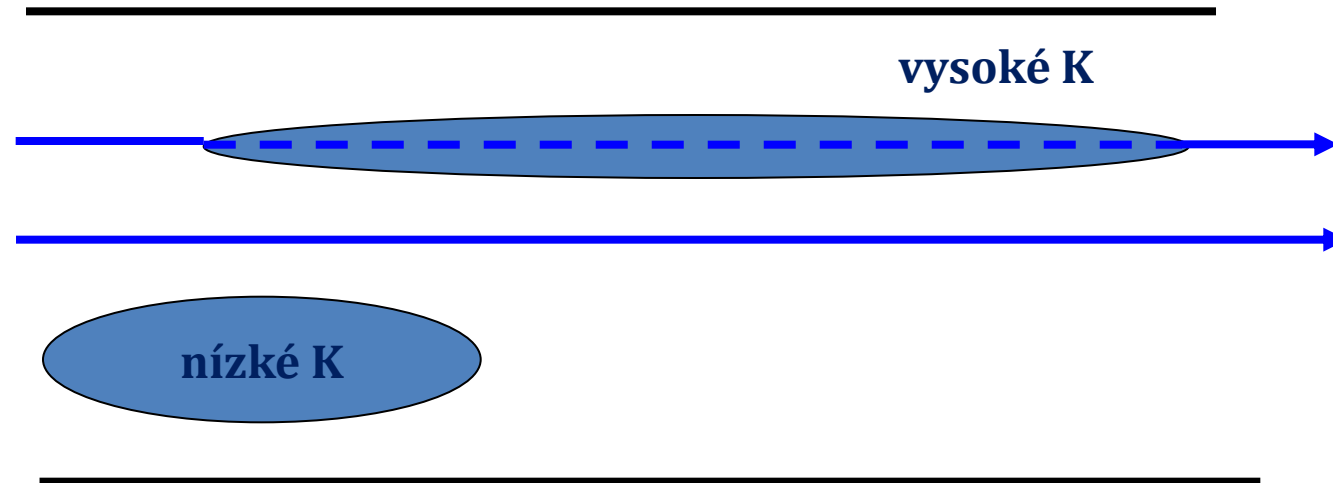
2 mechanismy:



1) rozdělení rychlostí v pórech



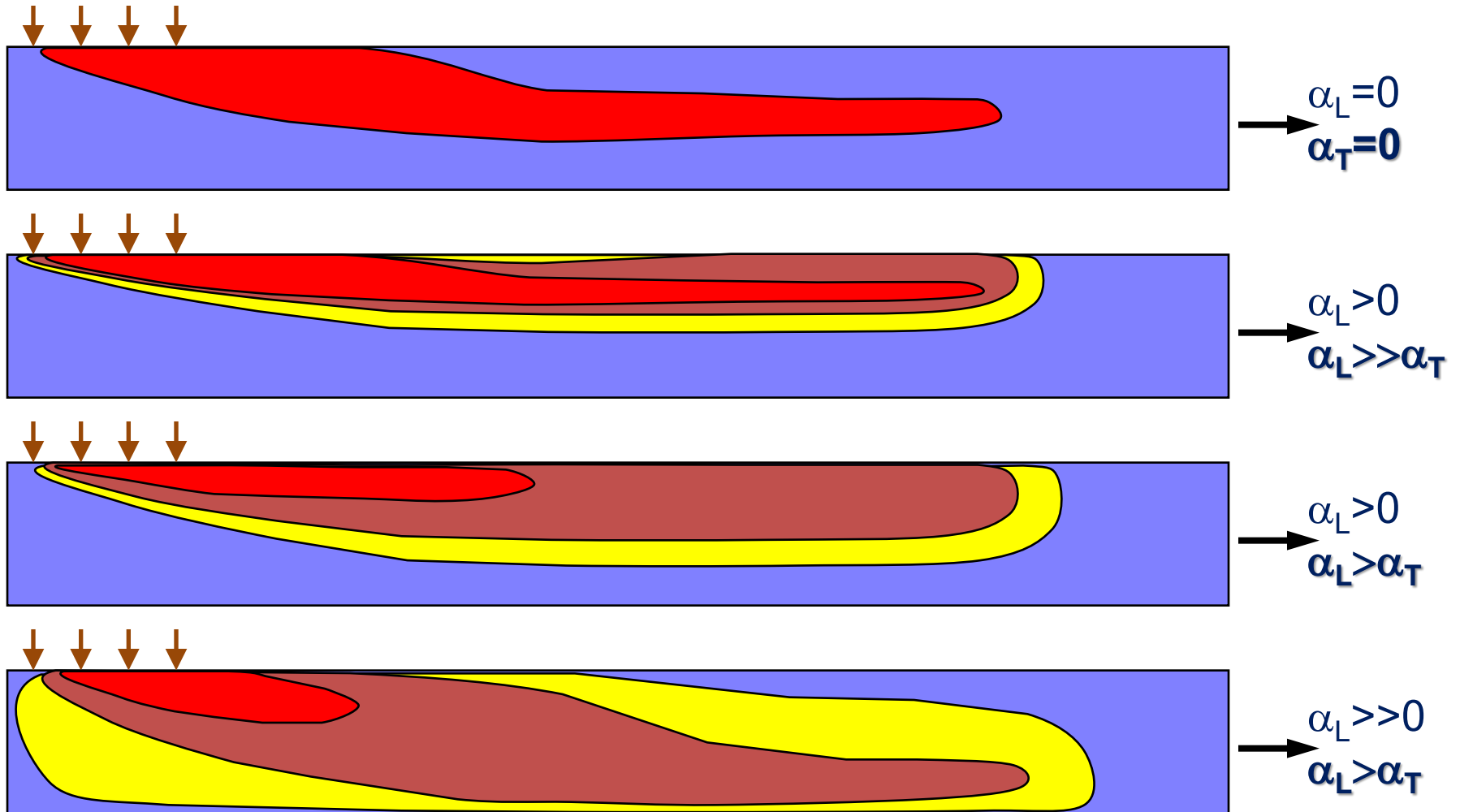
2) různé dráhy v pórech



## Disperze

- **zvětšování disperze** .... širší kontaminační mrak
- zvyšování  $\alpha_T$  má za následek zvětšení vertikálního šíření
- velké  $\alpha_L$  a velké  $\alpha_T$  větší míšení kontaminace.

# DISPERZE



## Molekulární difuze

znečištění se může šířit v důsledku **chemického gradientu**

**vliv difuze** se častěji projevuje v materiálech **s malou hodnotou K**

**vliv** molekulární difuze **je zanedbatelný při vysokém K** (převládá mech. disperze)

hnací silou je **koncentrační gradient** ( $dC/dx$ )

šíření zneč. molekulární difúzí i při nulovém hydraulickém gradientu

pórovitost závisí na : - vyšší pórovitost zvětšuje difundující hmotnost při stejném koncentračním gradientu

- **Darcyho zákon:**  $q = -K \cdot \text{grad}(h)$
- Pro transport hmoty (**Fickův zákon**) vlivem koncentračního gradientu:  
 $J = -D_d \cdot n \cdot \text{grad}(C)$   
kde J je tok vlivem difuze; C je koncentrace;  $D_d$  je difuzní koeficient


**Cílem je matematické modelování kontaminačního mraku**

- a) předpovídat jak se šíří
- b) vědět jak/čistit
- c) vědět jak zabránit zneč.

### Koeficient difuze - $D_D$

Kation	$D_d$ ( $10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)	Anion	$D_d$ ( $10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)
H <sup>+</sup>	93.1	OH <sup>-</sup>	52.7
K <sup>+</sup>	19.6	Cl <sup>-</sup>	20.3
Na <sup>+</sup>	13.3	HS <sup>-</sup>	17.3
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11.8
Ca <sup>2+</sup>	7.93	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10.7
Fe <sup>2+</sup>	7.19	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	9.55
Mg <sup>2+</sup>	7.05		
Fe <sup>3+</sup>	6.07		

## Pecletovo číslo


$$Pe = D_m/D_d$$

Podle velikosti  $Pe$  lze rozlišit 4 režimy

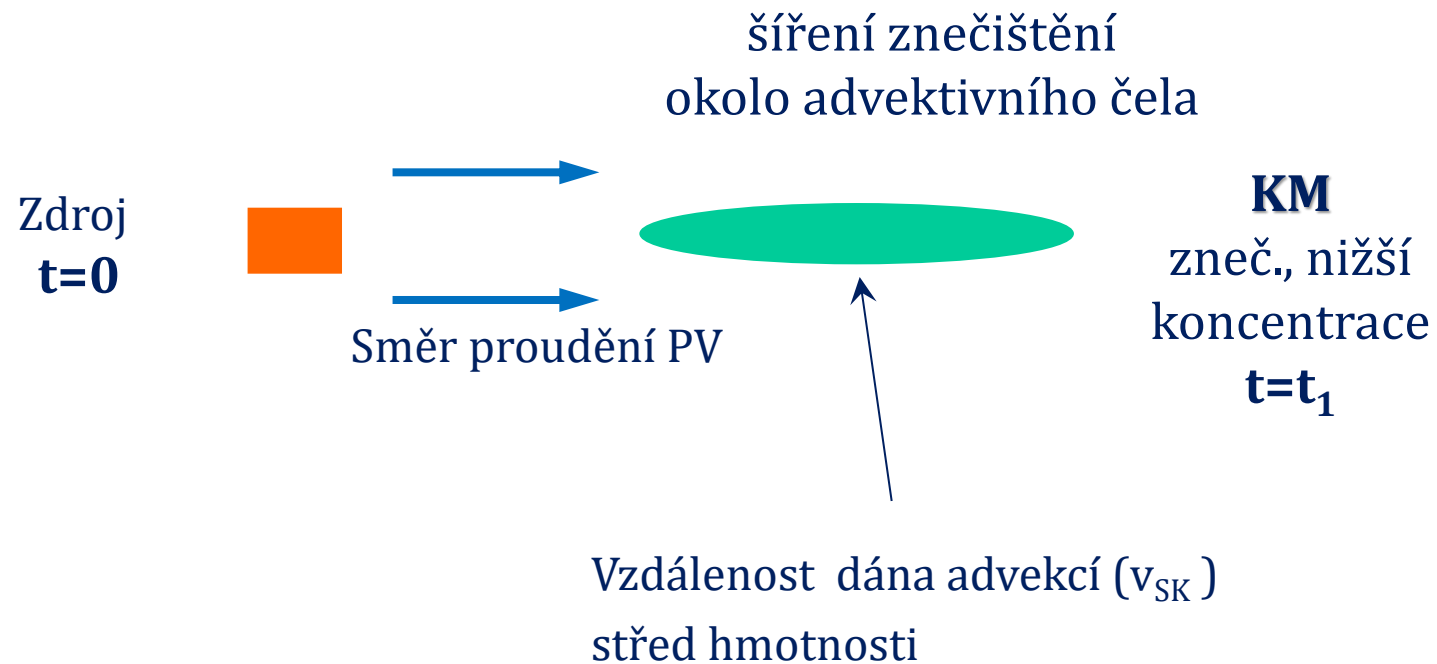
Pro  $Pe < 0.01$  k mechanické disperzi téměř nedochází  
difuze dominuje

- Pro  $Pe \dots 0.01 - 4$   
difuze a mechanická disperze
- Pro  $Pe \dots 4 - 10^4$  na hydrodynamické se podílejí oba procesy, každý jinou váhou ... Postupně dominuje mechanická disperze
- Pro  $Pe > 10^4$  mechanická disperze dominuje; difuze se již neuplatňuje

# Disperze

- V reálu** - mrak konzervativního znečištění je dispergován
- mrak znečištění (kontaminační mrak-**KM**) nemá ostré hranice
  - znečištění se šíří dopředu i dozadu advektivní hranice - tzv.

## hydrodynamická disperze



## Transportní (průnikové) křivky

vhodné pro vyhodnocení transportu kontaminantů

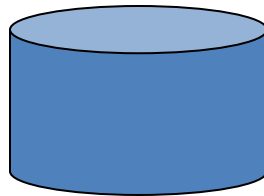
- koncentrace vs. čas
- určují „naředění“, zpoždění a ztrátu hmoty kontaminačního mraku
- srovnání migrace různých roztoků - jedna křivka pro daný roztok

K sestrojení transportní křivky - nutné znát

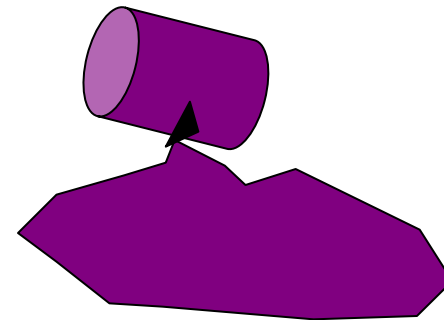
- koncentraci  $c_0$  -a dobu trvání „zdroje“ kontaminace
- rychlostní pole, počáteční koncentraci
- odhad hydrodynamické koncentrace

Charakteristiky zdroje

kontinuální zdroj



okamžitý zdroj



# Transportní křivky

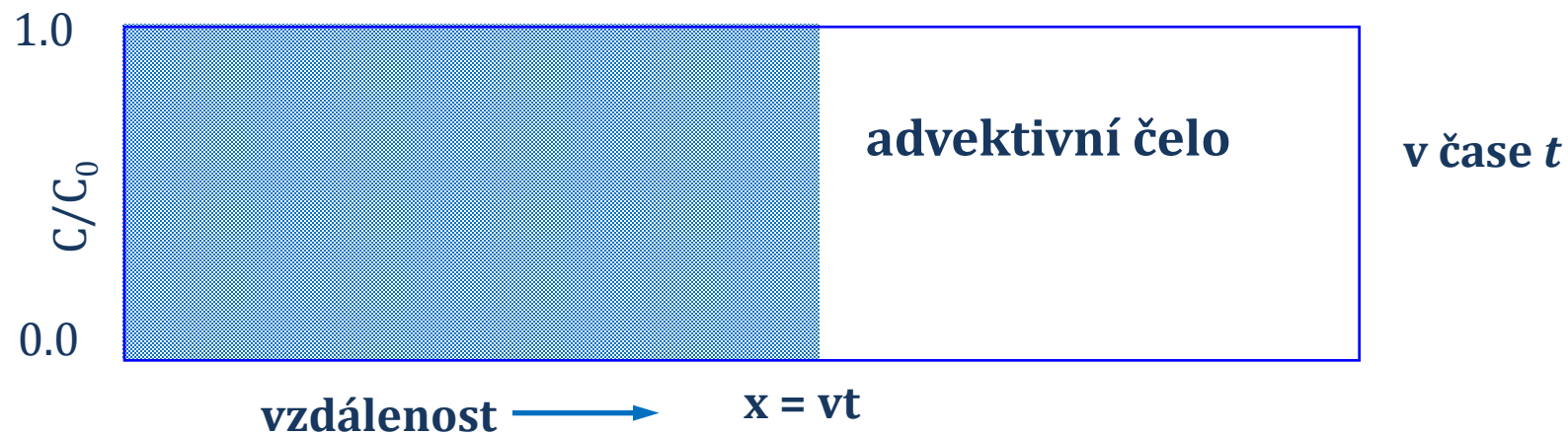
**normalizovaná koncentrace** ( $c/c_0$ )

- měřená koncentrace dělená počáteční koncentrací ve zdroji

**absolutní koncentrace** (mg/l)

- měřená koncentrace

Jen *advekce*, (kontinuální zdroj)



všechny roztoky - šíří se rychlostí  $v_{\text{prům}}$

- žádné rozptřeni kontaminačního mraku

( neodpovídá reálné situaci)

# Sorpce

**Adsorpce**- zvyšování koncentrace molekul v důsledku nevyvážených sil na povrchu fázové rozhraní voda-hornina, vzduch – hornina  
( adsorpce intenzivní v sypkých zeminách – velký specifický povrch)

Přírodní adsorbenty – jílovité minerály, hydroxidy železa, hlinitokřemičitany a org. látky

**Adsorpce** (podle povahy sil):

- **chemická** (chemické síly)
- **fyzikální** van (der Waalesovy síly)

V systému **voda - hornina** – oba druhy adsorpce .... sorpční proces

Sorpční vlastnosti – důležité pro pohyb kontaminantu

Sorpce kromě koncentrace – eliminuje negativně nabitě koloidní částice organického charakteru, včetně virů a bakterií.

**Sorpční procesy** – reverzibilní – pohyb znečištění jen zpomalují(nezastavují)

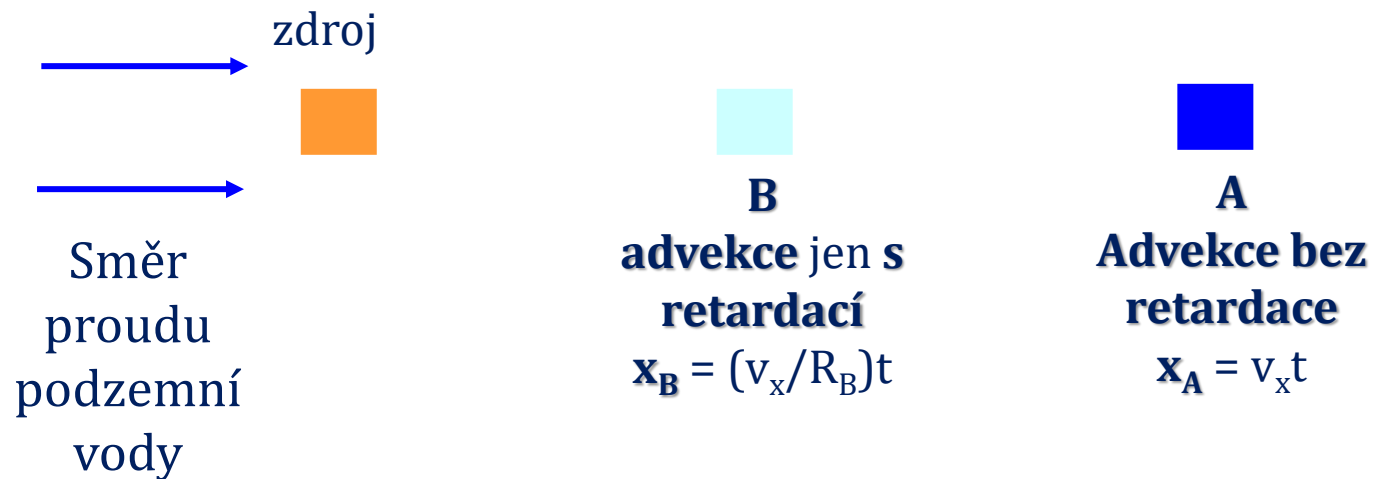
**Desorpce** – opačný proces k adsorpci. – uvolnění naadsorbovaných látek zpět do vody.

## Retardační efekty (zpoždění)

### Určení zpoždění (retardace)

- laboratorní testy ( měření koeficientu distribuce)
- porovnáním kontaminačních mraků (odhad R)

Zpoždění advektivního čela retardového roztoku (**B**) – jen pro advekci

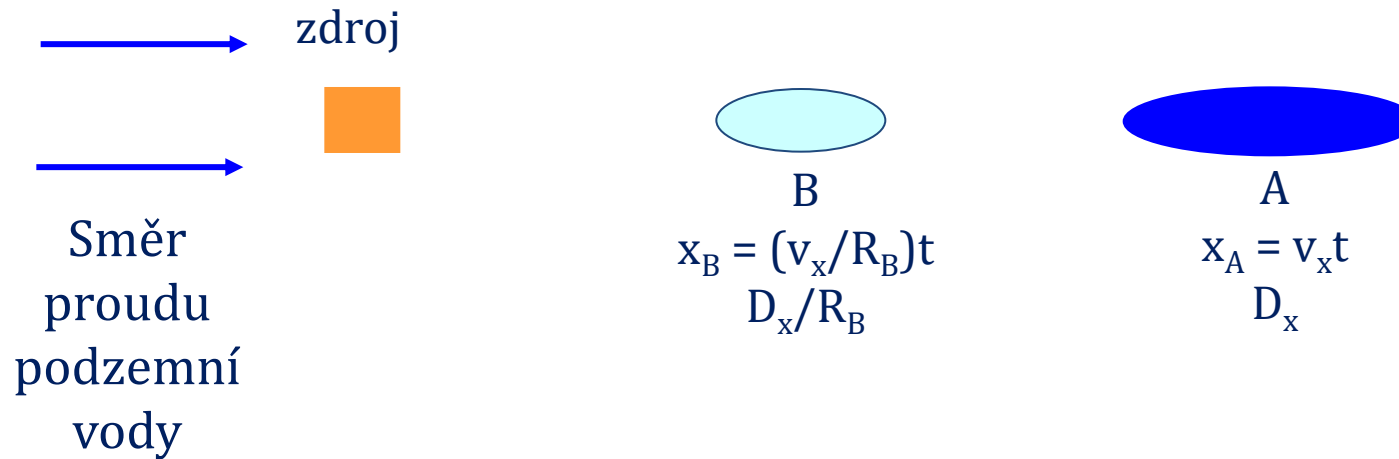


**A** je konzervativní roztok

**B** je retardovaný,  $R_B \sim 2$

## Disperze (s retardačním efektem)

Zpoždění retardového roztoku (**B**) – pro advekci a disperzi

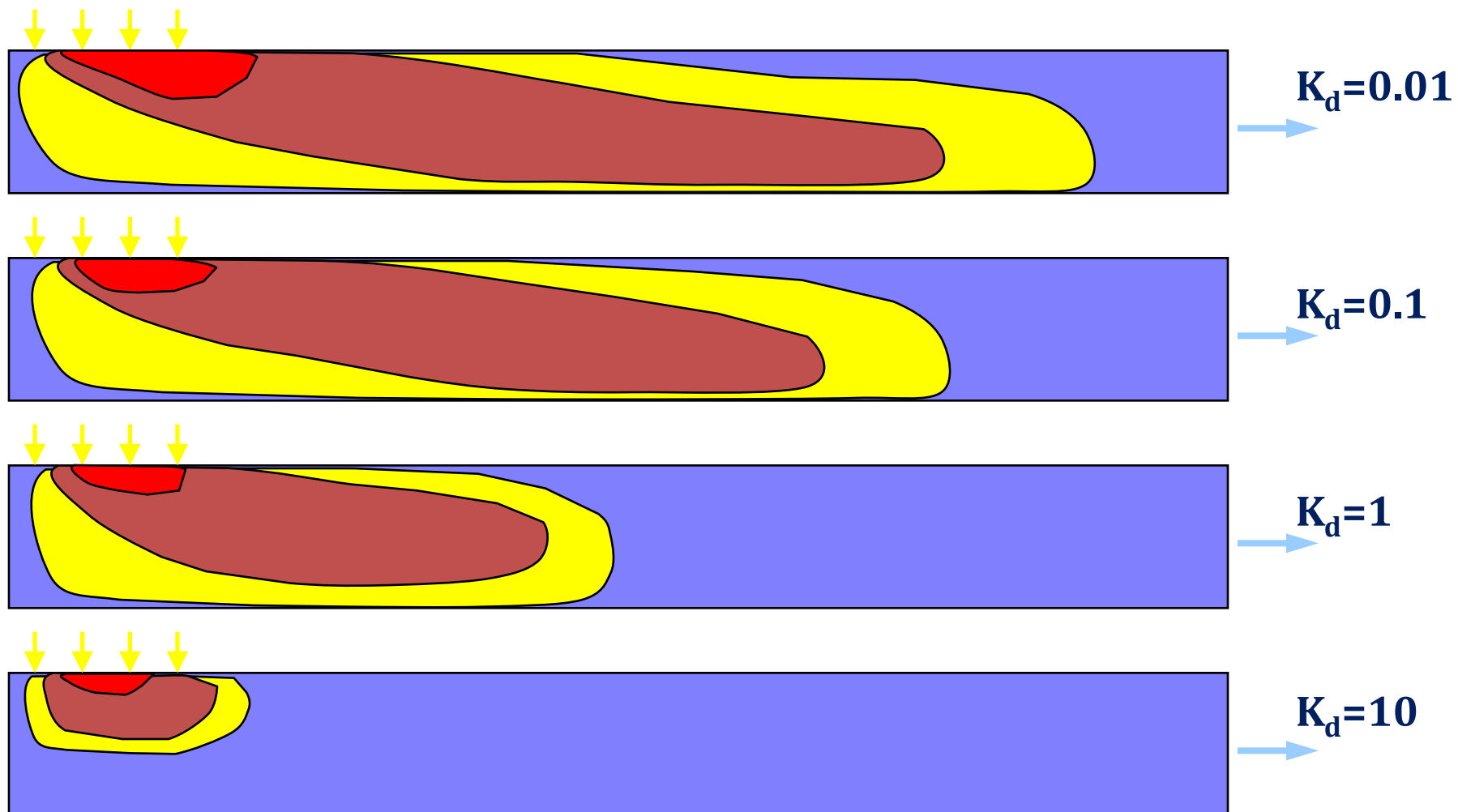


**A je konzervativní šíření**  
**B je retardované šíření,  $R_B \sim 2$**

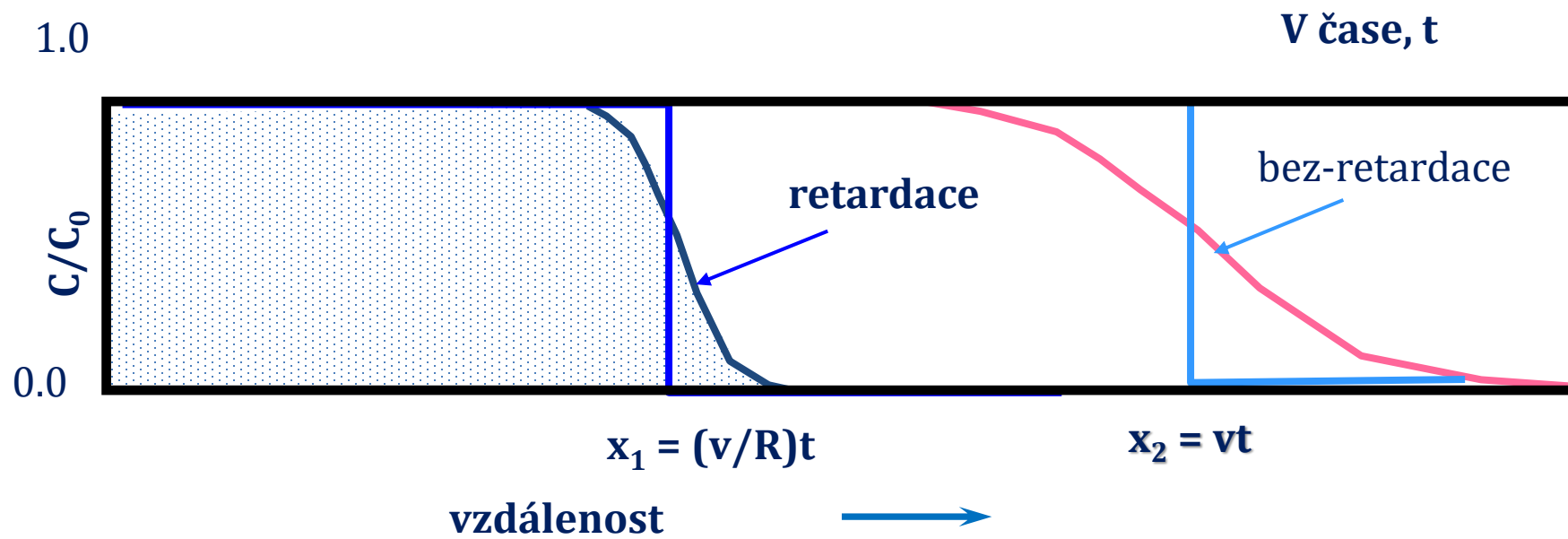
## SORPCE (způsobuje retardaci)

působení mezi roztokem a pevnou částí zvodnělé vrstvy ... mechanismus redukující rozšíření kontaminančního mraku

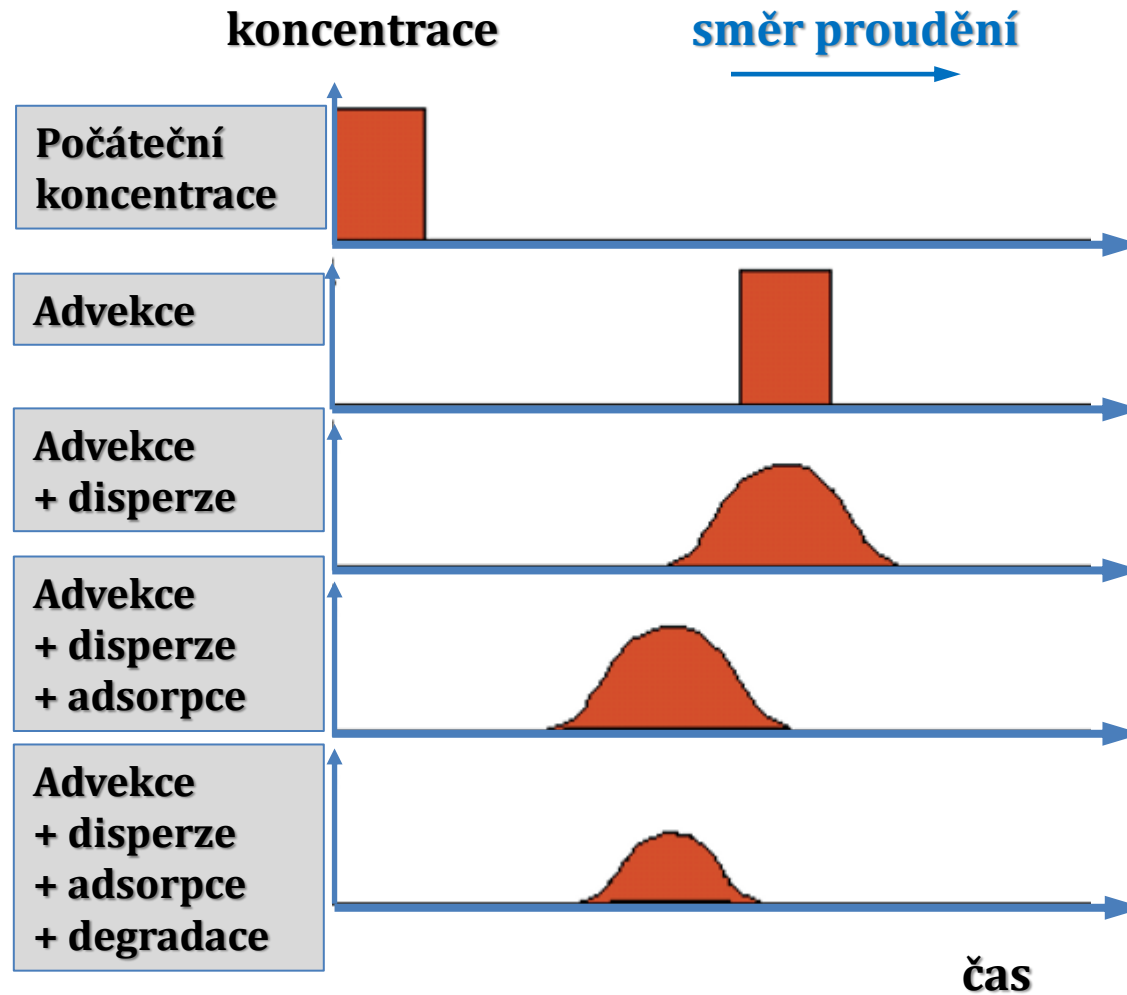
Pokud se  $K_D$  zvětšuje KM se zužuje



## Transportní křivka



## Vliv transportních procesů na šíření kontaminace



**Konec**