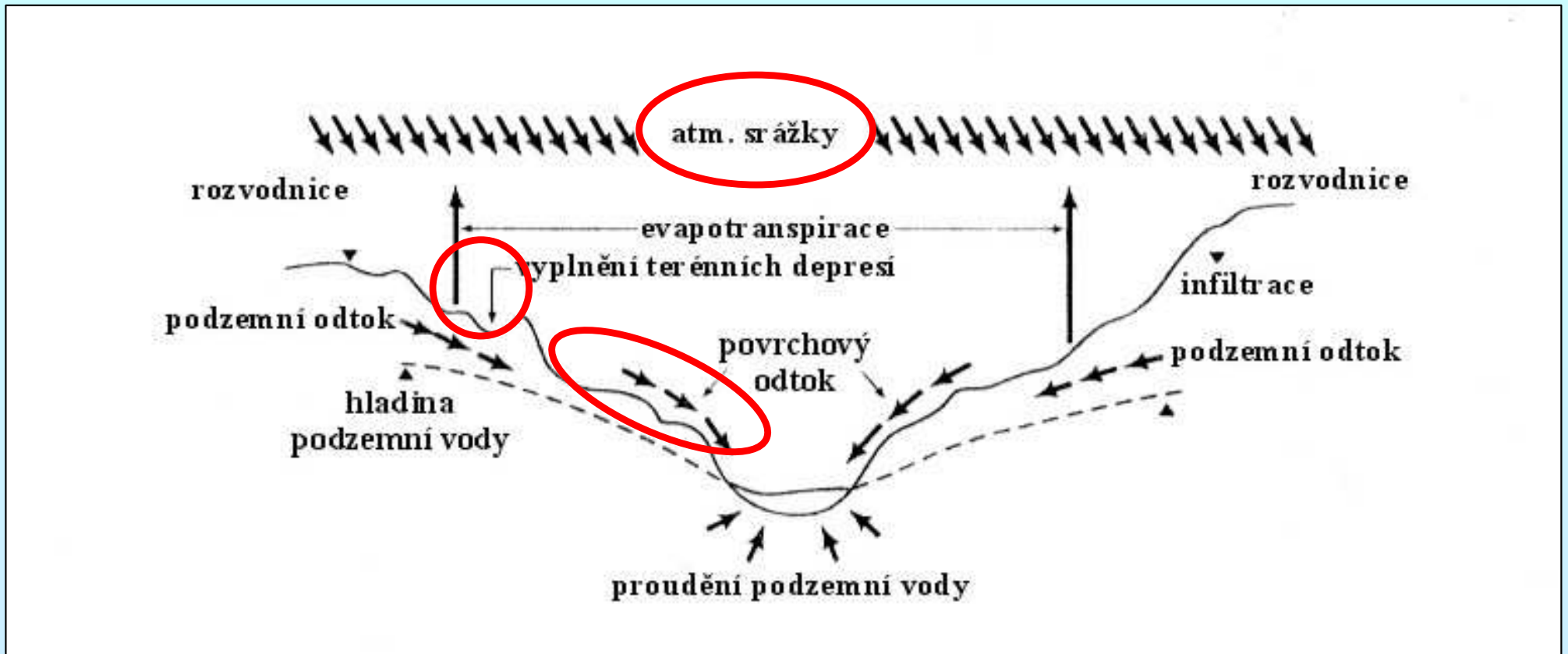


# **ZÁKLADY HYDROGEOLOGIE**

## ***II. PŘEDNÁŠKA***

# INFILTRACE A ODTOK

popis procesů



určení infiltrace – přímé určení infiltrace je prakticky nemožné

dopočítání ...  $I = P - ET - PO$

# URČENÍ POVRCHOVÉHO ODTOKU

malé oblasti (povodí)

$$Q = C \cdot i \cdot A$$

$Q$  maximální odtok [ m<sup>3</sup>/s ]

$C$  odtokový koeficient

$i$  průměrná intenzita srážek [ mm/hod ]

$A$  příslušná plocha [ km<sup>2</sup> ]

## odtokový koeficient

- hodnoty tabelovány

- udává typické rozmezí hodnot pro daný typ povrchu terénu

- např. parky – 0,10 – 0,25

asfaltové lochy – 0,70 – 0,95

pastviny - písčité půdy – 0,05 – 0,25

zatravněná jílovitá půda se sklonem 2-7% - 0,18 – 0,22

# ZÁKLADNÍ PRINCIPY PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

porozita (pórovitost) hornin

velikosti od rozměrů krystalů  $\longrightarrow$  obrovské kaverny

*pórovitost (celková pórovitost)*  $n = \frac{V_V}{V_{celk}}$  bezrozměrné číslo  $< 1$ ,  
často vyjádření v %

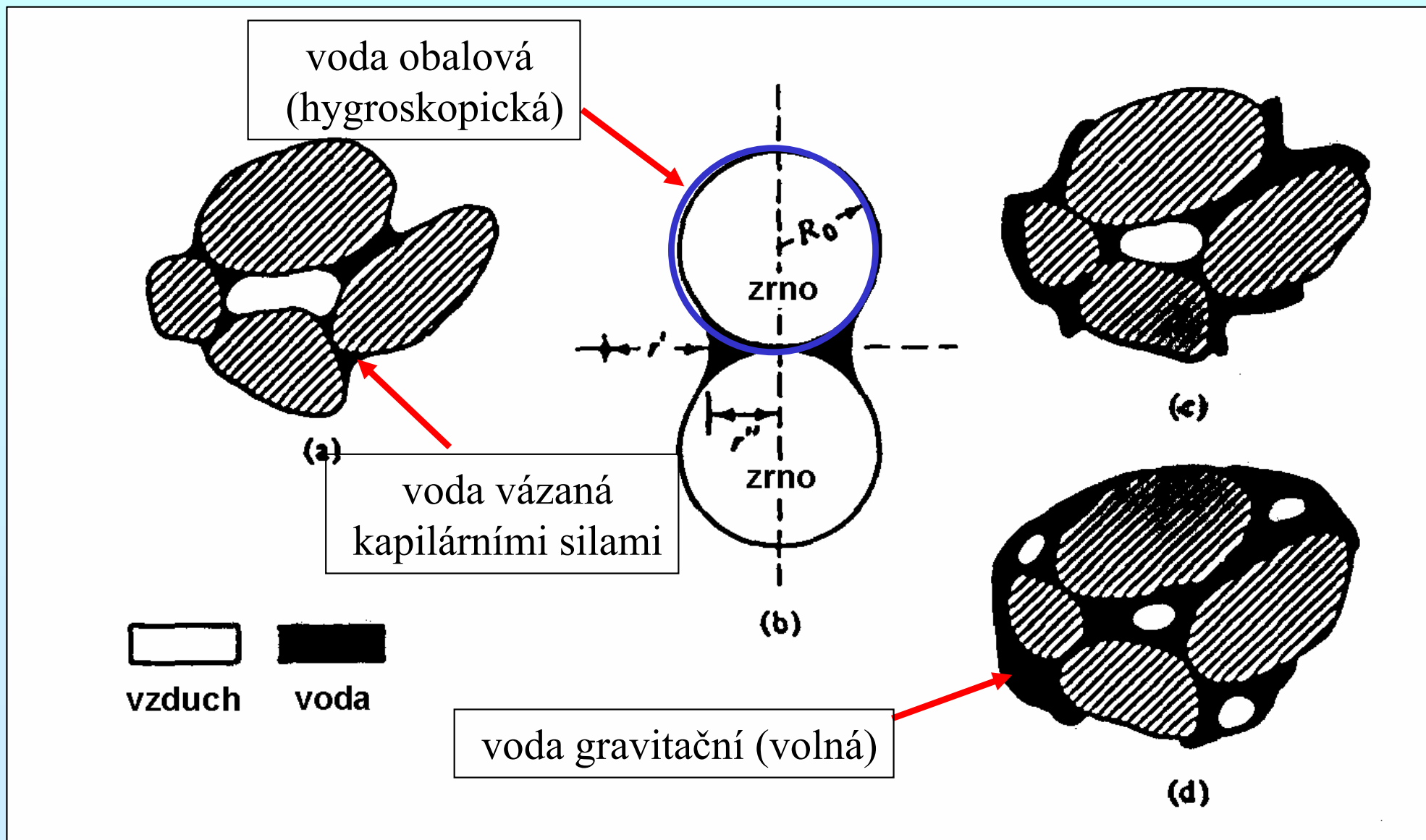
*číslo pórovitosti*  $e = \frac{V_V}{V_{zrn}}$  současně platí  $V_{celk} = V_V + V_{zrn}$

$\searrow$

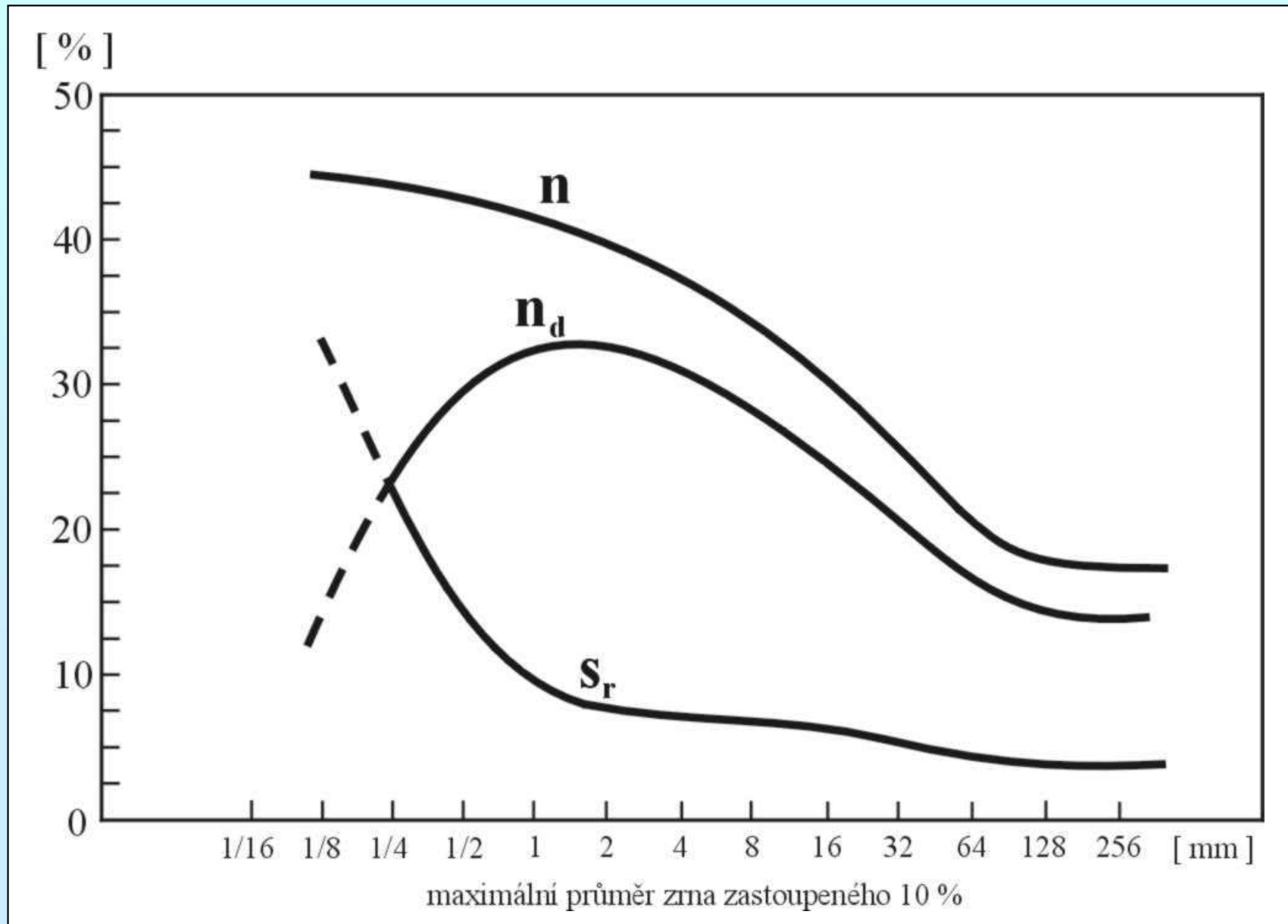
$n = \frac{e}{e+1}$

*efektivní pórovitost*  $n_e = \frac{V_{cv}}{V_{celk}}$  uvažuje zastoupení pórů, kterými může proudit voda gravitační silou

# FORMY VÝSKYTU VODY V KAPALNÉM SKUPENSTVÍ V HORNINOVÉM PROSTŘEDÍ



drenážní pórovitost a reziduální nasycení  $n = n_D + S_r$   $n_D \cong n_e$



## zastoupení vody v nesaturované zóně

*vlhkost*       $\theta = \frac{V_{voda}}{V_{celk}}$       bezrozměrná veličina, často vyjádření v %

*saturace vodou*       $S_{voda} = \frac{V_{voda}}{n}$       bezrozměrná veličina, často vyjádření v %

### *primární pórovitost*

- porozita vzniklá při genezi horniny

#### příklady

- sedimenty – struktury vzniklé v nezpevněných sedimentech
- magmatity – matrix základní hmoty, pukliny vzniklé při chladnutí magmatu

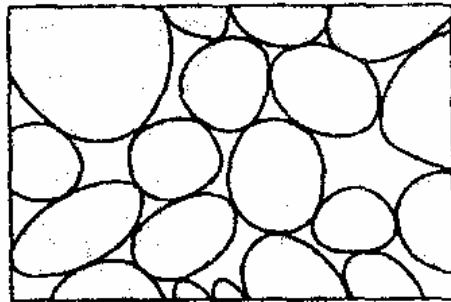
### *sekundární pórovitost*

- porozita vzniklá sekundárně
- exogenní procesy, rozpouštění minerálů proudící vodou

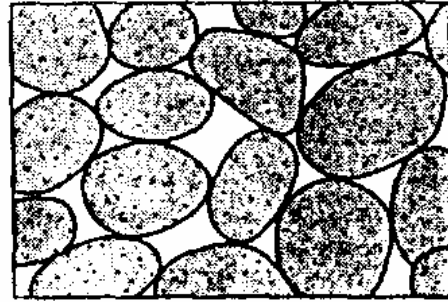
#### příklady

- sedimenty – po diagenézi vzniklé pukliny, rozpouštění tmelu, kaverny
- magmatity – tektonicky vzniklé pukliny
- metamorfity – pukliny vzniklé při metamorfóze, působení fluid - kaverny

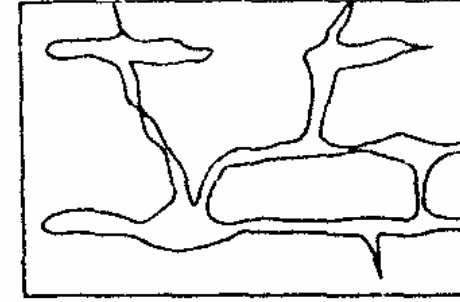




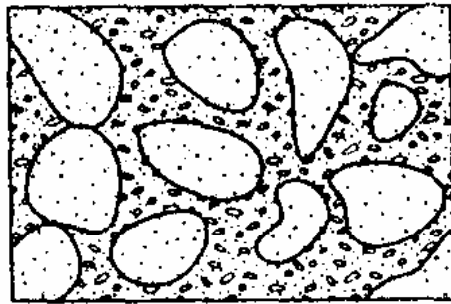
(a)



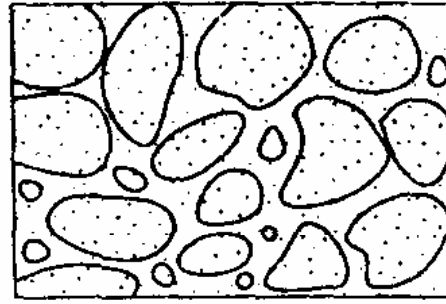
(c)



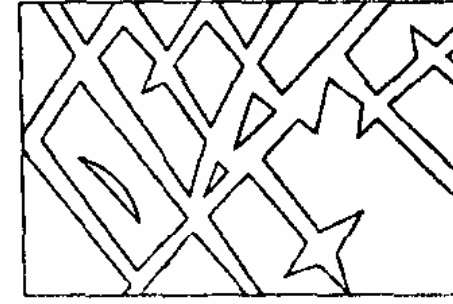
(e)



(b)



(d)



(f)

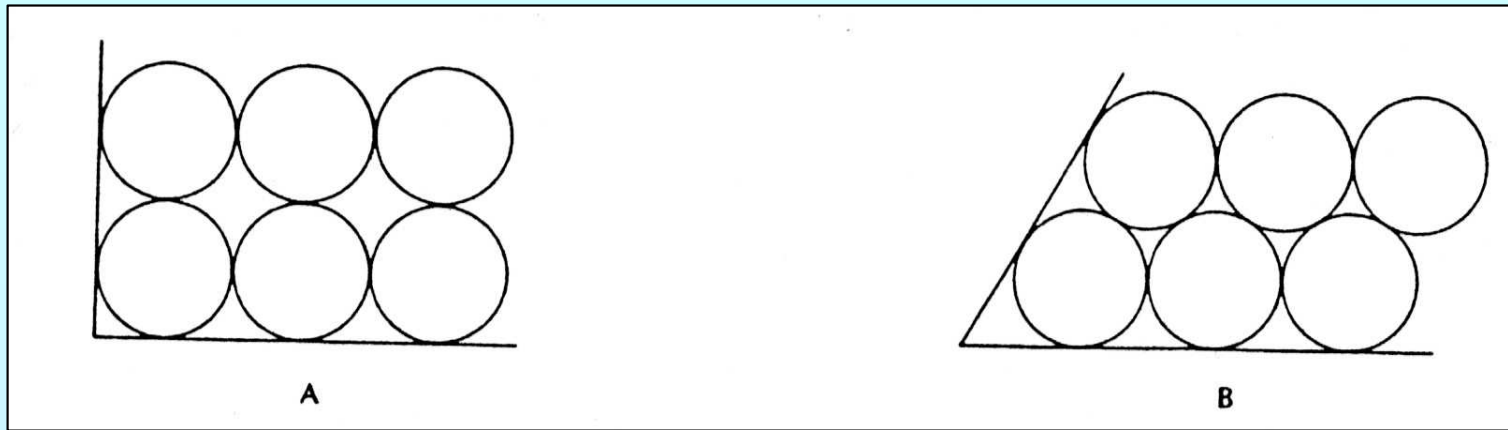
### Vztah mezi texturou a porozitou hornin (Meinzer 1923):

- a) dobře vytríděný sediment s vysokou porozitou
- b) špatně vytríděný sediment s nízkou porozitou
- c) dobře vytríděný sediment s valouny, které mají vlastní vysokou porozitu
- d) dobře vytríděný sediment, jehož porozita byla snížena depozicí materiálu v prostoru mezi valouny
- e) hornina, která se stala porózní důsledkem působení roztoků
- f) hornina, která se stala porózní důsledkem tektonického porušení

## nezpevněné sedimentární horniny

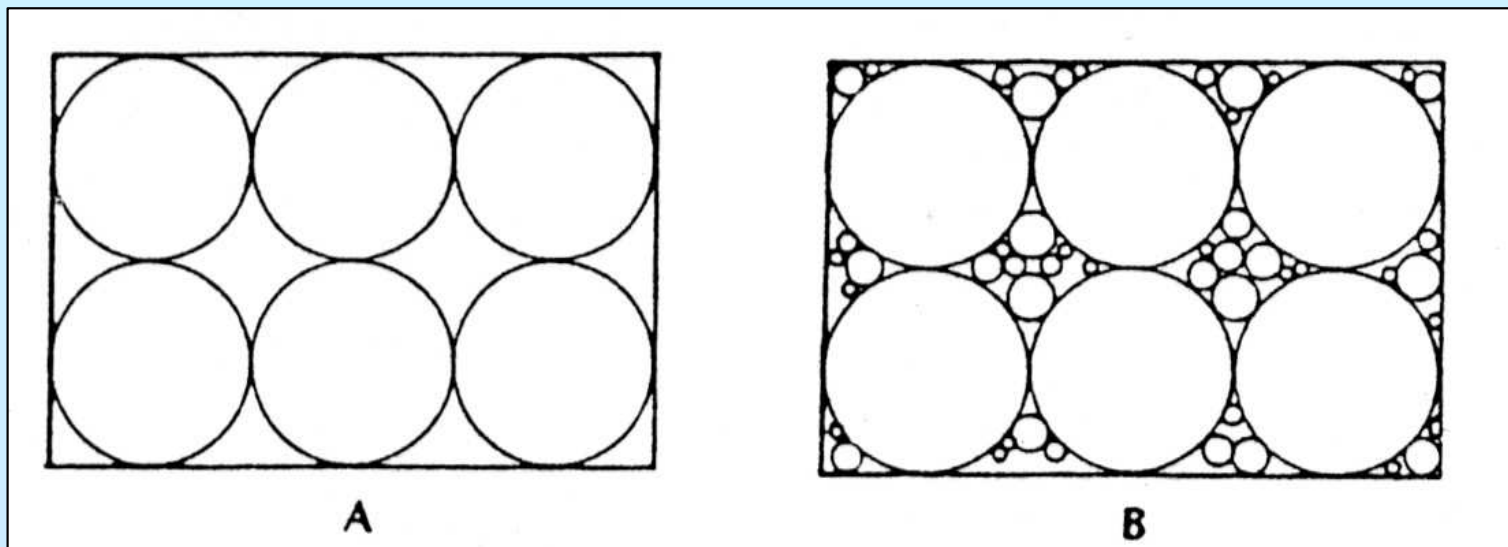
- pórovitost závisí i na uspořádání zrn

47 %



26 %

- pórovitost závisí i na granulometrickém složení



charakteristické hodnoty *celkové pórovitosti*  
nezpevněných sedimentárních hornin

šterky hrubozrnné	24 – 36 %
šterky jemnozrnné	25 – 38 %
písky hrubozrnné	31 – 46 %
písky jemnozrnné	26 – 53 %
hlíny prachovité	34 – 61 %
jíly	34 – 60 %

*efektivní pórovitost*

- odráží vliv velikosti pórů na pohyb vody gravitační silou
- výrazně klesá s poklesem velikosti zrn

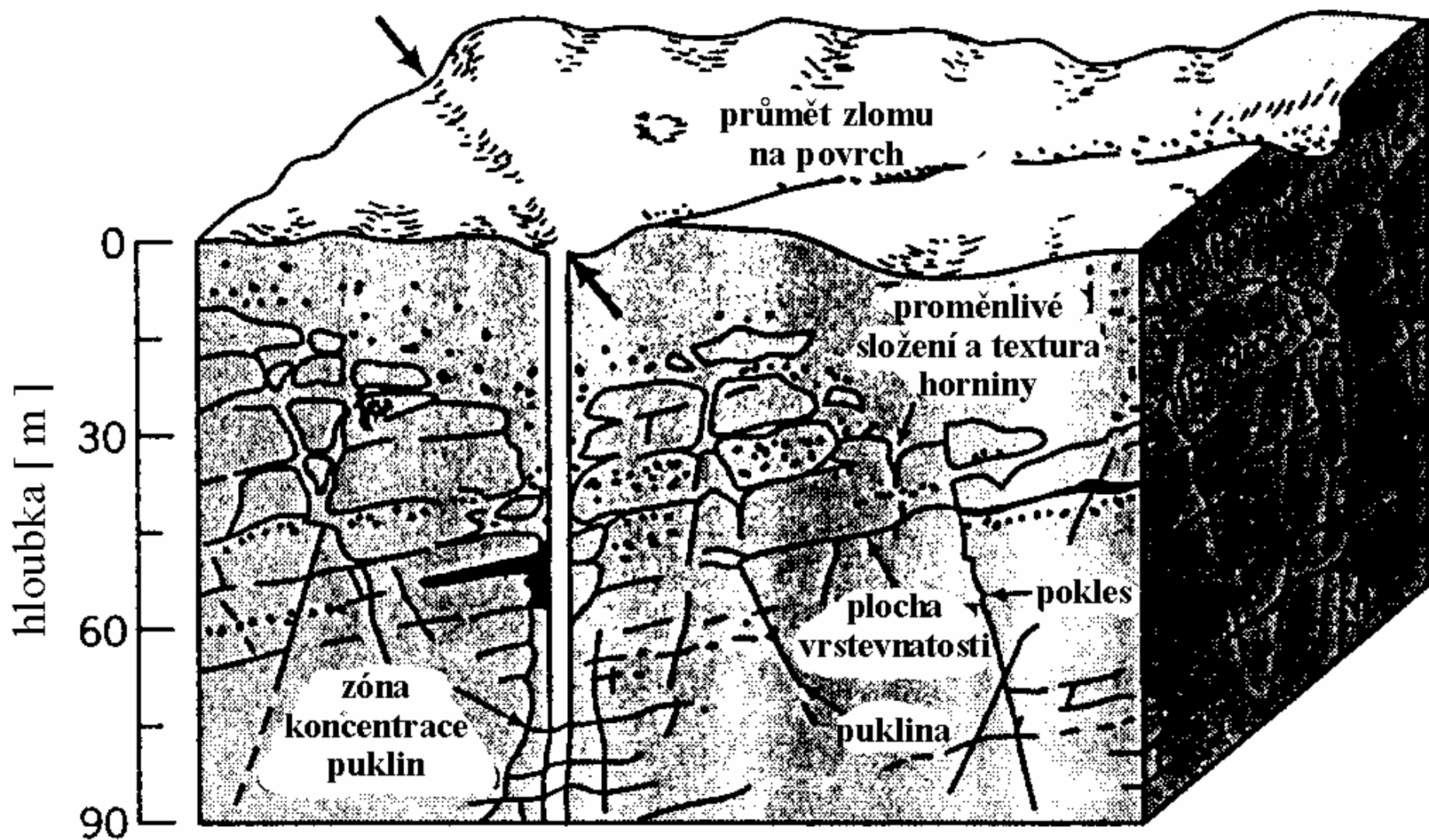
např.

- hrubozrnné písky 20 – 35 %
- jíly 1 – 5 %

## **zpevněné sedimentární horniny**

- diagenéze – změna struktury zrn sedimentů + vysrážení minerálů
- obecně nižší celková pórovitost než u nezpevněných ekvivalentů

pískovce	5 – 30 %
prachovce	21 – 41 %
vápence, dolomity	0 – 40 %
zkrasovělé vápence	0 – 40 %
jílovce	0 – 10 %

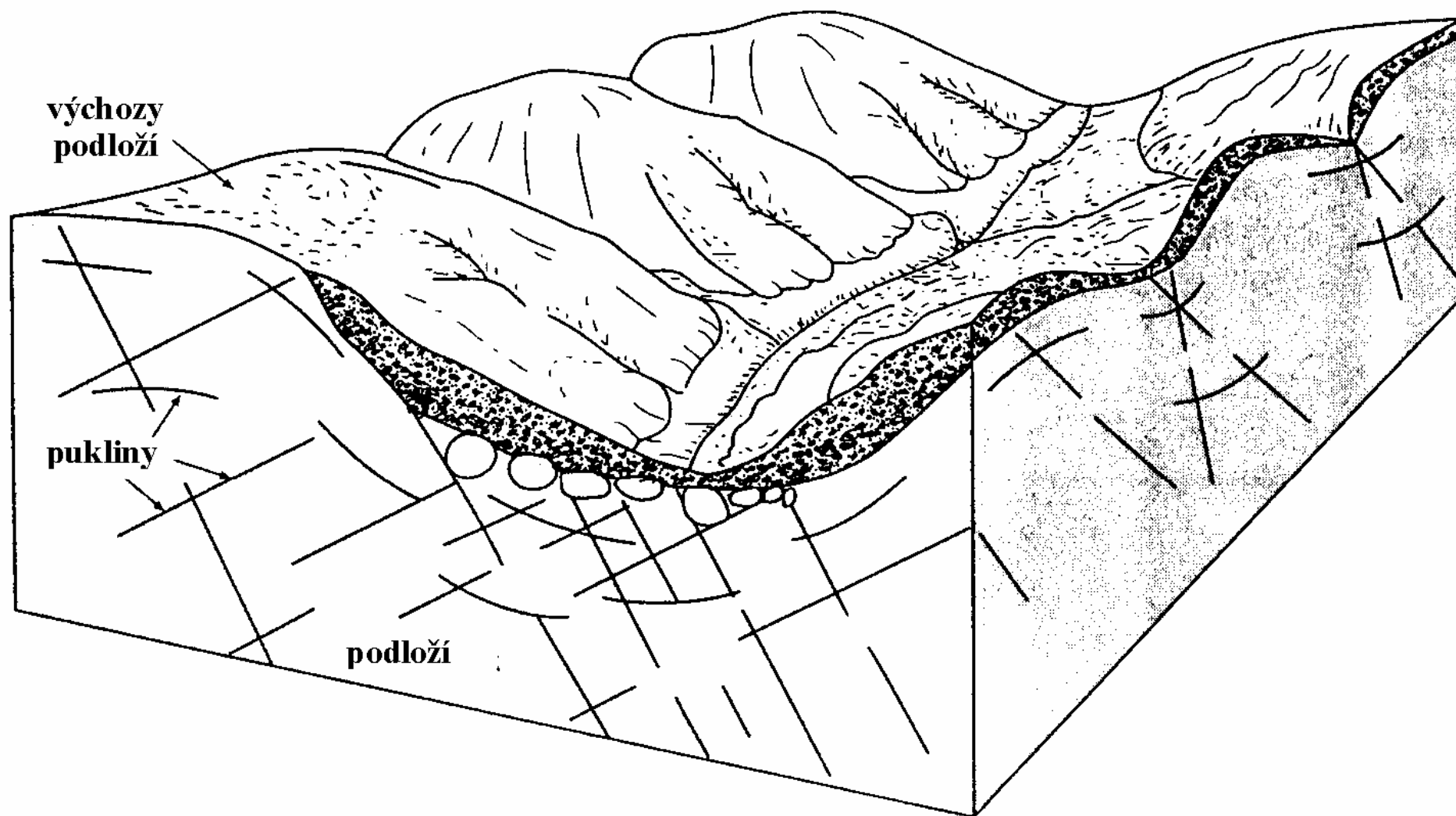


**Výskyt zón s různou propustností  
v karbonátových horninách s puklinovou porozitou  
(Lattman a Parizek 1994)**

## krystalinikum

- extrémně proměnlivé hodnoty
- exogenní procesy – vznik tzv. zóny přípovrchového rozvolnění a rozpukání

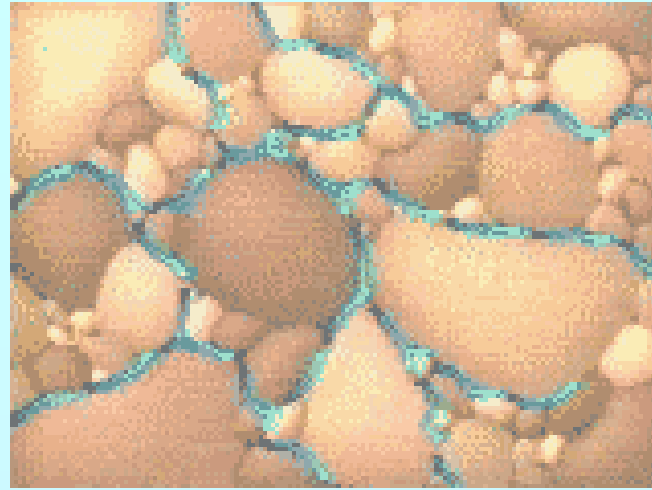
tektonicky porušené krystalinické horniny	5 – 30 %
tektonicky téměř neporušené krystalinické horniny	0 – 5 %
bazalty	3 – 35 %
zvětralé granity	34 – 57 %
zvětralé gabro	42 – 45 %



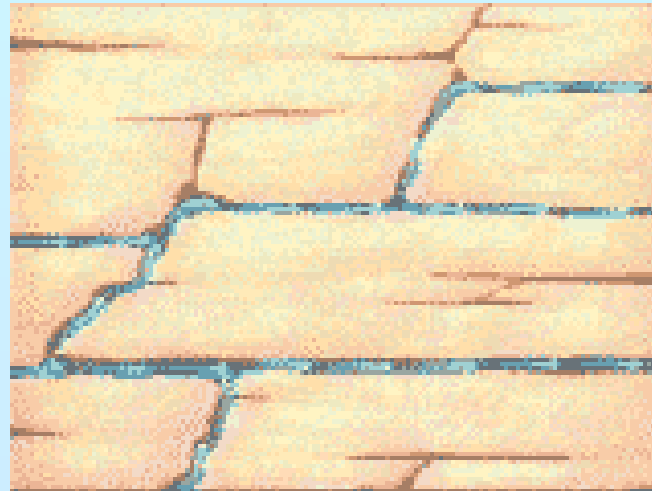
**Blokdiagram oblasti Piedmontu a Blue Ridge  
s vyznačením porozity hornin (Heath 1984)**

*česká terminologie*

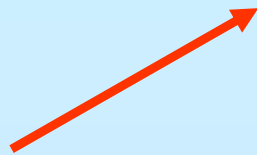
- průlinová porozita  
(pórovitost, propustnost)



- puklinová porozita  
(pórovitost, propustnost)



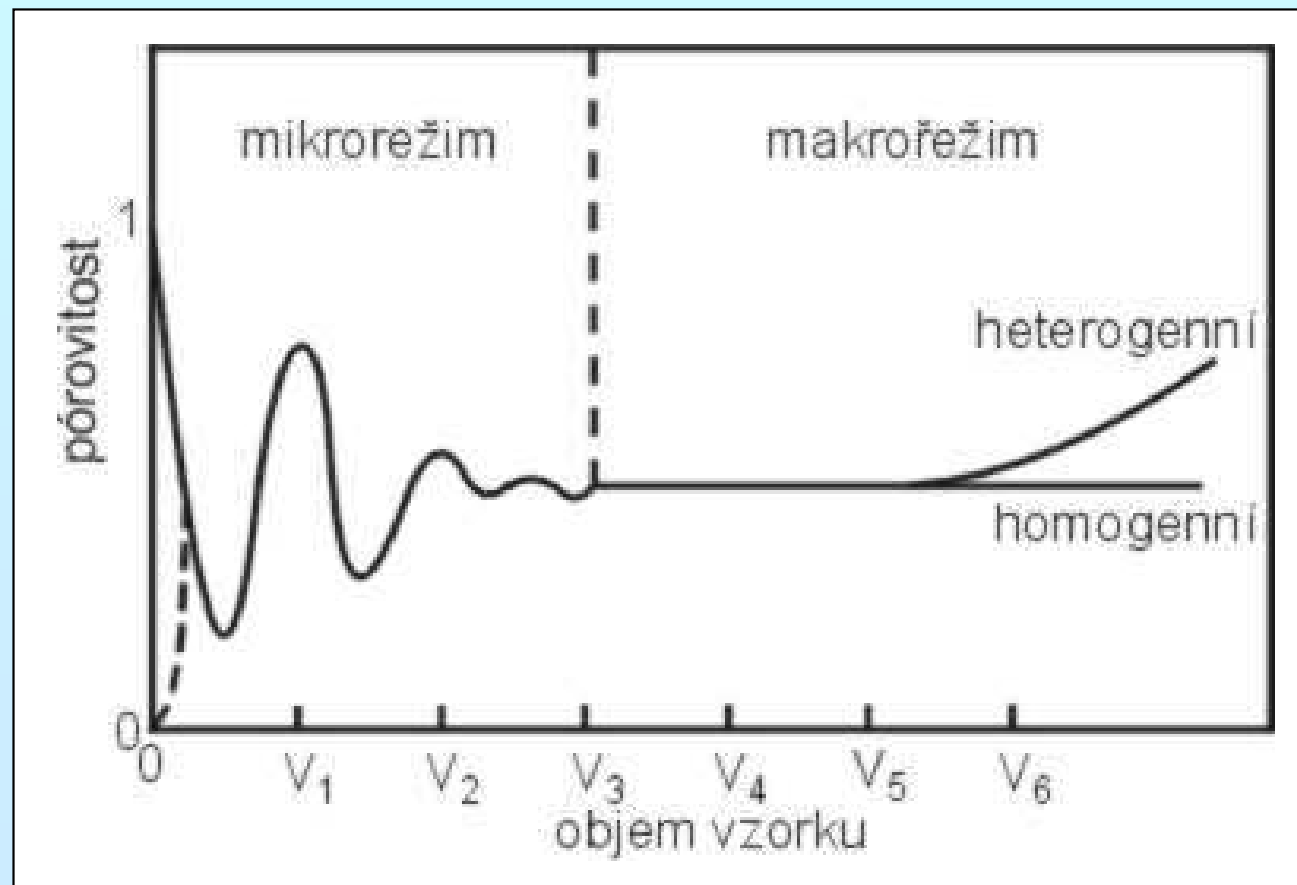
- krasová porozita  
(pórovitost, propustnost)



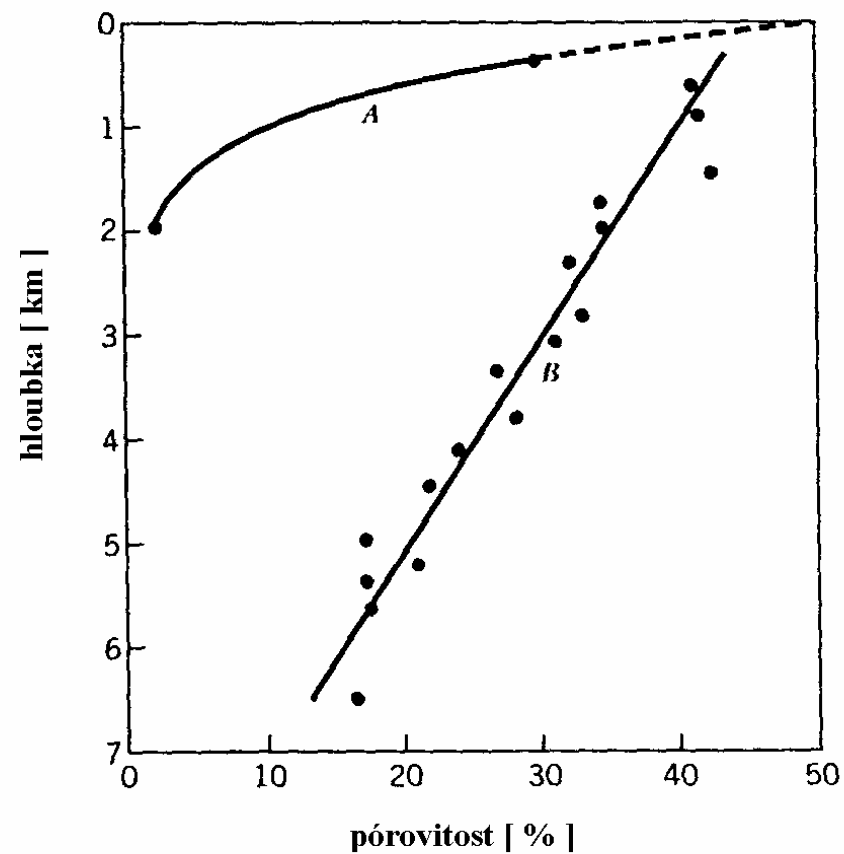


# REPREZENTATIVNÍ ELEMENTÁRNÍ OBJEM (REV)

- objem pórového prostředí,  
pro který můžeme definovat průměrné hydraulické parametry
- současně je v něm i průměrná hodnota pórovitosti



# VÝVOJ PÓROVITOSTI S HLOUBKOU



**Vztah mezi pórovitostí a hloubkou uložení horniny pod povrchem Země (Domenico a Schwarz 2000)**

**A - břidlice (Athys 1930)**

**B - pískovce (Blatt 1979)**

## *Pohyb podzemní vody*

proudění probíhá z místa s vyšším potenciálem do místa s nižším potenciálem

*hydraulický potenciál*

složky hydraulického potenciálu

kinetická energie = „rychlostní“ výška

$$E_k = \frac{m.v^2}{2}$$

potenciální energie = „polohová“ výška

$$E_p = m.g.z$$

tlaková energie = „tlaková“ výška

$$E_t = p$$

Celková energie – součet všech parciálních složek

$$E_{celkv} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z + p \quad / \rho$$

$$E_{celkm} = \frac{v^2}{2} + g \cdot z + \frac{p}{\rho} \quad \longrightarrow \quad \text{Bernoulliho rovnice} \quad / g$$

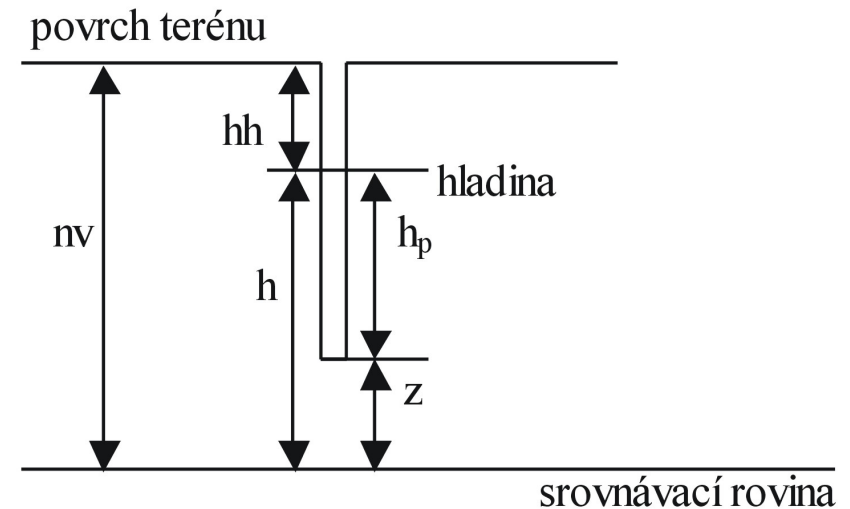
Proudění nestlačitelné kapaliny bez tření – součet všech členů je konstantní

$$\frac{v^2}{2 \cdot g} + z + \frac{p}{\rho \cdot g} = konst.$$

jednotky [ J/N ] = [ m ]  $\longrightarrow$  **hydraulická výška**

$$p = h \cdot \rho \cdot g$$

$$h = z + h_p$$



hydraulický potenciál (celková energie) -  $\phi$

$$\phi = g.z + \frac{p}{\rho} = g.z + \frac{\rho.g.h_p}{\rho} = g(z + h_p) \implies \phi = g.h$$

upravená základní rovnice hydrostatiky

$$\frac{\delta \cdot d}{z} + z + \frac{\delta \cdot z}{z} = \frac{\delta \cdot d}{d_1} + z + \frac{\delta \cdot z}{z}$$

mírou potenciálu (energie) podzemní vody je tedy její *hydraulická výška*

určení hydraulické výšky

- piezometry – „bodové hodnoty“
- hydrogeologické vrty – „průměrné hodnoty“

# HYDRAULICKÝ GRADIENT

určuje směr pohybu podzemní vody

$$I = -\frac{dh}{dl} = \frac{h_1 - h_2}{\Delta l}$$

$h_1$  hydraulická výška v bodě 1

$h_2$  hydraulická výška v bodě 2

$\Delta l$  rozdíl vzdáleností bodů 1 a 2

je definovaný jako maximální pokles hydraulické výšky  
(maximální rozdíl výšek při minimální stejné vzdálenosti)

je paralelní se směrem proudění podzemní vody  
(homogenní, izotropní prostředí)

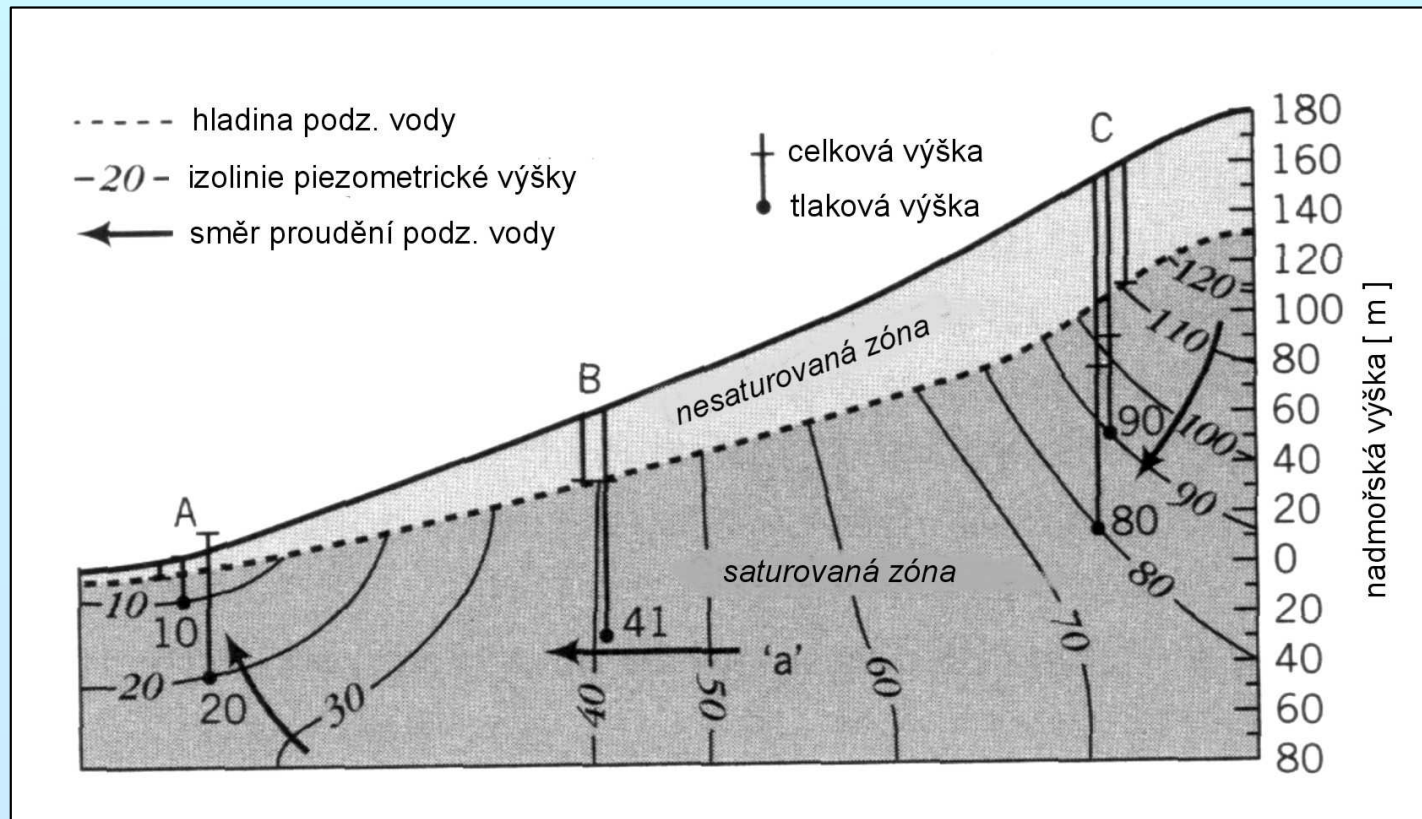
### *equipotenciály (equipotenciální linie)*

- spojují místa se stejnou hodnotou hydraulické výšky
- směry proudění podzemní vody jsou na ně kolmé

### *hydroizohypsy (volná hladina)*

- průmět equipotenciálních linií na povrch terénu

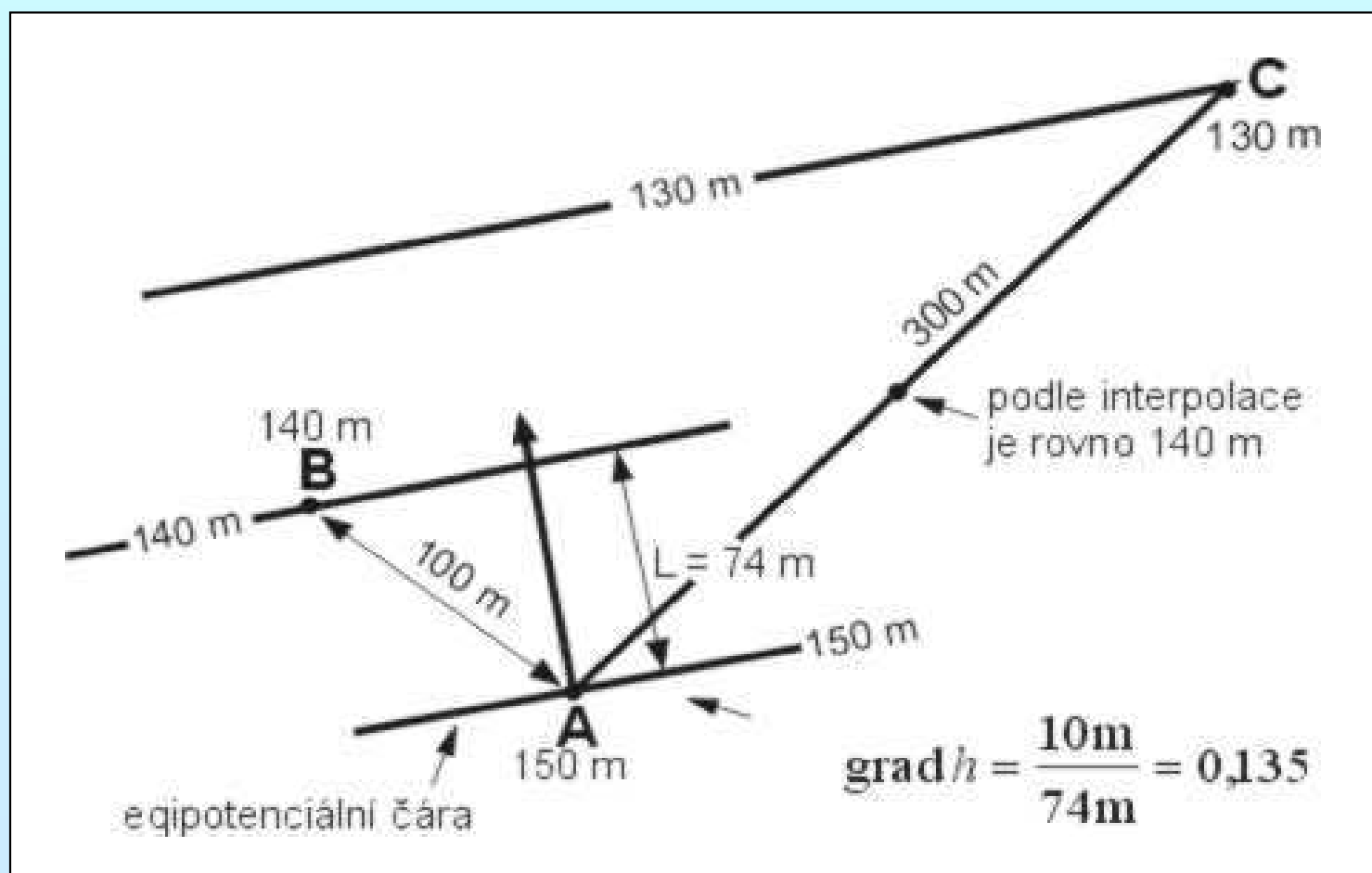
### *hydroizopiezy (napjatá hladina)*



# URČENÍ HYDRAULICKÉHO GRADIENTU

*horizontální hydraulický gradient*

- minimálně 3 body se změřenými hydraulickými výškami (výšky hladin podz. vody)
- metoda současně základní i pro konstrukci hydroizohyps

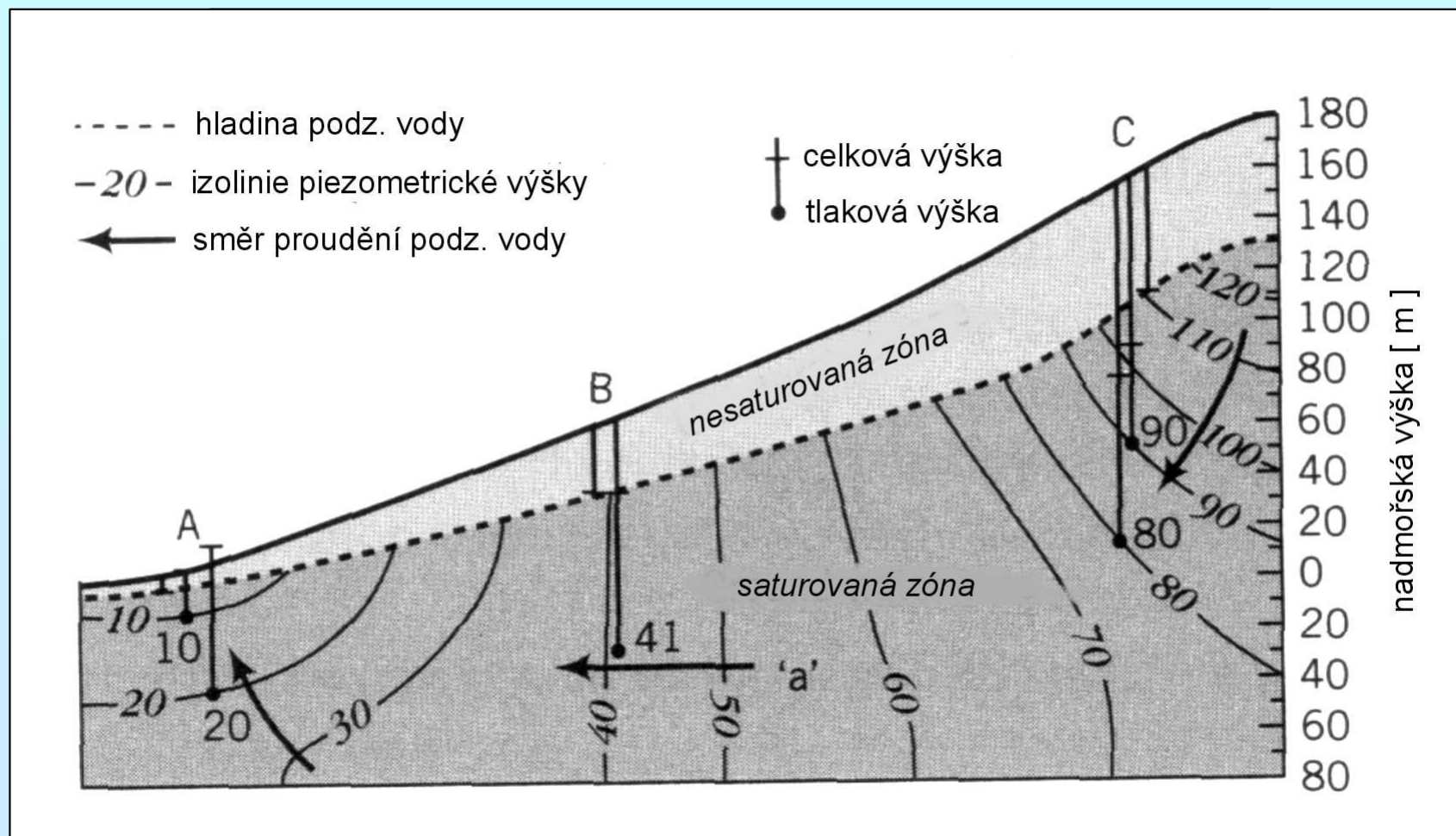




# URČENÍ HYDRAULICKÉHO GRADIENTU

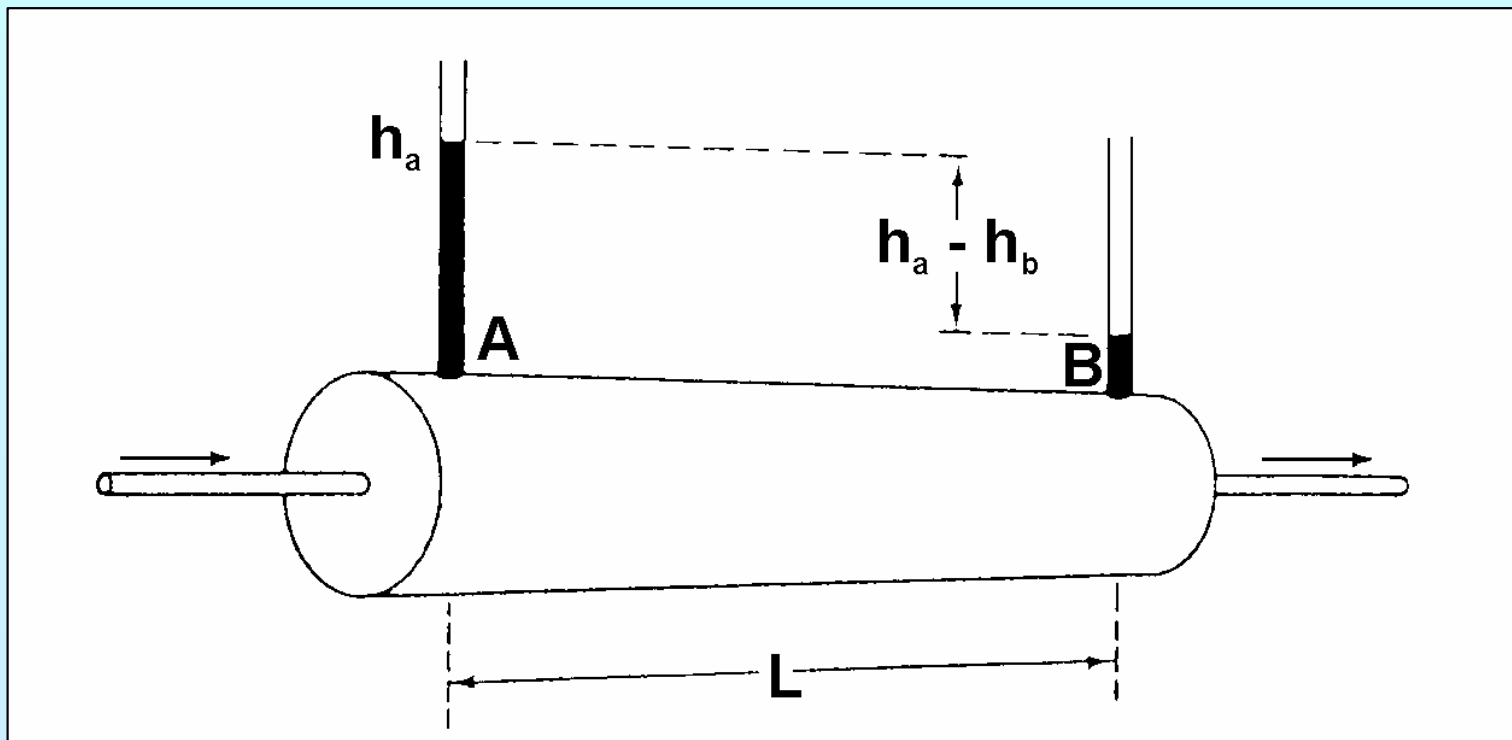
*vertikální hydraulický gradient*

- minimálně 2 piezometry situovanými těsně vedle sebe
- se změřenými hydraulickými výškami (výšky hladin podz. vody)



# DARCYHO ZÁKON

$$Q \propto (h_A - h_B) \quad Q \propto 1/L \quad Q \propto k$$



$$Q = k \cdot A \cdot \frac{h_A - h_B}{L}$$



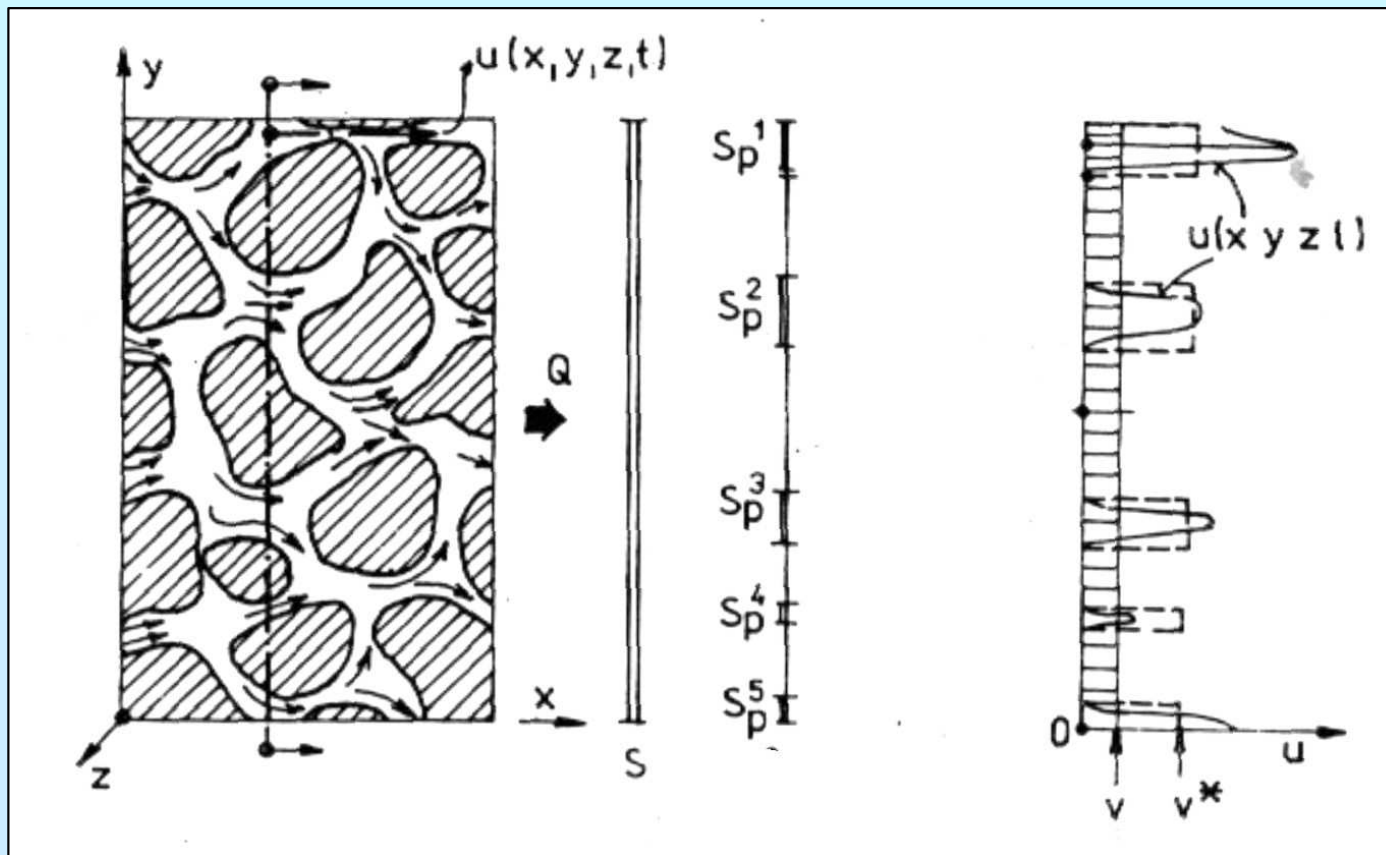
$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dh}{dl}$$

$$q = \frac{Q}{A} = k.I$$

*specifický průtok* (průtok přes jednotkový průřez)  
 = event. *filtrační rychlost proudění* ( $v$ ), *fiktivní rychlost*

$$v = \frac{Q}{A.n_e} = \frac{q}{n_e}$$

*střední lineární rychlost proudění*  
 = event. *skutečná (efektivní) rychlost proudění* ( $v_{ef}$ )



konstanta  $k$  – *hydraulická vodivost (koeficient filtrace -  $k_f$ )* – [ m/s ]

- charakterizuje vlastnost prostředí propouštět vodu
- je tedy vlastností prostředí i proudící kapaliny

$$k = - \frac{Q}{A \cdot (dh / dl)}$$

$K$  – *koeficient propustnosti (někdy  $k_p$ )* – [ m<sup>2</sup> ]

- charakterizuje vlastnost prostředí propouštět jakoukoliv kapalinu a plyn
- je tedy vlastností prostředí
- v praxi používaná jednotka – Darcy – 1D = 9,87 x 10<sup>-9</sup> cm<sup>2</sup>

$$k = K \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu}$$

# PLATNOST DARCYHO ZÁKONA

pomalé rychlosti proudění – pohyb molekul kontrolován viskózními silami

*laminární proudění*

částičky se pohybují po vzájemně paralelních drahách - *proudnicích*

větší rychlosti proudění – setrvačné síly převyšují viskózní síly

*turbulentní proudění*

částičky se pohybují po křivočarých drahách - *nedefinovatelné*

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}$$

$Re$	Reynoldsovo číslo
$\rho$	hustota vody
$v$	rychlost proudění
$d$	průměr efektivního zrna
$\mu$	dynamická viskozita

přechod laminárního do turbulentního proudění při  $Re$  kolem 5

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_{kr} \cdot d}{\mu}$$

vyjádření pomocí *kritické rychlosti proudění*

vznik turbulentního proudění - při překročení kritické rychlosti proudění

- okolí čerpaných vrtů
- krasové dutiny
- kaverny či pukliny větších rozměrů

---

velmi jemnozrnné horniny ( $k < 10^{-8}$  m/s)

- voda je vázána převážně jako voda obalová
- malá velikost pórů – pohyb vody až po překonání sil tření
- existuje tzv. *prahový hydraulický gradient*

— zkrasovělý vápenec —

— propustný bazalt —

— rozpukané vyvěřelé a metamorfované horniny —

— vápence a dolomity —

— pískovce —

— kompaktní vyvěřelé a metamorfované horniny —

— břidlice —

— nezvětralé mořské jíly —

— glaciální till —

— hlíny, spraše —

— hlinitý písek —

— čistý písek —

— štěrk —

zpevněné horniny

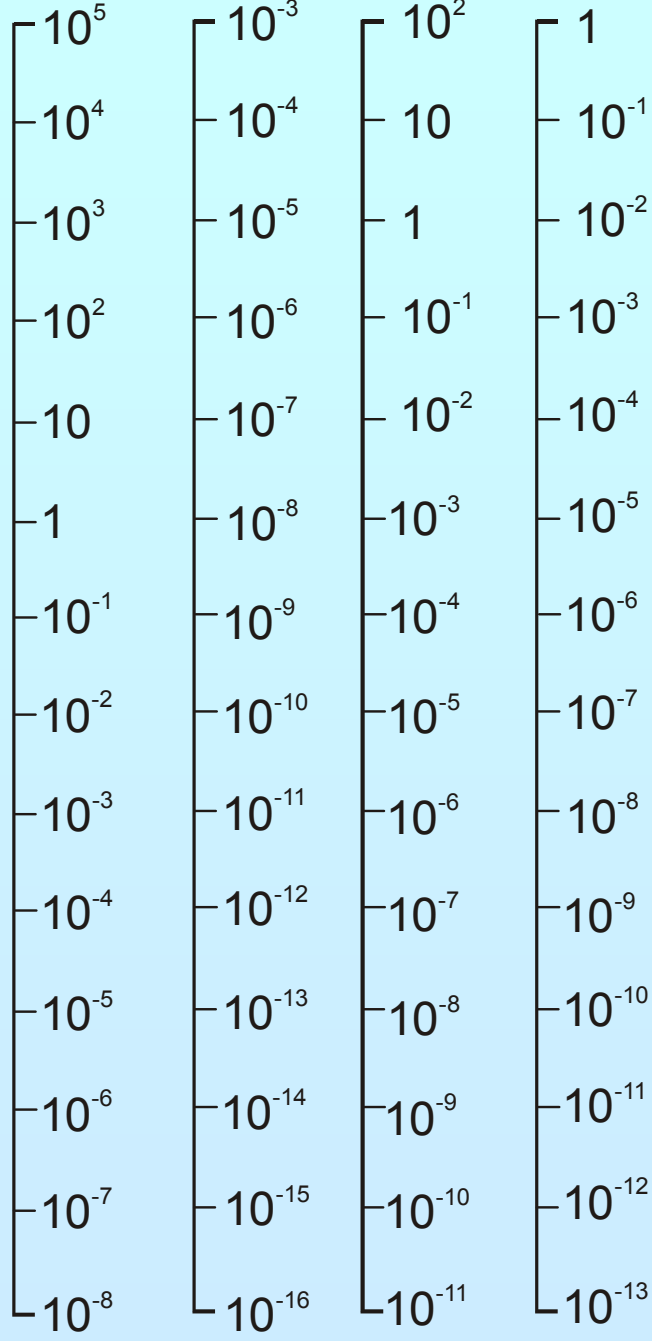
nezpevněné horniny

$K$   
(darcy)

$K$   
( $\text{cm}^2$ )

$k$   
( $\text{cm/s}$ )

$k$   
( $\text{m/s}$ )



## vzájemné srovnávání propustnosti hornin

- relativní –  $k_1 \gg k_2$  (minimálně o 1 řád)

- absolutní

- uvedení hodnot  $k$

- index propustnosti (regionální HG průzkum)

- neexistuje absolutně nepropustná hornina

- v praxi považujeme za prakticky nepropustnou horninu s  $k < 10^{-10} - 10^{-12}$  m/s

kolektor

- hornina, která ve srovnání s okolními horninami má vyšší propustnost

izolátor

-



*kolektor*

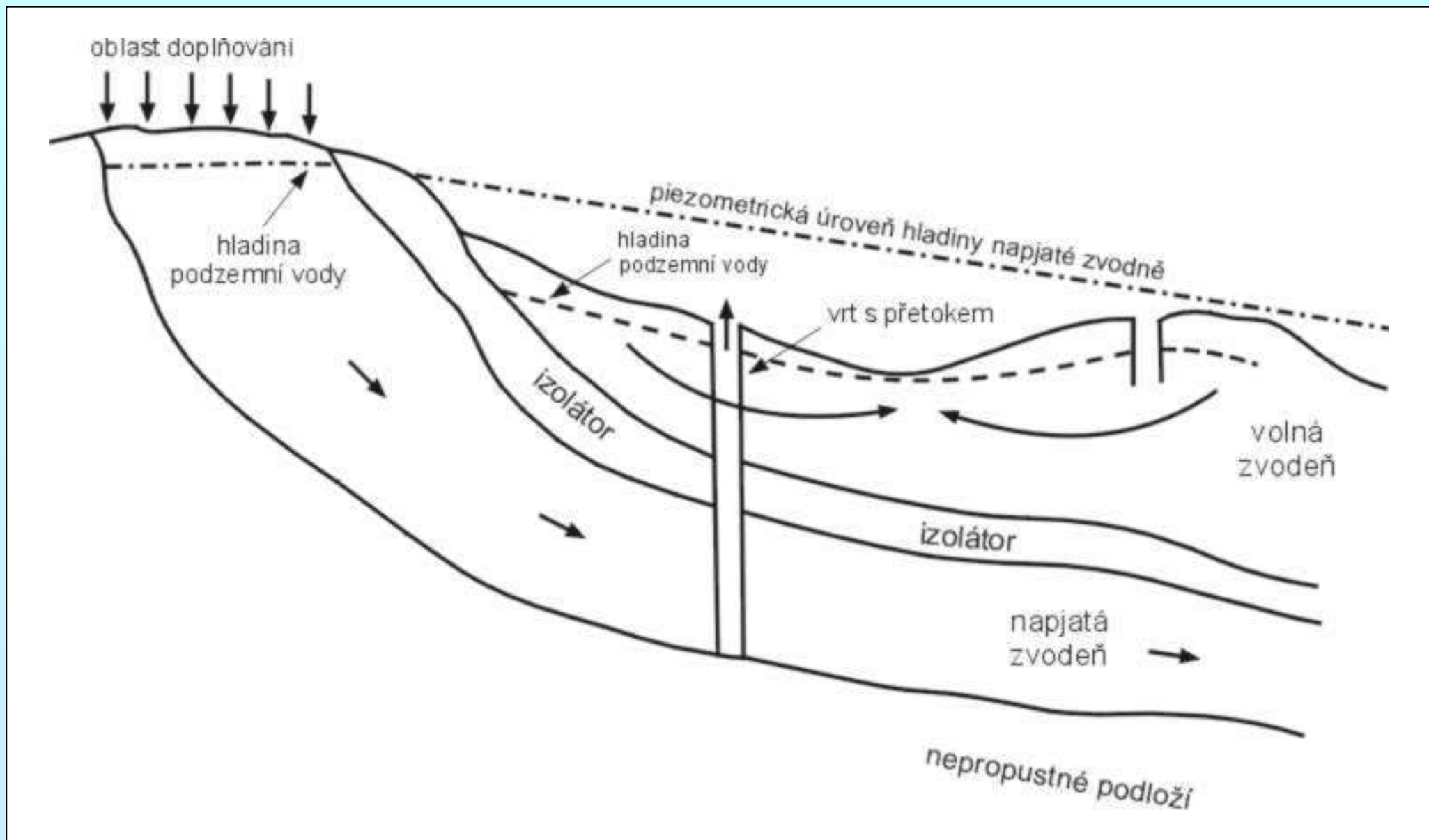
- hornina, která má ve srovnání s okolními horninami vyšší propustnost

*izolátor*

- hornina, která má ve srovnání s okolními horninami nižší propustnost
- stropní izolátor X počevní izolátor

*poloizolátor*

- hornina (izolátor), přes kterou může do kolektoru přetékat nezanedbatelné množství vody (= mezivrstevní přetékaní)



### *zvodeň*

- těleso podzemní vody – hydraulicky spojitá akumulace podzemní vody

### *zvodněný systém*

- jeden nebo více zvodněných kolektorů s přilehlými izolátory a poloizolátory

### *zvodeň napjatá*

- shora omezená izolátorem
- má napjatou hladinu – tlak je vyšší než tlak atmosférický
- piezometrická hladina – hladina, na kterou by napjatá hladina vystoupila (výtláčná hladina = event. kladná nebo záporná)
- tzv. artéská podzemní voda, artéské systémy

### *zvodeň volná*

- shora není omezená
- má volnou hladinu – tlak je roven tlaku atmosférickému

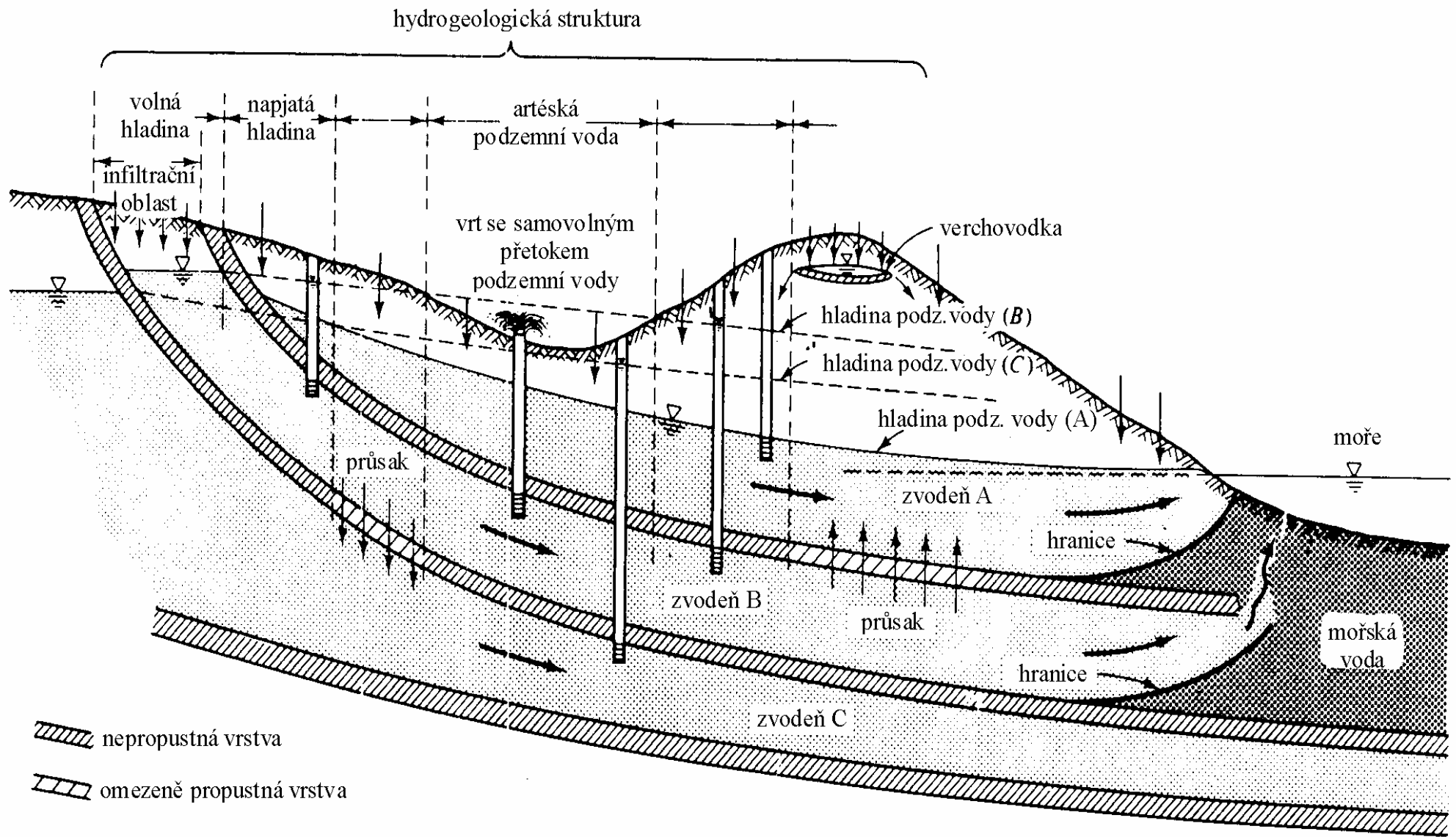
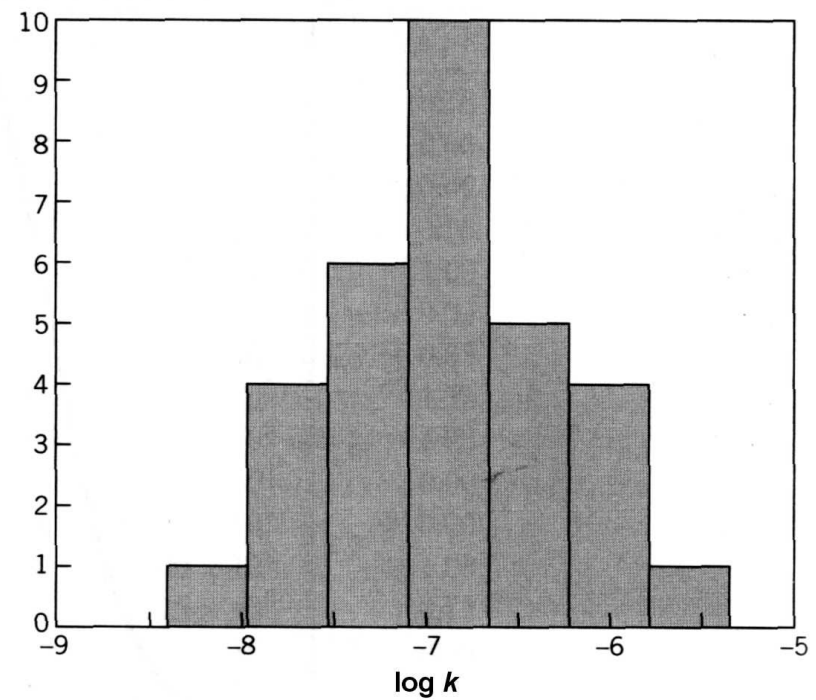
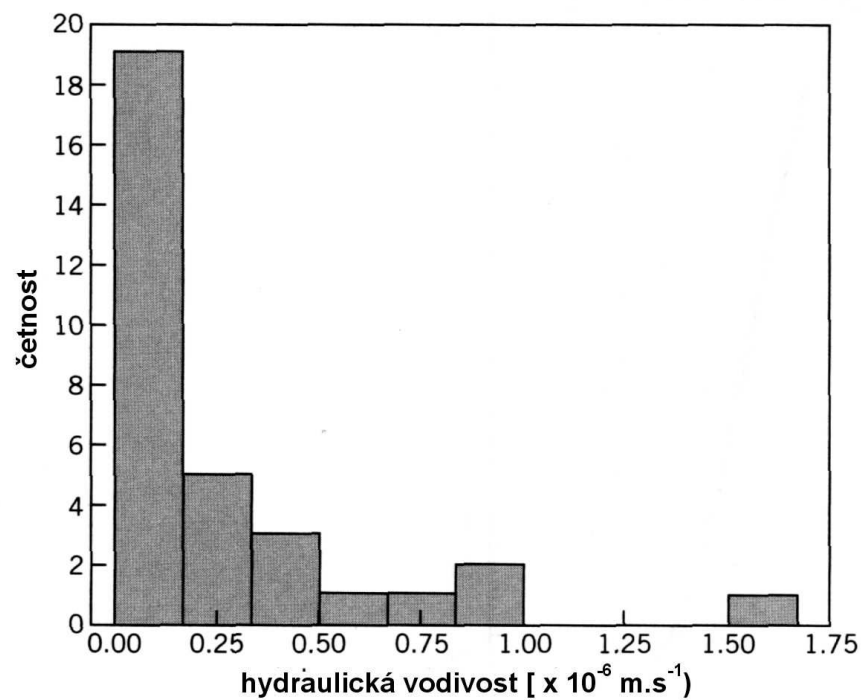
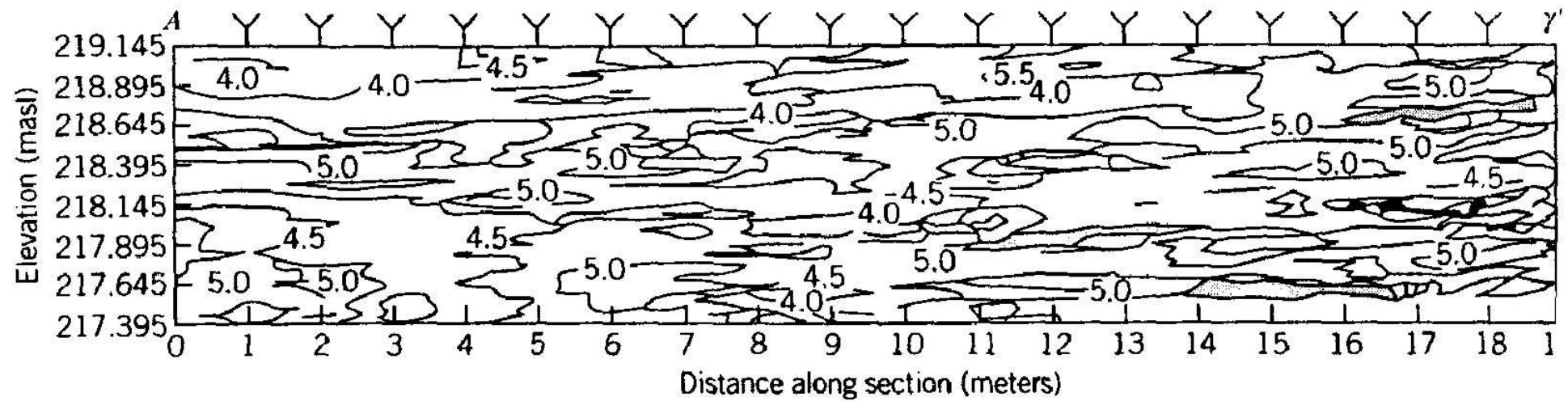


Fig. 1.4. Types of aquifers.

# DISTRIBUCE HODNOT HYDRAULICKÉ VODIVOSTI



# HOMOGENITA A IZOTROPIE

*homogenní* formace

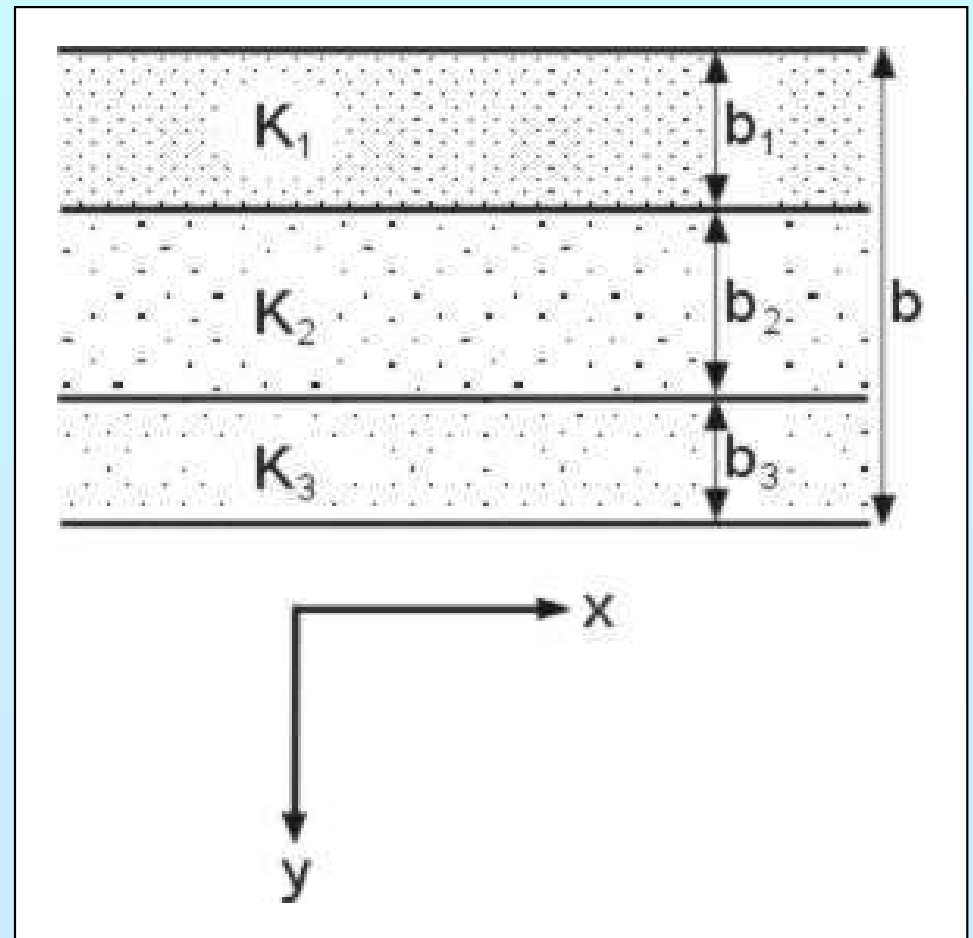
- v každém bodě má stejné vlastnosti – stejné hodnoty hydraulické vodivosti

*heterogenní* (nehomogenní) formace

- odlišné vlastnost v různých bodech

příčiny heterogenity

- různé sedimentační podmínky a jejich změny
- v rámci jedné vrstvy
- mezi vrstvami
- prostředí s puklinovou pórovitostí

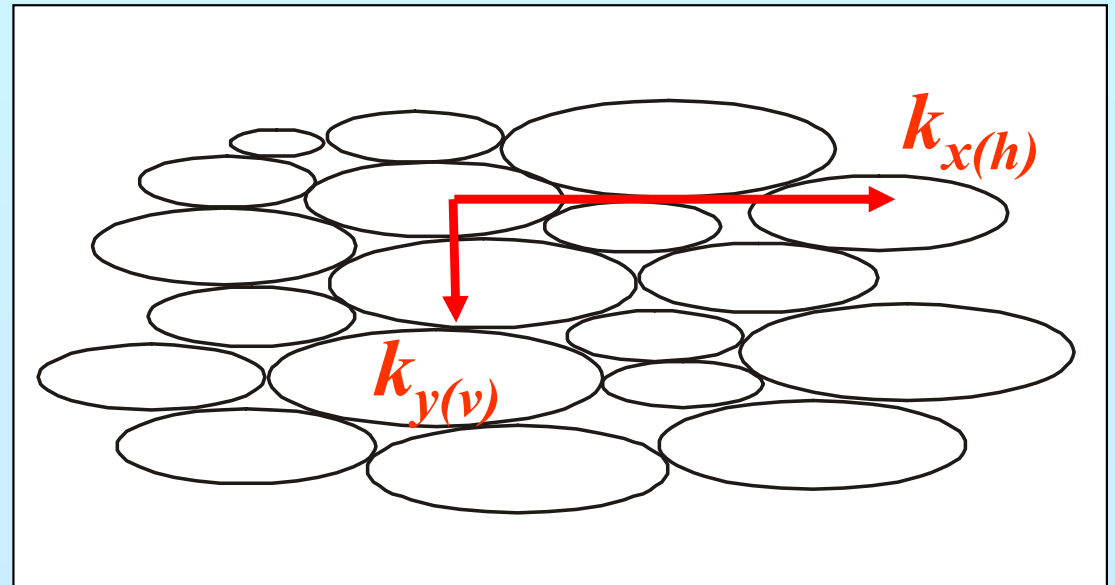
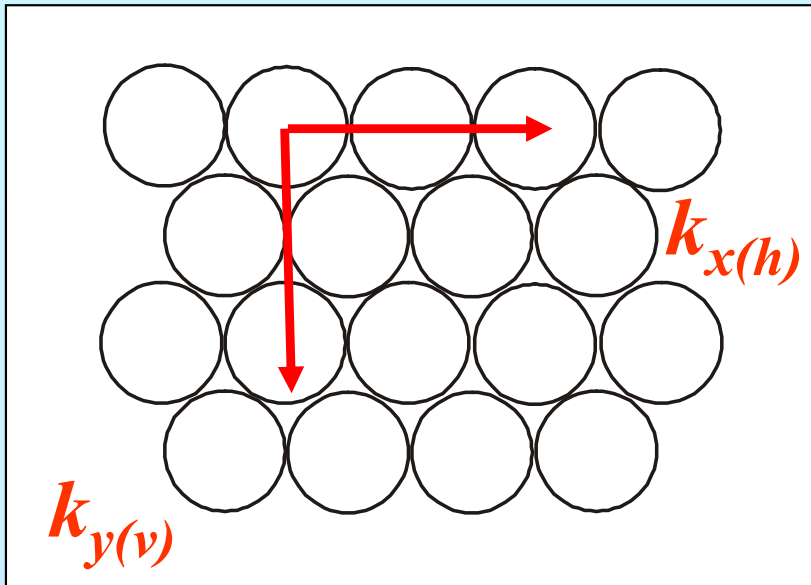


### *izotropní prostředí*

- vlastnosti prostředí nezávisí na směru a jsou ve všech směrech stejné

### *anizotropní prostředí*

- vlastnosti prostředí závisí na směru a nejsou ve všech směrech stejné
- extrémně vysoká v puklinově pórovitém prostředí



# DARCYHO ZÁKON V ANIZOTROPNÍM PROSTŘEDÍ

- v reálném 3-D prostředí může podzemní voda proudit všemi směry (osy  $x$ ,  $y$ ,  $z$ )
- podobně hydraulický gradient můžeme definovat ve všech směrech
- potom pokud jsou směry anizotropie paralelní se směry os  $x$ ,  $y$ ,  $z$

proudění ve směru osy  $x$

$$q_x = -k_x \frac{\Delta h}{\Delta x}$$

proudění ve směru osy  $y$

$$q_y = -k_y \frac{\Delta h}{\Delta y}$$

proudění ve směru osy  $z$

$$q_z = -k_z \frac{\Delta h}{\Delta z}$$

specifický tok  $q$  ve směru osy  $x$

$$q_x = -k_{xx} \frac{\Delta h}{\Delta x} - k_{xy} \frac{\Delta h}{\Delta y} - k_{xz} \frac{\Delta h}{\Delta z}$$



pokud nejsou směry anizotropie paralelní se směry os  $x, y, z$

$$\begin{matrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{matrix}$$



$$\begin{matrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{matrix}$$

## Popis anizotropie

*elipsoid anizotropie*

*koeficient anizotropie*

- $KA = \frac{k_h}{k_v}$  - v sedimentárních horninách běžně kolem 10 a i řádově více

## Určení průměrné hydraulické vodivosti

$$K_x = \frac{\sum (m_i \cdot k_i)}{\sum m_i}$$

$m_i$  mocnost i-tého horizontu

$$K_z = \frac{\sum m_i}{\sum (m_i/k_i)}$$

$k_i$  hydraulická vodivost i-tého horizontu

## Metody stanovení propustnosti hornin

1. podle popisu hornin
2. empirické vzorce  
Hazenův  
Kozenyho  
Harlemanův,  
– vzorce jsou platné jen v prostředí v nichž byly odvozeny
3. laboratorními zkouškami  
– propustoměry – platné pro zkoumané vzorky hornin
4. hydrodynamickými zkouškami  
– obrovská výhoda – stanovení v přírodních podmínkách