

# Hydraulika podzemních vod

# ***Pohyb podzemní vody***

Hydraulický potenciál 

Složky hydraulického potenciálu

Kinetická energie = „rychlostní“ výška

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

Potenciální energie = „polohová“ výška

$$E_p = m \cdot g \cdot z$$

Tlaková energie = „tlaková“ výška

$$E_t = p$$

Celková energie – součet všech parciálních složek

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

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

Proudění nestlačitelné kapaliny bez tření – součet všech členů je konstantní

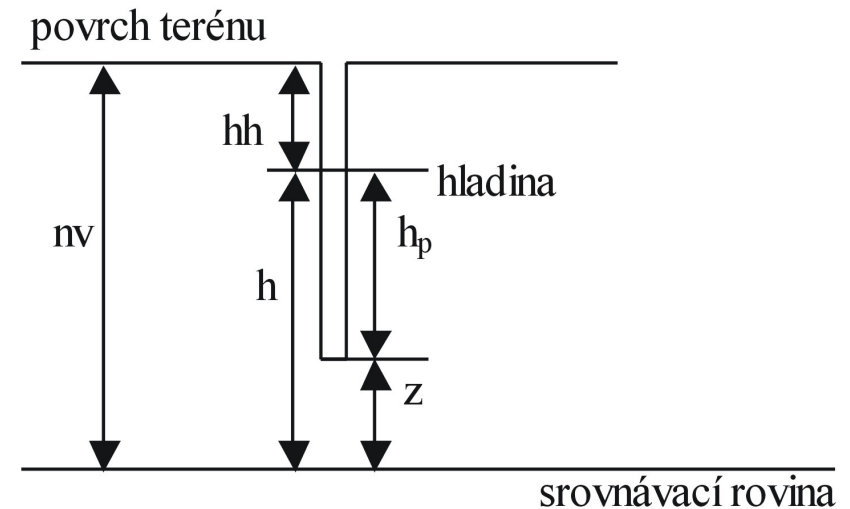
$$\frac{v^2}{2 \cdot g} + z + \frac{p}{\rho \cdot g} = konst.$$

jednotky [ J/N ] = [ m ]  $\longrightarrow$

**Hydraulická výška**

$$p = h \cdot r \cdot g$$

$$h = z + h_p$$



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

$$\frac{\delta \cdot d}{d_2} + z + \frac{\delta \cdot z}{v_2^2} = \frac{\delta \cdot d}{d_1} + z + \frac{\delta \cdot z}{v_1^2}$$

## Darcyho zákon

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

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

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

$$q = \frac{Q}{A} = k \cdot I \quad \text{specifický průtok (filtrační rychlost)}$$

$$v = \frac{Q}{A \cdot n_e} = \frac{q}{n_e} \quad \text{efektivní rychlost proudění}$$

rozdíl mezi koeficientem hydraulické vodivosti a koeficientem propustnosti

$$K = k \frac{\mu}{\gamma} \quad [\text{m}^2] \quad \gamma = \rho \cdot g \quad 1 \text{ Darcy} - 1\text{D} = 9,87 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2$$

$$k = \frac{K\gamma}{\mu} \quad [\text{m/s}]$$

koeficient propustnosti – vyjadřuje fyzikální vlastnost pórovitého prostředí propouštět vodu nebo plyn bez ohledu na jejich vlastnosti  
(viskozita – mění se s teplotou, tlakem a mineralizací)

koeficient hydraulické vodivosti – vyjadřuje vlastnost pórovitého prostředí propouštět vodu

### Jiné podoby lineárního filtračního zákona

$$\text{Hazen} \quad v = C_d e (0,70 + 0,03t) \frac{h}{L}$$

Terzaghi – uvažuje závislost na materiálu (dynamický koeficient viskozity)

Později – **nelineární tvary filtračního zákona** – experimentálně odvozované různé koeficienty n

$$v = k_f I^n$$

# Meze platnosti Darcyho zákona

- 1. přechod I<sub>1</sub>
- 2. velmi jem – jíly – většinou pohyb až

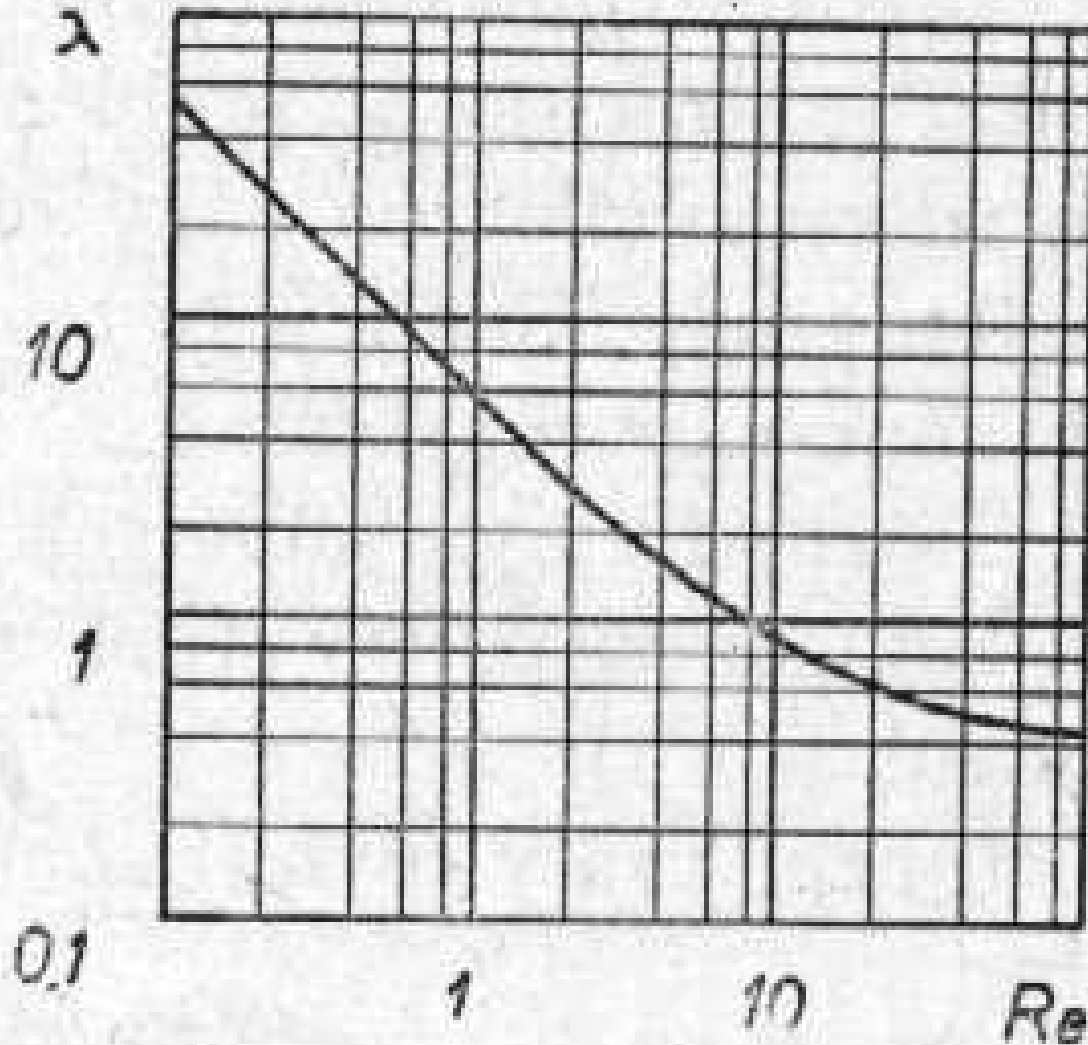
**laminární proudění**  
**turbulentní** (n

přechod I<sub>a</sub>  
 průměru p

vyjádření  $\rho$

kritická hod

nízké hodnoty  
 mezi hodnotami  
 při hodnot



- proudnice)

čné rychlosti,

bí ( $Re_k = 2000$ )

– 9 (4, 4,5, atd.)

**Obr. 8. Čára geohydraulického odporu  $\lambda$  (Kroupa).**

obecně

$$Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$$

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

(dynamický s. v.)

$$v_k = \frac{\nu Re}{d_e}$$

$$Re = \frac{1}{0,75p + 0,23} \frac{v d_e}{\nu}$$

Pavlovskij

$$v_k = (0,75p + 0,23) \frac{\eta}{\rho} \frac{Re_k}{d_e}$$

$$Q = -k \cdot A \cdot I^{1/n}$$

Darcyho zákon při turbulentním proudění



# Metody stanovení koeficientu filtrace

## 1. Orientační stanovení koeficientu filtrace podle popisu hornin

<i>Název horniny</i>	<i>Hydraulická vodivost (<math>m.s^{-1}</math>)</i>
Štěrk	$10^{-2} - 10^{-3}$
Štěrk písčítý	$10^{-3} - 10^{-4}$
Štěrk písčítý a jílovitý	$10^{-4} - 10^{-5}$
Písek hrubozrnný	$10^{-4} - 10^{-5}$
Písek jílovitý	$10^{-5} - 10^{-6}$
Jíl písčítý (hlína písčitá)	$10^{-6} - 10^{-7}$
Jíl slabě písčítý (hlína jílovitá)	$10^{-7} - 10^{-8}$
Jíl	$<10^{-8}$

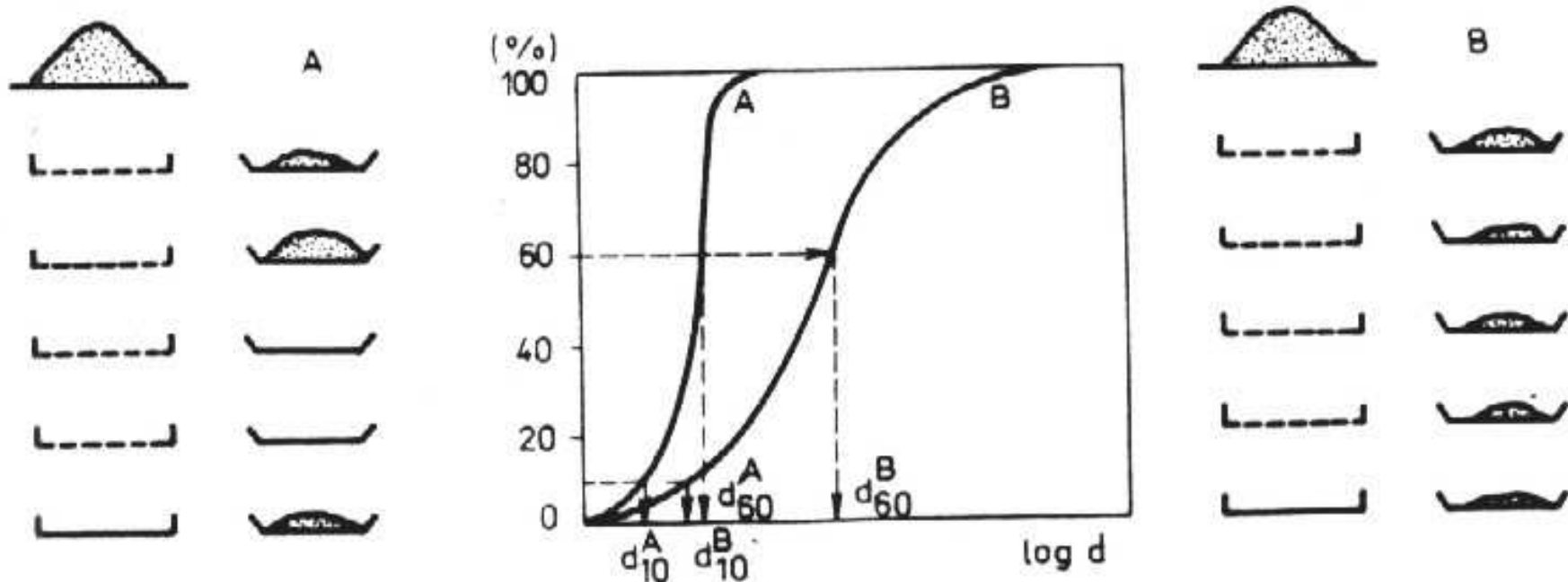
## 2. Stanovení koeficientu filtrace podle křivek zrnitosti

Průlinově porózní horniny vykazují závislost mezi velikostí zrn, pórovitostí, uspořádáním zrn a propustností

na základě laboratorních experimentů byla odvozena řada empirických vzorců

Pro tyto vzorce se na křivkách zrnitosti určují reprezentativní body  $D_{10}$ ,  $D_{20}$ ,  $D_{50}$  a  $D_{60}$ .

### Konstrukce granulometrické křivky



## 2. Stanovení koeficientu filtrace podle křivek zrnitosti

Průlinově porózní horniny vykazují závislost mezi velikostí zrn, pórovitostí, uspořádáním zrn a propustností

na základě laboratorních experimentů byla odvozena řada empirických vzorců

Pro tyto vzorce se na křivkách zrnitosti určují reprezentativní body  $D_{10}$ ,  $D_{20}$ ,  $D_{50}$  a  $D_{60}$ .

### **Konstrukce granulometrické křivky**

velikost zrna  $D_{10}$  nazývá Hazen *efektivní průměr* – kostra horniny

Koeficient stejnorodosti (nestejnorodosti)  $C_n = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Číslo křivky	$D_{10}$ mm	$D_{20}$ mm	$D_{60}$ mm	$D_{60}/D_{10}$
1	0,004	0,011	0,035	8,75
2	0,07	0,09	0,18	2,6
3	0,007	0,021	0,220	31,4

## Vzorec Hazenův

$$k = C \cdot d_{10}^2 (0,7 + 0,32) \text{ [ cm/s ]}$$

Podmínky platnosti:  $0,1 < d_{10} < 3.0 \text{ mm}$   
 $d_{60} / d_{10} = < 5$

## Tabulka hodnot C pro Hazenův vzorec

Koeficient C (pro $k_f$ v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Název sypkých hornin
0,00464	Štěrký a písky silně zahliněné
0,00695	Štěrký písčité, zahliněné
0,00925	Štěrký písčité , slabě zahliněné
0,0104	Štěrký písčité, velmi slabě zahliněné
0,0116	Štěrký písčité, střední zrnitosti, čisté
0,0139	Štěrký písčité, hrubé, velmi čisté

## Vzorec podle Beyera a Schweigera – písčité a štěrkovité aluviální náplavy

$$K = Cd_{10}^2 \quad k = \frac{\gamma}{\eta} Cd_{10}^2 \quad C = a \left( \frac{d_{60}}{d_{10}} \right)^b \quad a = 1,5961 \cdot 10^{-3} \quad , \quad b = -0,20374$$

podzemní voda při 10 °C  $k = 7,5 \cdot 10^6 Cd_{10}^2$  (hodnoty d v metrech)

Podmínky platnosti:  $d_{10} = 0,06 - 0,6$  mm

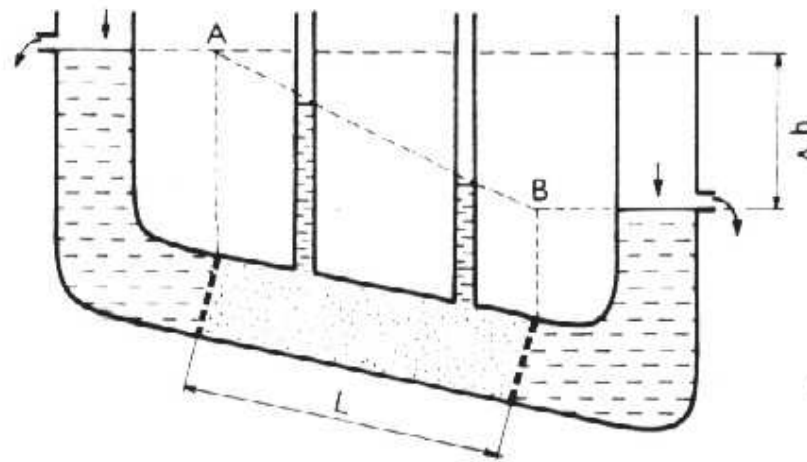
$$d_{60}/d_{10} = 1 - 20$$

### 3. Stanovení koefi

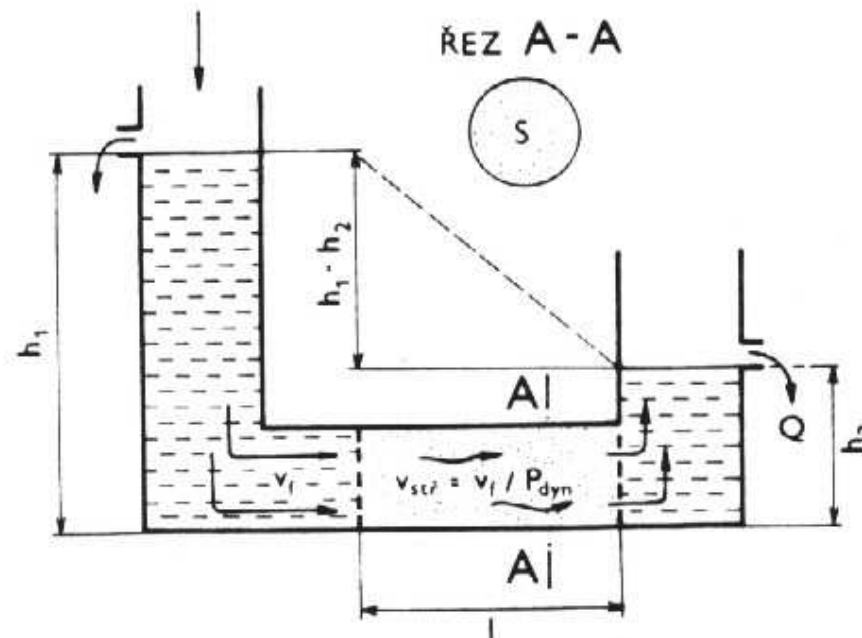
laboratorní metod  
nejčastější využití

vychází ze základ  
úprava rovnice po

1. vytvoření kor
2. proměnlivý h



Obr. 8. 1.15.: Schéma filtračního přístroje podle O. Hynie



hornin,

### 3. Stanovení propustnosti v propustoměrech

laboratorní metoda stanovení koeficientu hydraulické vodivosti v odebraných vzorcích hornin, nejčastější využití pro nesoudržné sedimenty

vychází ze základní rovnice Darcyho filtračního zákona, úprava rovnice podle typu konstrukce propustoměrů

1. vytvoření konstantního hydraulického gradientu
2. proměnlivý hydraulický gradient

odběr vzorků – u nesoudržných zemin nelze odebrat neporušený vzorek, umělé zhutnění, nutné zajistit co nejmenší manipulaci se vzorkem

vodou nasycené vzorky – při odběru dochází k propírání vzorků vodou a vyplavování nejjemnější frakce – řešení v odčerpání vody z druhého vrtu  
– kalkulace rychlosti proudění pro zamezení vzniku sufoze

*nepřesnosti* – viskozita vody se mění s teplotou a tlakem (udávat laboratorní podmínky), není zachována ulehlost vzorku,

obsah vzduchu v pórech zeminy (vzduch rozpuštěný ve vodě se vylučuje v pórech a zmenšuje průtočný profil), nedodržení laminárního proudění ( $Re_k$ ), mechanické závady (obtékání vzorku)