

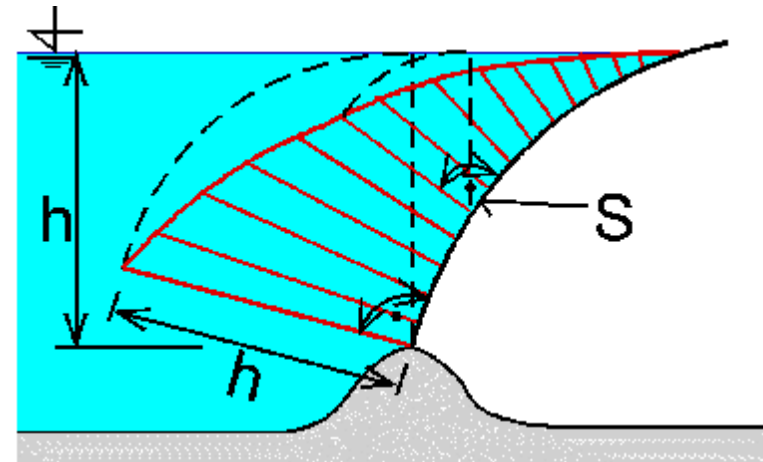
Základy hydrauliky pro praxi

**Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc., Ing. Ivana Marešová,
Ing. Daniel Mattas, CSc., Ing. Tomáš Pícek, Ph.D.**

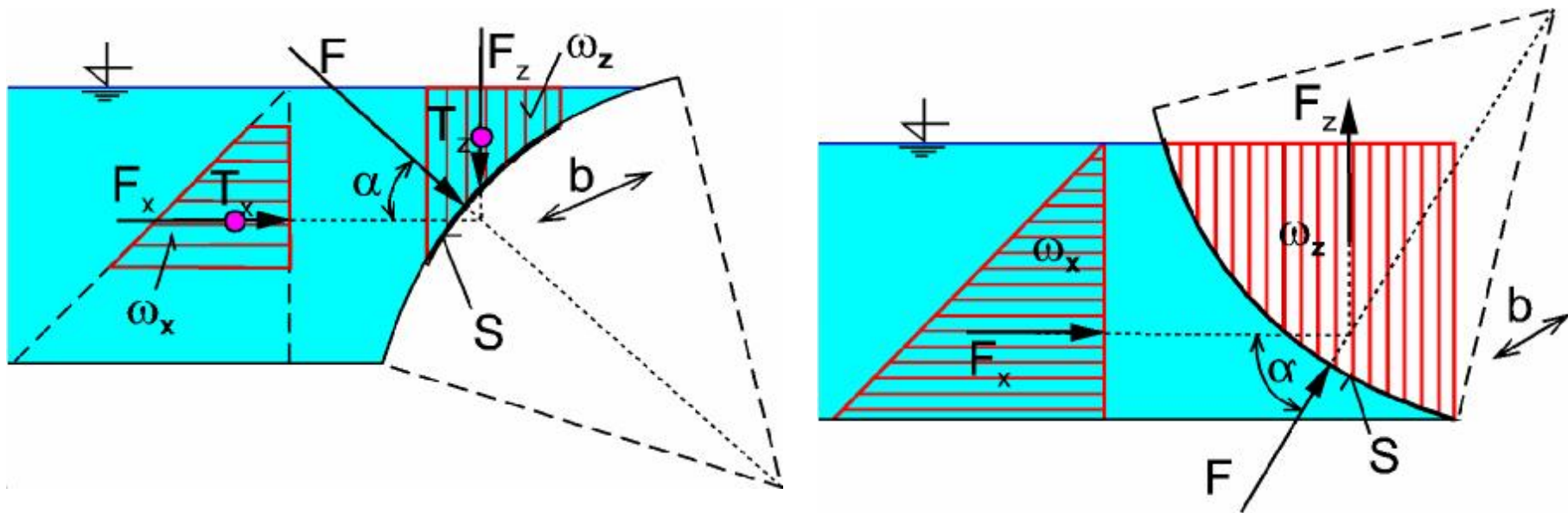
Praktické aplikace hydrostatiky při navrhování vodních staveb

ŘEŠENÍ ZATÍŽENÍ PRISMATICKÝCH ZAKŘIVENÝCH PLOCH

Průběh hydrostatického tlaku:

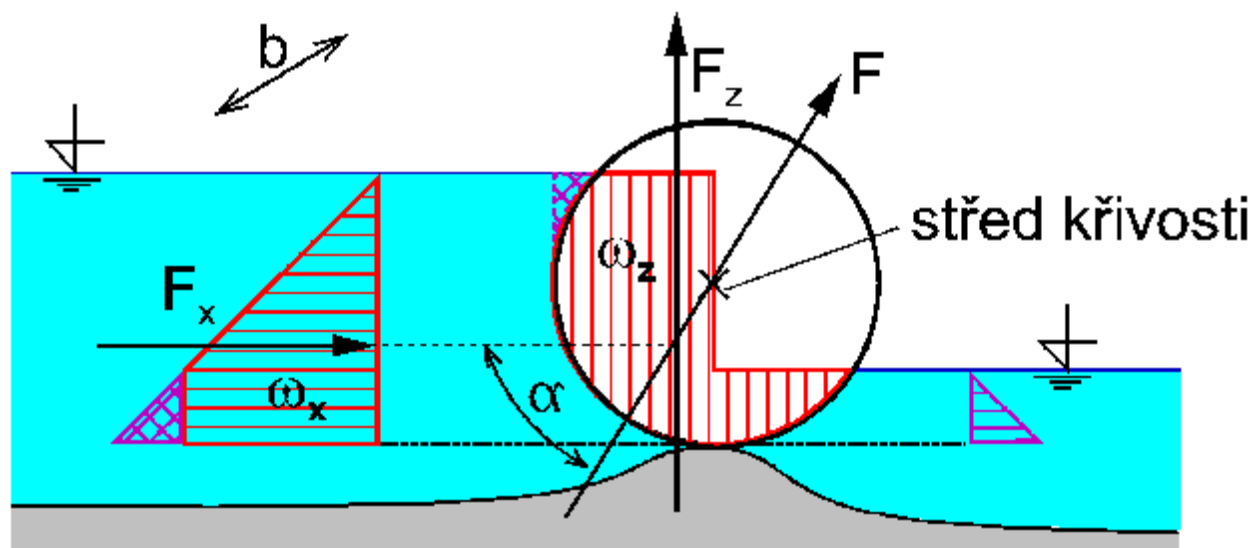


Řešení hydrostatické síly ve složkách:



Hydrostatická síla prochází středem křivosti válcové plochy S

Válcový jez s dolní vodou

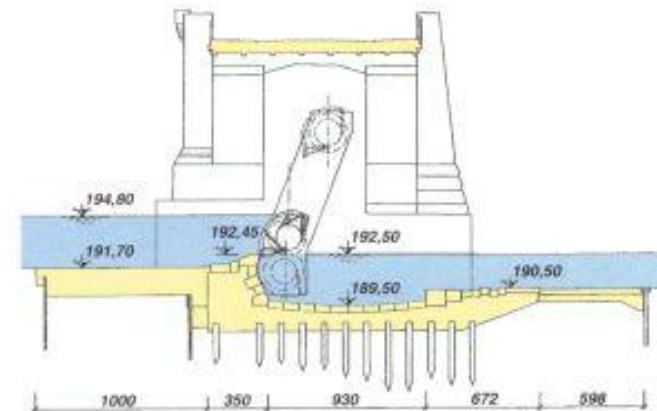


$$F_x = r \times g \times b \times w_x, \quad F_z = r \times g \times b \times w_z$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}, \quad \alpha = \text{arctg} \frac{F_z}{F_x}$$

PŘÍKLADY VÁLCOVÝCH JEZŮ

VD Kolín



Příčný řez středním jezovým polem

Lučice na Cidlině (pod Chlumcem n.C.)

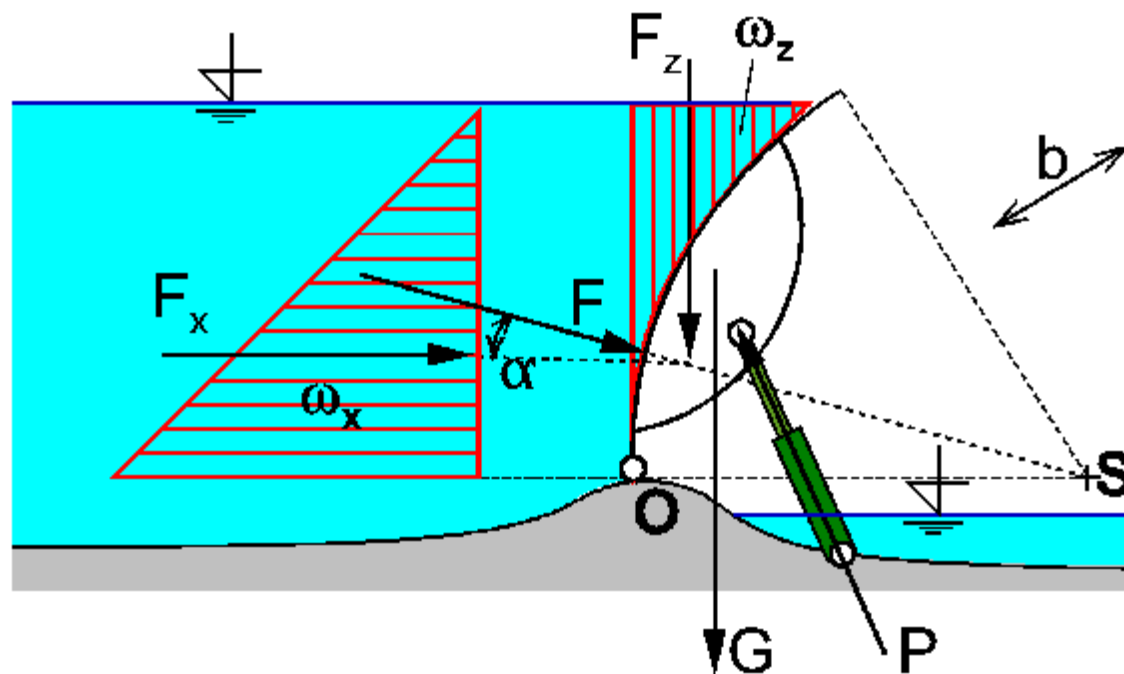


DUTÁ KLAPKA

sklápění klapky (síla P na píst):

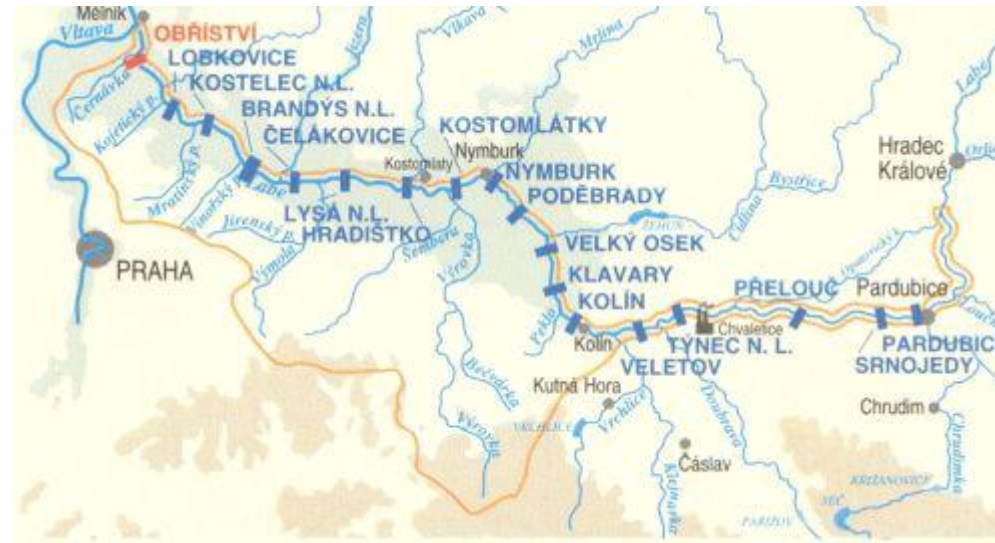
momentová podmínka k ose otáčení O

zatížení osy O : silová podmínka (řešení ve složkách)



PŘÍKLADY KLAPKOVÝCH JEZŮ

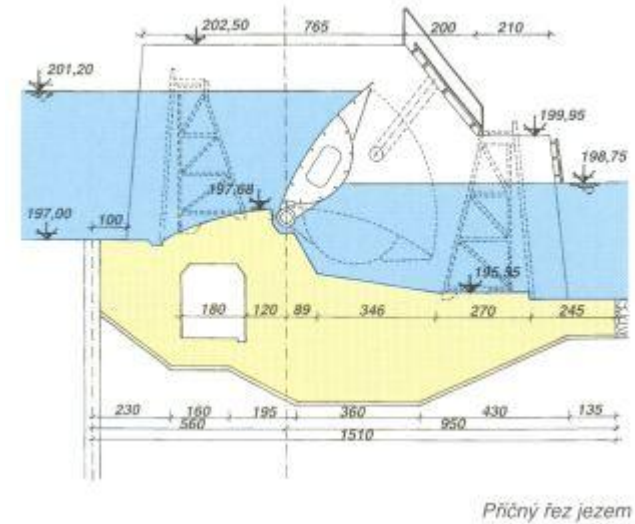
Labská vodní cesta – střední Labe



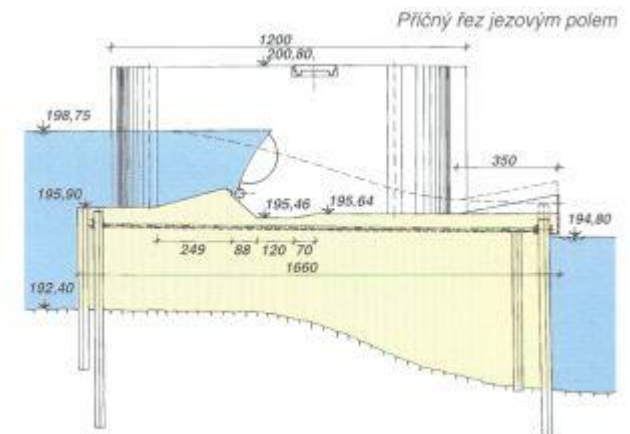
VD Týnce, VD Veletov – klapkový uzávěr na celou hrazenou výšku.

VD Pardubice, VD Srnojedy – kombinace stavidlového a klapkového uzávěru.

VD Týnec



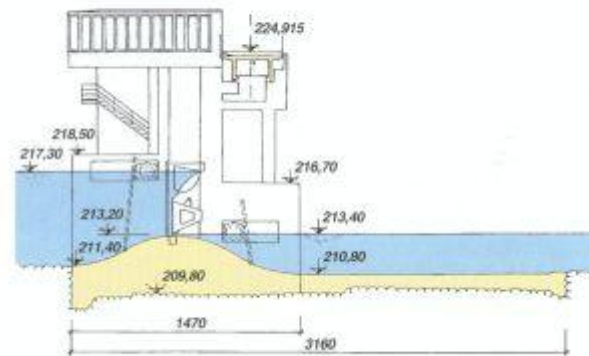
VD Veletov



VD Pardubice



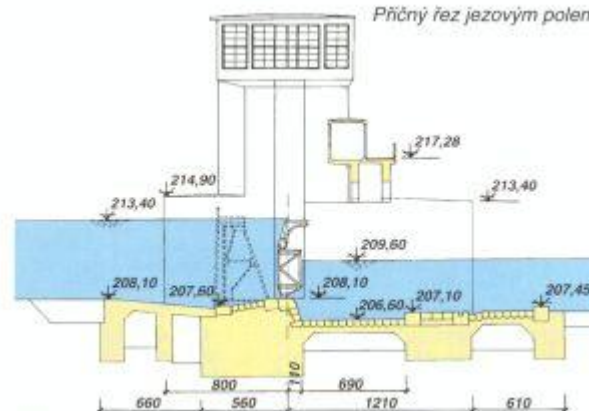
Příčný řez jezovým polem



VD Srnojedy



Příčný řez jezovým polem



K141 VIN

Základy hydrauliky pro praxi

10

Klapkový uzávěr na jedné z plavebních komor v Hoříně (plavební kanál Vraňany – Hořín)

Účel : zajištění nezámrazného průtoku v kanálu v průběhu mrazivého období (prodloužení plavby).

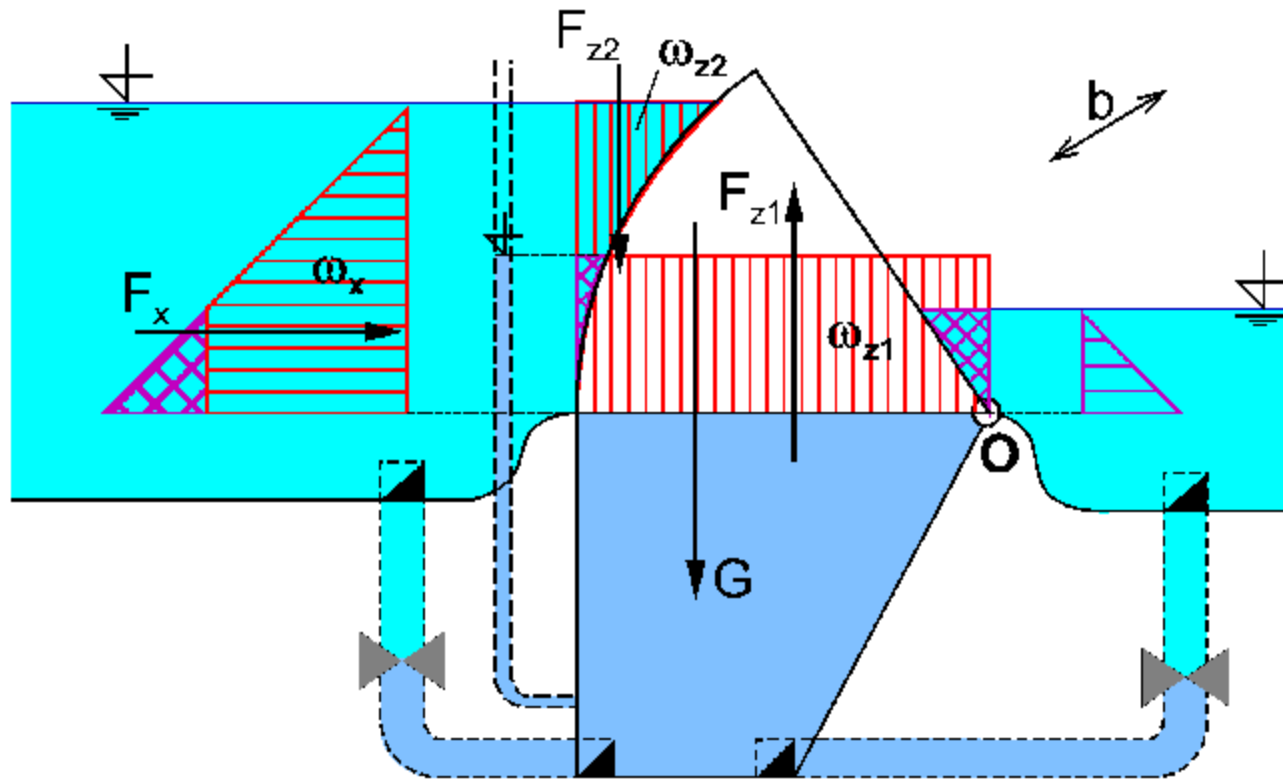


HYDROSTATICKÉ JEZY

ŘEŠENÍ ZATÍŽENÍ OSY OTÁČENÍ O

řešení ve složkách:

$$F_x = \rho \cdot g \cdot b \cdot \omega_x, \quad F_{z1} = \rho \cdot g \cdot b \cdot \omega_{z1}, \quad F_{z2} = \rho \cdot g \cdot b \cdot \omega_{z2}$$
$$\rightarrow F_{x0} = F_x, \quad \uparrow F_{z0} = F_{z1} - F_{z2} - G, \quad F_o = \sqrt{F_{x0}^2 + F_{z0}^2}$$



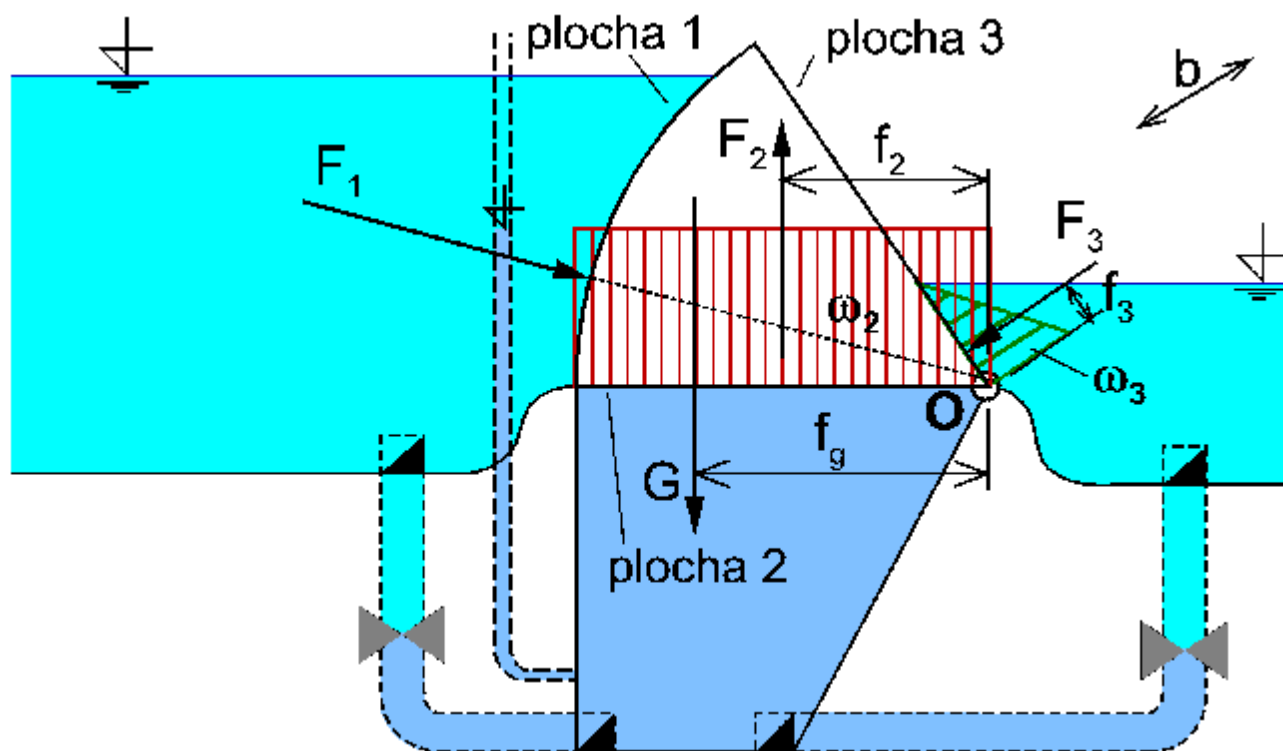
SKLÁPĚNÍ HYDROSTATICKÉHO JEZU

momentová podmínka k ose otáčení O:

$$F_2 \times f_2 - F_3 \times f_3 - G \times f_g = 0$$

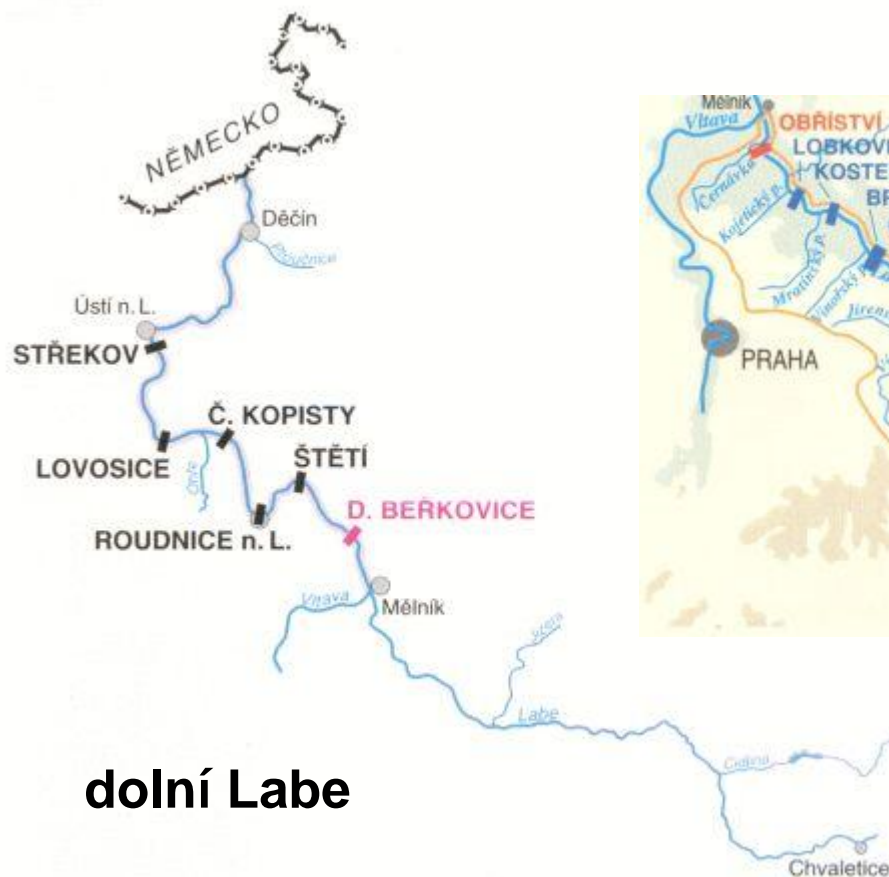
(síla F_1 prochází bodem O)

$$F_2 = r \times g \times b \times w_2, \quad F_3 = r \times g \times b \times w_3$$



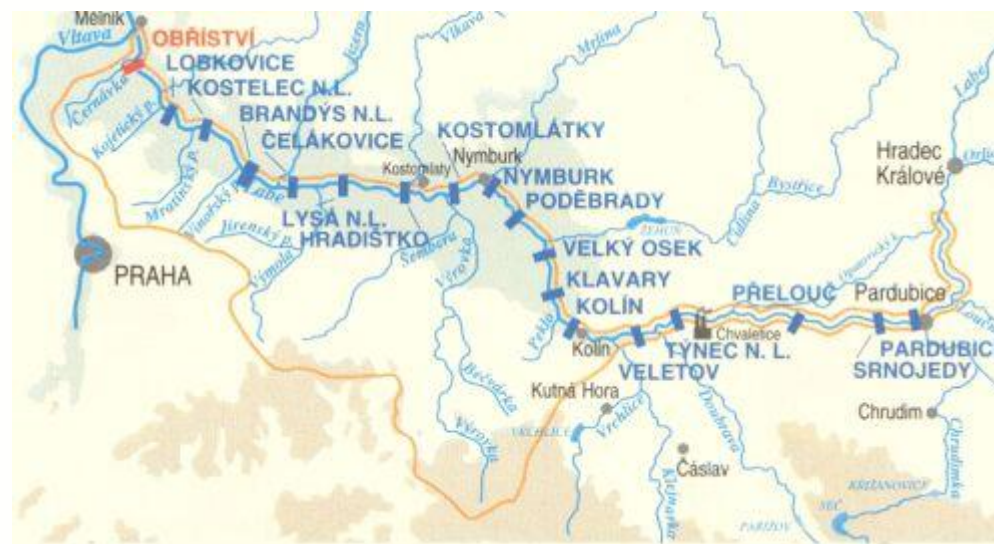
PŘÍKLADY HYDROSTATICKÝCH JEZŮ

Labská vodní cesta



dolní Labe

střední Labe



Hydrostatické jezy na LVC :

Obříství, Dolní Běrkovice, Rodunice, České Kopisty, Lovosice

Výhody a nevýhody hydrostatických jezů

Výhody :

- jednoduchá obsluha**
- možnost velké světlosti jednotlivých polí**
- nízké jezové pilíře**

Nevýhody :

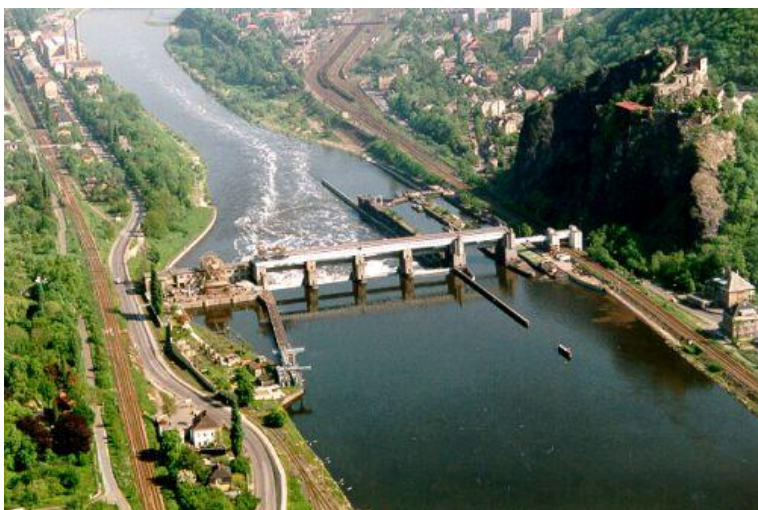
- složitá spodní stavba (tlaková komora)**
- náročné na přesnost provedení**
- vysoké nároky na těsnění (zanášení komory splaveninami)**



VD Nymburk



VD České Kopisty



VD Střekov

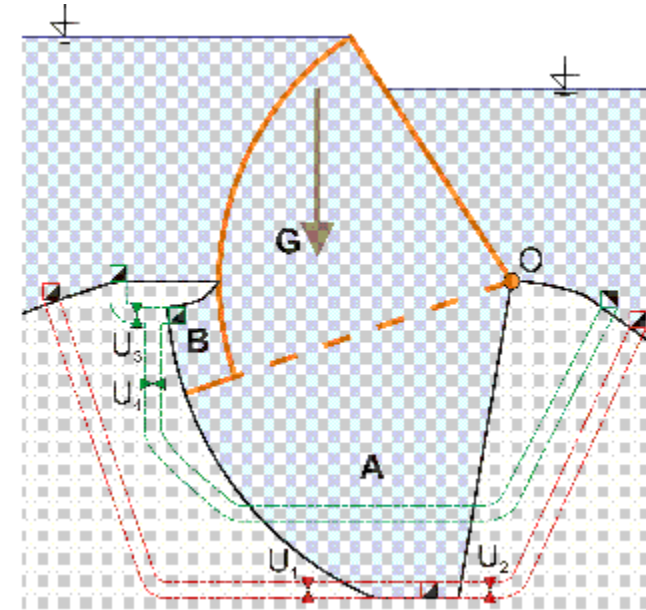


VD Dolní Běřkovice

Princip funkce

„Trojcestný ventil“ spojen potrubím :

- s tlakovou komorou
- s nadjezím (horní voda)
- s podjezím (dolní voda)



Změna polohy pohyblivé konstrukce v závislosti na změně hladiny v tlakové komoře.

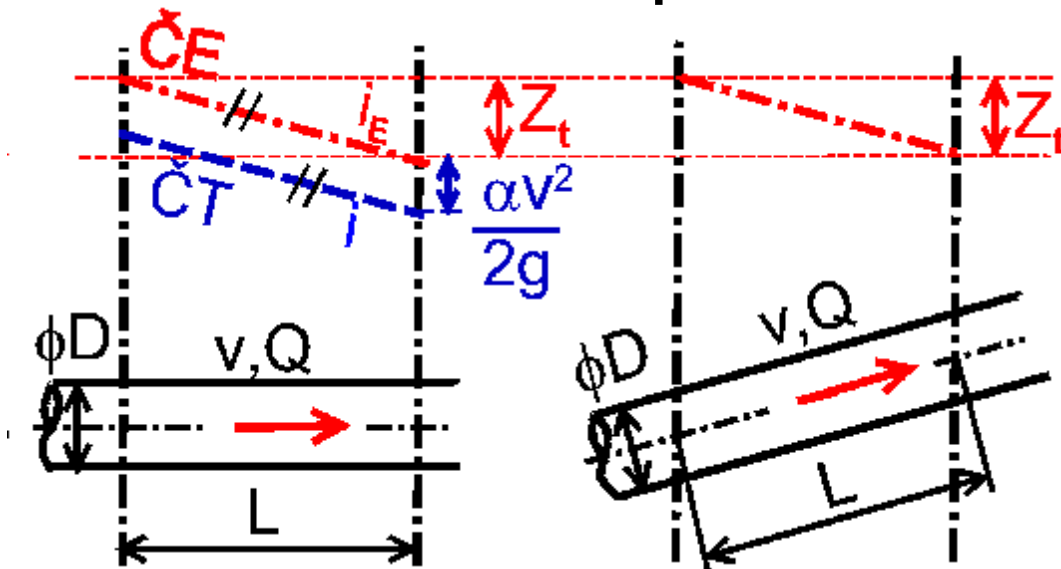
Zvýšení polohy \hat{U} zvýšení polohy úrovně hladiny v tlakové komoře \hat{U} přepuštění vody z nadjezí do tlakové komory přes trojcestný ventil.

Snížení polohy \hat{U} snížení polohy úrovně hladiny v tlakové komoře \hat{U} odpuštění vody z tlakové komory do podjezí přes trojcestný ventil.

Tlakové proudění v potrubí

ZTRÁTY TŘENÍM

rovnoměrné proudění $\rho D = \text{konst}$, $v = \text{konst}$, $i_E = i$



rovnice Darcy-Weisbachova

$$Z_t = l \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

$$i_E = \frac{Z_t}{L} = l \times \frac{1}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

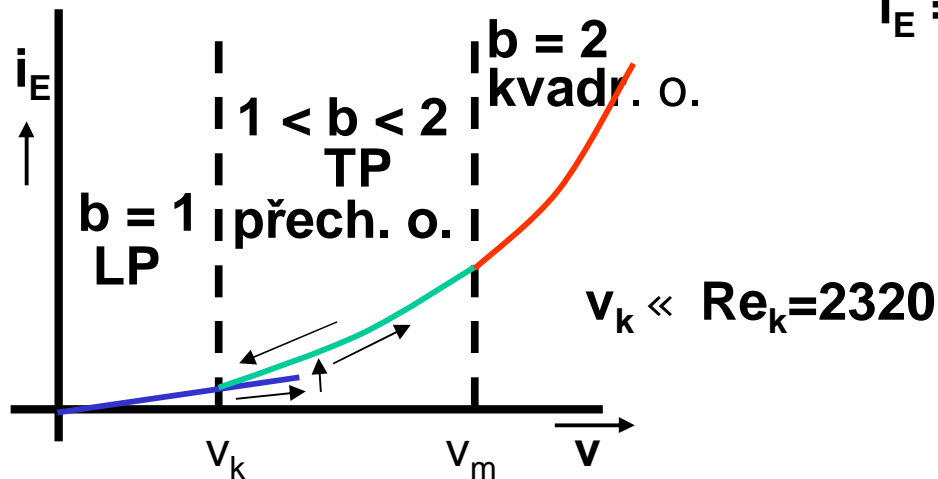
$i_E = \text{hydraulický sklon} = \text{sklon } \check{C}E$

$$i_E = a v^b$$

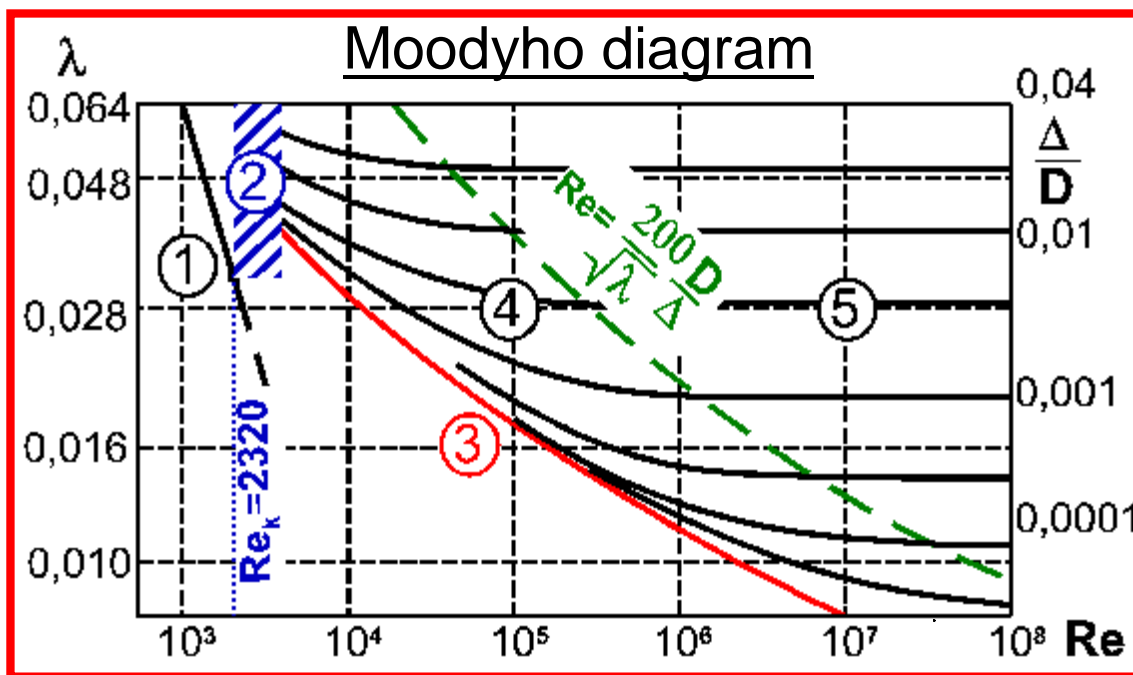
součinitel ztráty třením

$$l = f_{\check{c}}^a \text{Re}, \frac{D}{\delta}$$

$$\text{Re} = \frac{v \times D}{\nu}$$



SOUČINTEL ZTRÁTY TŘENÍM λ



1 Laminární proudění

Poiseuille $\lambda = \frac{64}{Re}$

2 Oblast přechodu

3 Hydraulicky hladké potrubí

$\lambda = f(Re)$

4 Turbulentní proudění
v přechodné oblasti

$\lambda = f\left(\frac{D}{\Delta}, Re\right)$

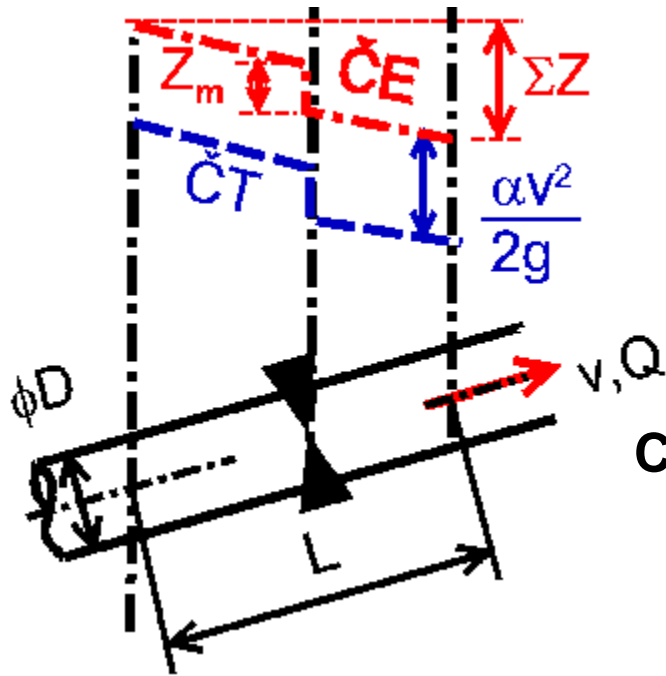
5 Hydraulicky drsné potrubí
v kvadratické oblasti

$\lambda = f\left(\frac{D}{\Delta}\right)$

Betonové potrubí propustků

$\lambda = 0.01668 \times D^{-0.281}$

MÍSTNÍ ZTRÁTY V POTRUBÍ



$$Z_i = \zeta_i \frac{v^2}{2g}$$

ztrátový součinitel z_i

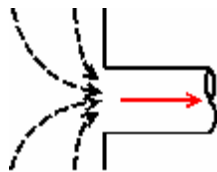
TAB

Celkové ztráty = ztráty třením + ztráty místní

$$\sum Z = \sum \left(\lambda_j \frac{L_j}{D_j} + \sum_i \zeta_i \right) \frac{v_j^2}{2g}$$

VTOK (obyčejný, zaoblený, proudnicový, sací koš, zpětná klapka, mříž, ...)

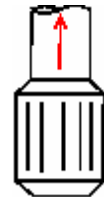
$z_v = 0,5$



0,05 , 0,2

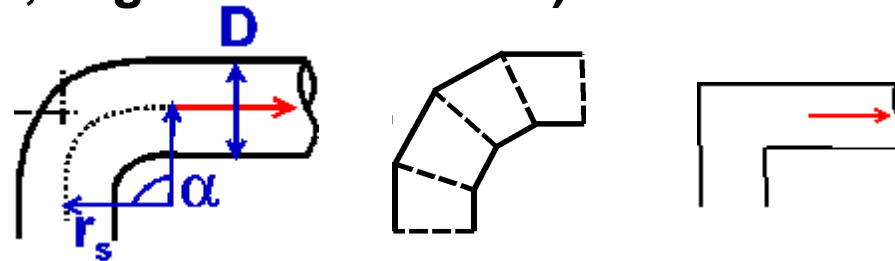


2 , 20



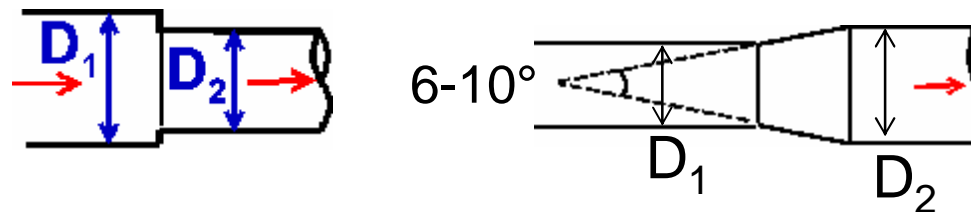
ZMĚNA SMĚRU (oblouk, koleno, segmentové koleno)

$$\zeta_s = f\left(\frac{r_s}{D}, \alpha, \frac{\Delta}{D}\right)$$

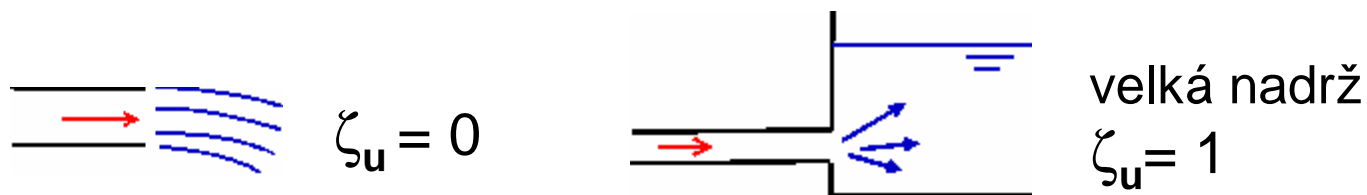


ZMĚNA PRŮŘEZU (náhlá x plynulá, rozšíření x zúžení)

$$\zeta_z = f\left(\frac{D_1}{D_2}, \delta\right)$$



VÝTOK



HYDRAULICKÝ VÝPOČET POTRUBÍ

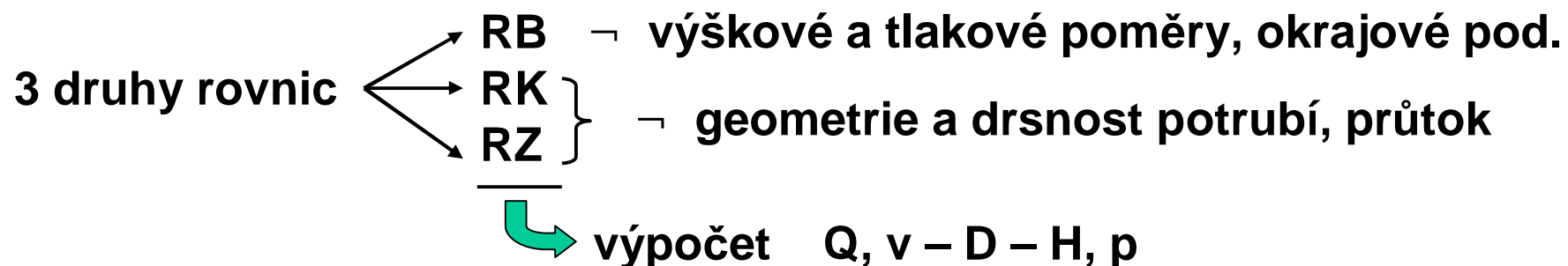


Schéma hydraulicky dlouhého potrubí:

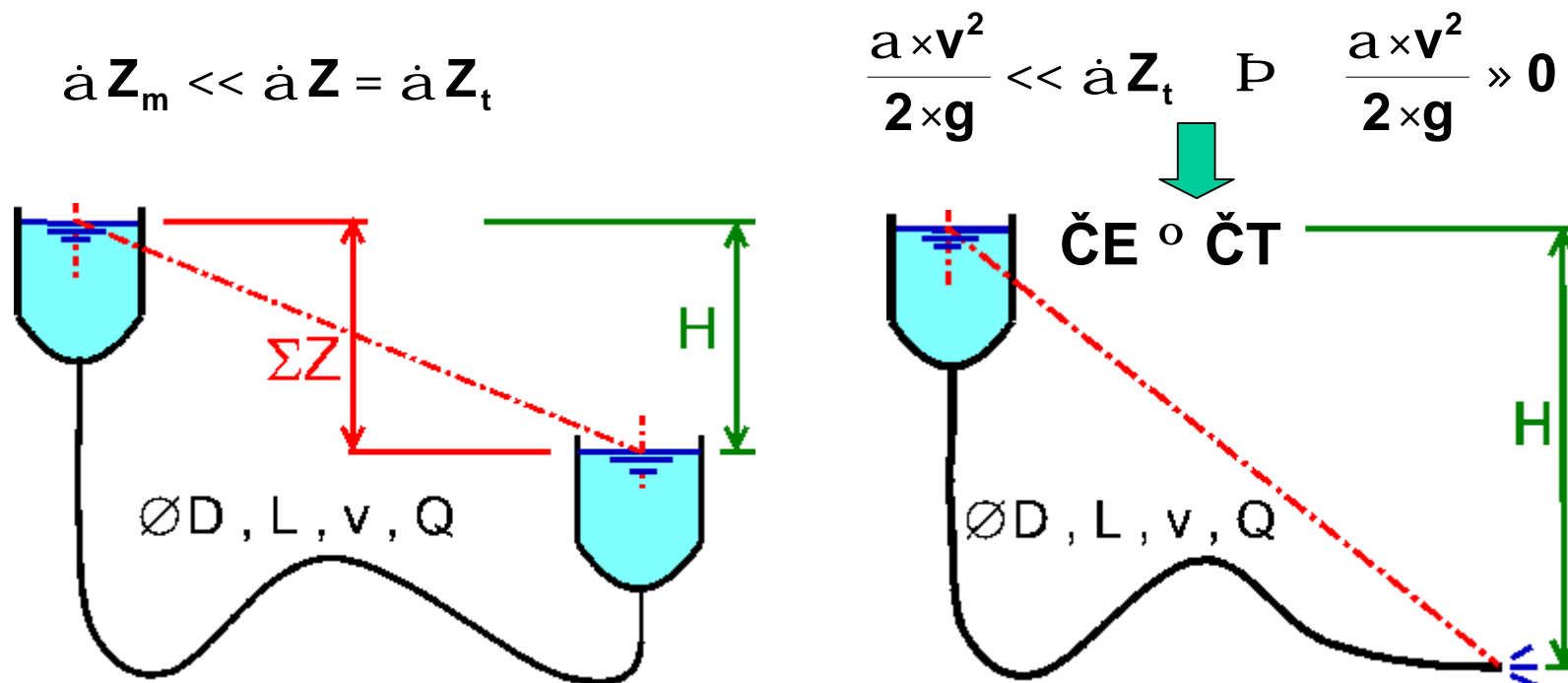
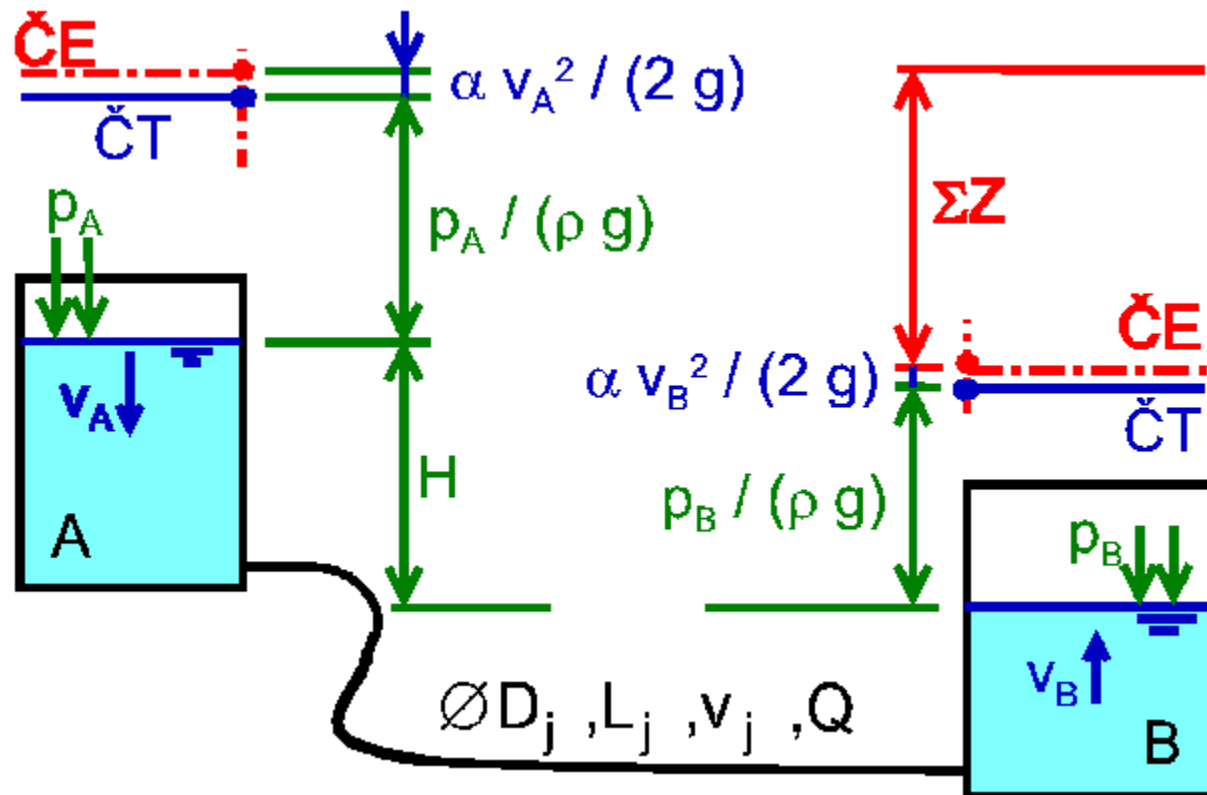


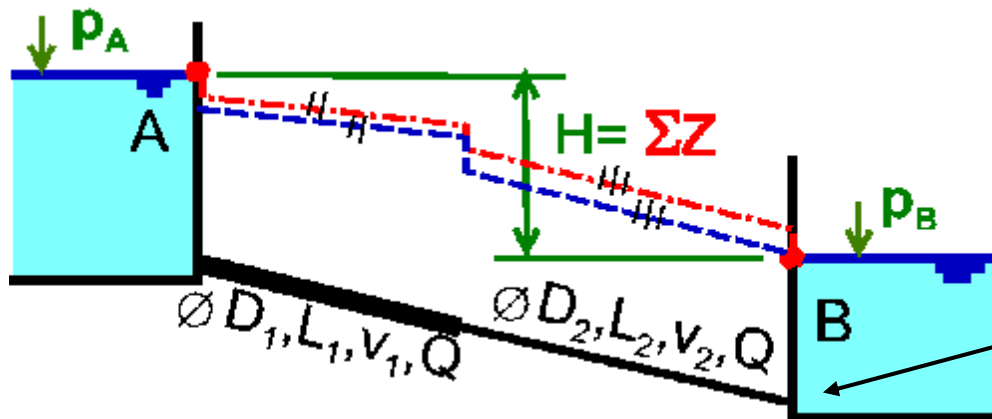
Schéma hydraulicky krátkého potrubí:

$$H + \frac{p_A}{r \times g} + \frac{a \times v_A^2}{2 \times g} = \frac{p_B}{r \times g} + \frac{a \times v_B^2}{2 \times g} + \dot{a} Z$$

$$\dot{a} Z = \dot{a} Z_t + \dot{a} Z_m = \dot{a} \xi_l \times \frac{L}{D} + \dot{a} \xi_i \times \frac{v^2}{2 \times g}$$



• otevřené a velké nádrže



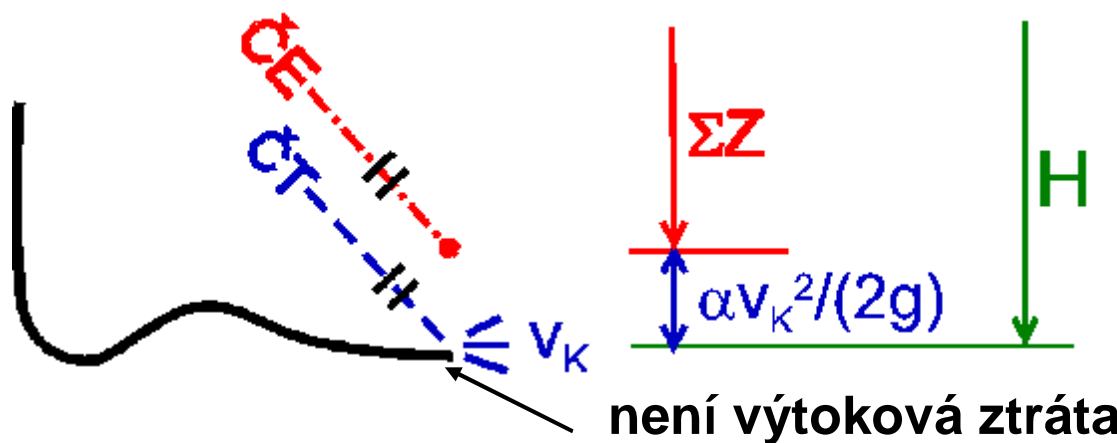
$p_A = p_B = 0$ (přetlaky)

$v_A = v_B = 0$

RB: $H = \dot{a}Z$

výtoková ztráta

• výtok z potrubí do volna



$p_B = 0$

RB: $H = \frac{\alpha \times v^2}{2 \times g} + \dot{a}Z$

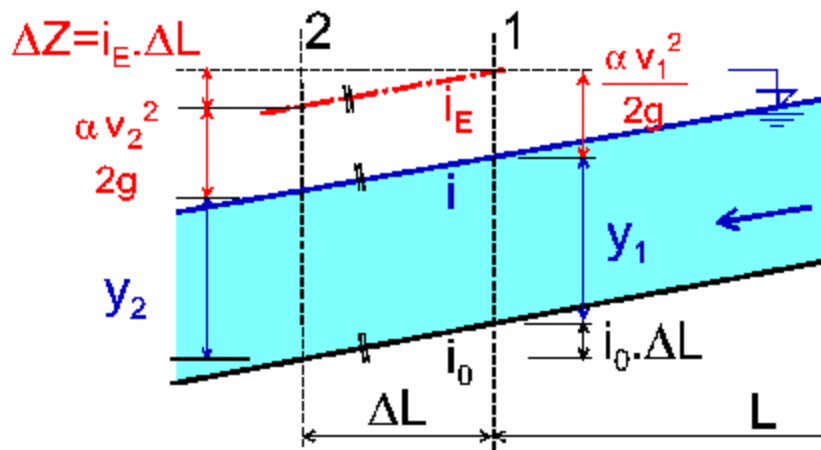
není výtoková ztráta

Proudění v korytech

USTÁLENÉ PROUDĚNÍ VODY V KORYTECH

Ⓜ průtok **konstantní**, ostatní geometrické a proudové charakteristiky závislé pouze na poloze

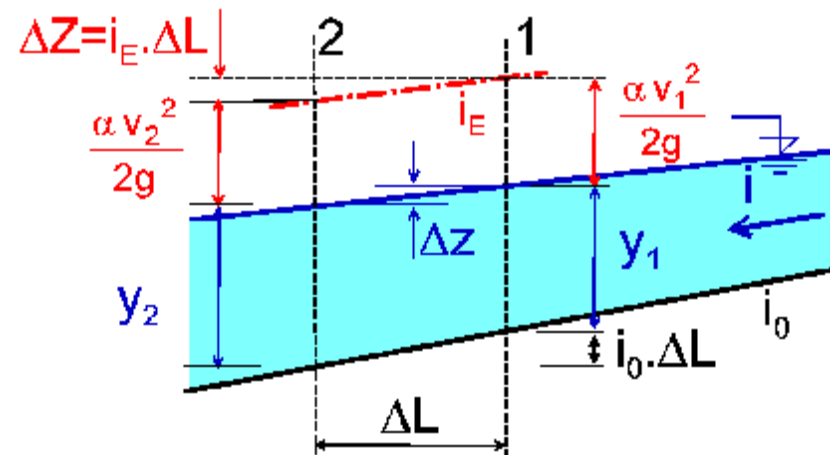
Rovnoměrné proudění



$$S; y; v = \text{konst.}$$

$$i = i_0 = i_E$$

Nerovnoměrné proudění



$$y_1 \neq y_2; v_1 \neq v_2$$

$$i \neq i_0 \neq i_E$$

ROVNOMĚRNÉ PROUDĚNÍ

1. Chézyho rovnice (1768)

$$v = C \times \sqrt{R \times i_0}$$

$$Q = C \times S \times \sqrt{R \times i_0} = K \times \sqrt{i_0}$$

C - rychlostní součinitel, **K** - modul průtoku ($m^3 \times s^{-1}$)

2. Manningova rovnice (1889)

$$v = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times i^{1/2}$$

n - drsnostní součinitel

porovnáním obou rovnic \Rightarrow

$$C = \frac{1}{n} \times R^{1/6}$$

Určení n:

Tabulky

Druh koryta	n min.	n stř.	n max.
Rovinné toky			
a) čisté, přímé, zaplněný profil, bez peřejí a tůní	0,025	0,030	0,033
b) totéž, ale s přítomností kamenů a plevelle	0,030	0,035	0,040
c) zakřivená trasa, čisté koryto, tůně a peřeje	0,033	0,040	0,045

Různé drsnosti po omočeném obvodě

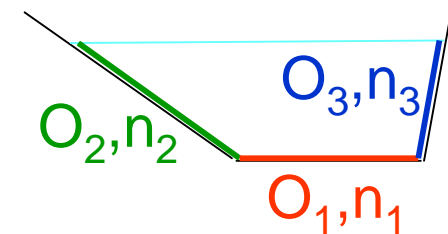
® ekvivalentní drsnostní součinitel

Vážený průměr

$$n = \frac{\sum O_i \times n_i}{O}$$

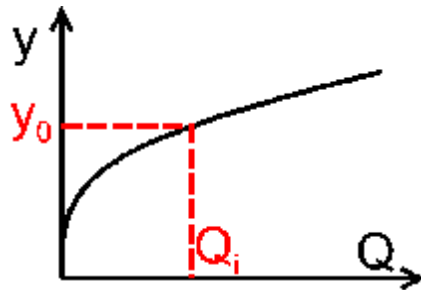
Horton, Einstein, Banks

$$n = \frac{\sum O_i \times n_i^{3/2}}{O^{2/3}}$$



NAVRHOVÁNÍ KORYT

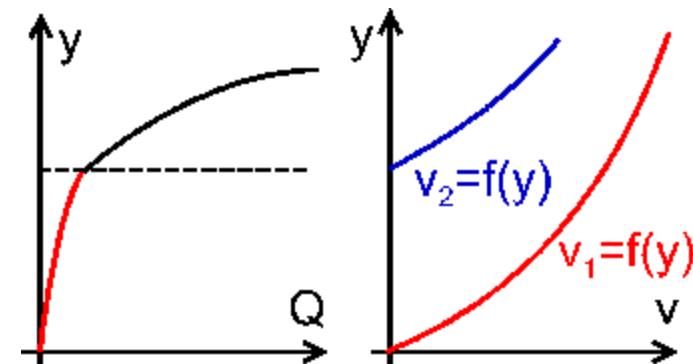
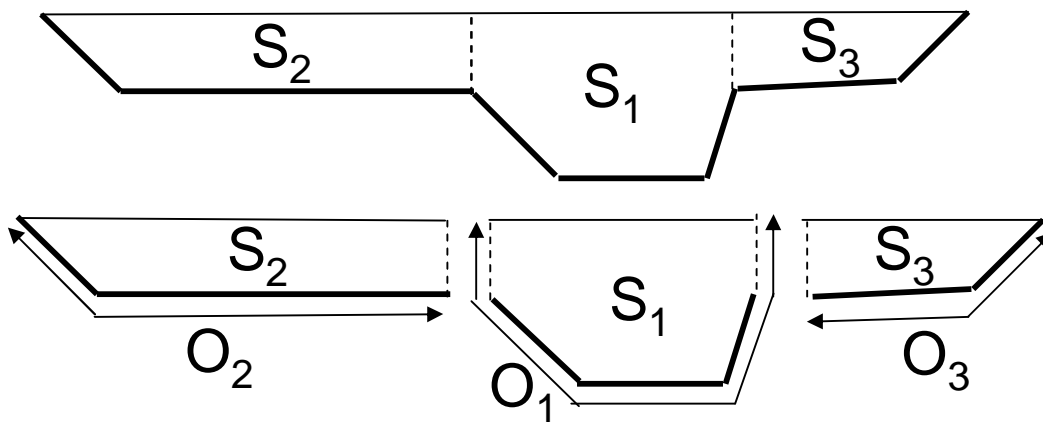
- výpočet rychlosti a průtoku Q \textcircled{R} základní rovnice
- výpočet sklonu dna i_0 \textcircled{R} základní rovnice
- výpočet hloubky y_0 \textcircled{R} polograficky $y = f(Q)$ (konzumční křivka)
 \textcircled{R} početně přibližováním y_i \textcircled{R} Q_i ; Q \textcircled{R} y_0



- výpočet šířky koryta b \textcircled{R} obdobně jako řešení hloubky
- Složené průřezy (kyneta, bermy)**

! rychlosti, drsnostní součinitel, průtok

$$Q = \sum Q_i$$



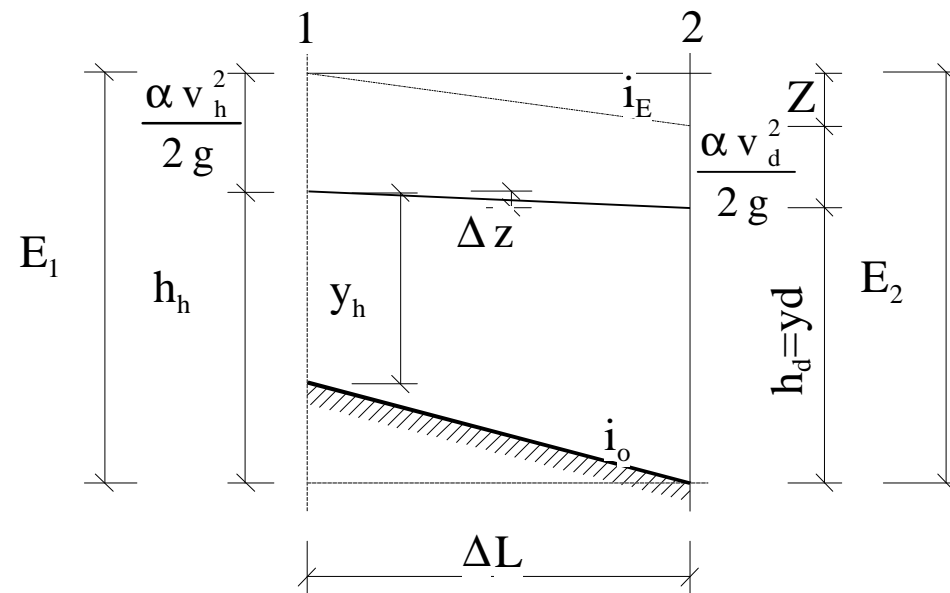
Nerovnoměrné proudění

Obecná metoda po úsecích

- § tvar podélného profilu dna je náhodný
- § S, O, R – nelze vyjádřit analyticky → zaměřené veličiny
- § volba úseků !!
- § úsek charakterizovat průměrným příčným průřezem;

Řešení: z dolního profilu se známou úrovní hladiny h_d

V případech náhlých změn: úseky prakticky s nulovou délkou



Bernoulliho rovnice 1 – 2:

$$h_h + \frac{a \times v_h^2}{2 \times g} = h_d + \frac{a \times v_d^2}{2 \times g} + Z$$

$$h_h - h_d = Dz = \frac{a \times (v_d^2 - v_h^2)}{2 \times g} + Z$$

$$v = \frac{Q}{S} \quad Dz = \frac{a \times Q^2}{2 \times g} \times \left(\frac{1}{S_d^2} - \frac{1}{S_h^2} \right) + Z$$

$$Z = Z_t + Z_m$$

Z_m [Ⓡ] místní ztráty
- nejčastěji: $Z_m = Z_{zp}$ [Ⓡ]
ztráty změnou průřezu

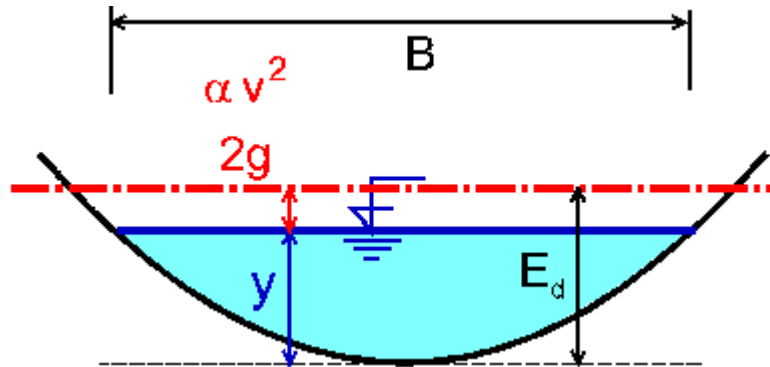
$$Z_t = \frac{Q^2}{K_p^2} \times DL$$

$$K_p = C_p \times S_p \times \sqrt{R_p}$$

Stanovení ztrát třením

Zjednodušení – ztráty třením ve skutečném úseku » ztráty třením v fiktivním úseku tvořeném prizmatickým korytem se zprůměrovaným profilem skutečného koryta v daném úseku za předpokladu rovnoměrného proudění.

PROUDĚNÍ KRITICKÉ, ŘÍČNÍ A BYSTRINNÉ



$$E_d = y + \frac{\alpha v^2}{2g} = y + \frac{\alpha Q^2}{2gS^2}$$

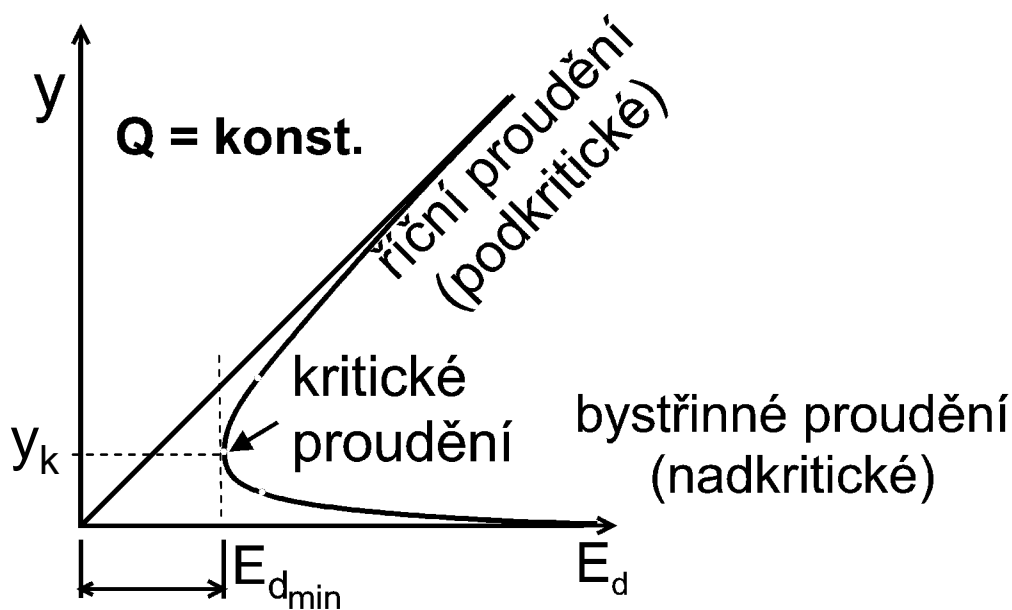
E_d – energetická výška průřezu (měrná energie)

$E_d = f(y)$ \textcircled{R} při $Q = \text{konst.}$

Kritické proudění:

$Q = \text{konst.}$ \textcircled{R} $E_{d\text{min}}$

($E_d = \text{konst.}$ \textcircled{R} Q_{max})



řešení minima $E_d = f(y)$

$$\frac{dE_d}{dy} = 1 - \frac{\alpha Q^2}{gS^3} \frac{dS}{dy} = 0$$

$$S = f(y) \rightarrow dS = Bdy$$

$$1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B}{S^3} = 0$$

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{S^3}{B}$$

- obecná podmínka kritického proudění

$\mathbb{P} y_k$

Určení kritické hloubky y_k

- $E_d = f(y)$ pro $Q = \text{konst.}$

a) analyticky $S = f(y)$, $B = f(y)$ – možno jen výjimečně
 pro obdélník: $B = b$, $S_k = b \cdot y_k$, měrný průtok $q = \frac{Q}{b}$

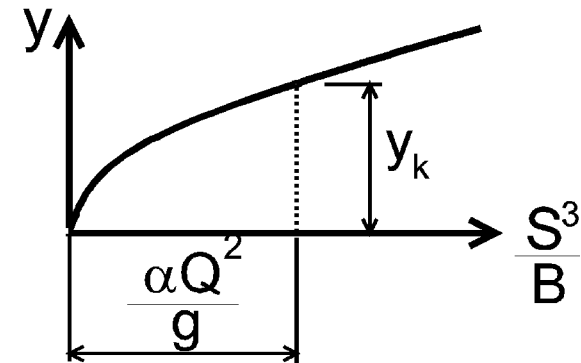
$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{S_k^3}{B_k} = b^2 y_k^3 \Rightarrow y_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha}{g} q^2}$$

b) z $E_d = f(y) \Rightarrow E_{d\min} \Rightarrow y_k$

c) graficko-početně z obecné podmínky

d) iterativně (postupným sblížováním)

e) empirické vztahy



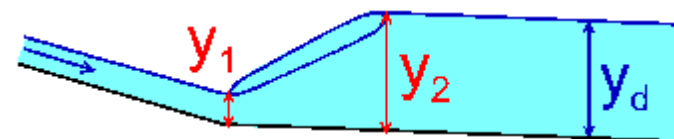
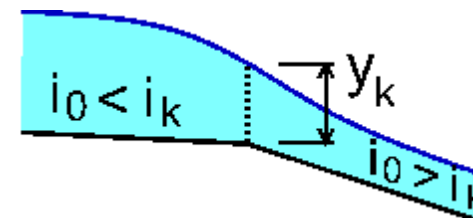
Přechod režimu proudění

říční \textcircled{R} bystřinné:

plynulý přechod

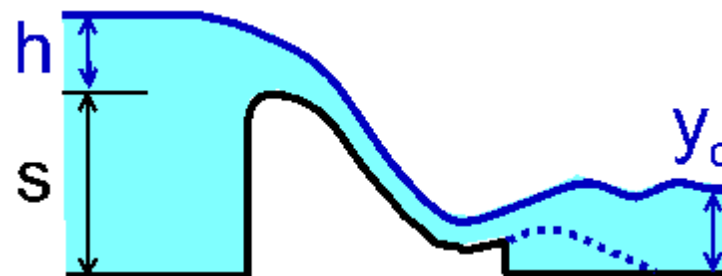
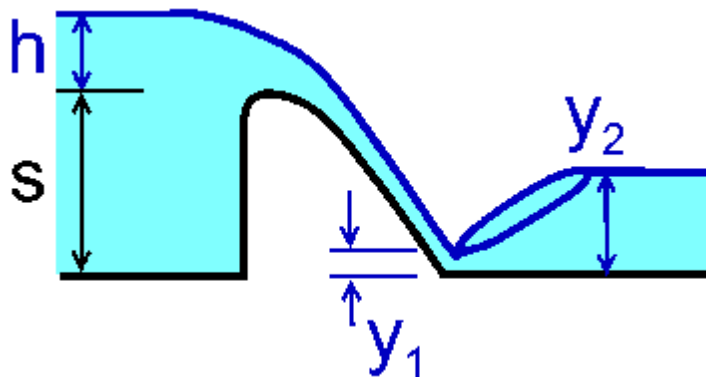
bystřinné \textcircled{R} říční:

vodním skokem



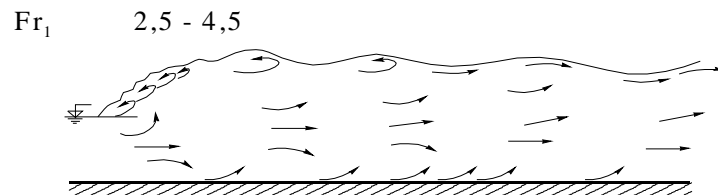
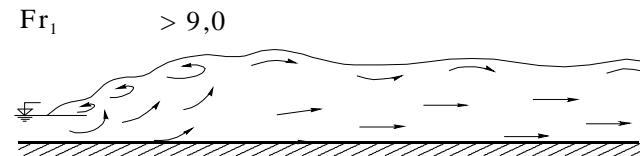
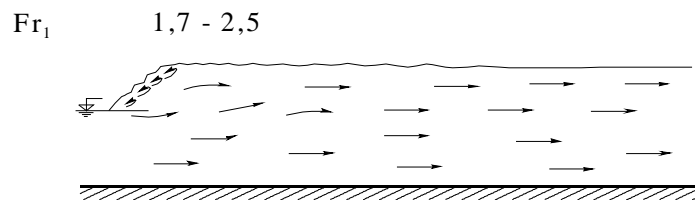
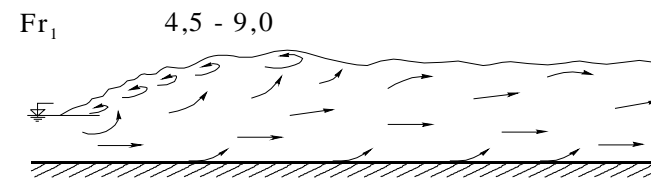
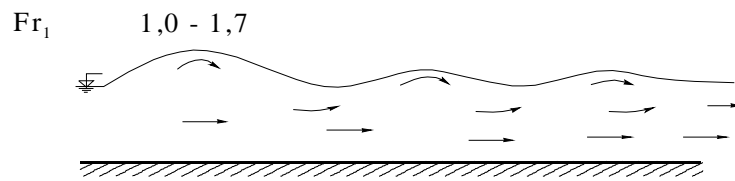
s dnovým režimem

s povrchovým režimem
(přelivy s odrazníkem)



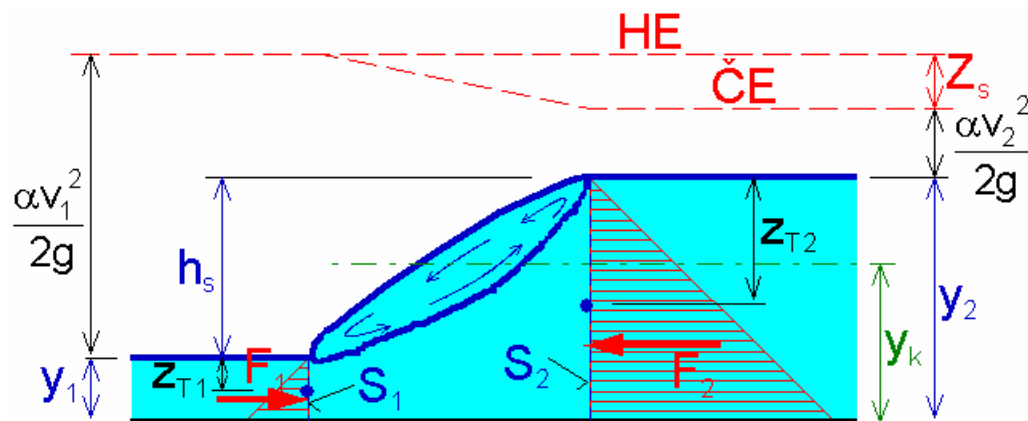
Vodní skok s dnovým režimem - struktura

vlnovitý		$Fr_1 \leq 1,7$	$y_2 < (1,3 \div 1,4) y_k$
slabý	$1,7 < Fr_1$	$\leq 2,5$	
oscilující	$2,5 < Fr_1$	$\leq 4,5$	
prostý	$4,5 < Fr_1$	≤ 9	$y_2 > (1,3 \div 1,4) y_k$
silný	$Fr_1 > 9$		



Vodní skok - charakterizován vzájemnými hloubkami y_1 a y_2

Prostý vodní skok



Pro obdélníkové koryto odvození na základě věty o hybnostech:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8q^2}{gy_1^3}} - 1 \right]$$