ČVUT v Praze, fakulta stavební
katedra hydrauliky a hydrologie
(K141)

Přednáškové slidy předmětu
1141 HYA (Hydraulika)

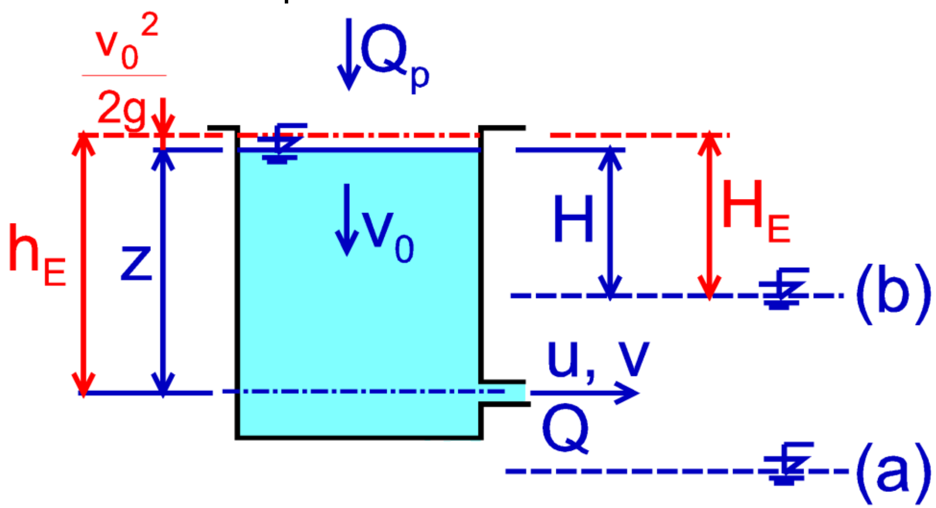
verze: 09/2008

Tato webová stránka nabízí k nahlédnutí/stažení řadu pdf souborů složených z přednáškových slidů předmětu 1141HYA (Hydraulika) vyučovaného na fakultě stavební ČVUT v Praze studentům bakalářského směru Stavební inženýrství. Nabízené slidy jsou dílem kolektivu autorů, zaměstnanců katedry hydrauliky a hydrologie (K141) FSv ČVUT v Praze. Soubor slidů je základní učební pomůckou předmětu 1141HYA a je volně přístupný pro učební potřeby studentů předmětu. Jiné použití slidů nebo jejich částí bez přesné citace online zdroje (nejlépe dle ČSN ISO 690-2) považuje autorský kolektiv za plagiátorství.

Výtok otvorem

DRUHY VÝTOKU

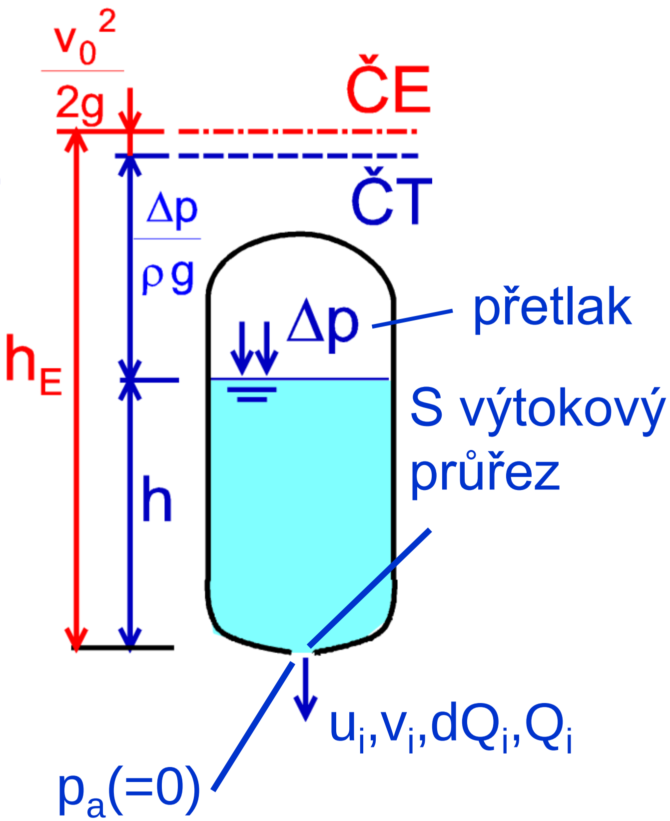
Výtok
- ustálený, stacionární: z = konst, h_E = konst (H = konst, H_E = konst) $Q_p = Q$
- kvazistacionární: $z \sim$ konst, fenomén velké nádrže
- neustálený, nestacionární: $z \neq$ konst ($H \neq$ konst) $Q_p \neq Q$, plnění či prázdnění nádoby (nádrže)



Výtok
- volný (a) → volný výtokový paprsek
- zatopený (b) → ponořený výtokový paprsek
- částečně zatopený, např. výtok velkými otvory u dna (pod stavidlem)

USTÁLENÝ VÝTOK OTVOREM

USTÁLENÝ VOLNÝ VÝTOK (UVV) IDEÁLNÍ KAPALINY



BR hladina – výtok:

$$h + \frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_i^2}{2g}$$

$$\boxed{h_E = \frac{v_i^2}{2\,g} \qquad v_i = \sqrt{2\,g\,h_E}}$$

Torricelliho (1608 - 1647) rovnice pro výtokovou rychlost ideální kapaliny v_i

pro velké nádrže s volnou hladinou:

$$\Delta p = 0, \ \frac{v_0^2}{2g} \approx 0, \ h_E = h \qquad \boxed{v_i = \sqrt{2\,g\,h}}$$

výtok ideální kapaliny Q_i:

$$Q_i = \int_S dQ_i = \int_S u_i \, dS$$

pro malý otvor ve dně i ve stěně: $u_i \approx v_i$

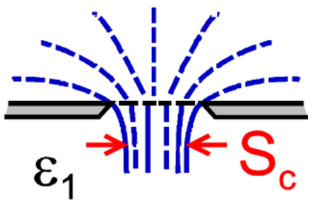
$$Q_i = v_i \int_S dS \qquad \boxed{Q_i = v_i\, S = S\sqrt{2\,g\,h}}$$

h… hloubka těžiště otvoru

KONTRAKCE VÝTOKOVÉHO PAPRSKU

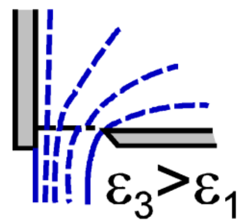
zúžený průřez $S_c < S$, $S_c = \varepsilon \cdot S$, součinitel kontrakce $\varepsilon \leq 1$ TAB.

ostrá hrana

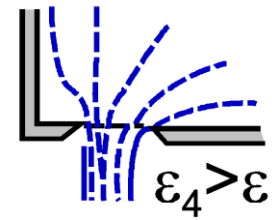


zaoblení hran

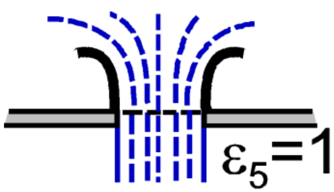
částečné zúžení



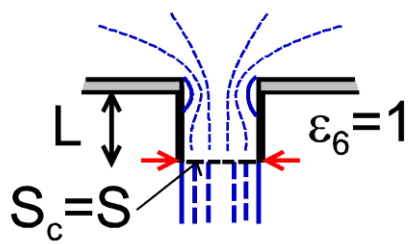
nedokonalé zúžení

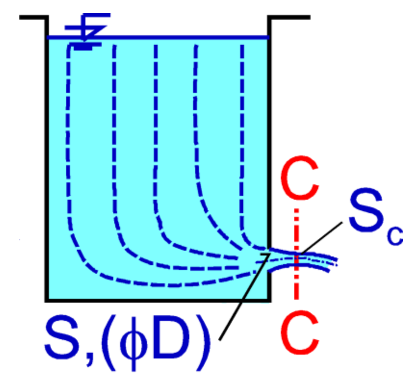


vnitřní proudnicové výtokové zařízení



vnější výtokový nátrubek ∅D

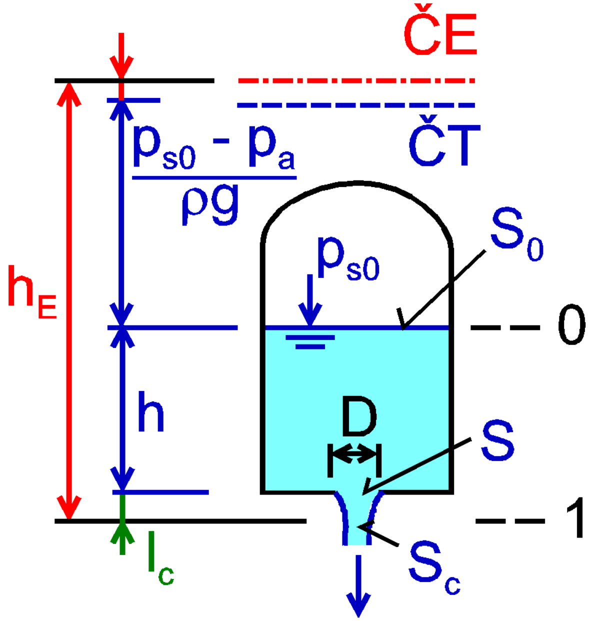




Hydraulické ztráty

ztráta výtokem $Z = \zeta_v \dfrac{v_c^2}{2g}$, ζ_v ... podle tvaru, uspořádání, velikosti výtokového otvoru (objektu), Re

UVV REÁLNÉ KAPALINY OTVOREM VE DNĚ NÁDRŽE



$l_c \sim 0{,}5 \cdot D$

BR 0 - 1

$$h + l_c + \frac{\alpha v_0^2}{2g} + \frac{p_{s0}}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + \zeta_v \cdot \frac{v_c^2}{2g}$$

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_v}} \cdot \sqrt{2g\left(h + l_c + \frac{\alpha v_0^2}{2g} + \frac{p_{s0}}{\rho g} - \frac{p_a}{\rho g}\right)}$$

α

φ ... rychlostní součinitel

$Q = v_c \cdot S_c, \quad S_c = \varepsilon \cdot S, \quad \varepsilon \cdot \varphi = \mu_v$ ... výtokový součinitel

součinitel kontrakce

$\boxed{\varphi,\ \mu_v,\ \varepsilon \text{ ... TAB.}}$

Zjednodušení:

volná hladina $\rightarrow p_{s0} = p_a \rightarrow \frac{p_{s0} - p_a}{\rho g} = 0$

$S_0 >> S \rightarrow v_0 \sim 0$

$l_c << h_E \rightarrow l_c \sim 0$

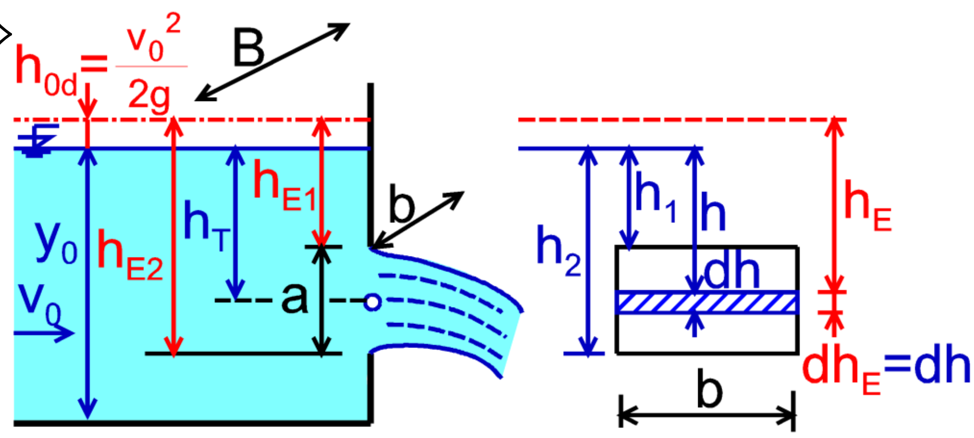
$$\Rightarrow v_c = \varphi \cdot \sqrt{2gh}, \quad Q = \mu_v \cdot S \cdot \sqrt{2gh}$$

UVV REÁLNÉ KAPALINY VE SVISLÉ STĚNĚ NÁDRŽE

- Velký otvor $h_T < (2 - 3) \cdot a$ $\Rightarrow$ uvažovat změnu výtokové rychlosti u po výšce otvoru

$$u = \varphi \sqrt{2 g h_E}$$

$$Q = \mu_v \sqrt{2g} \int_S h_E^{1/2} \, dS$$



- Pro otevřenou nádrž a velký obdélníkový otvor ve svislé stěně:

$$dS = b \, dh_E \qquad S = b a$$

$$Q = \mu_v b \sqrt{2g} \int_{h_{E1}}^{h_{E2}} h_E^{1/2} \, dh_E$$

pro velkou nádrž: $\frac{v_0^2}{2g} \approx 0 \Rightarrow h_E = h$

$$\boxed{Q = \frac{2}{3} \mu_v b \sqrt{2g} \left(h_{E2}^{3/2} - h_{E1}^{3/2} \right)}$$

$$\boxed{Q = \frac{2}{3} \mu_v b \sqrt{2g} \left(h_2^{3/2} - h_1^{3/2} \right)}$$

- Malý otvor $h_T > (2 - 3) \cdot a$
pro $S_0 >> S \rightarrow v_0 \sim 0$

$$\Rightarrow \quad v_c = \varphi \cdot \sqrt{2 g h_t}, \qquad Q = \mu_v \cdot S \cdot \sqrt{2 g h_t}$$

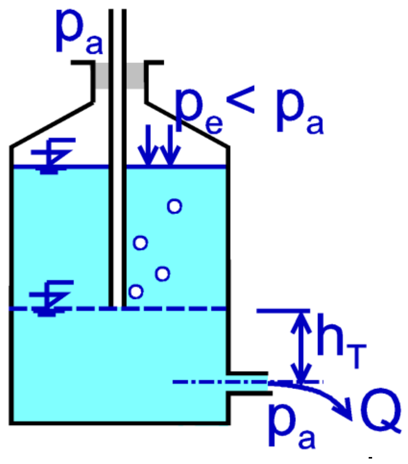
Součinitele pro výpočet výtoku

	φ	ε	μ_v
- malý ostrohranný výtokový otvor s úplným zúžením	0,97	0,63	0,61
- vnější válcový výtokový nátrubek L/D = 2 ÷ 4	0,81	1,00	0,81
- křivkově vytvořený nátrubek, tryska	0,95	1,00	0,95
- velké otvory u dna s podstatným až plynulým bočním zúžením			0,65 až 0,85
- výtokové potrubí průměru D a s délkou L a volným výtokem	$\mu_v = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda\frac{L}{D}+\sum\zeta_i}}$		

$\underbrace{\varphi, \varepsilon, \mu_v \text{ pro nedokonalé a částečné zúžení}}_{\boxed{\text{empirické vztahy}}} > \varphi, \varepsilon, \mu_v$ pro dokonalé zúžení

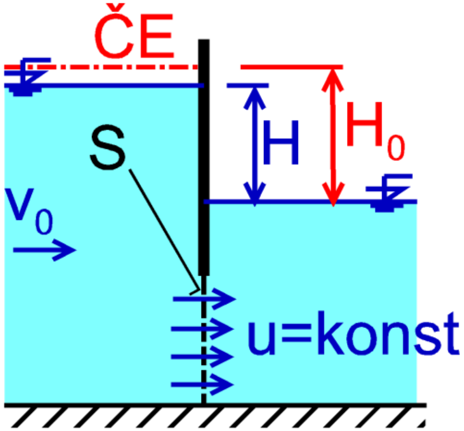
Poznámka:

zvláštní aplikací výtoku nátrubkem je Mariottova láhev s funkcí dávkovače roztoku, Q = konst.



VÝTOK ZATOPENÝM OTVOREM

Pro malé i velké otvory libovolného tvaru



$$\boxed{u = v = \varphi\sqrt{2gH_0}}$$

jako u malého otvoru

$$Q = \mu_v S\sqrt{2gH_0}$$

a pro velkou nádrž
$H = H_0$

$$Q = \mu_v S\sqrt{2gH}$$

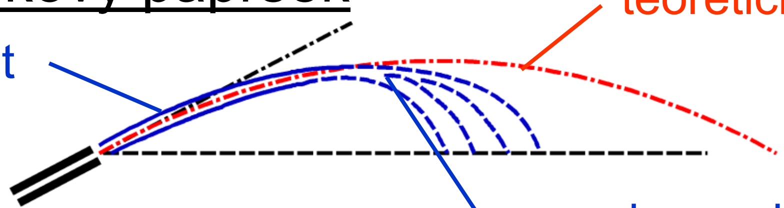
Poznámka:
při částečném zatopení se orientačně řeší $Q = Q_1 + Q_2$
(Q_1 výtok volnou částí otvoru, Q_2 výtok zatopenou části otvoru).

VÝTOKOVÉ PAPRSKY

Volný výtokový paprsek

teoretická dráha (parabola 2°)

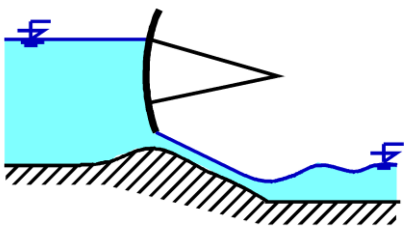
souvislá část



typ voda - vzduch

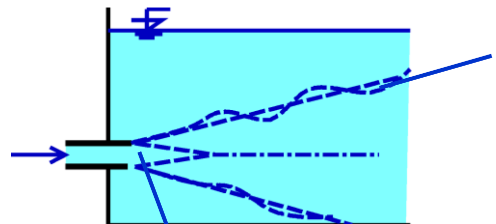
rozpad paprsku, provzdušení, kapky

Podepřený výtokový paprsek



typ voda – vzduch
– pevný povrch

Ponořený výtokový paprsek



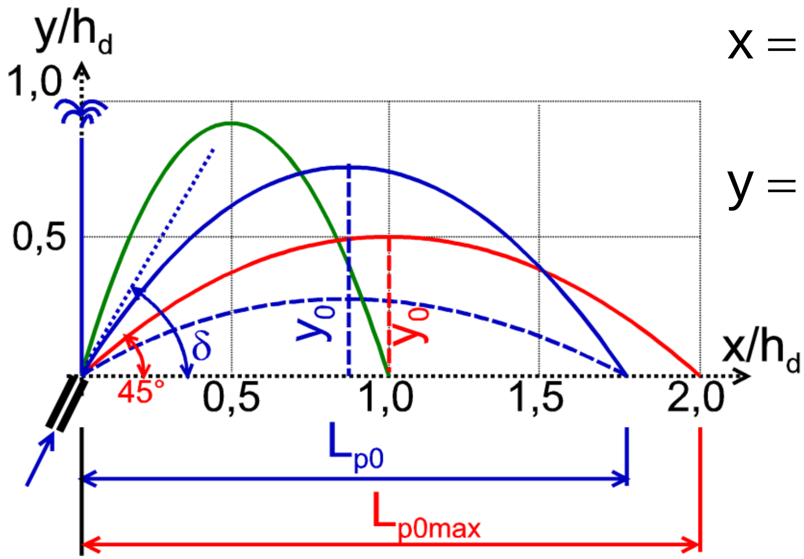
pulzující hranice
mezní vrstvy
(směšovací oblasti)

jádro paprsku s konstantní rychlostí

typ voda - voda

- různé funkce paprsku → požadavky na výtokové zařízení a výtokovou rychlost
- volné paprsky řezací, vrtací, hydromechanizační (rozpojovací), hasební, zavlažovací, …
- ponořené paprsky dávkovací, směšovací, usměrňovací, …

Teoretický tvar výtokového paprsku (šikmý vrh)



$$x = v_0 t \cos\delta$$

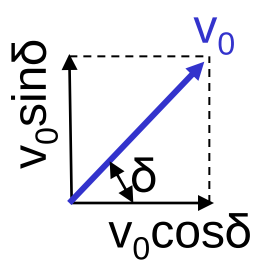
$$y = v_0 t \sin\delta - \frac{1}{2} g t^2$$

doskok paprsku

$$\boxed{L_{p0} = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\delta = 2 h_d \sin 2\delta}$$

výška dostřiku

$$\boxed{y_0 = \frac{v_0^2}{2g} \sin^2 \delta = h_d \sin^2 \delta}$$

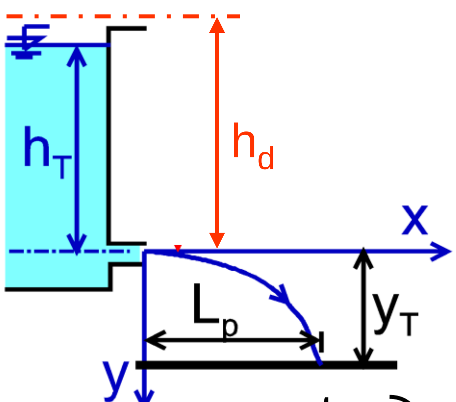


$$\frac{v_0^2}{2g} = h_d$$ energetická výška paprsku

Pro $\delta = 45° \rightarrow L_{p0max} = v_0^2/g = 2h_d$, $y_0 = 0{,}5\ h_d$

Pro $\delta = X°$ a $\delta = 90 - X° \rightarrow$ stejný doskok

Pro $\delta = 90°$ svislý paprsek $\rightarrow y_{0max} = v_0^2/2g = h_d$



$$x = v_0 t$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

Pro $\delta = 0°$ vodorovný paprsek (vodorovný vrh)

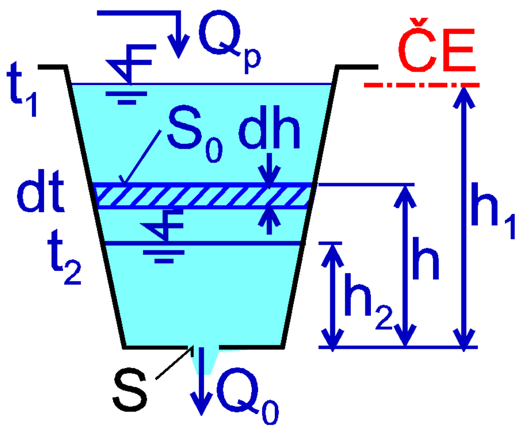
teoreticky $L_p = 2\sqrt{h_d\ y_T}$

reálná kapalina, velká nádrž $L_p = 2\varphi\sqrt{h_T\ y_T}$

NEUSTÁLENÝ VÝTOK OTVOREM

$Q_p < Q_0$ prázdnění, $Q_p > Q_0$ plnění

Diferenciální rovnice neustáleného výtoku



$$Q_0\,dt - Q_p\,dt = -S_0\,dh \quad \text{(prázdnění)}$$

$$Q_p\,dt - Q_0\,dt = S_0\,dh \quad \text{(plnění: } t_1 \leftrightarrow t_2,\ h_1 \leftrightarrow h_2\text{)}$$

$$dt = -\frac{S_0\,dh}{Q_0 - Q_p} = \frac{S_0\,dh}{Q_p - Q_0}$$

tatáž rovnice pro prázdnění i plnění

$$\boxed{t = t_2 - t_1 = \int_{h_2}^{h_1} \frac{S_0\,dh}{Q_0 - Q_p} = \int_{h_2}^{h_1} \frac{S_0\,dh}{Q_p - Q_0}}$$

Pro $Q_p \neq$ konst., $S_0 \neq$ konst. , nepravidelná nádrž $\Rightarrow$

$\Rightarrow$ numerické řešení po intervalech Δt

Prázdnění prizmatické nádoby (S_0 = konst.) při Q_p=0

Předpoklady:

- výtok malým otvorem, nátrubkem, potrubím $Q_0 = \mu_v S\sqrt{2gh}$
- volná hladina
- $S_0 >> S \rightarrow v_0 \sim 0$

$$t = \frac{S_0}{\mu_v S\sqrt{2g}} \int_{h_2}^{h_1} h^{-1/2}\, dh \qquad \boxed{t = \frac{2S_0}{\mu_v S\sqrt{2g}}\left(\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}\right)}$$

Doba úplného vyprázdnění ($h_2 = 0$):

$$\boxed{T = \frac{2S_0\sqrt{h_1}}{\mu_v S\sqrt{2g}} = \frac{2S_0 h_1}{\mu_v S\sqrt{2gh_1}} = \frac{2V_1}{Q_{01}}}$$