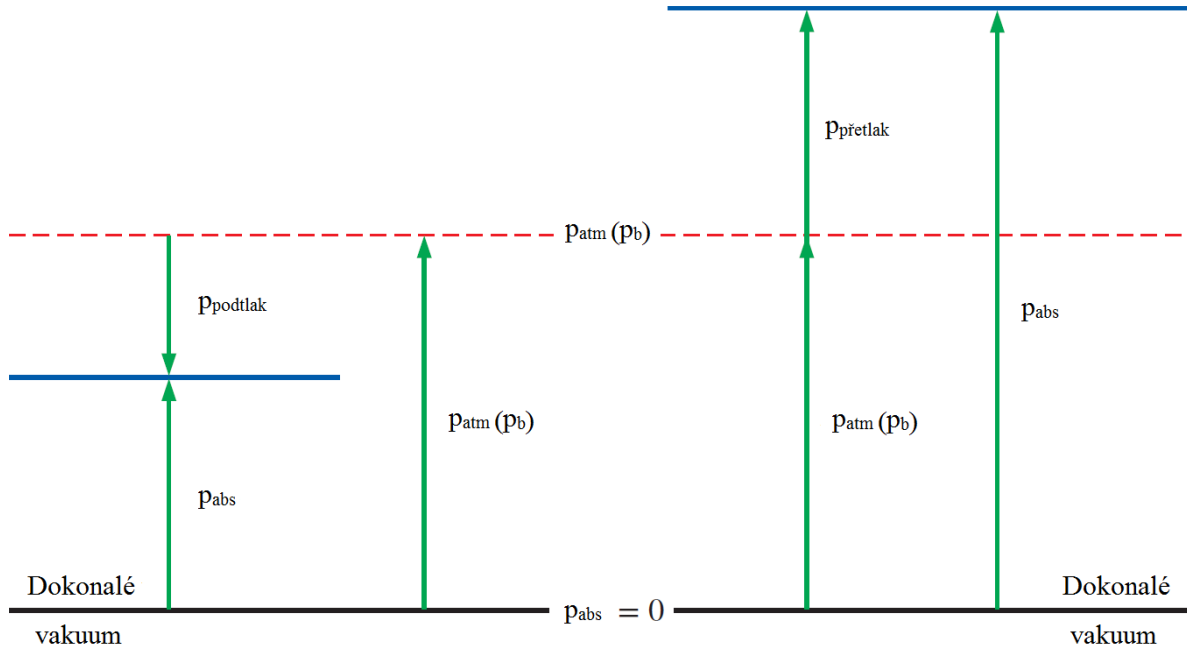




Způsoby měření tlaku, průtoku a rychlosti

Základní principy měření tlaku

Relativní tlak (přetlak, podtlak), absolutní tlak, barometrický tlak



Základní definice pro měření tlaku

Definice pomocí základních jednotek SI a definice hydrostatického tlaku

$$p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{L^2}$$

$$(Pa) = \frac{(N)}{(m^2)} = \frac{(kg) \left(\frac{m}{s^2}\right)}{(m)(m)} = \frac{(kg)}{(m)(s^2)}$$

$$p = h\rho g$$

$$(Pa) = (m) \left(\frac{kg}{m^3}\right) \left(\frac{m}{s^2}\right) = \frac{(kg)}{(m)(s^2)}$$

Základní definice pro měření tlaku

Celkový tlak, statický tlak, dynamický tlak

$$p_{celk} = p_{stat} + p_{dyn}$$

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Základní dělení přístrojů pro měření tlaku

- Tlakoměry kapalinové (hydrostatické)
 1. Zvonové (využívají zdvihu zvonu)
 2. Pístové (využívají Pascalova zákona)
 3. Sloupcové (využívají tíhy kapalinového sloupce)

- Tlakoměry deformační (využívají deformace pružného členu)
 1. Pružný prvek Bourdonova trubice
 2. Pružný prvek vlnovec (měchy)
 3. Pružný prvek membrána (krabicové tlakoměry apod.)

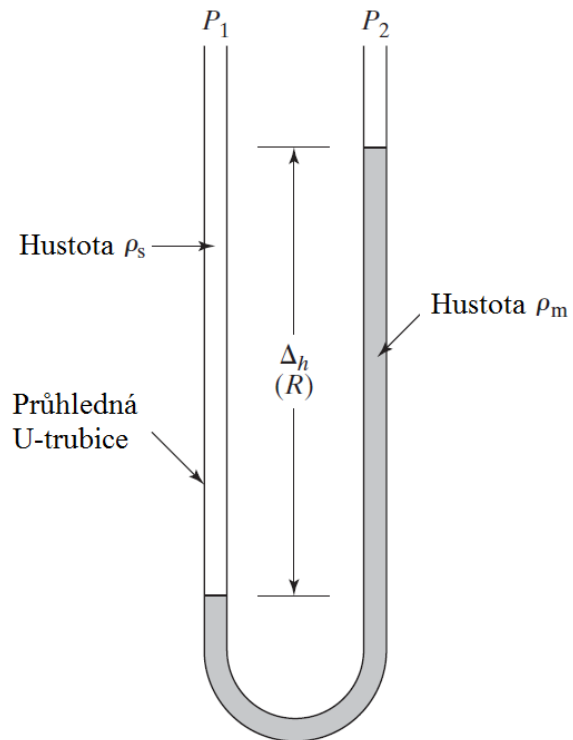
- Tlakoměry elektrické (využívají změny elektrické veličiny)
 1. Tenzometrické snímače tlaku
 2. Kapacitní snímače tlaku
 3. Piezoelektrické snímače tlaku
 4. LVDT snímače tlaku

Základní dělení přístrojů pro měření velmi nízkého tlaku

- Kompresní vakuometry (hydrostatické, mechanické)
- Bolometrické vakuometry (tepelná vodivost plynu závislá na tlaku)
- Ionizační vakuometry (míra ionizace plynu závislá na tlaku)

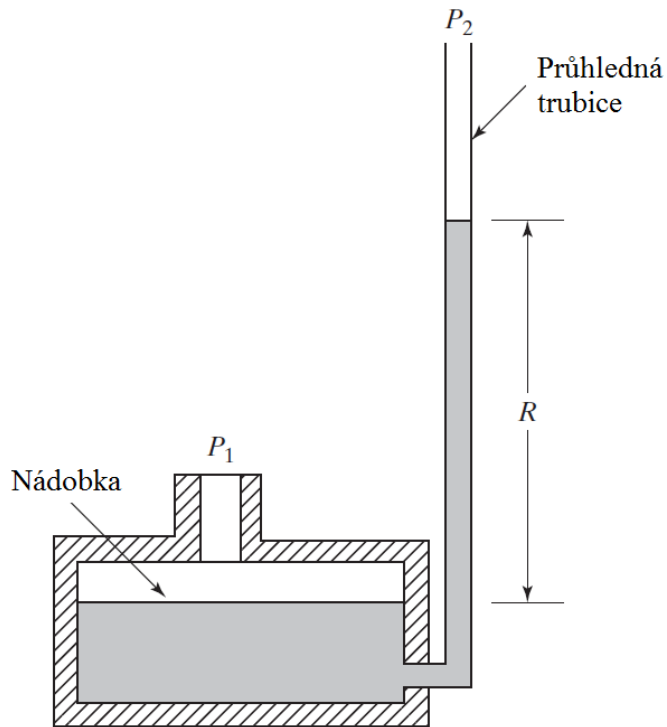
Měření tlaku

U-trubicový tlakoměr (U-manometr)



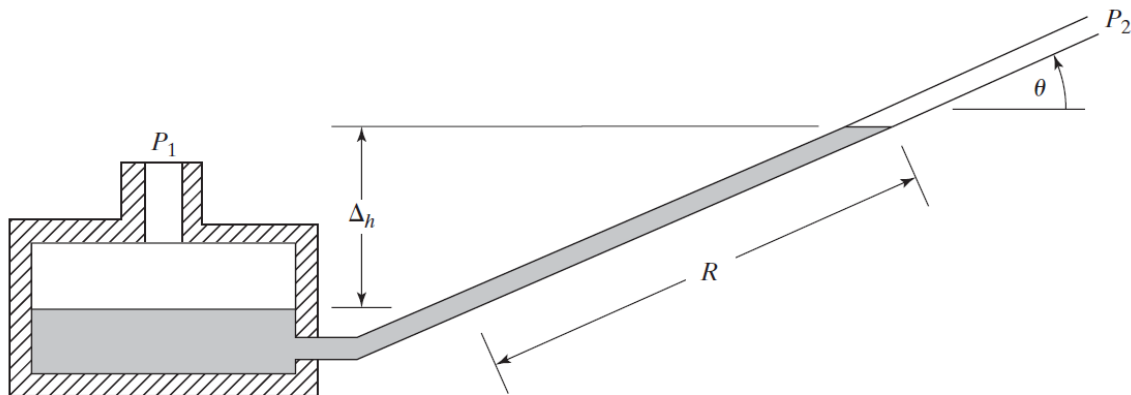
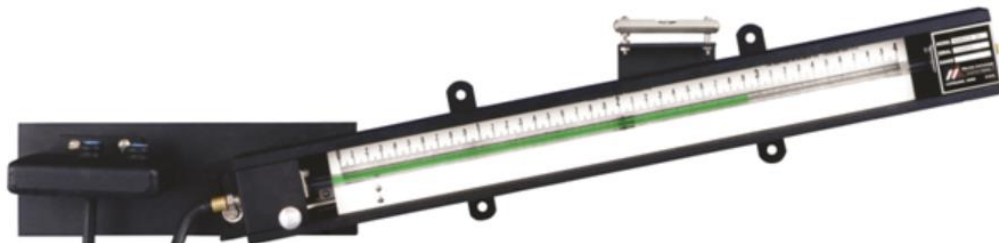
Měření tlaku

Nádobkový tlakoměr



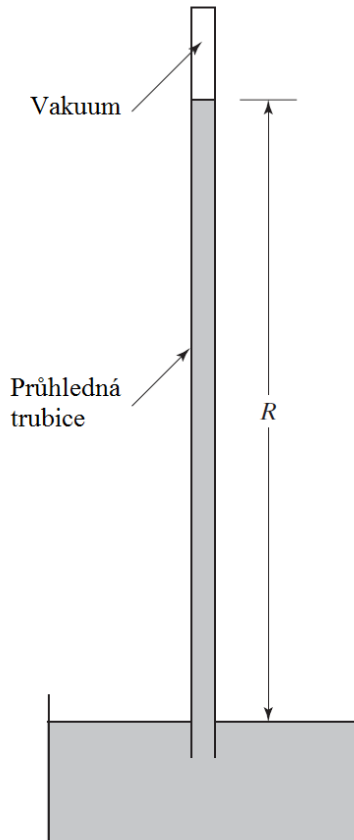
Měření tlaku

Sklonný kapalinový tlakoměr (úprava rozsahu, větší přesnost)



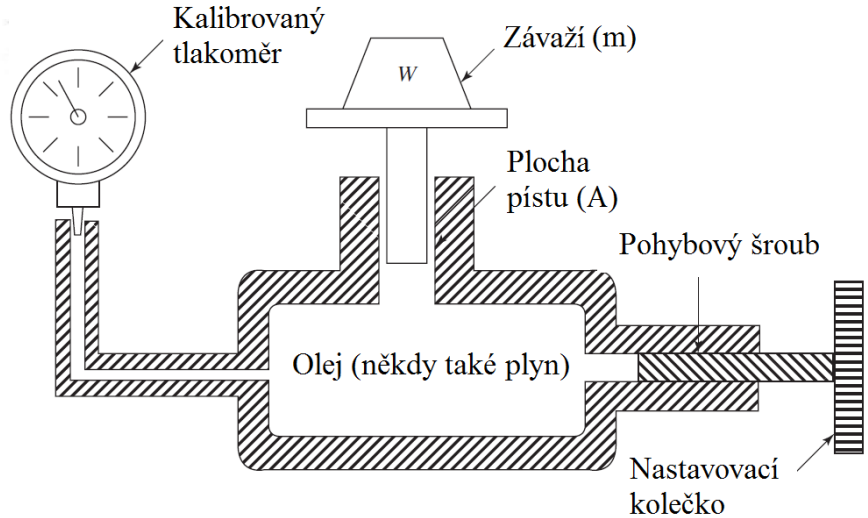
Měření tlaku

Rtuťový barometr



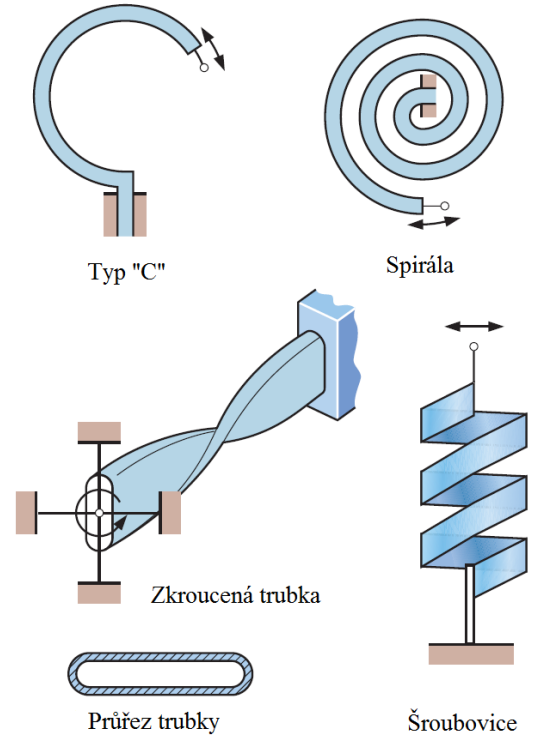
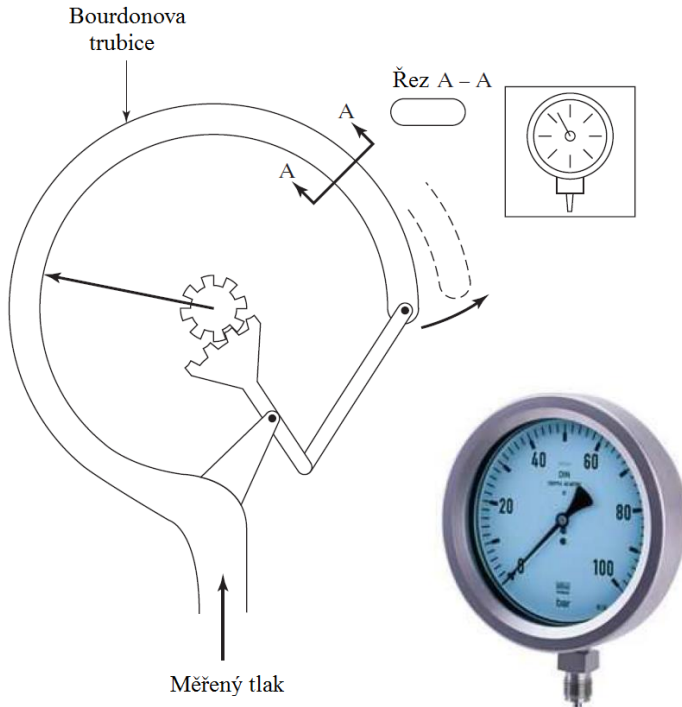
Měření tlaku

Pístový tlakoměr (závažová pumpa) – především vhodný pro kalibraci dalších tlakoměrů



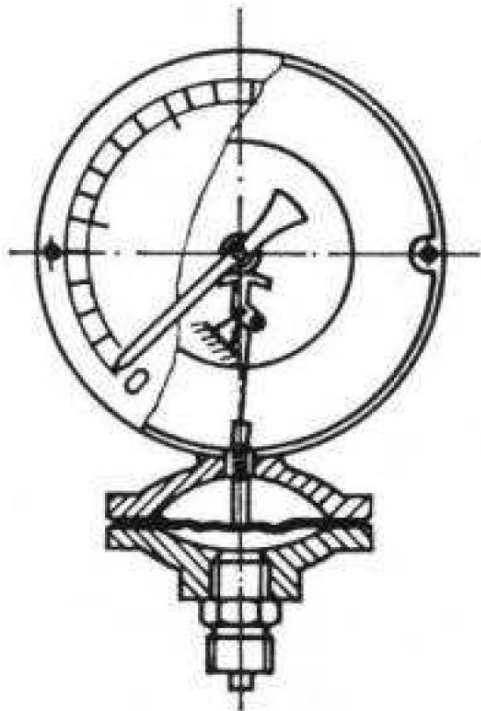
Měření tlaku

Bourdonův deformační tlakoměr



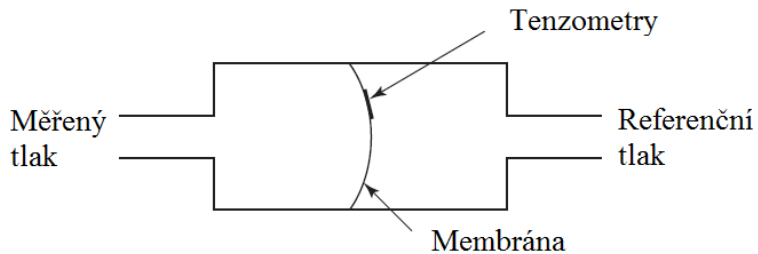
Měření tlaku

Membránový deformační tlakoměr

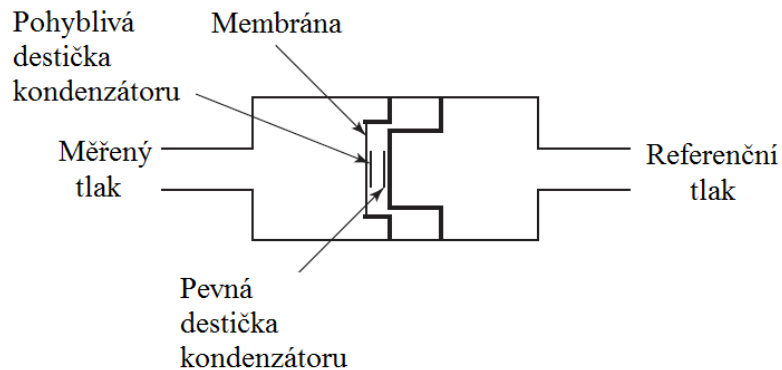


Měření tlaku

Tenzometrický snímač tlaku

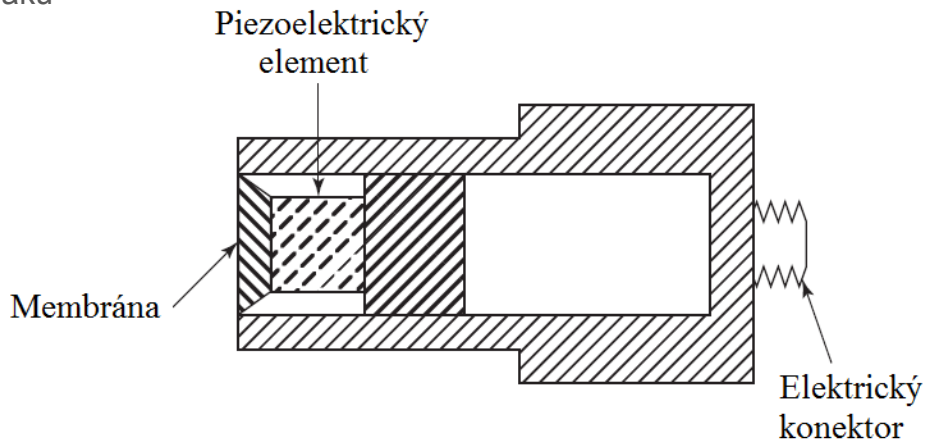


Kapacitní snímač tlaku



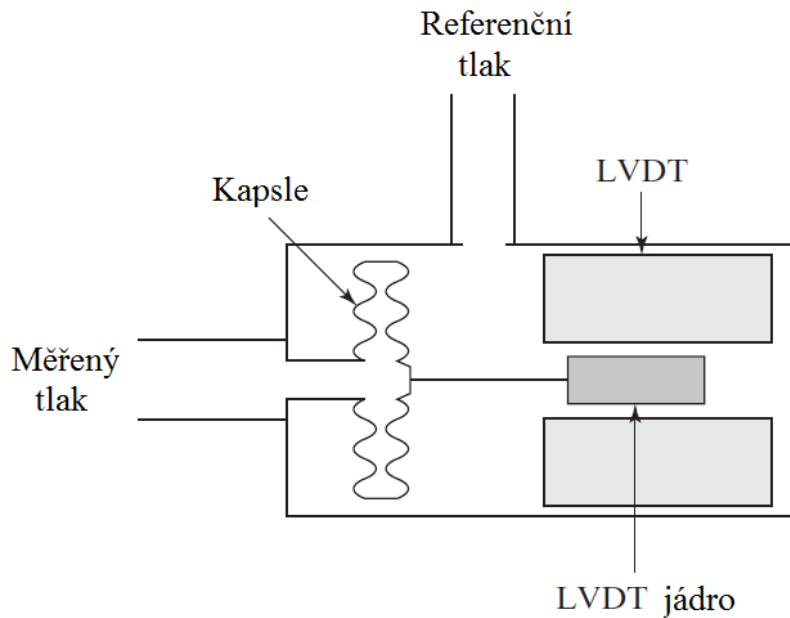
Měření tlaku

Piezelektrický snímač tlaku



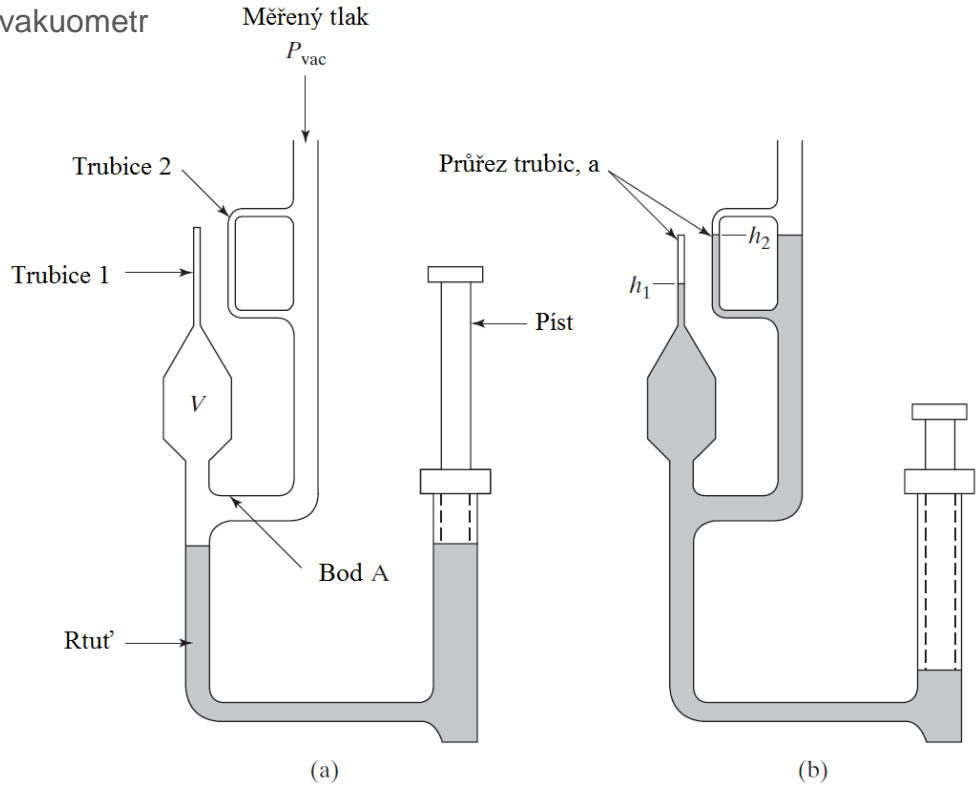
Měření tlaku

LVDT snímač tlaku (Linear Variable Differential Transformer)



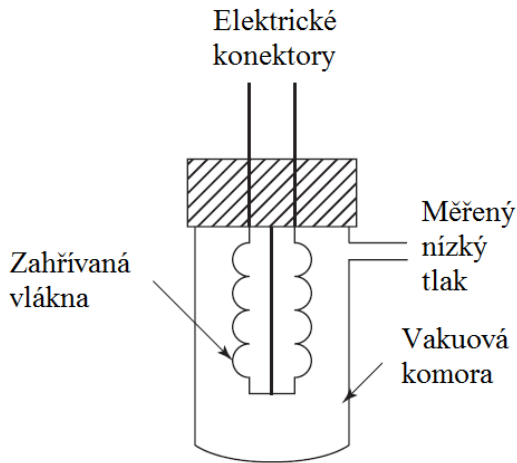
Měření velmi nízkého tlaku

Kompresní (McLeodův) vakuometr
(rozsah 10^3 až 10^{-4} Pa)

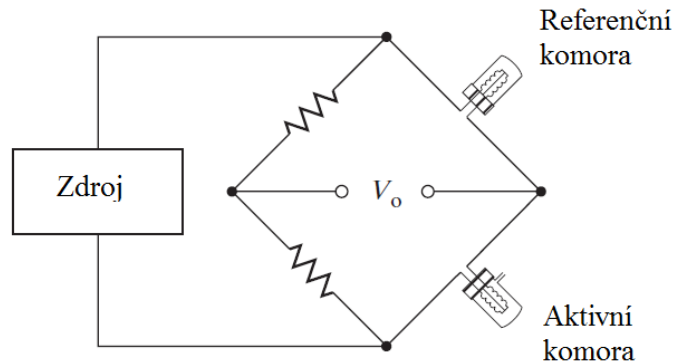


Měření velmi nízkého tlaku

Bolometrický (Piraniho) vakuometr
(rozsah 10^3 až 10^{-3} Pa)



(a) Měřicí komora



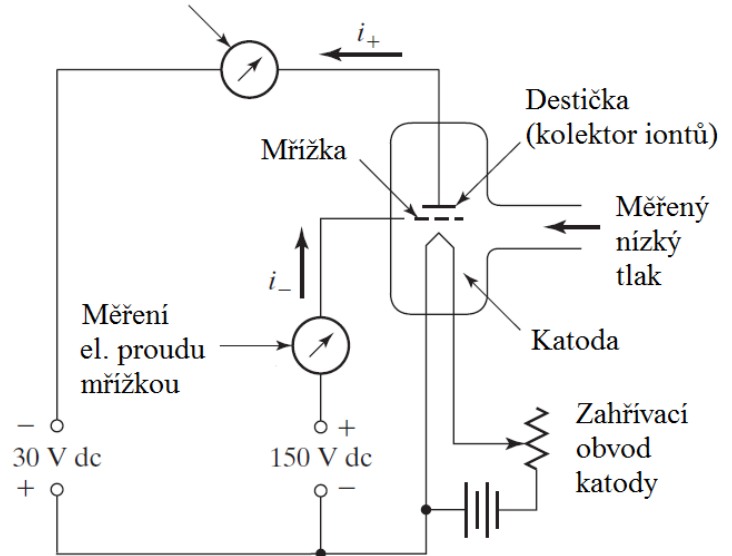
(b) Elektrické zapojení

Měření velmi nízkého tlaku

Ionizační vakuometr
(rozsah 10^{-1} až 10^{-10} Pa)

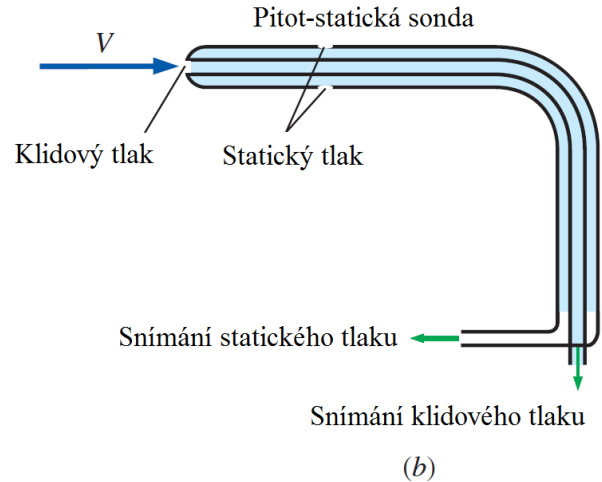
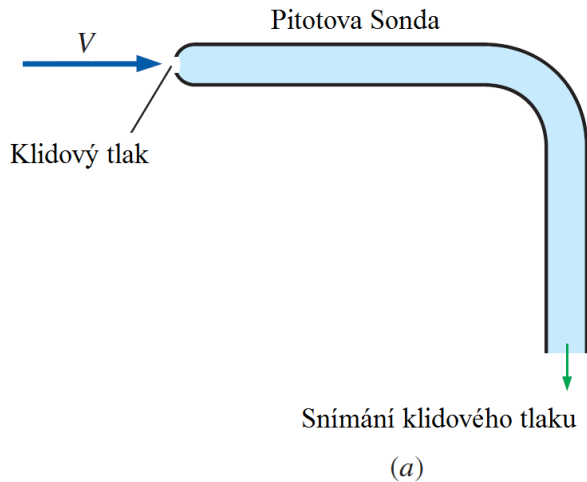


Měření el. proudu
destičkou



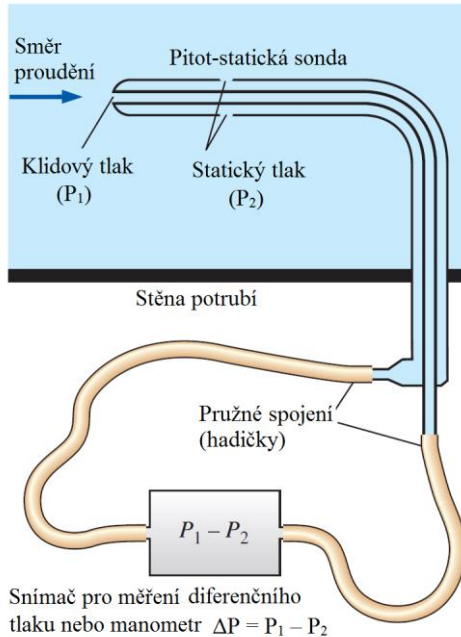
Měření rychlosti a průtoku

Pitotova a Pitotova-Statická sonda (Prandtlova sonda)



Měření rychlosti a průtoku

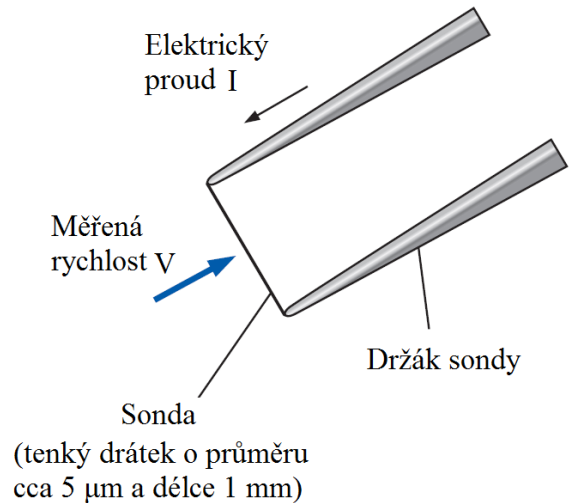
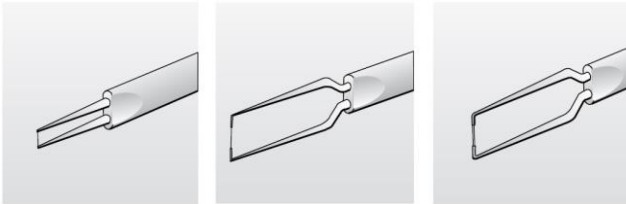
Pitotova-Statická sonda (Prandtova sonda)



Měření rychlosti a průtoku

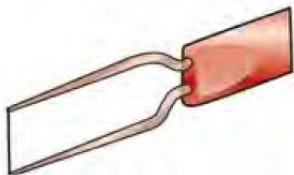
Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku) – 2 možné režimy měření (CTA/CCA)

- **CTA** (Constant Temperature Anemometry) **pro měření rychlosti**
- **CCA** (Constant Current Anemometry) **pro měření teploty**

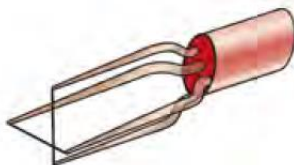


Měření rychlosti a průtoku

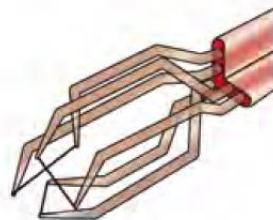
Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku) – CTA/CCA



1D



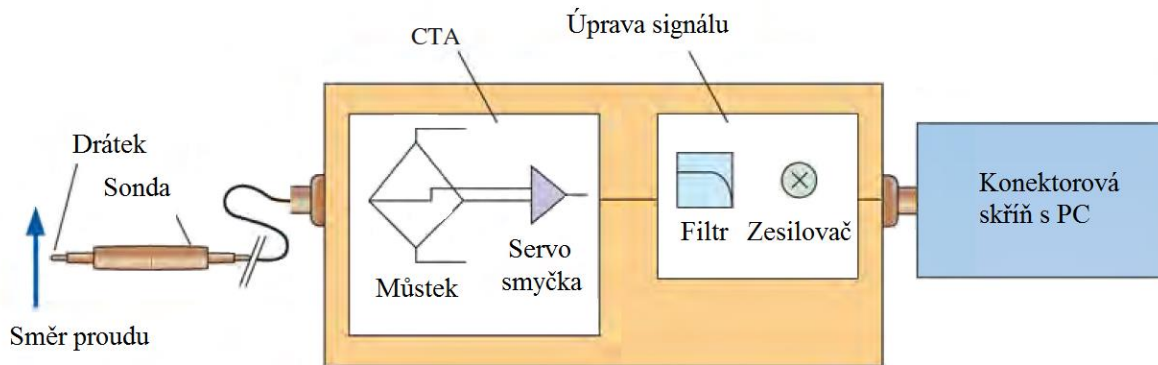
2D



3D

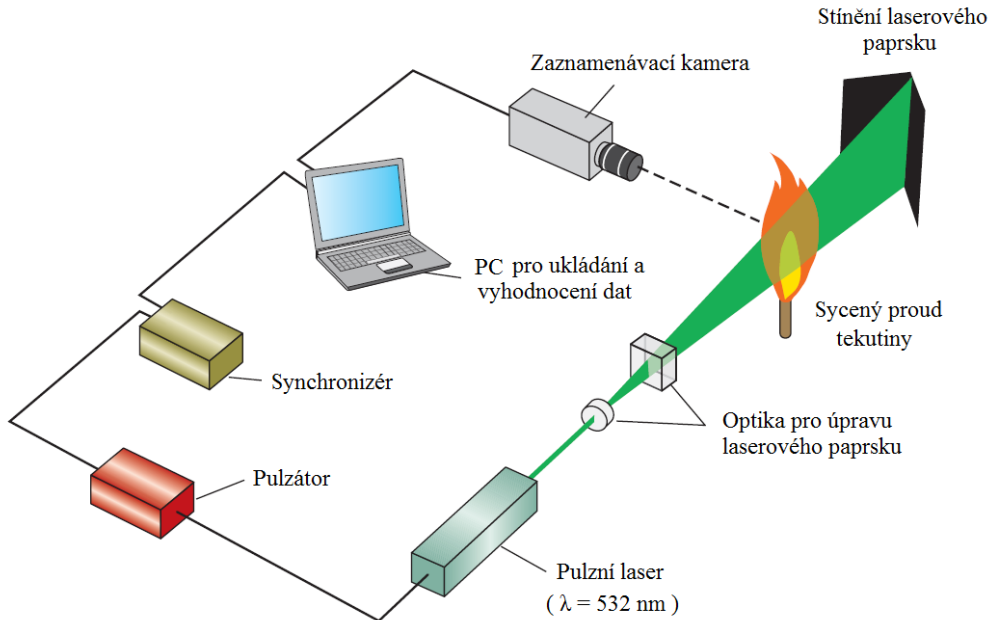
Měření rychlosti a průtoku

Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku) – CTA/CCA



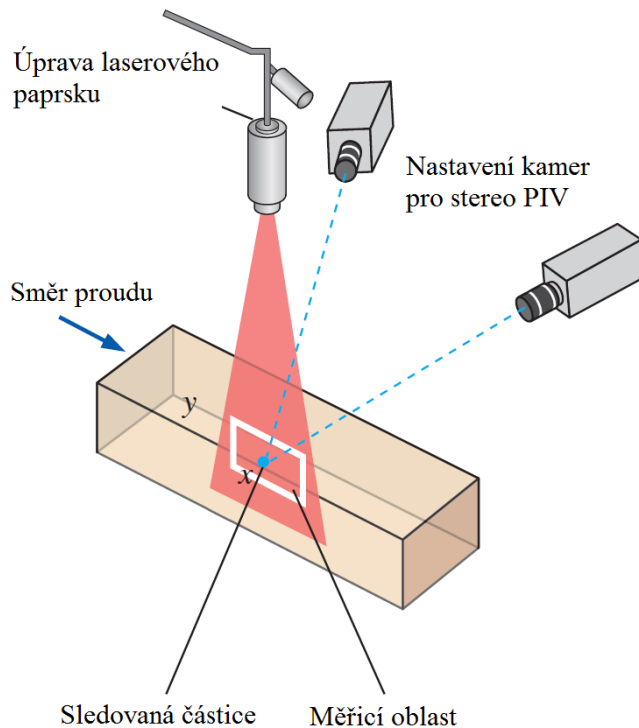
Měření rychlosti a průtoku

PIV metoda (Particle Image Velocimetry)



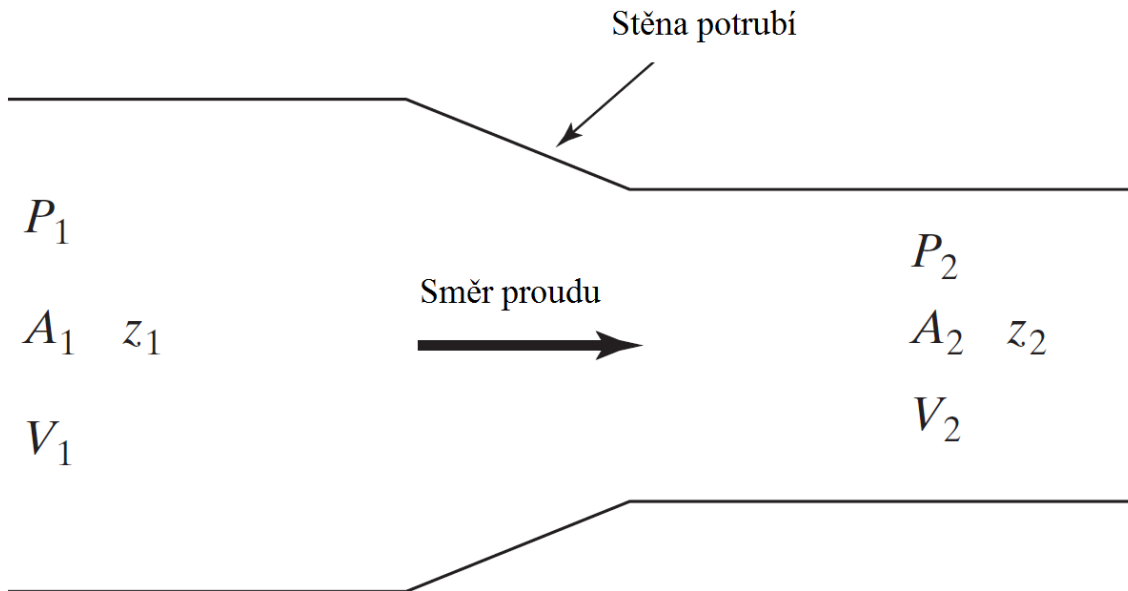
Měření rychlosti a průtoku

3D PIV metoda (Particle Image Velocimetry)



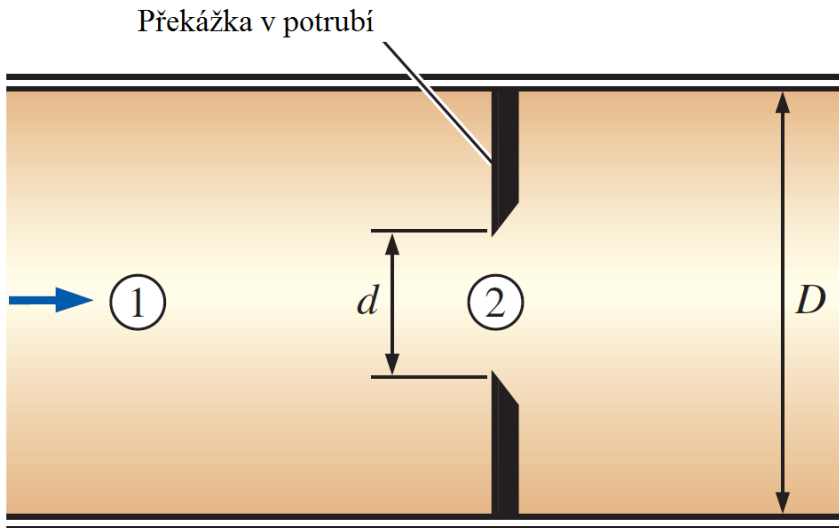
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové difference (ISO 5167)



Měření rychlosti a průtoku

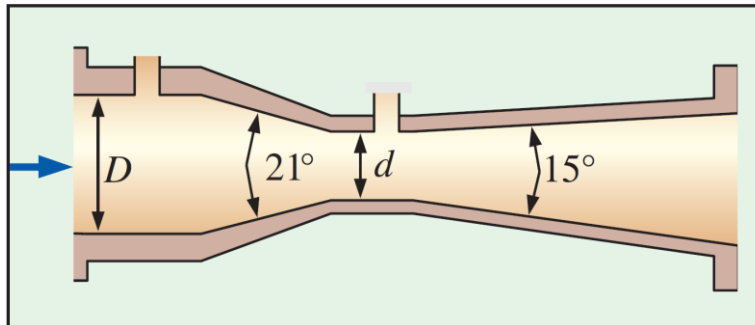
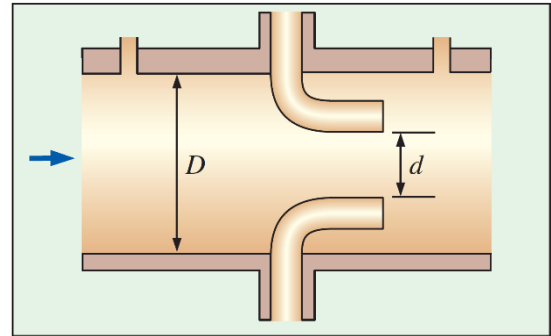
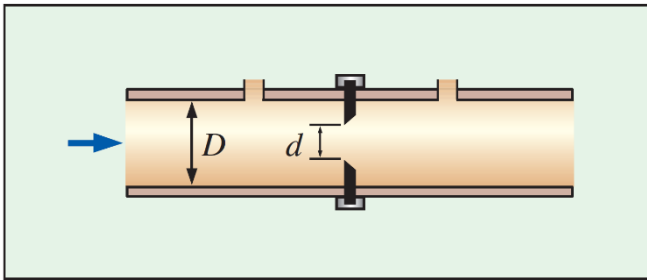
Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167)



Nutné provést korekci ideálního průtoku na reálný, případně také korekci stlačitelnosti.

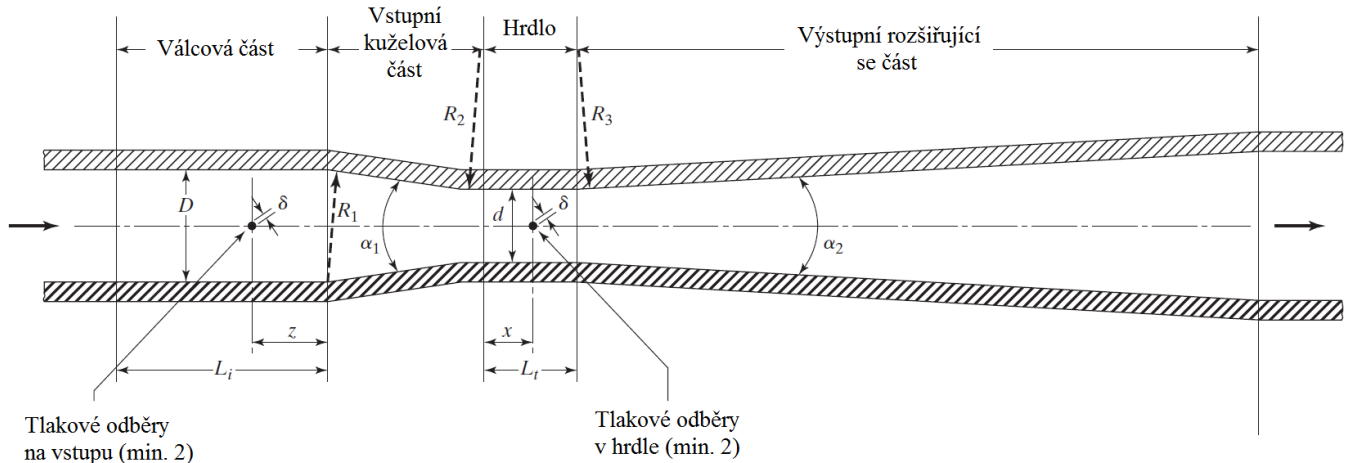
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167) – clona, dýza, Venturiho trubice



Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice



$L_i > D$ or $L_i > (D/4 + 250 \text{ mm})$
 $z = D/2 (+0.0 D, -D/4)$, minimálně 2 odběry
 $L_t \geq d/3$
 $x = 0.5 d \pm 0.02 d$, minimálně 2 odběry
 $4 \text{ mm} \leq \delta \leq 10 \text{ mm}$ a $\delta < 0.1D$ nebo $0.13 d$

$R_1 = 1.375 D \pm 20\%$
 $R_2 = 3.625 d \pm 0.125 d$
 $5d \leq R_3 \leq 15 d$
 $\alpha_1 = 21^\circ \pm 1^\circ$
 $7^\circ \leq \alpha_2 \leq 15^\circ$

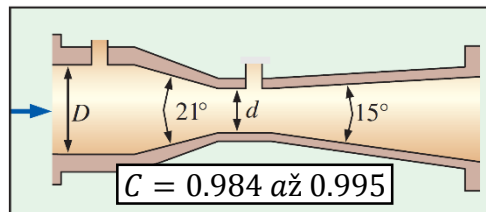
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové difference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice

Doporučené hodnoty součinitele průtoku pro Venturiho trubice

Litá a svařovaná vstupní kuželová část	Opracovaná vstupní kuželová část
$C = 0.984 \pm 1.0\%$	$C = 0.995 \pm 1.0\%$
$10.16 \text{ cm} \leq D \leq 121.92 \text{ cm}$	$5.08 \text{ cm} \leq D \leq 25.4 \text{ cm}$
$0.3 \leq \beta \leq 0.75$	$0.3 \leq \beta \leq 0.75$
$2 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \times 10^6$	$2 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \times 10^6$

Zdroj : ASME (1989).



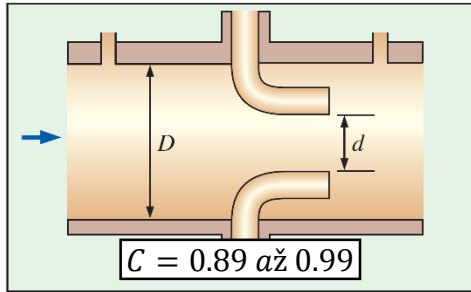
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové difference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice

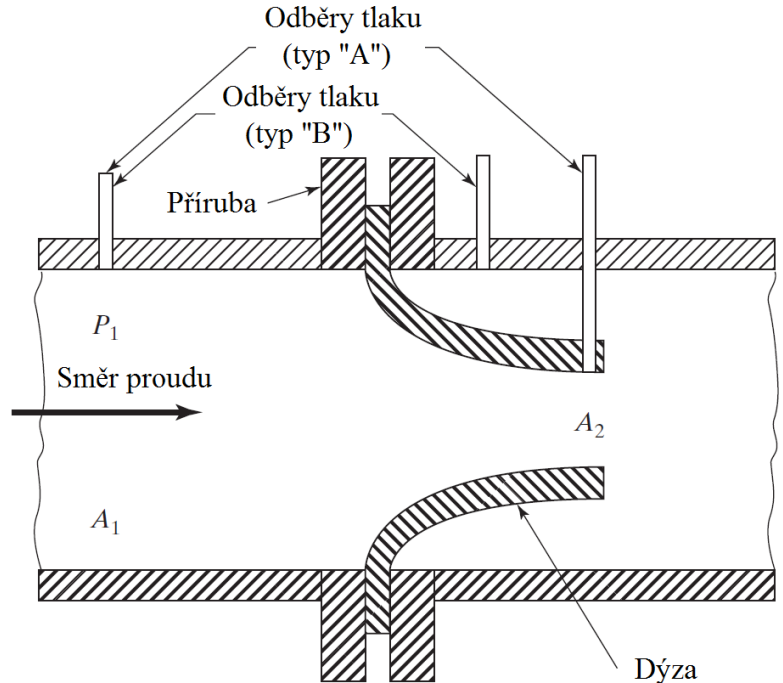


Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-3) – Dýza (různá provedení)

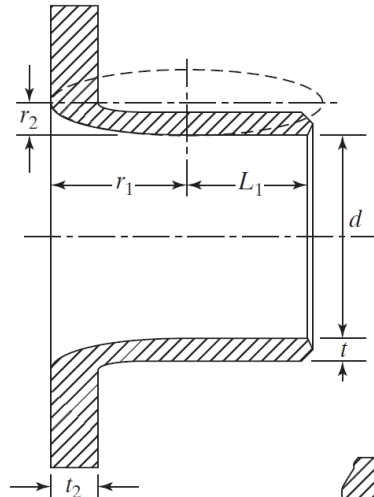


$$C = 0.9975 - 0.00653 \sqrt{\left(\frac{10^6 \beta}{Re_D}\right)}$$



Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-3) – např. dýza s dlouhým poloměrem



Dýza pro vysoký poměr β

$$0.50 \leq \beta \leq 0.80$$

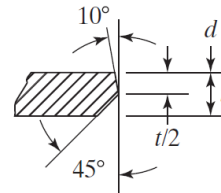
$$r_1 = D/2$$

$$r_2 = (D - d)/2$$

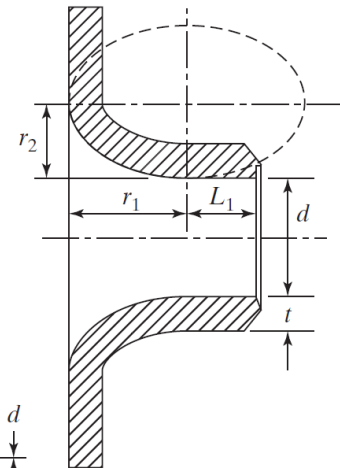
$$L_1 \leq 0.6 d \text{ or } \leq D/3$$

$$2t \leq D - (d + 6 \text{ mm})$$

$$3 \text{ mm} \leq t_2 \leq 0.15 D$$



Detail výstupu
dýzy



Dýza pro nízký poměr β

$$0.20 \leq \beta \leq 0.50$$

$$r_1 = d$$

$$0.63 d \leq r_2 \leq 0.67 d$$

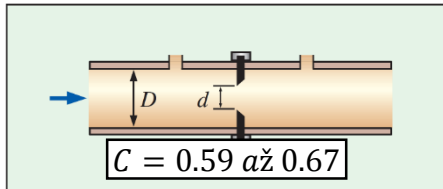
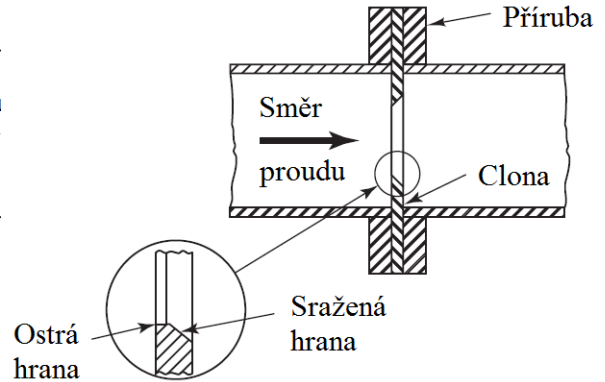
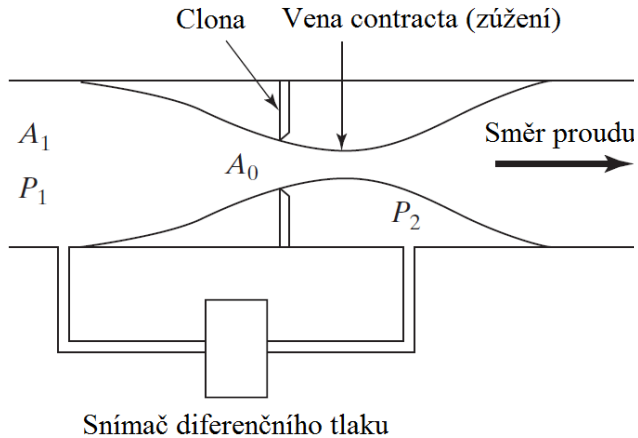
$$0.6 d \leq L_1 \leq 0.75 d$$

$$3 \text{ mm} \leq t \leq 12 \text{ mm}$$

$$3 \text{ mm} \leq t_2 \leq 0.15 D$$

Měření rychlosti a průtoku

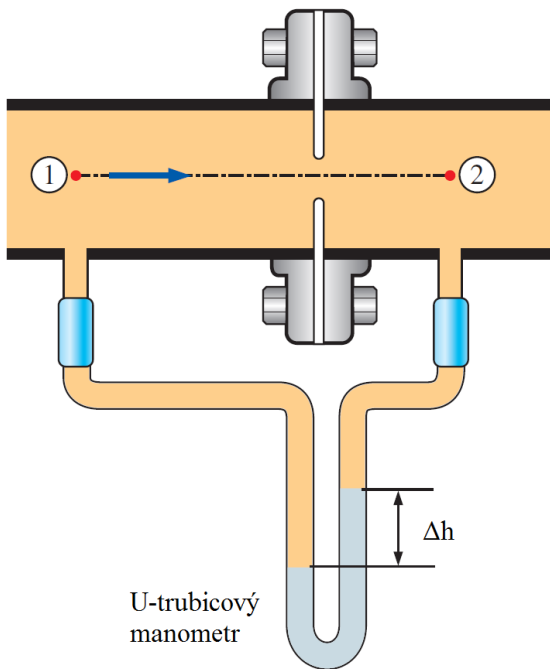
Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – clona (různá provedení)



$$C = 0.5959 - 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{97.71\beta^{2.5}}{Re_D^{0.75}}$$

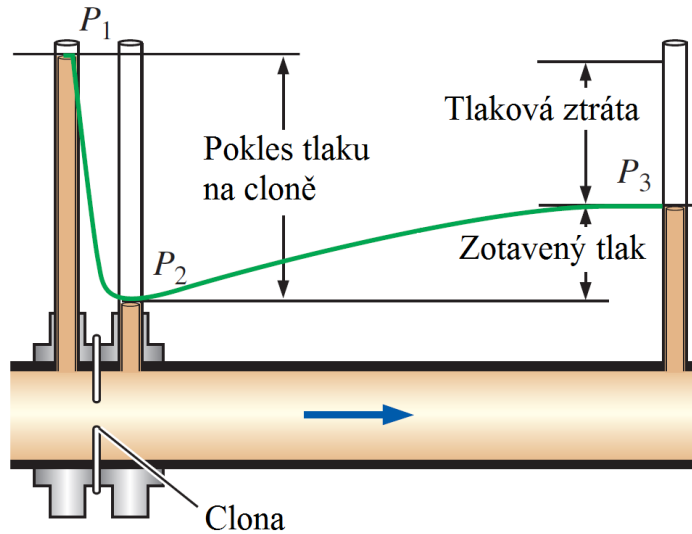
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – clona



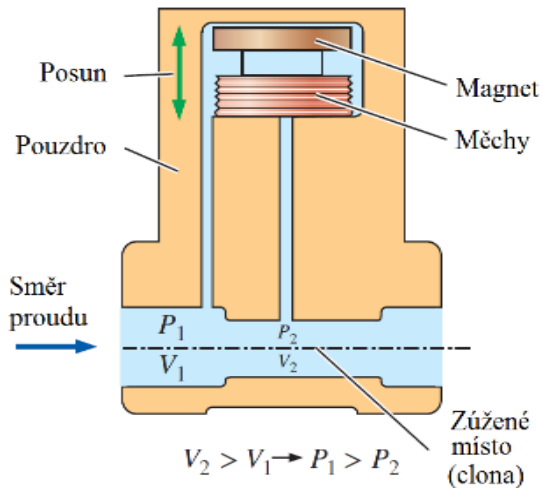
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – Pokles tlaku na cloně a tl. ztráta



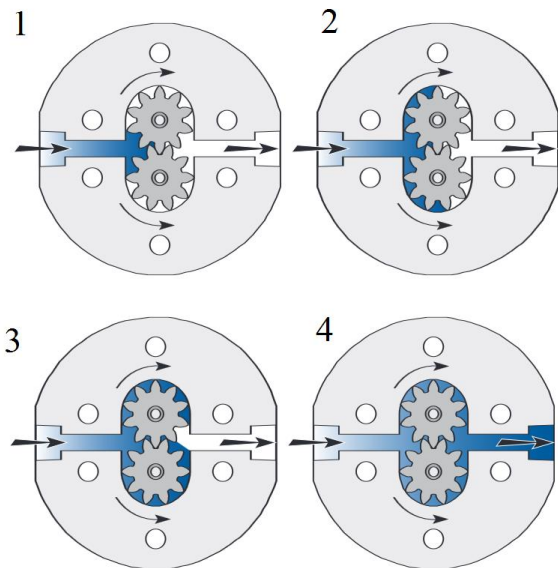
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference – Obecná překážka (kalibrace)



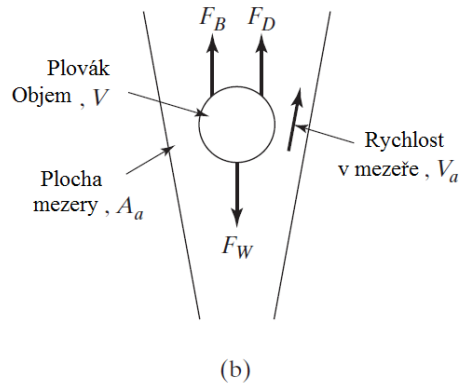
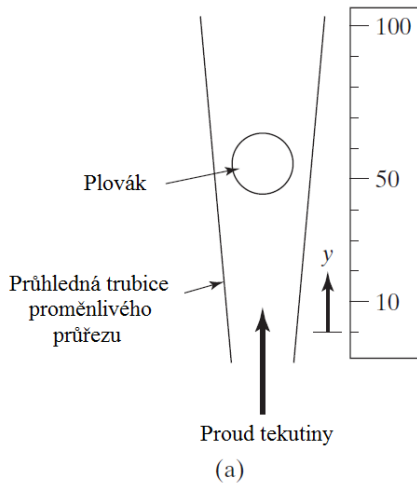
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku – Objemový průtokoměr



Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku – Plovákový průtokoměr (rotametr)



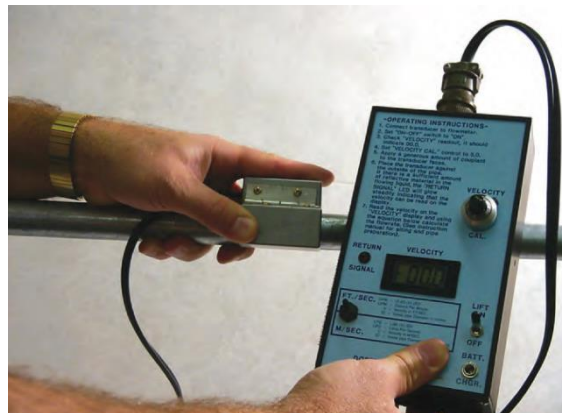
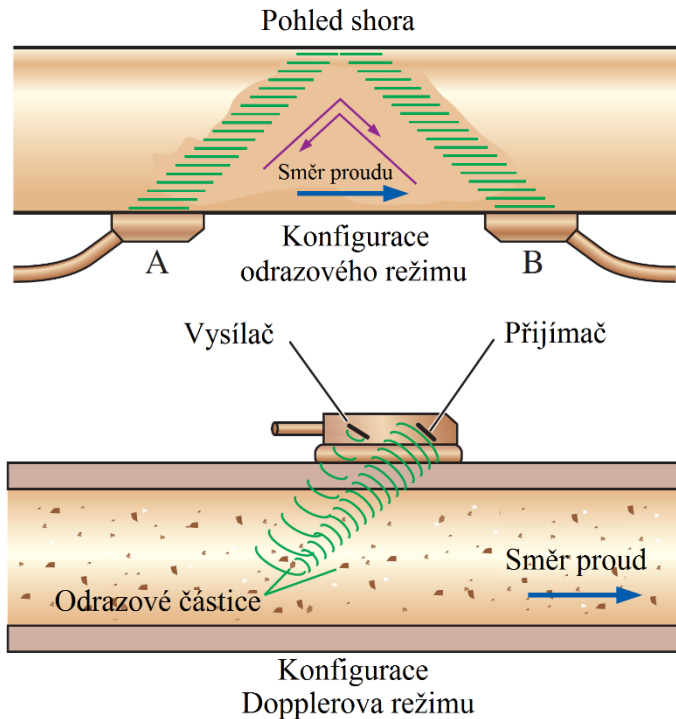
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku – Turbínkové (vrtulkové) průtokoměry



Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku – Ultrazvukové průtokoměry





Děkuji za pozornost!