Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Áramlástan Tanszék

Méréselőkészítő óra I.

Nagy László nagy@ara.bme.hu

M1 – M2	Czáder Károly	*czader@ara.bme.hu*
M3 – M12	Horváth Csaba	*horvath@ara.bme.hu*
M4 – M10	Benedek Tamás	*berbekar@ara.bme.hu*
M5 – M13	Rakai Anikó	*lukacs@ara.bme.hu*
M7	Gulyás András	*gulyas@ara.bme.hu*
M8 – M9	Hernádi Zoltán	*hernadi@ara.bme.hu*
M11	Nagy László	*nagy@ara.bme.hu*

2012.

Általános ismertetés

- A tanszéki weblap:

  www.ara.bme.hu

- A hallgatói információcsere:

  www.ara.bme.hu/poseidon

  (segédanyagok, zh pontszámok, jk. és prezentáció pontok, …)

- A honlapon lehet jelentkezni mérőcsoportokba, de nem lehet időpontot váltani.

  www.ara.bme.hu/hjelentk

  vagy a neptun levélben mellékelt google dokumentumban jelölve

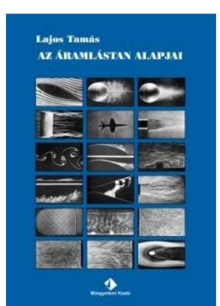
  MINDENKI jelentkezzen 2. oktatási hét végéig!

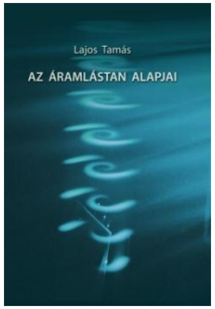
- A mérési zh a harmadik gyakorlaton lesz.

  (a zárhelyi a mérések megkezdésének feltétele, pótlás a 4.héten)

Általános ismertetés

- Menetrend:
  - 1.alkalom: Mérőeszközök, mérési módszerek, hibaszámítás bemutatása
  - 2.alkalom: Mérőhelyek bemutatása, hibaszámítás gyakorlása
  - 3.alkalom: A mérés
  - 4.alkalom: B mérés
  - 5.alkalom: C mérés
  - 6.alkalom: A + ½ B mérések prezentációja
  - 7.alkalom: ½ B + C mérések prezentációja





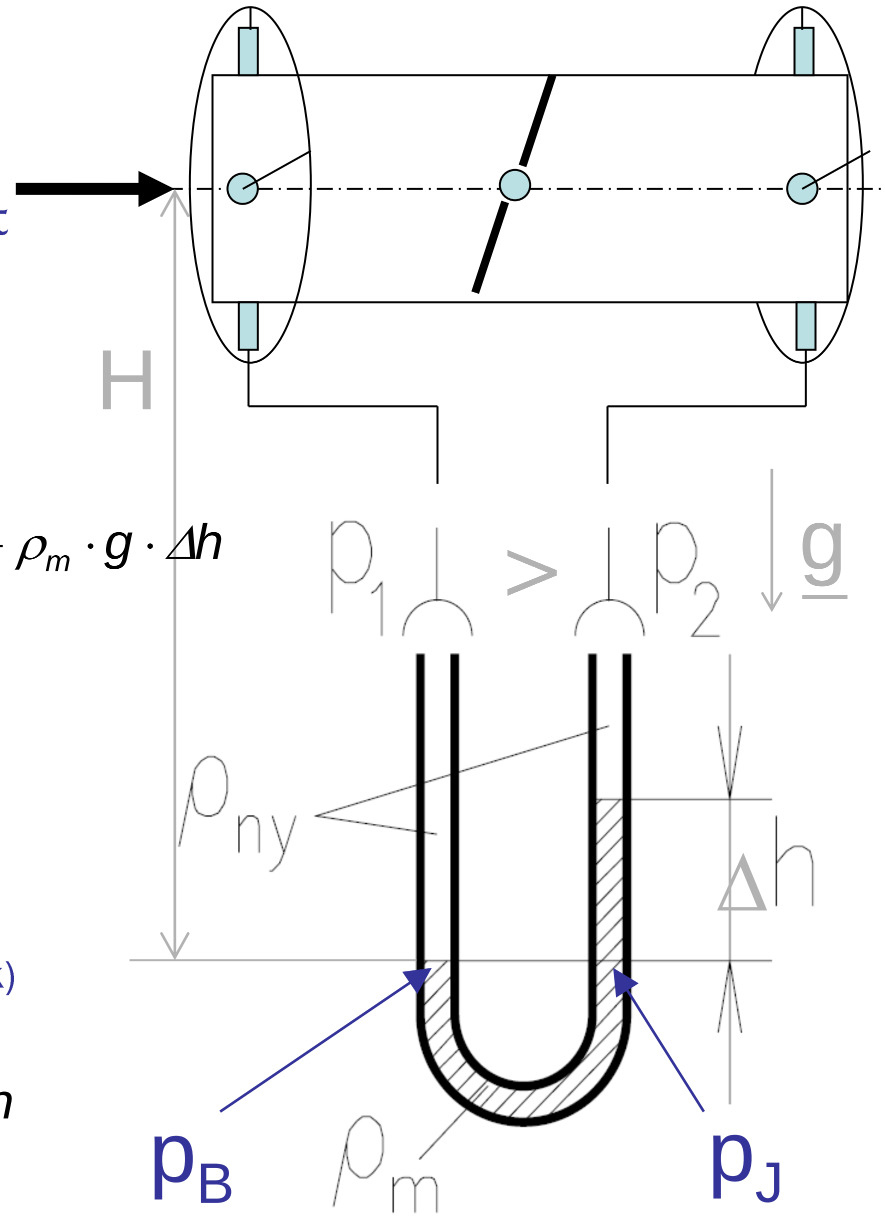
A nyomáskülönbség mérése (Δp mérés)

- Több mennyiség mérésének alapja (pl. sebesség, térfogatáram)
- Áramló közegben, két pont közötti nyomáskülönbség mérése
- Gyakran egy referenciaértékhez képest mérjük

  (légköri nyomás, csatorna statikus nyomás)
- Eszközei
  - U csöves manométer
  - Betz-rendszerű manométer
  - Ferdecsöves mikromanométer
  - Görbecsöves mikromanométer
  - EMB-001 digitális kézi nyomásmérő műszer

Δp mérés / U-csöves manométer I.

- Csőáramlás
- Pillangószelep
- Körvezetéken átlagoljuk a nyomást



A manométer egyensúly egyenlete:

$$p_B = p_J$$

$$p_1 + \rho_{ny} \cdot g \cdot H = p_2 + \rho_{ny} \cdot g \cdot (H - \Delta h) + \rho_m \cdot g \cdot \Delta h$$

$$p_1 - p_2 = (\rho_m - \rho_{ny}) \cdot g \cdot \Delta h$$

Egyszerűsíthető, ha

$$\rho_{ny} << \rho_m$$

(pl. levegő közeg – víz mérőfolyadék)

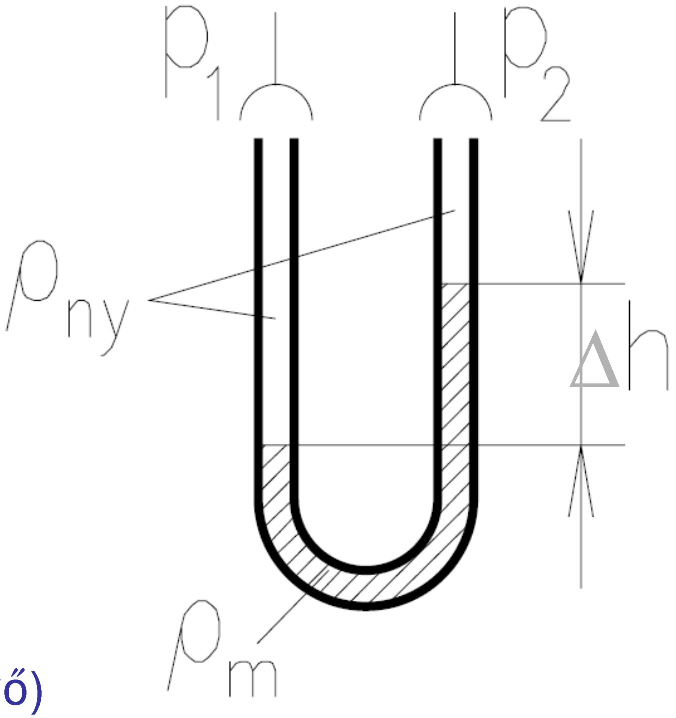
$$p_1 - p_2 = \rho_m \cdot g \cdot \Delta h$$

Vegyük észre, hogy $\Delta p \neq f(H)$

A nyomáskülönbség mérése / U-csöves manométer II.

A manométer egyensúly egyenlete

$$\Delta p = \left(\rho_m - \rho_{ny}\right) \cdot g \cdot \Delta h$$



A mérőfolyadékok sűrűsége ρ_m (irányszámok)

$$\rho_{Hg} \approx 13600 \frac{kg}{m^3} \qquad \rho_{víz} \approx 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{Alkohol} = 830 \frac{kg}{m^3}$$

A nyomásközvetítő közeg sűrűsége: ρ_{ny} (pl. levegő)

$$\rho_{levegő} = \frac{p_0}{R \cdot T} = 1{,}19 \frac{kg}{m^3}$$

p_0 - levegő nyomás, közel légköri nyomás [Pa] ~10^5Pa

R - a levegő specifikus gázállandója 287[J/kg/K]

T - légköri hőmérséklet [K] ~293K=20°C

Δp mérés / U-csöves manométer pontossága III.

Pl. a leolvasott érték: $\Delta h = 10mm$

A pontossága ~1mm: Az abszolút hibája:

$$\delta(\Delta h) = \pm 1mm$$

A helyes érték felírása az abszolút hibával(!)

$$\Delta h = 10mm \pm 1mm$$

A relatív hibája:

$$\frac{\delta(\Delta h)}{\Delta h} = \frac{1mm}{10mm} = 0{,}1 = 10\%$$

Hátrányai:

- Leolvasási hiba (kétszer olvassuk le)
- Pontossága ~1mm
- Kis nyomáskülönbségeknél nagy a relatív hiba

Előnye:

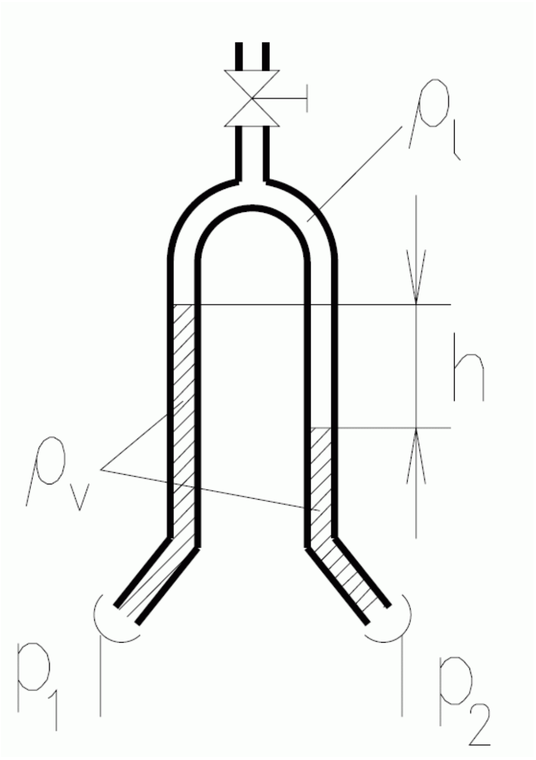
- Megbízható
- Nem igényel karbantartást

Δp mérés / fordított U-csöves manométer II.

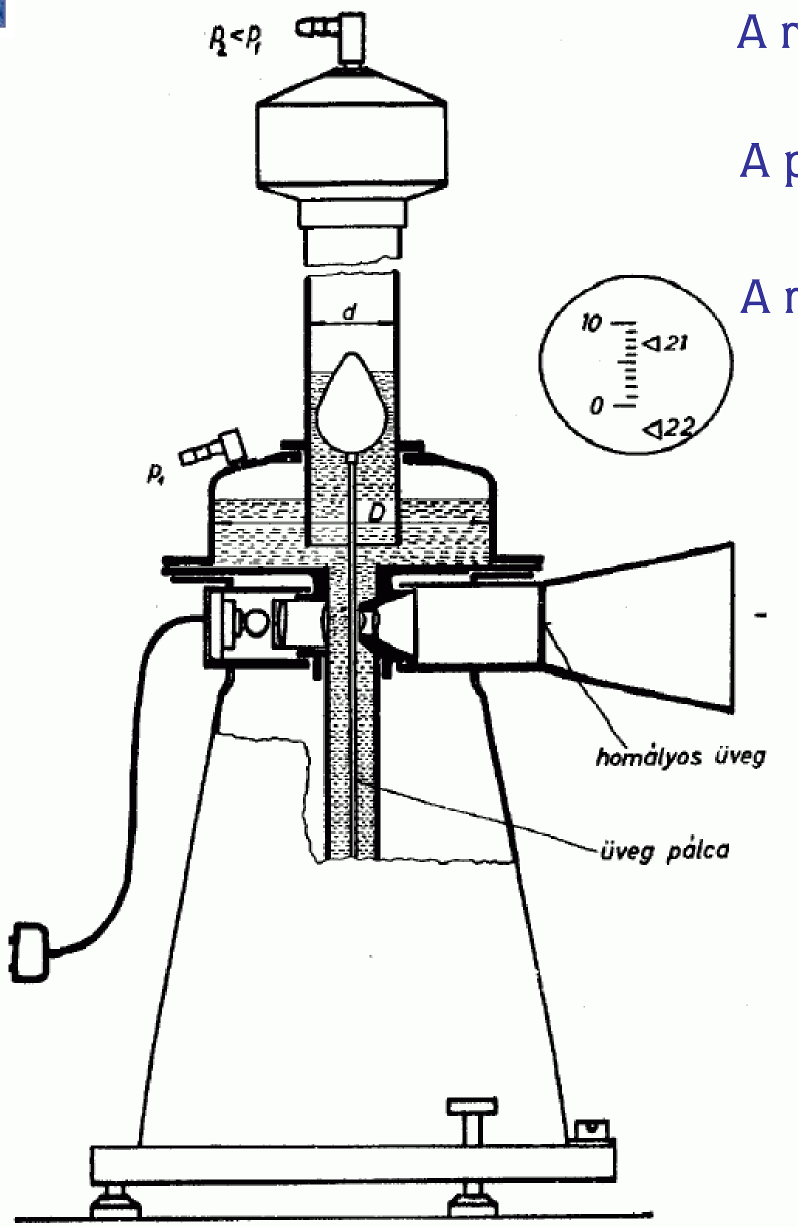
A manométer egyensúly egyenlete

$$p_1 - p_2 = (\rho_v - \rho_l) \cdot g \cdot h$$

Mivel általában folyadékkal (pl. víz) töltött vezetékekben mérjük a nyomáskülönbséget fordított U-csöves manométerrel, így ha a „mérőfolyadék" ebben az esetben pl. levegő, akkor a sűrűségviszony (1.2/1000) miatt a $-\rho_l$ elhagyható.
Előnye, hogy vizes rendszerekben alkalmazva, higany alkalmazása helyett levegő a mérőfolyadék, így javul a mérés relatív hibája!



Δp mérés / Betz-rendszerű mikromanométer

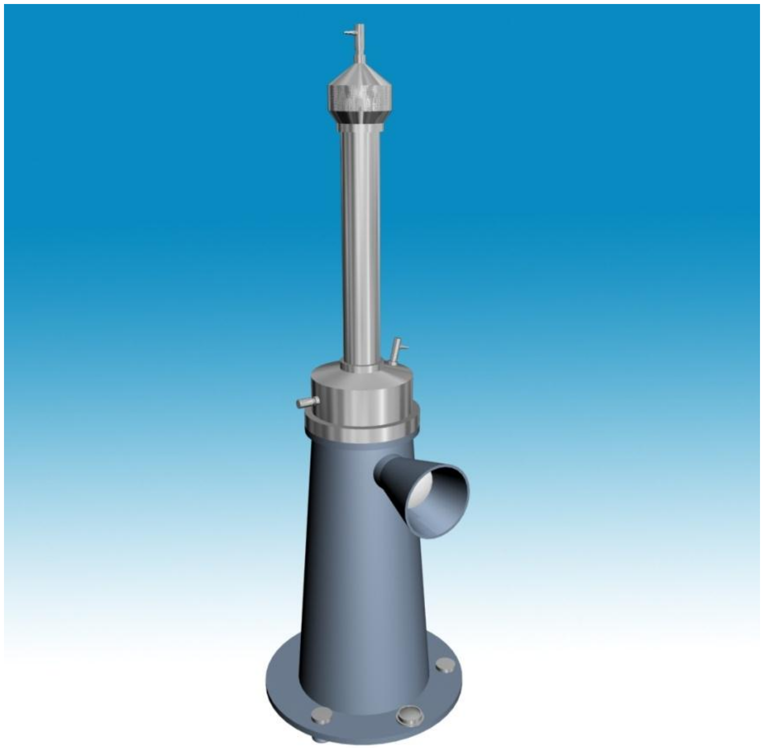


A relatív hiba csökkentése optikai eszközökkel, így a pontosság növelhető.

A pontossága ~0,1mm: Az abszolút hibája:

$$\Delta h = 10mm \pm 0{,}1mm$$

A relatív hibája: $\dfrac{\delta(\Delta h)}{\Delta h} = \dfrac{0{,}1mm}{10mm} = 0{,}01 = 1\%$

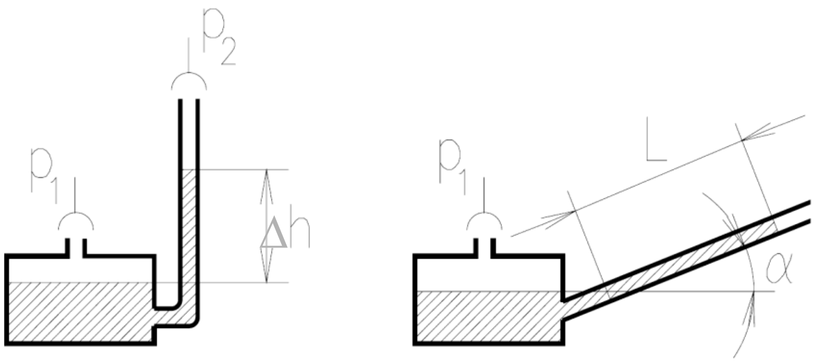


Δp mérés / ferdecsöves mikromanométer

A manométer egyensúly egyenlete

$$p_1 - p_2 = \rho_m \cdot g \cdot \Delta h$$

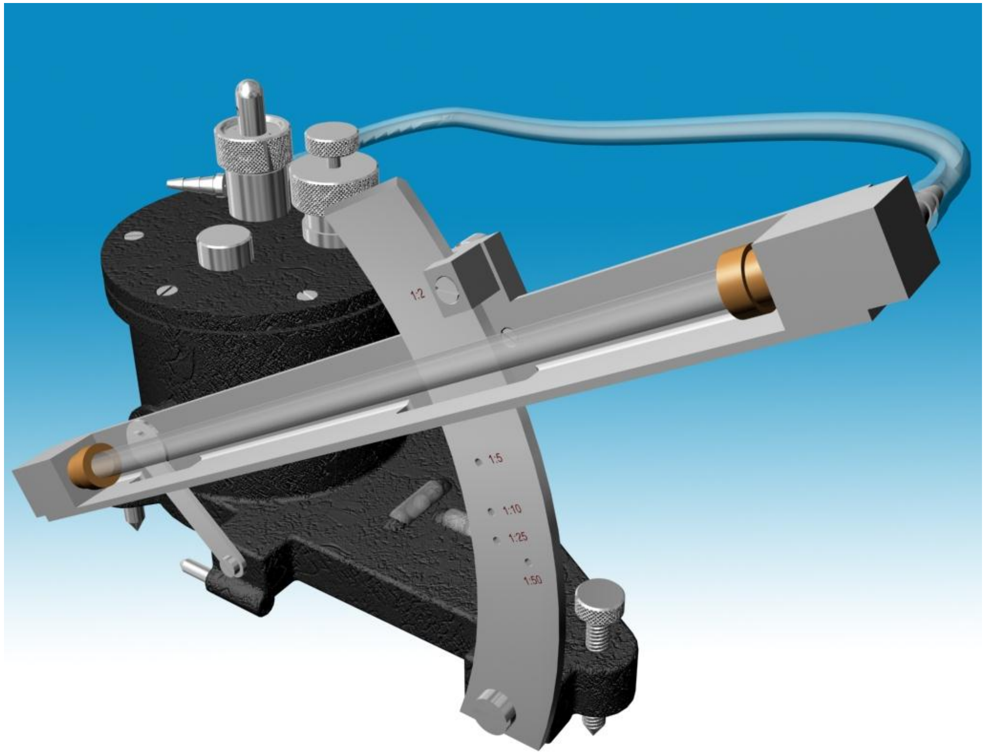
$$\Delta h = L \cdot \sin\alpha$$



Pontosság: $\delta L \sim \pm 1 \text{mm}$,

Relatív hiba $\alpha=30°$ esetén:

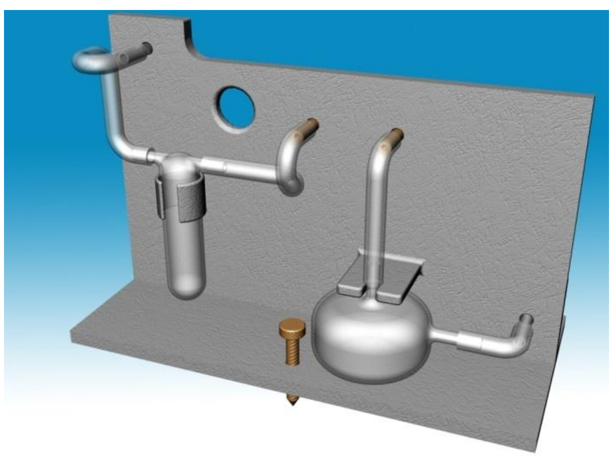
$$\frac{\delta L}{L} = \frac{\delta L}{\frac{\Delta h}{\sin\alpha}} = \frac{1mm}{\frac{10mm}{\sin 30°}} = 0{,}05 = 5\%$$

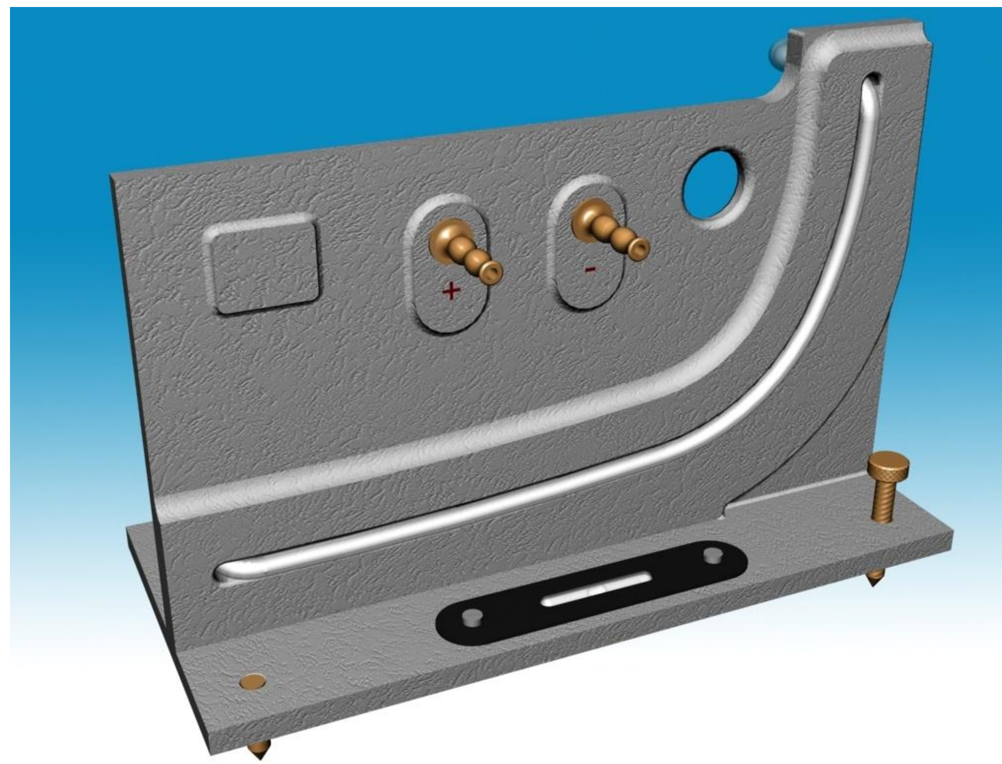


Döntési szög függő - $f(\alpha)$ - változó relatív hiba jellemzi.

Δp mérés / görbecsöves mikromanométer

Állandó relatív hiba és nem lineáris skála jellemzi.





Δp mérés / EMB-001 digitális nyomásmérő

Mérés során használandó gombok listája

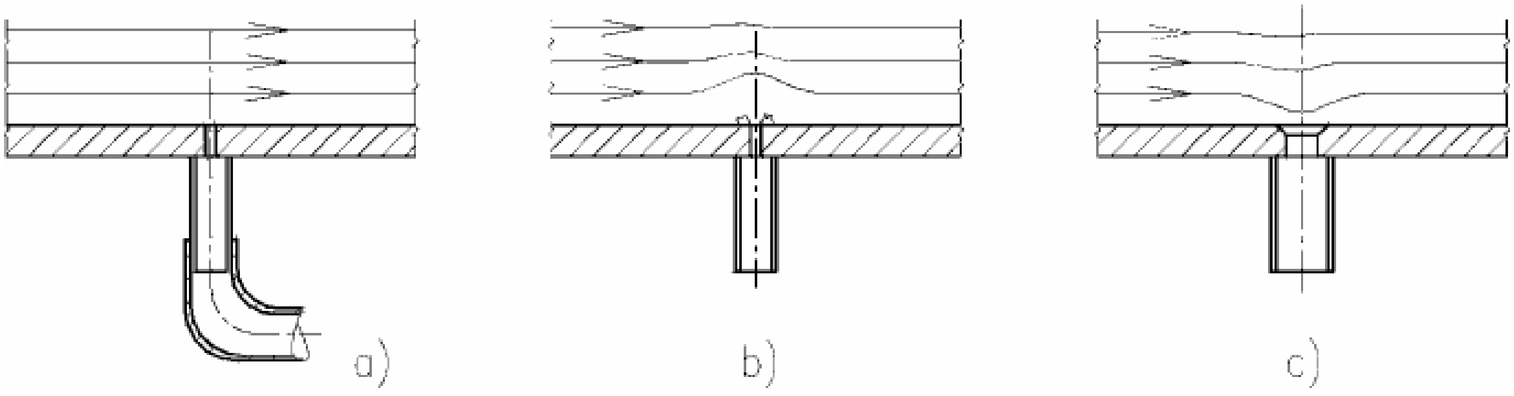
Be/kikapcsolása	Zöld gombbal
Gyári kalibráció visszaállítása	„0” majd a „STR Nr” (javasolt)
Mérési csatornák váltása	„CH I/II”
0 Pa beállítása	„0 Pa”
Átlagolási idő váltása (1/3/15s)	„Fast/Slow” (F/M/S)

A mérési tartomány: $\Delta p = \pm 1250 Pa$

A mérési hiba: $\delta\Delta p = 2 Pa$

Δp mérés / Mérőfurat kialakítás

Nyomásmérés esetén párhuzamos, egyenes áramvonalakra merőlegesen nem változik a nyomás (Euler egyenlet normál irányú komponense)



a) Helyes b) c) Hibás

Sebességmérés eszközei

- Pitot-cső
- Prandtl-cső

Sebességmérés / Pitot-cső

Pitot, Henri (1695-1771), francia mérnök.

A dinamikus nyomás meghatározása:

$$p_d = p_ö - p_{st}$$

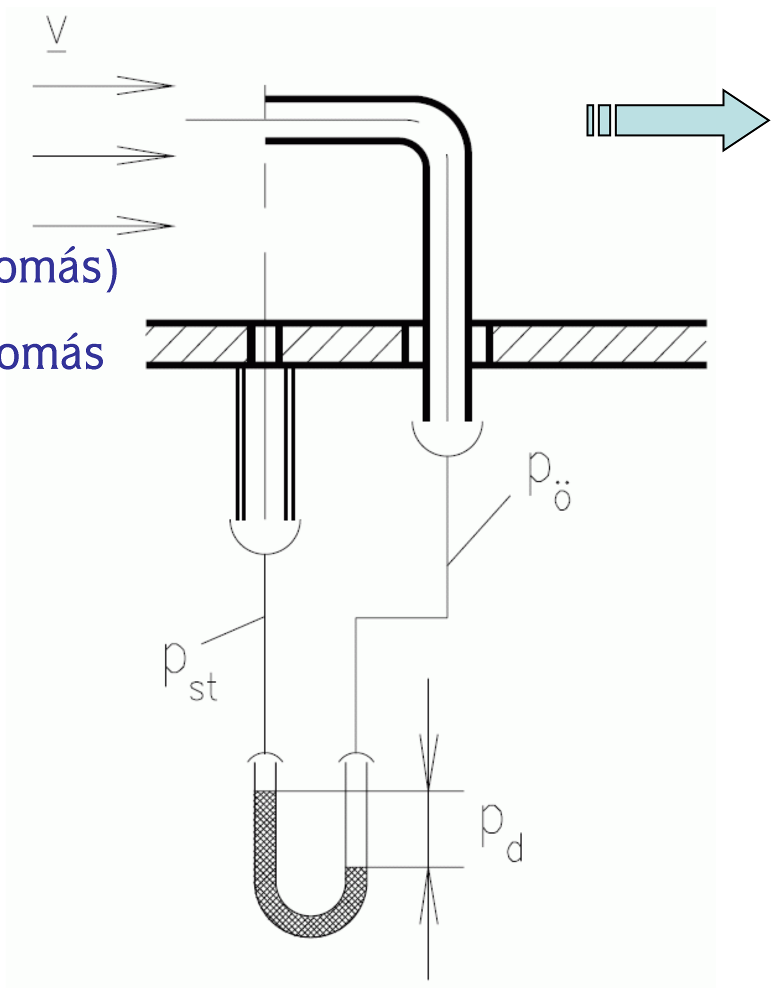
$p_ö$ a megállított közeg nyomása (össznyomás)

p_{st} áramlással párhuzamos falra ható nyomás (statikus nyomás)

$$p_d = \frac{\rho_{ny}}{2} \cdot v^2$$

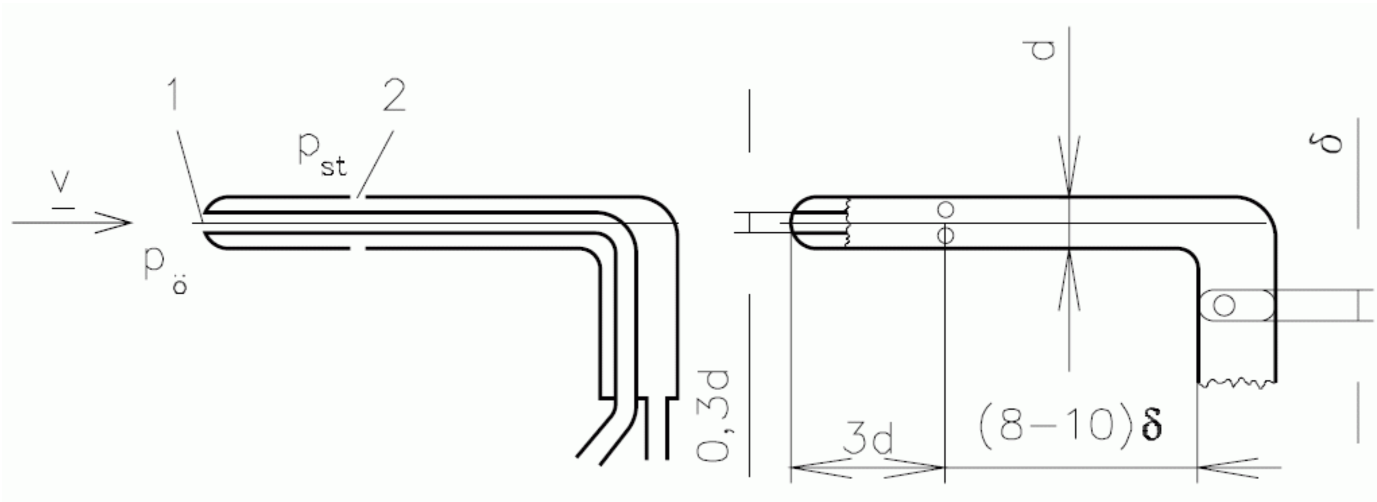
A sebesség meghatározása:

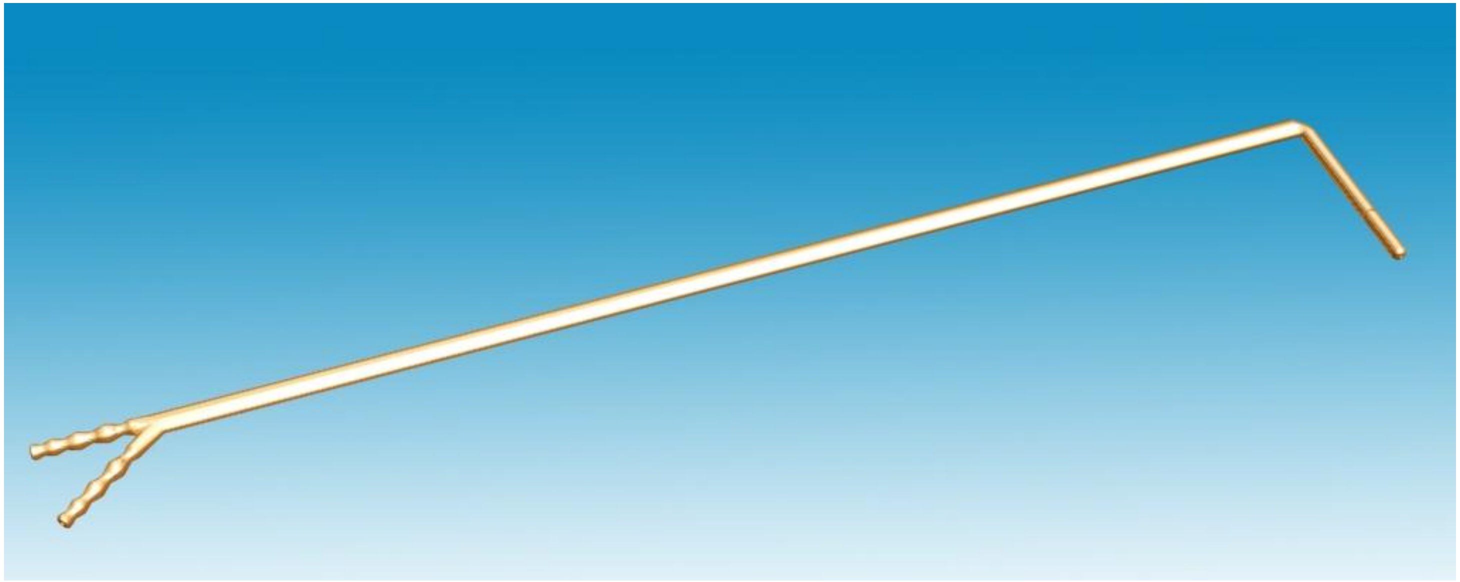
$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot p_d}$$



Sebességmérés / Prandtl -cső

Prandtl, Ludwig von (1875-1953), német áramlástan kutató.





Térfogatáram-mérés

- Térfogatáram definíció
- Pontonkénti sebességmérésen alapuló módszer
  - Nem kör keresztmetszetű vezetékek
  - Kör keresztmetszetű vezetékek
    - 10-pont módszer
    - 6-pont módszer
- Szűkítőelemes módszer
  - Venturi-cső (vízszintes/ferde tengely)
  - Átfolyó mérőperem (átfolyási szám, iteráció)
  - Beszívó mérőperem
  - Beszívó tölcsér

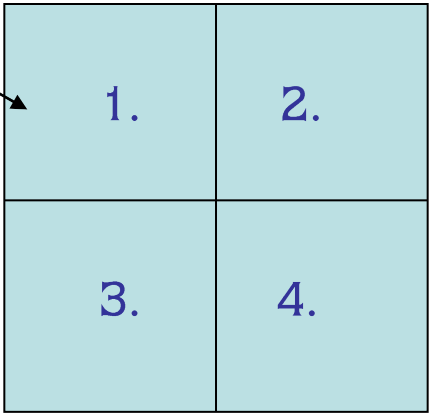
Több mért sebességből átlagsebesség számítás

Nagyon fontos, hogy: átlagok gyöke ≠ gyökök átlaga (!)

Pl. Ha több pontban mérjük a dinamikus nyomást, majd abból sebességet kívánunk számolni…

$$v_i = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_i}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_1}$$



$$\bar{v} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_1} + \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_2} + \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_3} + \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_4}}{4} \neq \cancel{\sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4}{4}}}$$

HELYES átlagolás

HELYTELEN átlagolás

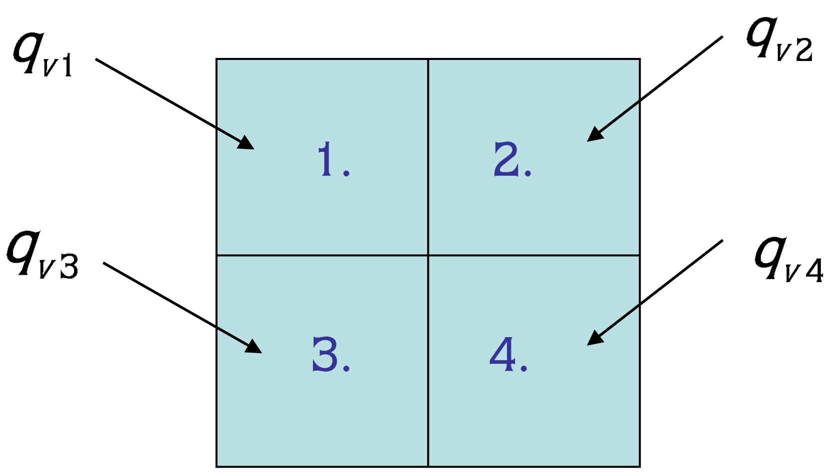
Térfogatáram-mérés / sebességmérésen alapuló
Nem kör keresztmetszetű vezeték

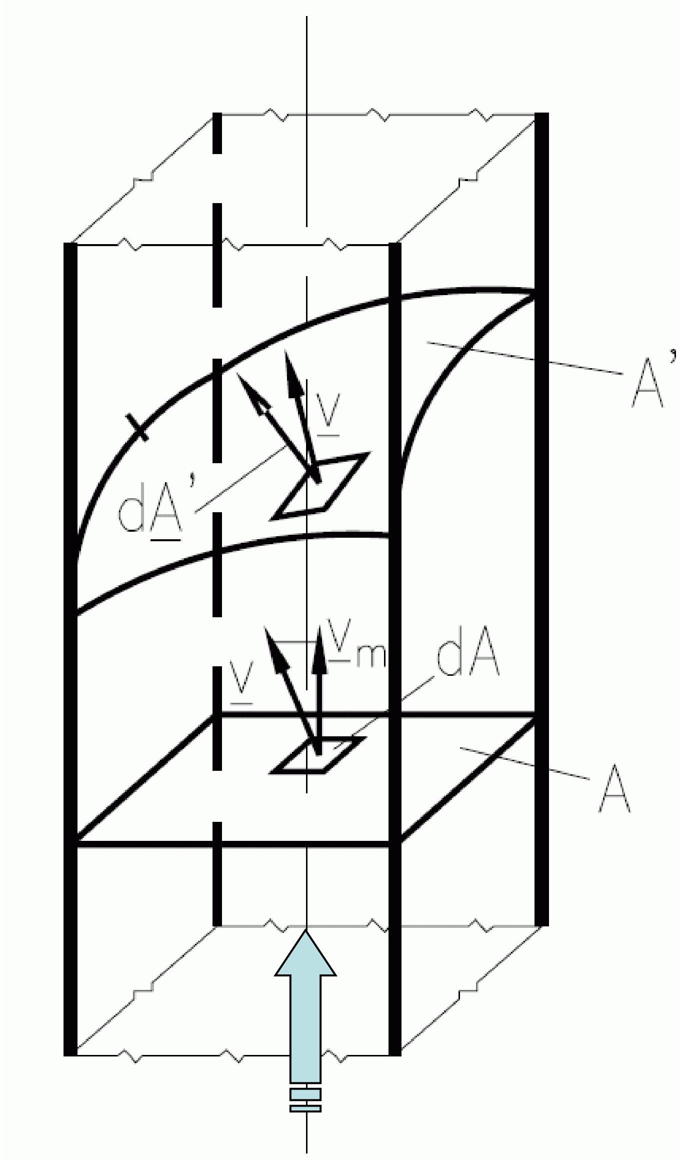
$$q_v = \int_A \underline{v} \cdot \underline{dA} \approx \sum_{i=1}^{n} v_{m,i} \cdot \Delta A_i$$

Feltéve, hogy:

$$\Delta A_1 = \Delta A_2 = \Delta A_i = \frac{A}{n}$$

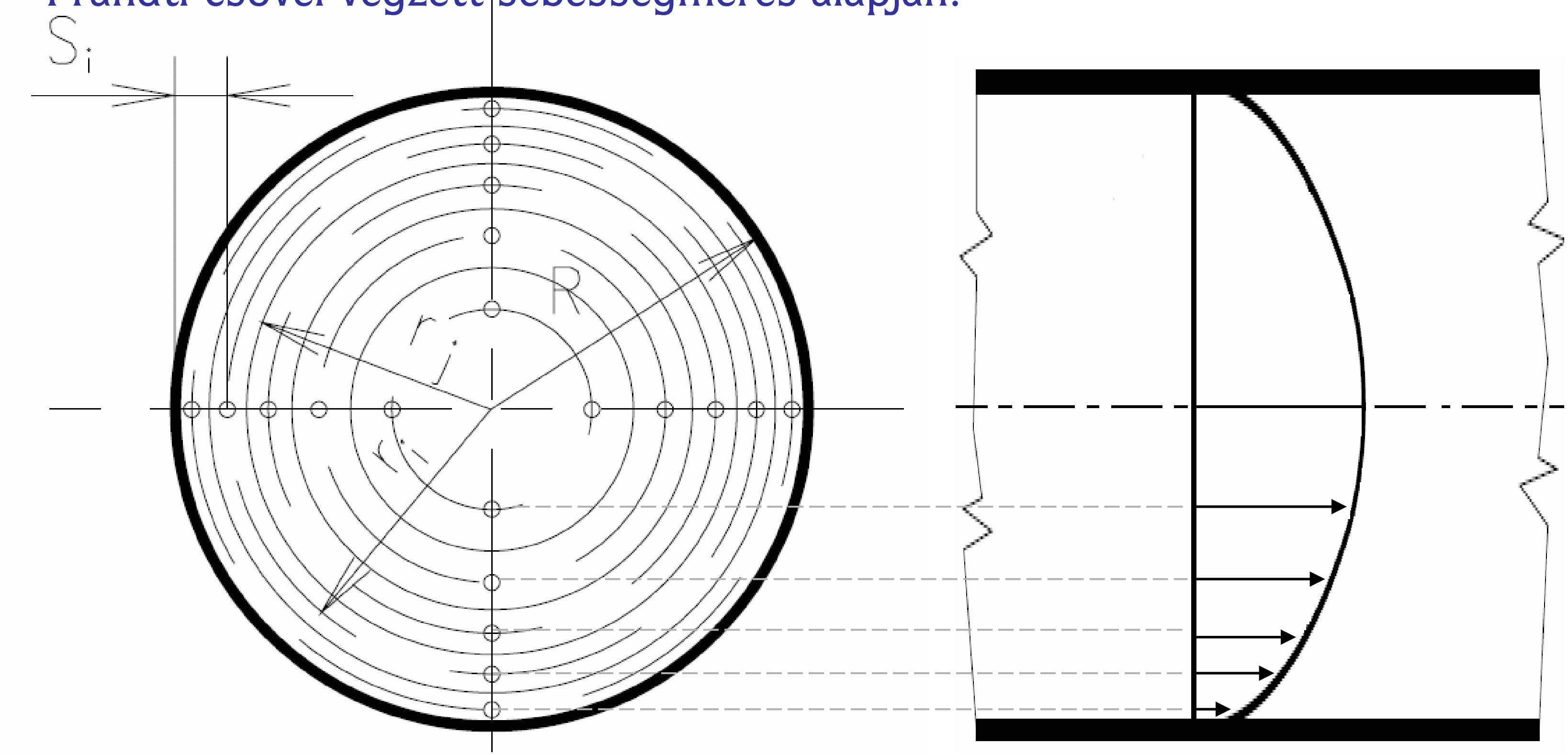
$$q_v = \Delta A_i \cdot \sum_{i=1}^{n} v_{m,i} = \frac{A}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} v_{m,i} = A \cdot \bar{v}$$





Térfogatáram-mérés / sebességmérésen alapuló I.
Kör keresztmetszetű vezeték, 10pont (6pont) módszer

- A sebességprofil feltételezetten másodfokú parabola.
- Állandó üzemállapot
- Prandtl-csővel végzett sebességmérés alapján.



Szabványos eljárás, a mérésipontokat a szabvány (**MSZ 21853/2**) megadja:

S_i/D= 0.026, 0.082, 0.146, 0.226, 0.342, 0.658, 0.774, 0.854, 0.918, 0.974

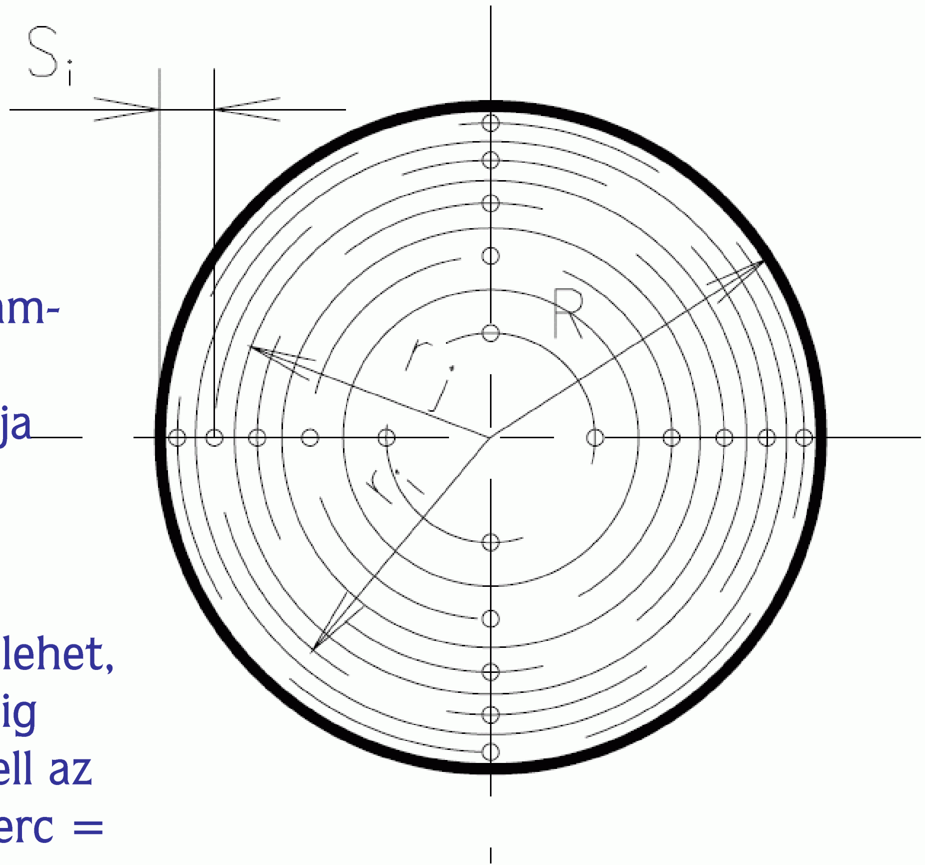
Térfogatáram-mérés / sebességmérésen alapuló II.

Kör keresztmetszetű vezeték, 10pont (6pont) módszer

$$q_v = A \cdot \frac{v_1 + v_2 + \ldots + v_{10}}{10}$$

Mivel a keresztmetszetekre igaz, hogy:

$$A_1 = A_2 = \ldots = A_{10}$$



A sebességmérésen alapuló térfogatáram-mérés **előnye** a szűkítőelemmel való méréssel szemben, hogy nem változtatja meg a mért berendezés üzemállapotát, illetve az, hogy a mérés egyszerű.

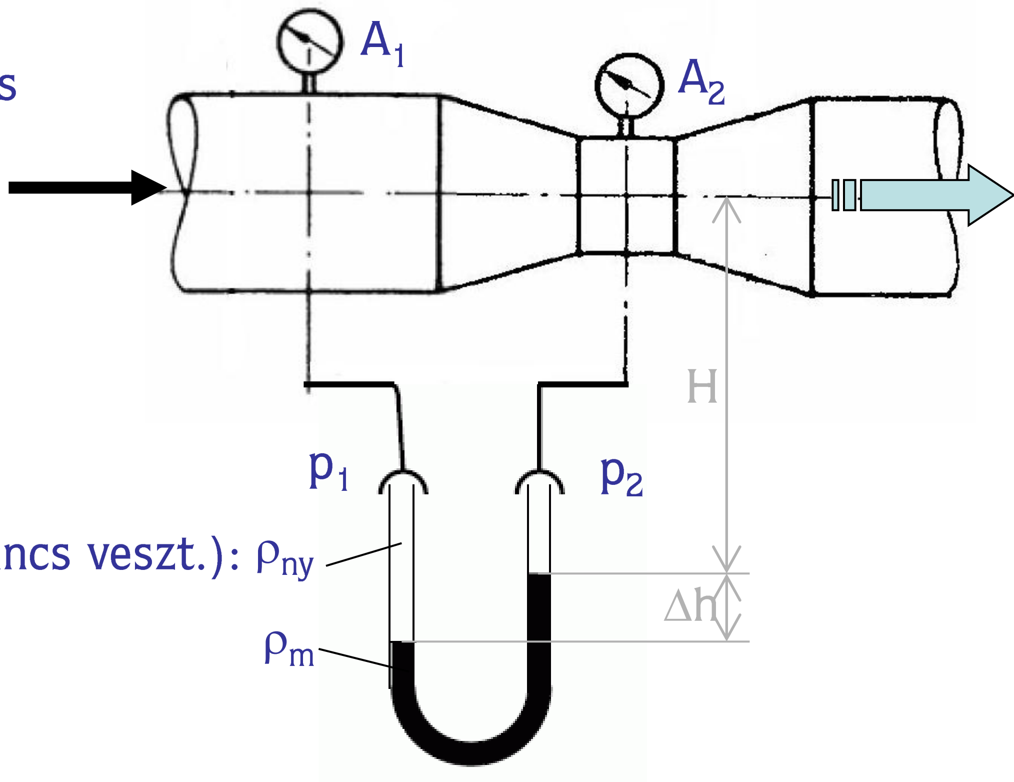
Hátránya, hogy a hiba viszonylag nagy lehet, a szűkítőelemeshez képest. Hosszú ideig tart egy mérés és az alatt biztosítani kell az állandó üzemállapotot. (10pont x 1,5perc = 15 perc)

Térfogatáram-mérés / szűkítőelemes módszer
Venturi-cső

Ha nem jelentős az összenyomódás (ρ=áll.):

$$q_v = v \cdot A = áll \qquad [q_v] = \frac{m^3}{s}$$

$$q_v = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$



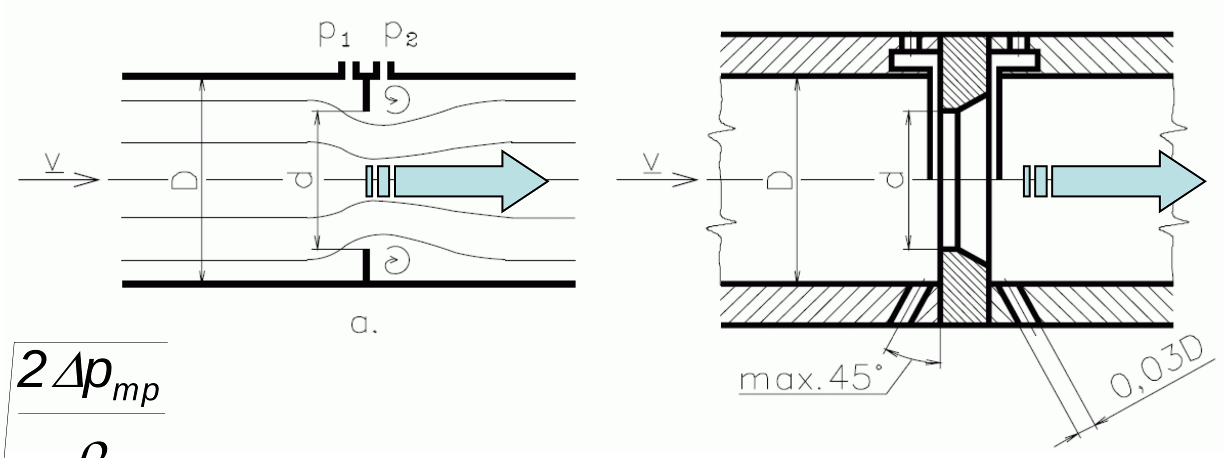
Bernoulli-egyenlet (ρ=áll., U=áll., nincs veszt.):

$$p_1 + v_1^2 \cdot \frac{\rho_{ny}}{2} = p_2 + v_2^2 \cdot \frac{\rho_{ny}}{2}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{(\rho_m - \rho_{ny}) \cdot g \cdot \Delta h}{\frac{\rho_{ny}}{2} \cdot \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1\right]}} = \sqrt{\frac{\Delta p}{\frac{\rho_{ny}}{2} \cdot \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1\right]}}$$

Térfogatáram-mérés / szűkítőelemes módszer
Átfolyó mérőperem

Szabványos szűkítés - nyomáskülönbség



$$q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d_{mp}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_{mp}}{\rho}}$$

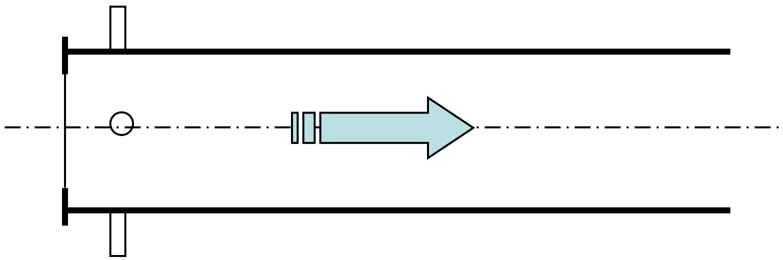
$\beta = d/D$ átmérőviszony,
D_{mp} [m] legszűkebb keresztmetszet átmérője
D [m] a szűkítést megelőző cső átmérője
$Re_D = vD/\nu$ a **Reynolds-szám** (alapképlet)
v [m/s] átlagsebesség a D átmérőjű csőben
ν [m²/s] kinematikai viszkozitás
p_1 [Pa] szűkítőelem előtt mért nyomás
p_2 [Pa] szűkítőelem utána mért nyomás
ε kompresszibilitási tényező ($\varepsilon=\varepsilon(\beta,\tau,\kappa)\sim 1$ a levegő esetén, a nyomásváltozás csekély)
α átfolyási szám, $\alpha=(\beta,Re_D)$ (szabványos kialakítás!)
$\kappa=c_p/c_v$ izentrópikus kitevő
$\tau=p_2/p_1$ nyomásviszony

Térfogatáram-mérés / szűkítőelemes módszer
Beszívó mérőperem (nem szabványos)

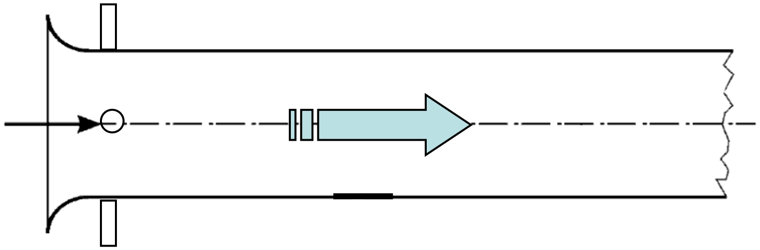
Nem szabványos szűkítés - nyomáskülönbség

$$q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d_{mp}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_{mp}}{\rho}}$$

$$\alpha = 0{,}6$$



$$q_v = k \cdot \frac{d_{besz}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_{besz}}{\rho}}$$



A mérési bizonytalanság meghatározása (hibaszámítás) I.
Sebességmérés bizonytalansága

Prandtl-csővel mért dinamikusnyomás:
$\Delta p_d = 486{,}2 Pa$

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_{lev}} \cdot \Delta p_d} \qquad \rho_{lev} = \frac{p_0}{R \cdot T}$$

A labor kondíciója:
$p = 1010 hPa$; $T = 22°C$ $(295K)$;
Levegő gázállandója
$R = 287$ J/kg/K

$$v = \sqrt{\frac{2}{p_0} \cdot \Delta p_d R T}$$

$$v = 28{,}45 \frac{m}{s} \qquad \rho_{lev} = 1{,}2 \frac{kg}{m^3}$$

$$v = f(T, p_0, \Delta p_d, állandók)$$

Hibával terhelt mennyiségek (X_i):
A légköri nyomás mérési hibája a leolvasási hibája $\delta p_0 = 100 Pa$
A labor hőmérsékletének mérési hibája, $\delta T = 1K$
A Prandtl-csöves nyomásmérés hibája (EMB-001) $\delta(\Delta p_i) = 2Pa$

A mérési bizonytalanság meghatározása (hibaszámítás) II.

Pl. a sebességmérés bizonytalansága

Általánosan abszolút hiba

$$\delta R = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\delta X_i \cdot \frac{\partial R}{\partial X_i}\right)^2} \quad \rightarrow \quad \delta v = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\delta X_i \cdot \frac{\partial v}{\partial X_i}\right)^2}$$

$$R = v$$

$$X_1 = T;\ X_2 = p_0;\ X_3 = \Delta p_d$$

$(\delta p,\ \delta T,\ \delta(\Delta p_d))$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial v}{\partial T} = \sqrt{2R} \cdot \boxed{\dfrac{1}{2} \cdot T^{-\frac{1}{2}}} \cdot \dfrac{1}{\sqrt{p_0}} \cdot \sqrt{\Delta p_d} = 0{,}00366\ \dfrac{m}{s \cdot K} \\ \dfrac{\partial v}{\partial p_0} = \sqrt{2R} \cdot \sqrt{T} \cdot \boxed{\dfrac{-1}{2} \cdot p_0^{-\frac{3}{2}}} \cdot \sqrt{\Delta p_d} = 1{,}4 \cdot 10^{-4}\ \dfrac{m}{s \cdot Pa} \\ \dfrac{\partial v}{\partial \Delta p_d} = \sqrt{2R} \cdot \sqrt{T} \cdot \dfrac{1}{\sqrt{p_0}} \cdot \boxed{\dfrac{1}{2} \cdot \Delta p_d^{-\frac{1}{2}}} = 0{,}029\ \dfrac{m}{s \cdot Pa} \end{cases}$$

A mérési bizonytalanság meghatározása (hibaszámítás) III.
Pl. a térfogatáram bizonytalansága

A sebességmérés abszolút hibája:

$$\delta v = \sqrt{\left(\delta T \cdot \sqrt{\frac{2R}{p_0}\Delta p_d} \cdot \frac{1}{2} \cdot T^{-\frac{1}{2}}\right)^2 + \left(\delta p_0 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot T \cdot \Delta p_d} \cdot \frac{-1}{2} \cdot p_0^{-\frac{3}{2}}\right)^2 + \left(\delta(\Delta p_d) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot T}{p_0}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \Delta p_d^{-\frac{1}{2}}\right)^2}$$

$$\delta v = 0{,}05977\ \frac{m}{s}$$

A sebességmérés relatív hibája:

$$\frac{\delta v}{v} = 0{,}0021 \cong 0{,}21\%$$

A sebességmérés számeredménye:

$$\boxed{v = 28{,}45 \pm 0{,}05977\ \frac{m}{s}}$$

A jegyzőkönyvben is így kell dokumentálni!

A honlapról letölthető anyagok

http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEAT3030/20xx-20xx-N/labor

http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATAG01/MAGYAR_kepzes/20xx-20xx-N/labor/

http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATAE01/20xx-20xx-N/labor

http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATAT01/20xx-20xx-N/labor