

Áramlástan Tanszék

www.ara.bme.hu

Mérés előkészítő óra II.



Benedek Tamás benedek@ara.bme.hu

Összeállította:

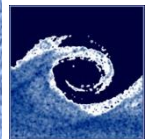
Nagy László nagy@ara.bme.hu

A mérési adminisztráció felelőse:

Dr. Istók Balázs istok@ara.bme.hu

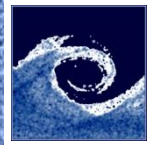
2015.
Ősz

Áramlástan Tanszék H-1111 Bertalan Lajos u. 4-6. „AE” épület



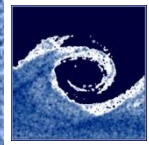
Mérések felelősei

M1	Füle Péter	<u>fule@ara.bme.hu</u>
M2	Dr. Kalmár-Nagy Tamás	<u>kalmarnagy@gmail.com</u>
M3	Dr. Istók Balázs	<u>istok@ara.bme.hu</u>
M4	Varga Árpád	<u>varga@ara.bme.hu</u>
M5 – M13	Tóth Bence	<u>tothbence@ara.bme.hu</u>
M7	Mikó Szandra	<u>miko@ara.bme.hu</u>
M8	Farkas Balázs	<u>farkas@ara.bme.hu</u>
M9	Tomor András	<u>tomor@ara.bme.hu</u>
M10	Nagy Márton	<u>nagymarton@ara.bme.hu</u>
M11	Nagy László	<u>nagy@ara.bme.hu</u>
M12	Benedek Tamás	<u>benedek@ara.bme.hu</u>



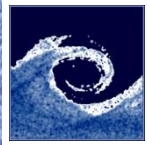
A mérés menete (összefoglaló)

- Sikeres mérés ZH írása
- A mérési segédlet és az egyéni mérési feladatok letöltése és alapos áttanulmányozása
- A kézzel írott mérési terv elkészítése
- Mérés (felkészülés, kézzel írott mérési terv, milliméter papír szükséges)
- A számításokhoz, diagramokhoz szükséges táblázat és a jegyzőkönyv elkészítése otthon
- A számítások ellenőrzése
- Jó számítások esetén a jegyzőkönyv és a táblázat feltöltése (határidő a mérést követő hét vasárnap éjfélig)
- A visszajelzés függvényében a jegyzőkönyv javítása
- Elfogadott jegyzőkönyv esetén prezentáció készítése
- A prezentáció feltöltése
- Prezentáció



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 (folyadékszint- különbségen alapuló)
 - **U-csöves** manométer
 - **Betz-rendszerű** manométer
 - **Ferdecsöves** mikromanométer
 - **Görbecsöves** mikromanométer
- Eszközei (piezoelektromos elven alapuló)
 - EMB-001 digitális kézi nyomásmérő műszer



Δp mérés / U-csöves manométer I.

- Csőáramlás
- Pillangószelep
- Körvezetéken átlagoljuk a nyomást

A manométer egyensúlyi egyenlete:
(hidrosztatika B és J pontok között)

$$p_B = p_J$$

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

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



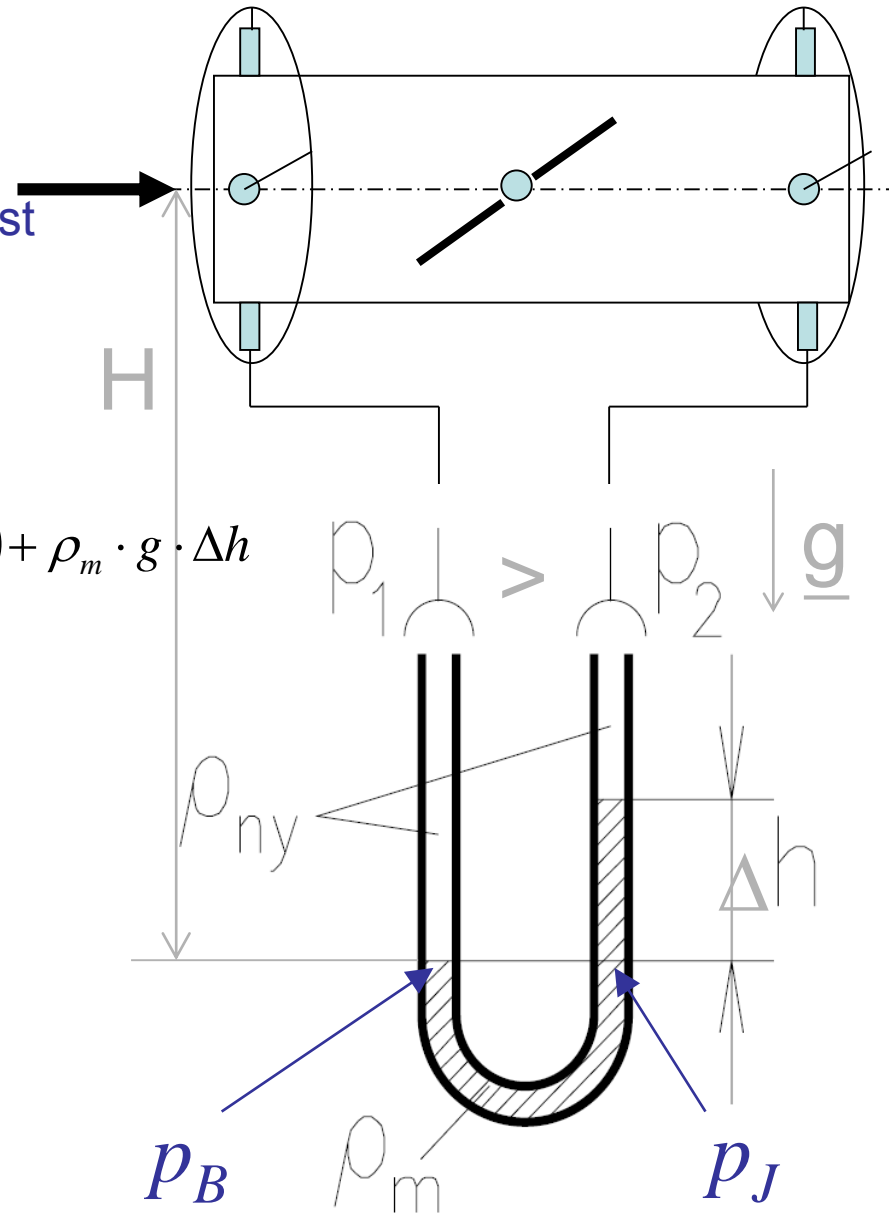
Egyszerűsíthető, ha

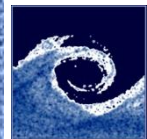
$$\rho_{ny} \ll \rho_m$$

(pl. levegő közeg – víz mérőfolyadék)

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

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





A nyomáskülönbség mérése / U-csöves manométer II.

A manométer egyensúlyi egyenlete

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

A mérőfolyadék sűrűsége ρ_m (irányszámok)

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

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

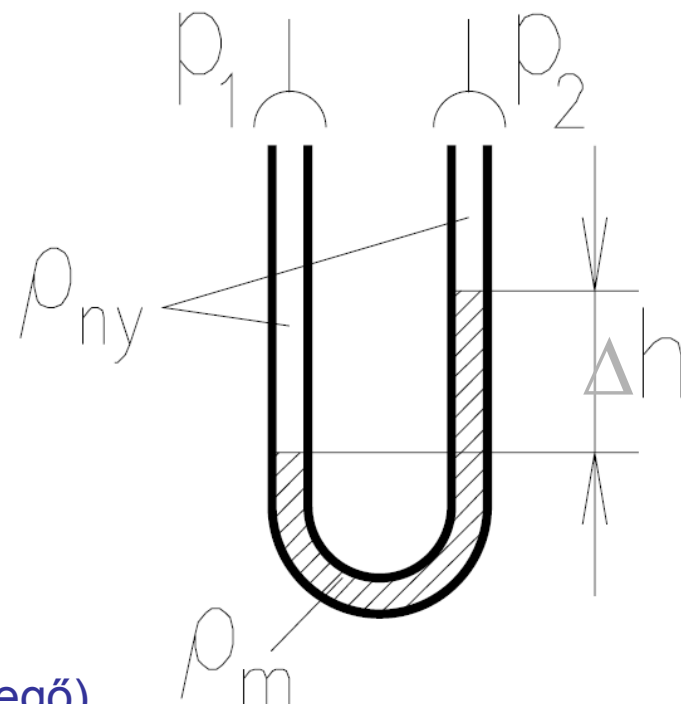
A nyomásközvetítő közeg sűrűsége: ρ_{ny} (pl. levegő)

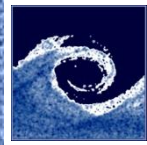
$$\rho_{\text{levegő}} = \frac{p_0}{R \cdot T} = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

p_0 - levegő nyomás, közel légköri nyomás [Pa] $\sim 10^5 \text{Pa}$

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

T - légköri hőmérséklet [K] $\sim 293 \text{K} = 20^\circ \text{C}$





Δp mérés / U-csöves manométer pontossága III.

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

A pontossága $\sim 1\text{mm}$: Az abszolút hibája:

$$\delta(\Delta h) = \pm 1\text{mm}$$

A helyes érték felírása az **abszolút** hibával(!)

$$\Delta h = 10\text{mm} \pm 1\text{mm}$$

A **relatív** hibája:

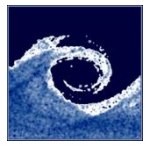
$$\frac{\delta(\Delta h)}{\Delta h} = \frac{1\text{mm}}{10\text{mm}} = 0,1 = 10\%$$

Hátrányai:

- Leolvasási hiba (kétszer olvassuk le)
- Pontossága $\sim 1\text{mm}$
- Kis nyomáskülönbségeknél nagy a relatív hiba

Előnye:

- Megbízható
- Nem igényel karbantartást

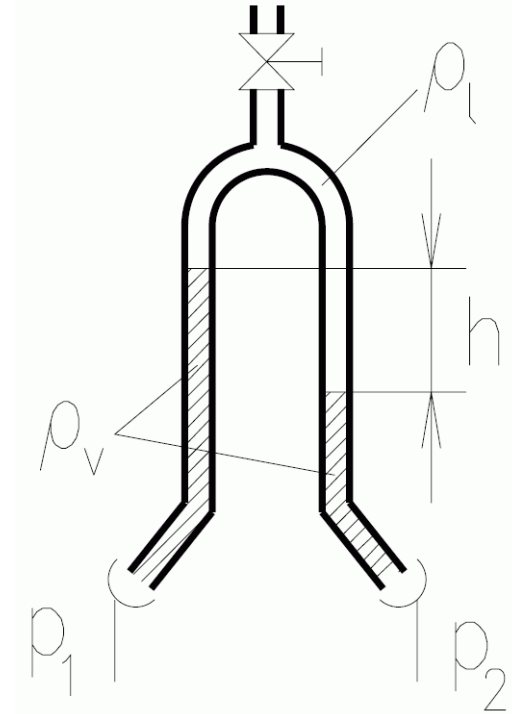


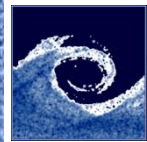
Δp mérés / fordított U-csöves manométer

A manométer egyensúlyi egyenlete

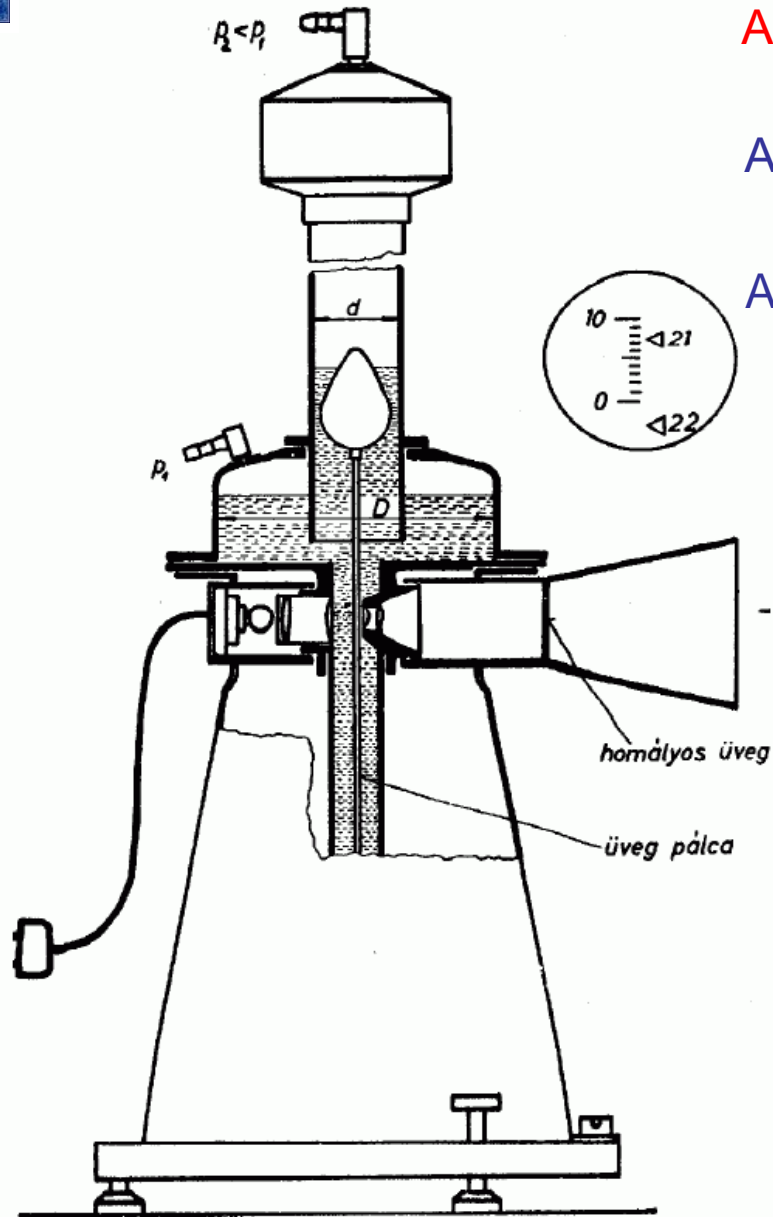
$$p_1 - p_2 = (\rho_v - \rho_l) \cdot g \cdot h$$

Mivel általában folyadékkal (pl. víz) töltött vezetékben 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

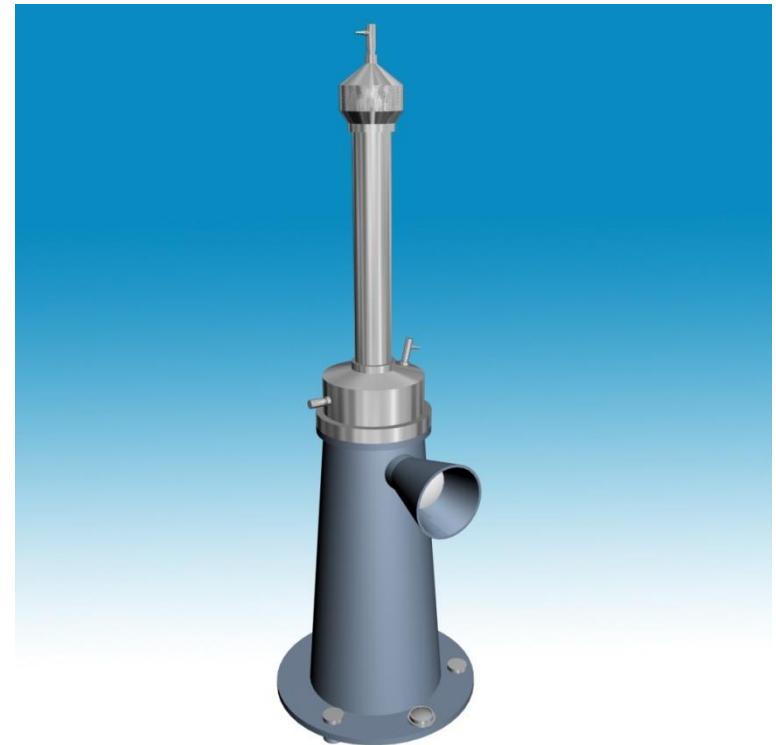


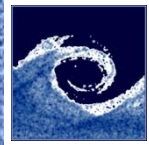
A relatív hiba csökkentése optikai eszközökkel, így a pontosság növelhető.

A pontossága $\sim 0,1\text{mm}$: Az abszolút hibája:

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

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





Δp mérés / ferdecsöves mikromanométer

A manométer egyensúly egyenlete

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

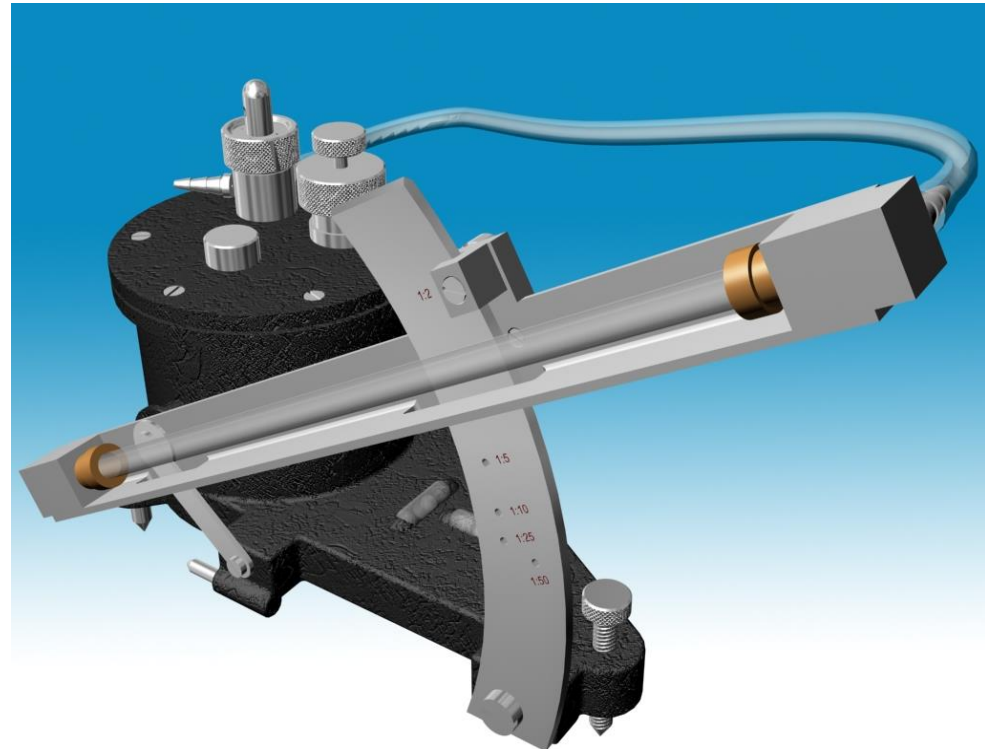
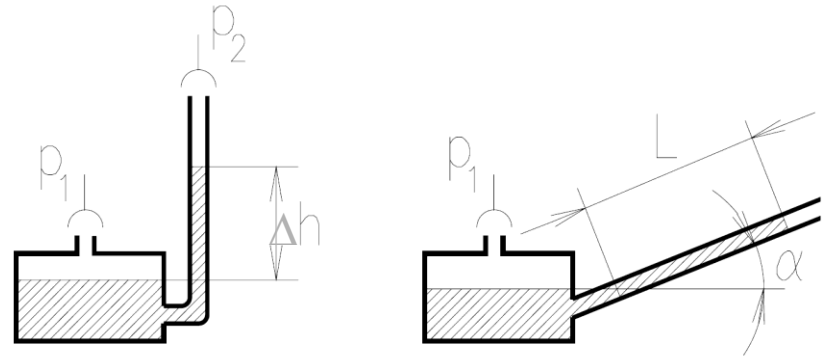
$$\Delta h = L \cdot \sin \alpha$$

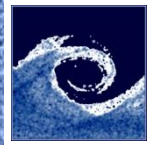
Pontosság: $\delta L \sim \pm 1 \text{ mm}$,

Relatív hiba $\alpha = 30^\circ$ esetén:

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

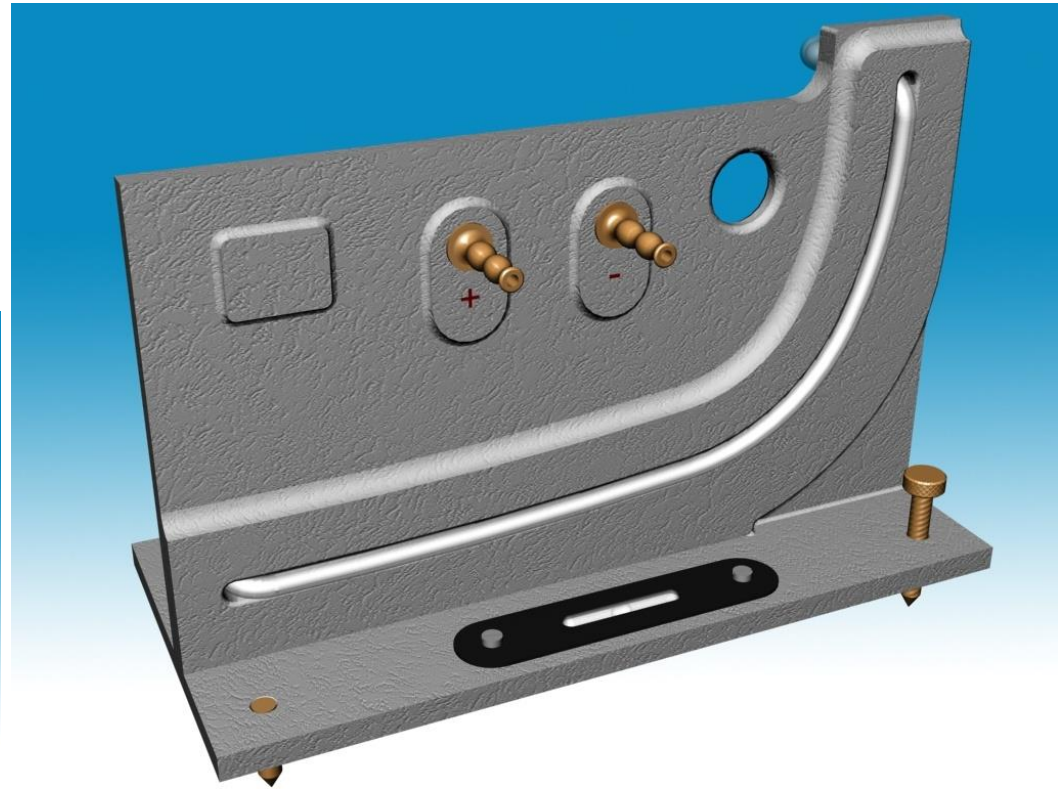
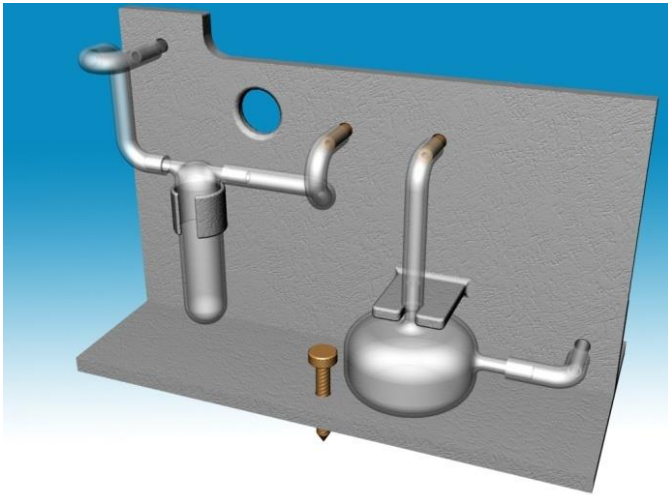
Döntési szög függő - $f(\alpha)$ -
változó relatív hiba jellemzi.

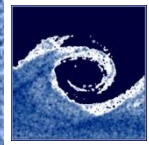




Δp mérés / görbecsöves mikromanométer

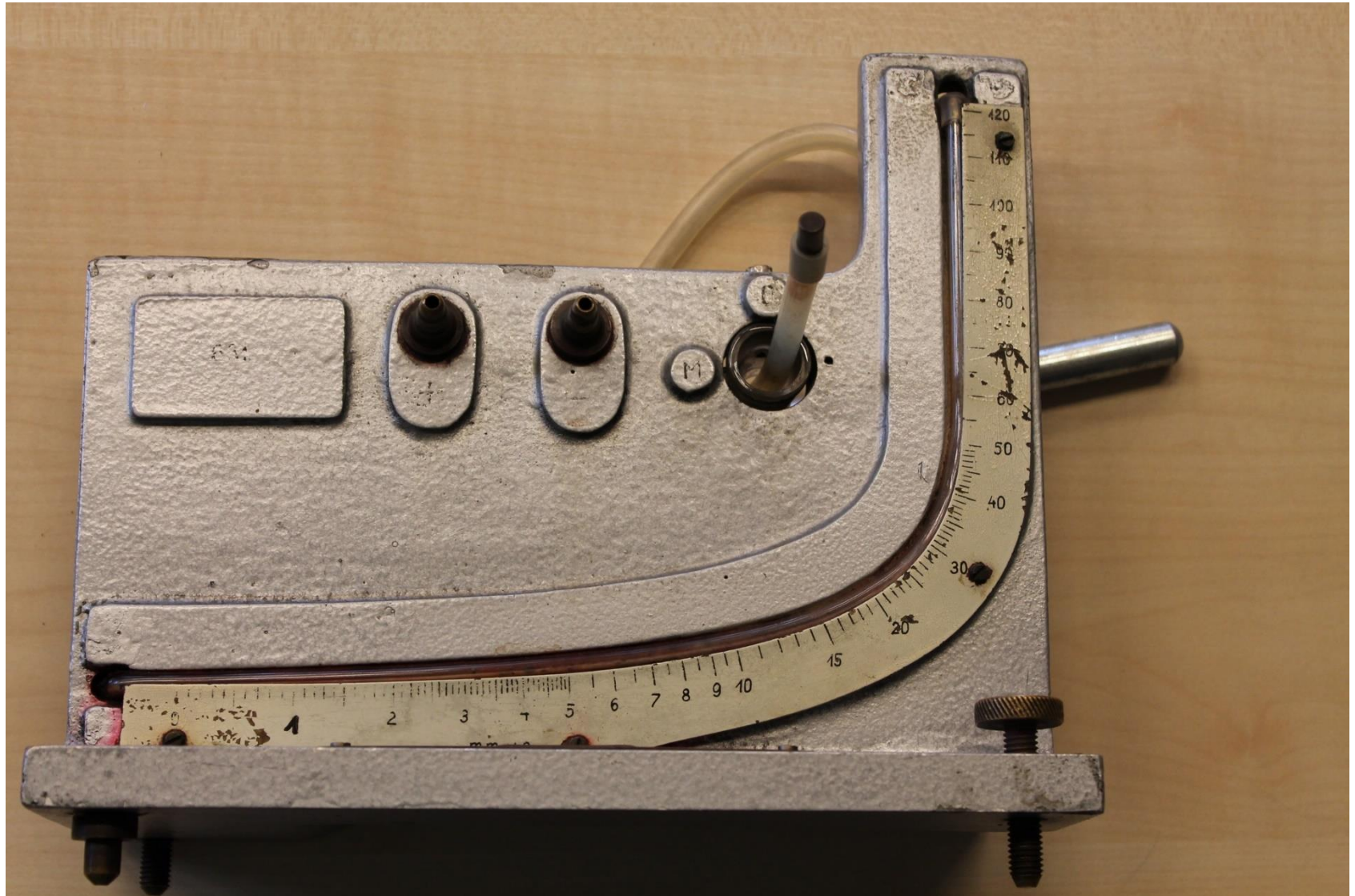
Állandó relatív hiba és
nem lineáris skála
jellemzi.

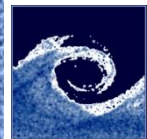




Δp mérés / görbecsöves mikromanométer

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”

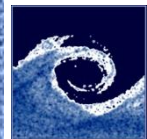
Átlagolási idő váltása (1/3/15s)

„Fast / Medium / Slow” (F / M / S)

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

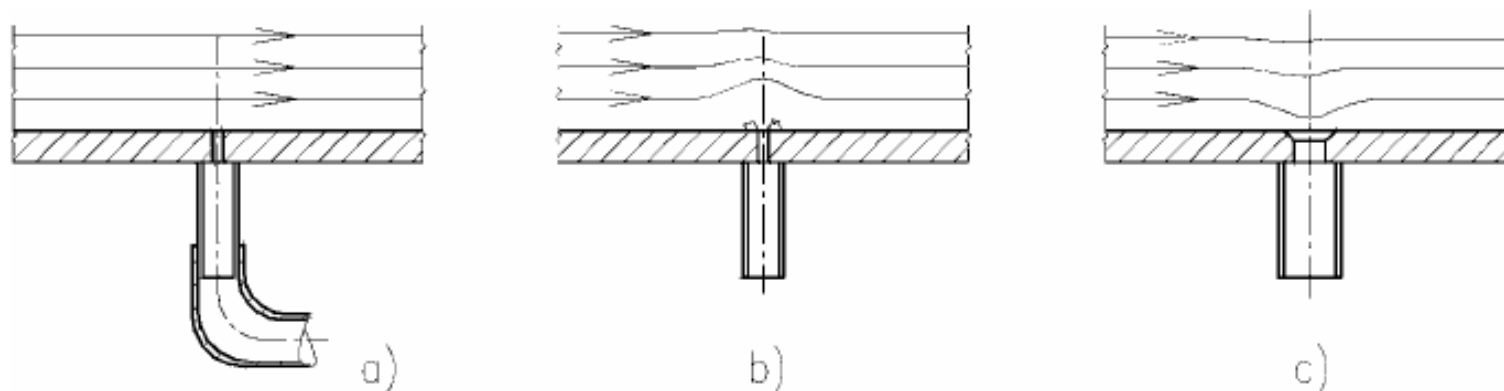
A mérési hiba: $\delta \Delta p = 2 Pa$



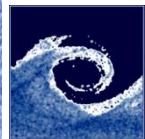


Δp mérés / Mérőfurat kialakítás

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



- a) Helyes
b). c) Hibás



Sebességmérés (nyomás alapon)

Eszközei:

- Pitot-cső
- Prandtl-cső

Elméleti háttér:

- veszteségmentes Bernoulli-egyenlet egyszerű alakja:

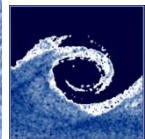
$$p_1 + \rho \cdot U_1 + \underbrace{\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2}_{p_{din,1}} = p_2 + \rho \cdot U_2 + \underbrace{\frac{\rho}{2} \cdot v_2^2}_{p_{din,2}}$$

- Ha $U_1=U_2$ és $v_2=0$:

$$\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 = p_2 - p_1$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p_1)}$$

$p_{din,1}$ és $p_{din,2}$ (az 1-es és 2-es pont beli dinamikus nyomások)



Sebességmérés / Pitot-cső

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

A dinamikus nyomás meghatározása:

$$p_d = p_{\ddot{o}} - p_{st}$$

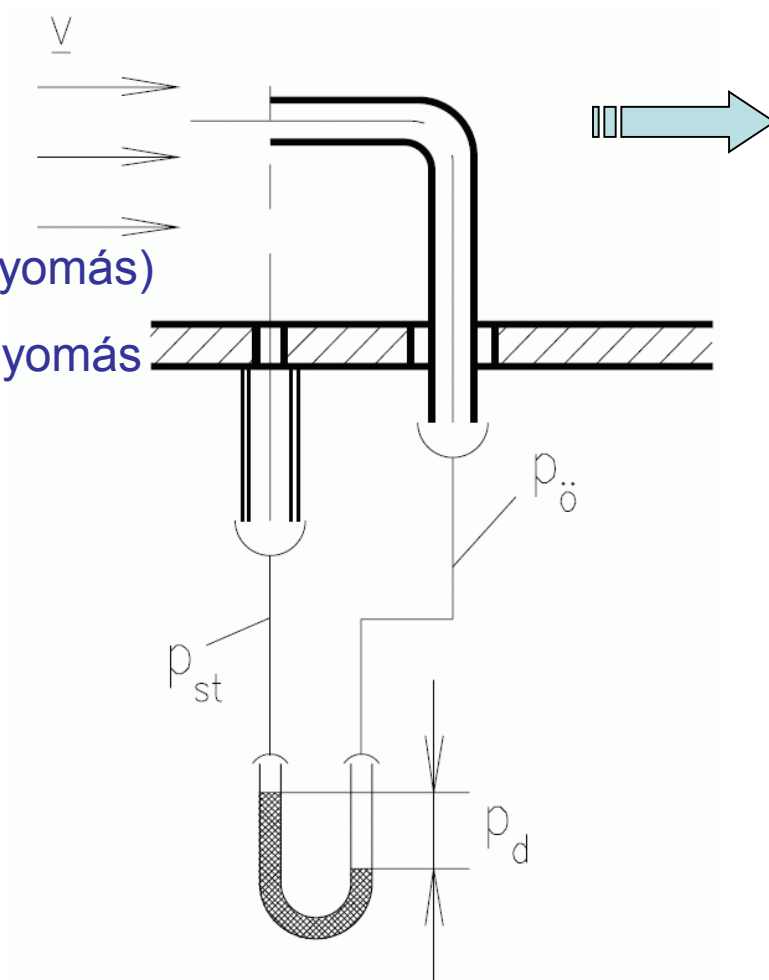
$p_{\ddot{o}}$ a megállított közeg nyomása (össznyomás)

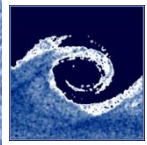
p_{st} áramlással párhuzamos falra ható nyomás (statikus nyomás)

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

A sebesség meghatározása:

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

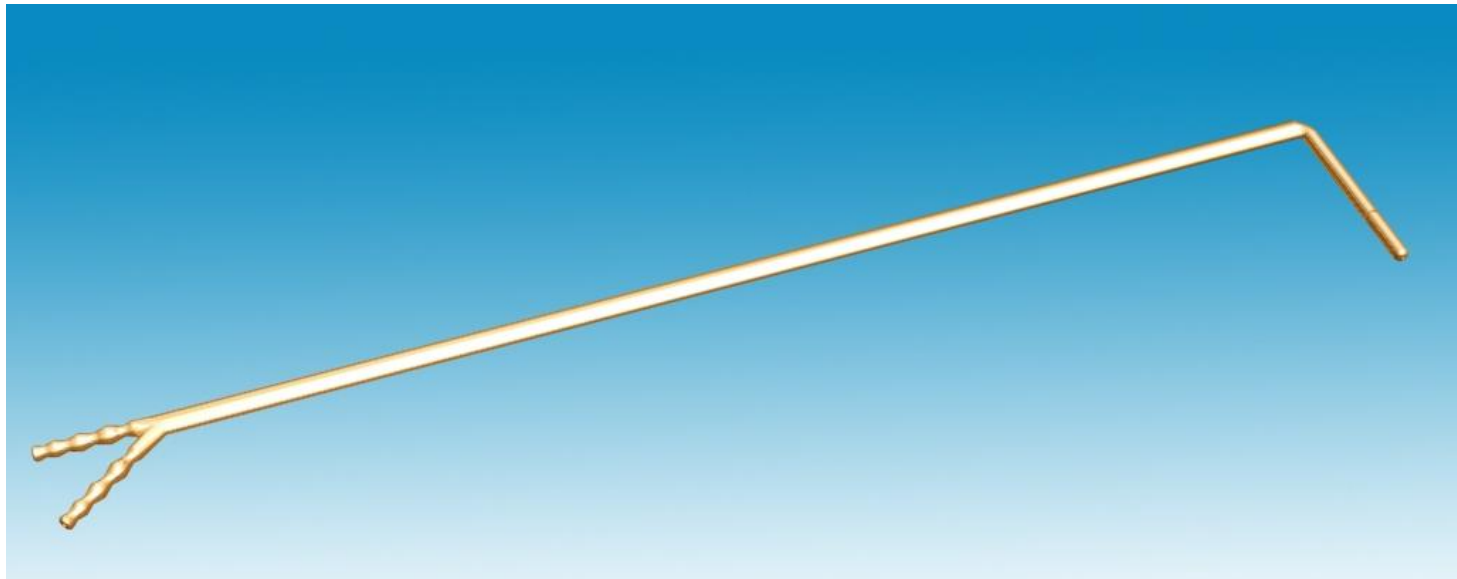
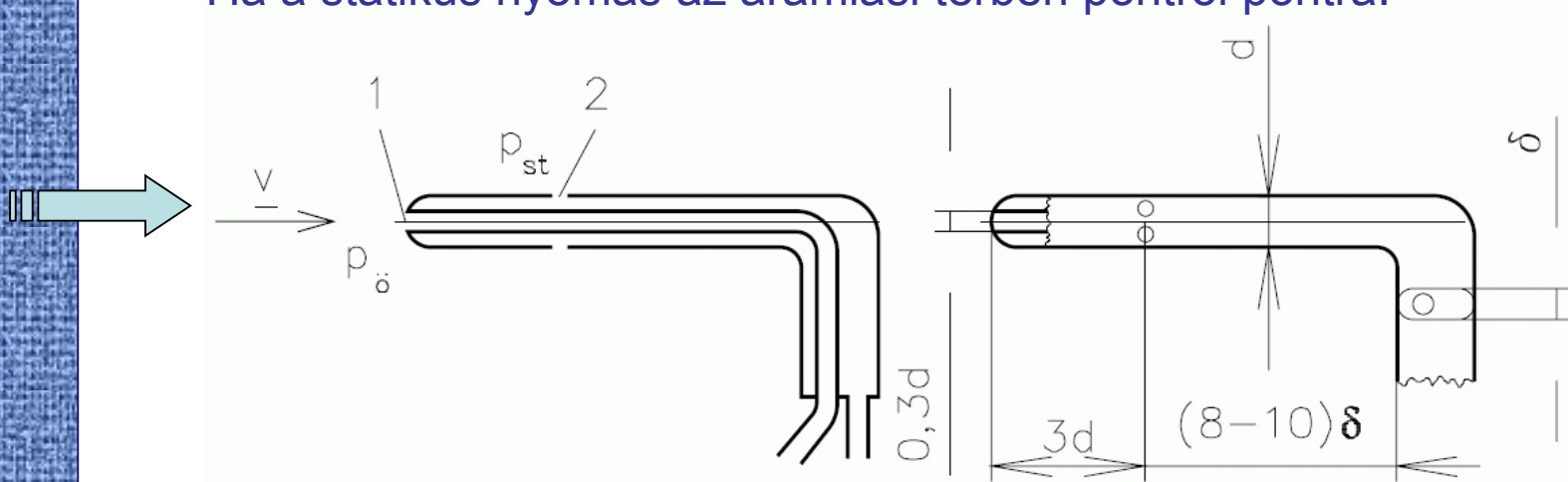


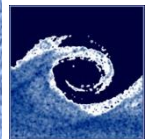


Sebességmérés / Prandtl -cső

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

Ha a statikus nyomás az áramlási térben pontról pontra.



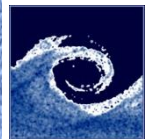


Térfogatáram-mérés

- Térfogatáram definíció:

Adott felületen egységnyi idő alatt kilépő térfogat. Mérése nagy gyakorlati fontossággal bír, mivel általában elszámolás, szabályzás alapját jelenti (pl.: vízdíj, üzemanyag, stb.)

- Jele: q_v , mértékegysége: *térfogat / időegység* (pl.: m^3/s)
- Pontonkénti sebességmérésen alapuló módszer
 - Nem kör keresztmetszetű vezeték
 - Kör keresztmetszetű vezeték
 - 10-pont módszer
 - 6-pont módszer
- Szűkítő elemes módszer
 - Venturi-cső (vízszintes/ferde tengely)
 - Átfolyó mérőperem (átfolyási szám, iteráció)
 - Beszívó mérőperem
 - Beszívó tölcser



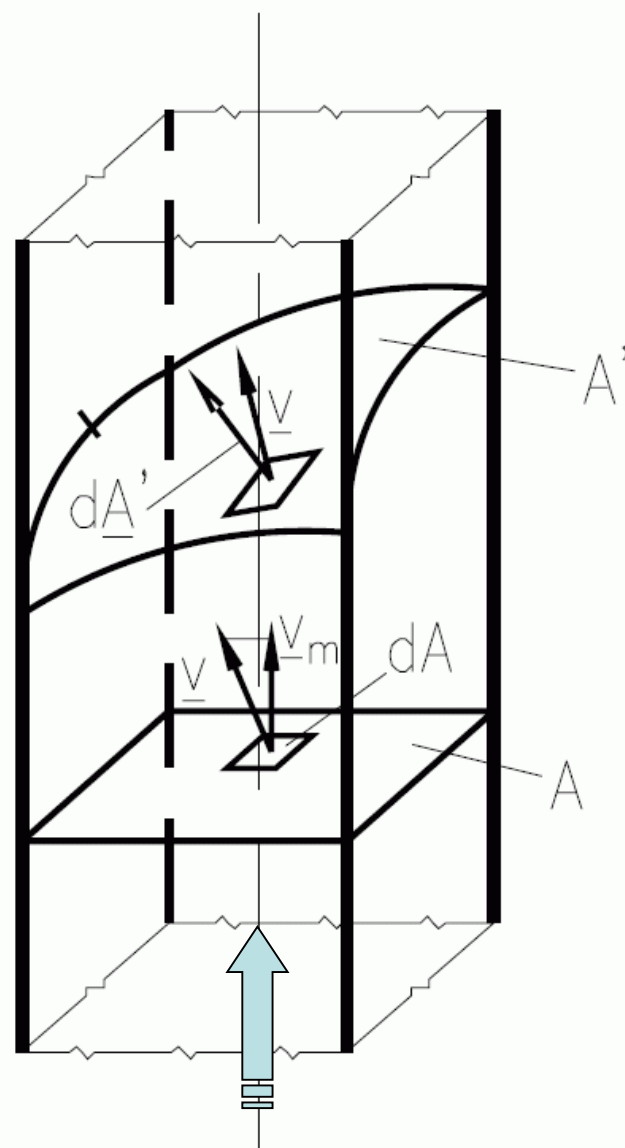
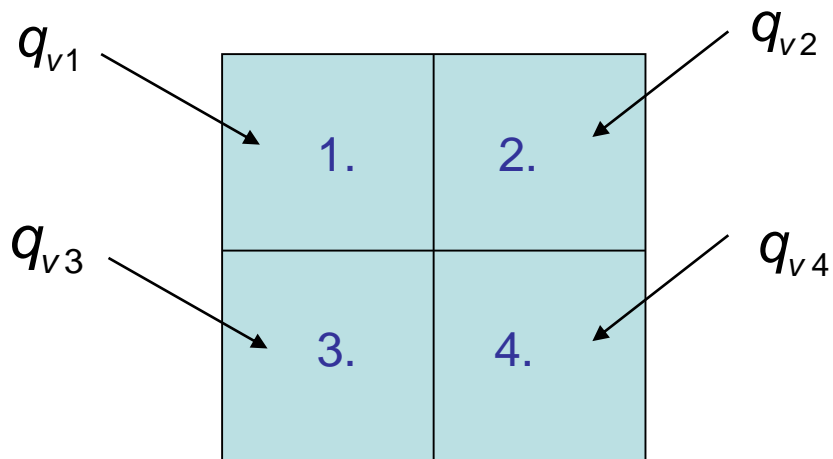
Térfogatáram-mérés / sebességmérésen alapuló Nem kör keresztmetzetű vezeték

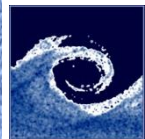
$$q_v = \int_A \underline{v} \cdot d\underline{A} \approx \sum_{i=1}^n v_{m,i} \cdot \Delta A_i$$

Feltéve, hogy:

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

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





Több mért sebességből átlagebesség számítás

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

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

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

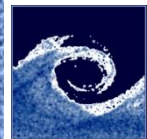
$$v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \Delta p_1}$$

1.	2.
3.	4.

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

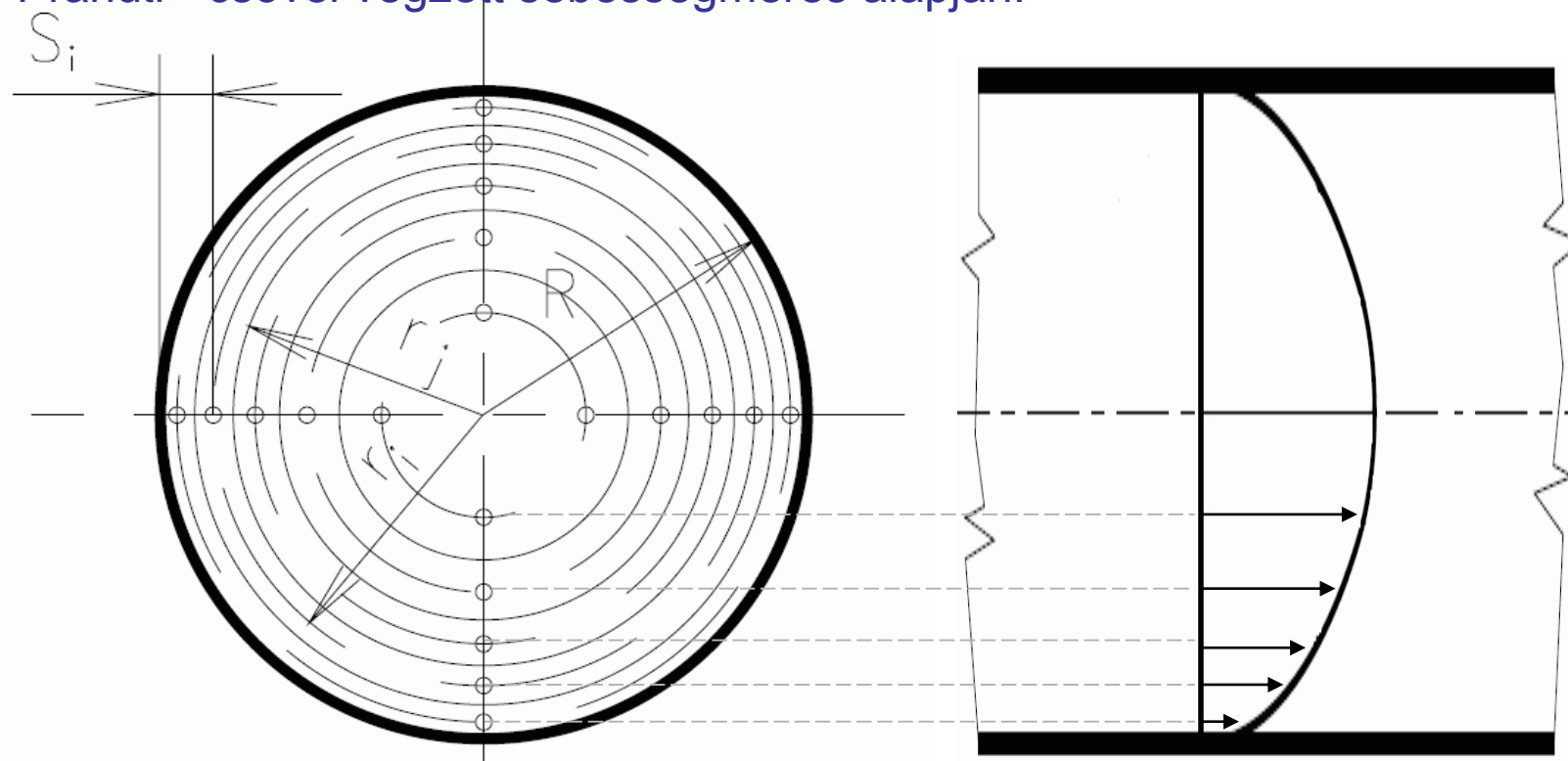
**HELYES
átlagolás**

**HELYTELEN
átlagolás**



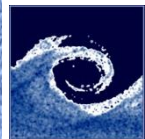
Térfogatáram-mérés / sebességmérésen alapuló I. **Kör keresztmetszetű vezeték, 10pont (6pont) módszer**

- A sebességprofil feltételezeten **n-ed fokú parabola**.
- Teltételezzük fel az állandó üzemállapotot.
- Prandtl - csővel végzett sebességmérés alapján.



Szabványos eljárás, a mérési pontokat 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**

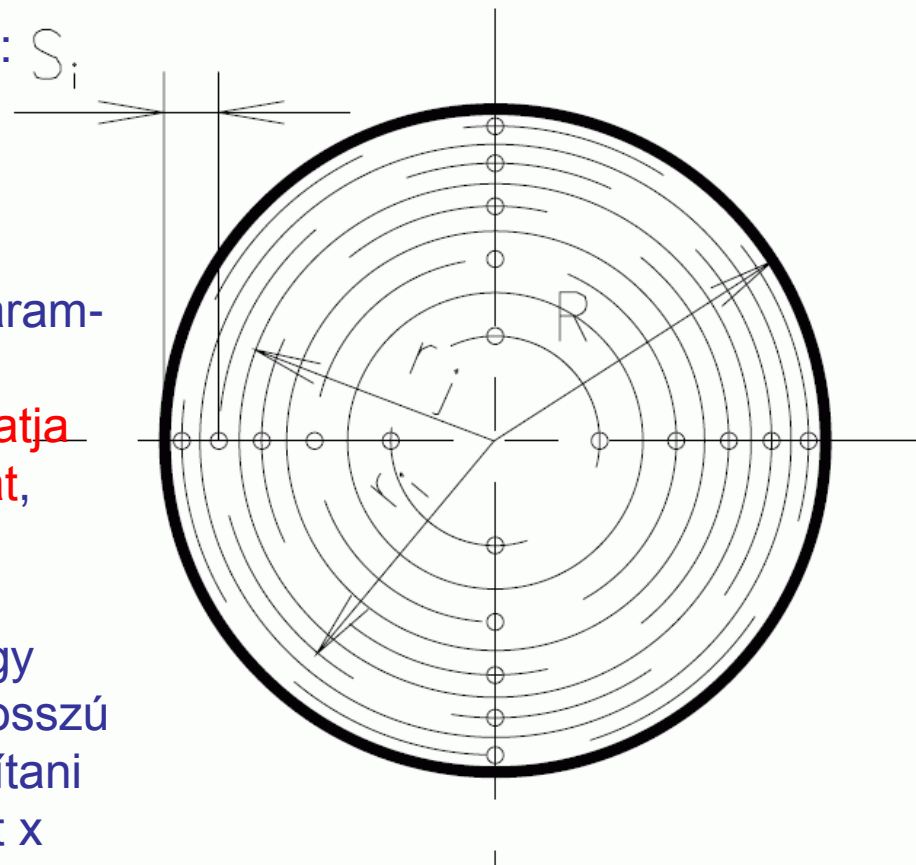
$$q_v = A \cdot \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_{10}}{10}$$

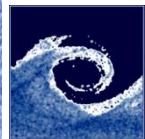
Mivel a keresztmetszetekre igaz, hogy: S_i

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

A sebességmérésen alapuló térfogatáram-mérés **előnye** a szűkítő elemmel 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 szűkítő elemeshez 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 ($\rho = \text{áll.}$), a kontinuitási egyenlet alapján:

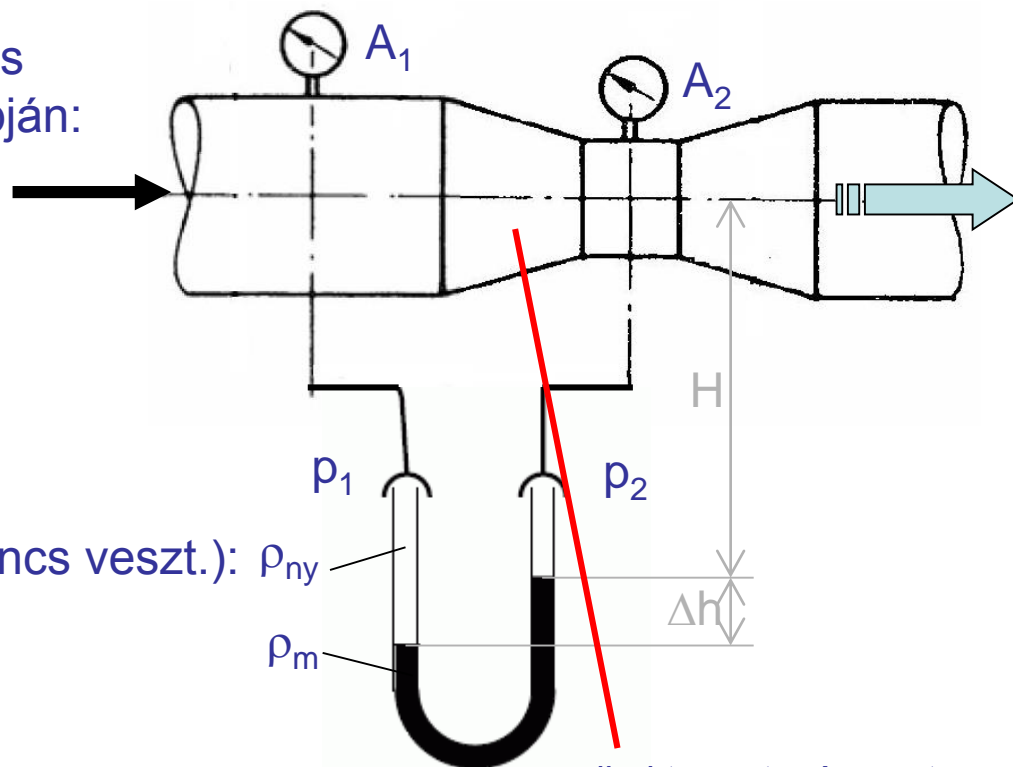
$$q_v = v \cdot A = \text{áll} \quad [q_v] = \frac{m^3}{s}$$

Kontinuitás:

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

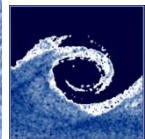
Bernoulli-egyenlet ($\rho = \text{áll.}$, $U = \text{áll.}$, nincs veszt.):

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



direkt veszteségmentes,
(leválás mentes), áramlás
kialakítására törekszünk

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

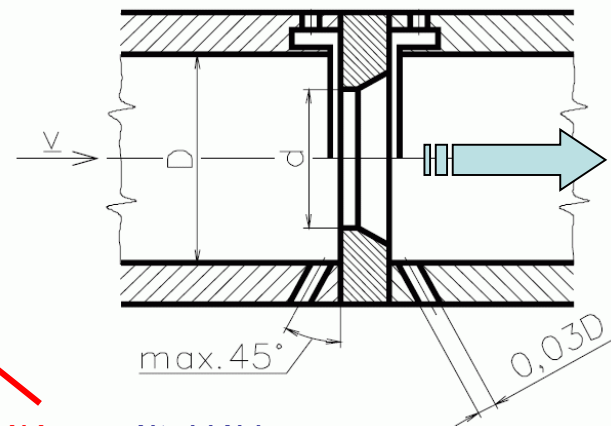
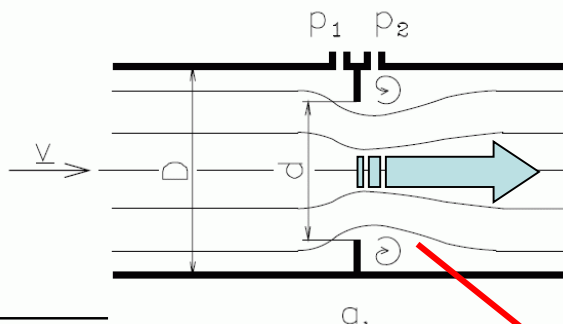


Térfogatáram-mérés / szűkítőelemes módszer

Átfolyó mérőperem

CFD eredmény

Szabványos szűkítés - nyomáskülönbség

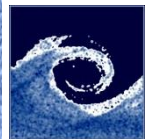


kontrollált leválás, ezáltal jól ismert nyomásveszteség kialakítására törekszünk

$$\Delta p_{mp} = p_1 - p_2$$

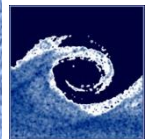
$$q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_{mp}}{\rho}}$$

- 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!)
- $\beta = d/D$ átmérőviszony,
- d [m] legszűkebb keresztmetszet átmérője
- D [m] a szűkítést megelőző cső átmérője
- $Re_D = vD/\nu$ a **Reynolds-szám** (alapképlet)
- v [m/s] sebesség
- ν [m²/s] kinematikai viszkozitás
- p_1 [Pa] szűkítő elem előtt mért nyomás
- p_2 [Pa] szűkítő elem utána mért nyomás
- $\kappa = c_p/c_v$ izentrópus kitevő
- $\tau = p_2/p_1$ nyomásviszony



A térfogatáram mérési elvek összehasonlítása

SZEMPONT	SZÚKÍTÓELEMES	SEBESSÉGMÉRÉSEN ALAP.
1/ Beavatkozás a rendszerbe	“ - ” Veszteségek \Rightarrow az üzemállapot módosulhat \Leftrightarrow eleve betervezni a rendszerbe	“ + ” Elhanyagolható (fali furatok)
2/ Időben változó üzemállapot követése	“ + ” Folyamatosan leköveti	“ - ” Nem követi (felületen összegez) (\Leftrightarrow korrekció..?)
3/ Előírások, követelmények	“ - ” Szigorúak (gyártás, beépítés, a rendszer leállítása...)	“ + ” Mérsékelt (nincsenek előírások, csak ajánlások; folyamatos rendszerüzem...)
4/ Költségek	“ - ” Magasak (gyártás, beépítés; üzemeltetés: a veszteségek fedezése)	“ + ” Mérsékelték
5/ Pontosság	“ + ” Fokozott (mérsékelt, szabványban szavatolt bizonytalanság) Jogilag <u>védhető!</u>	“ - ” Mérsékelt (a bizonytalanság mértéke nem szavatolt) Jogilag <u>támadható!</u>

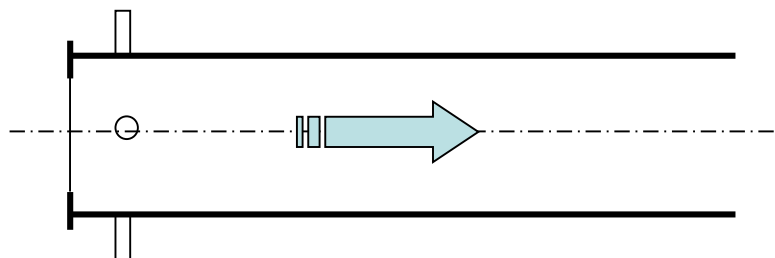


Térfogatáram-mérés / szűkítőelemes módszer Beszívó mérőperem/beszívó tölcsér (nem szabványos)

Beszívó - mérőperem

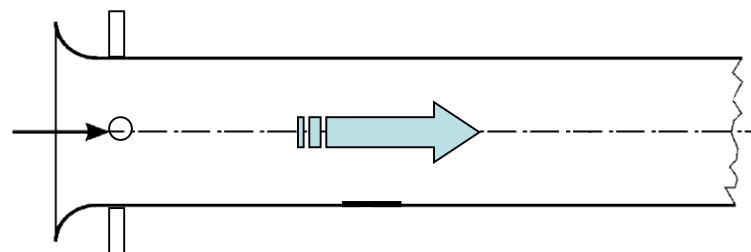
$$q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{mp}}{\rho}}$$

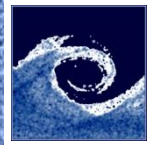
$$\alpha = 0,6$$



Beszívó - tölcsér

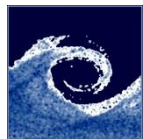
$$q_v = k \cdot \frac{d_{besz}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p_{besz}}{\rho}}$$





Info a mérés ZH-ról

- 4 feladat:
 - Mértékegységváltás
 - Elméleti kérdés
 - 2db számpélda
- 50%-tól elfogadott
- Minta ZH elérhető (lesz) a [honlapon](#)



Köszönöm a figyelmet!