

Áramlástan  
Tanszék



# MÉRÉSELŐKÉSZÍTŐ ÓRA II.

## Áramlásmérési módszerek, műszerek



Készítette:

Dr. Balczó Márton

Dr. Benedek Tamás

Dániel István

Dr. Istók Balázs

Nagy László

Dr. Sente Viktor



1. Nyomásmérés
2. Az áramlási sebesség mérése
3. Térfogatáram-mérés

# NYOMÁSMÉRÉS

- Több más áramlástanai mennyiség mérésének alapja:  $v, q_V, F$

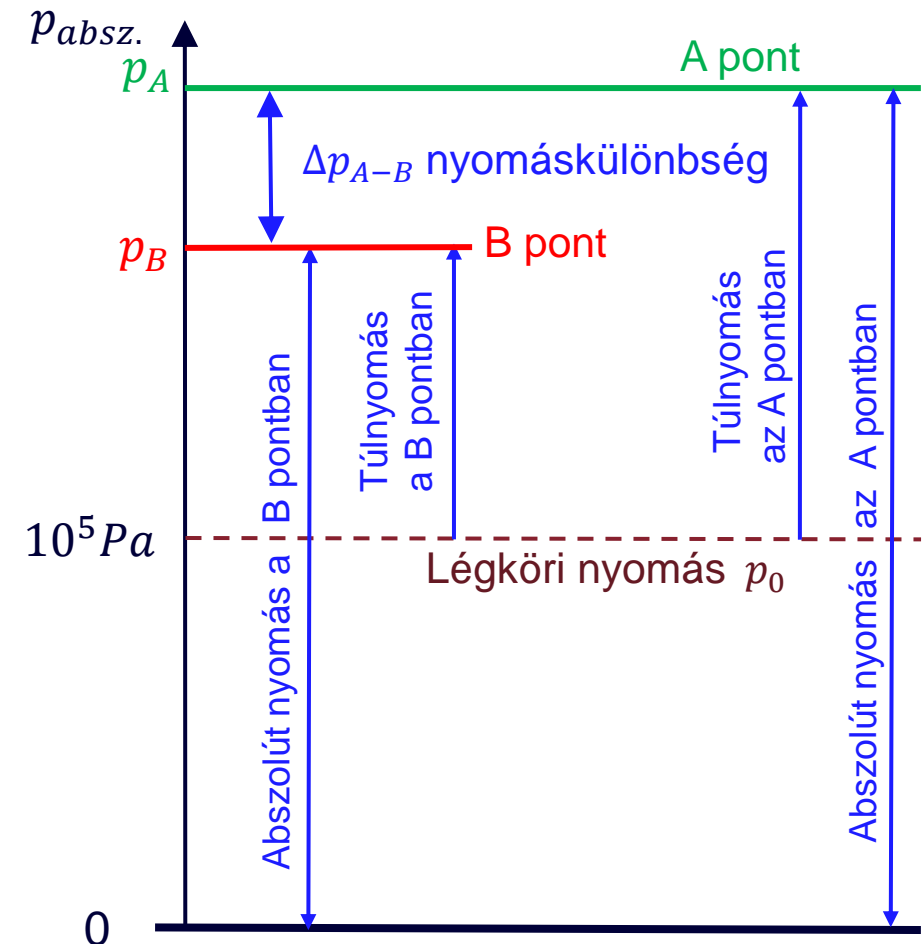
## Milyen nyomást mérünk?

- Abszolút nyomást: ritka (például: légköri nyomás mérése)
- nyomáskülönbséget: az áramlás két pontja között
- A túlnyomást: egy referenciaértékhez képesti nyomás (a referencia lehet: légköri nyomás, vagy egy rendszer statikus nyomása)

## A bemutatandó műszerek:

- U-csöves manométer és változatai  
mérési elv: folyadékszintek kitérése
- Digitális nyomásmérő  
mérési elv: membrán deformálódása

- U-csöves manométer
- Fordított U csöves manométer
- Betz-rendszerű manométer
- Ferdecsöves mikromanométer
- Görbecsöves mikromanométer





- Veszteségmentes áramlásra:

$$\left[ p_i + \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 + \rho \cdot U_i \right]_1^2 = 0$$

- Veszteséges áramlásra:

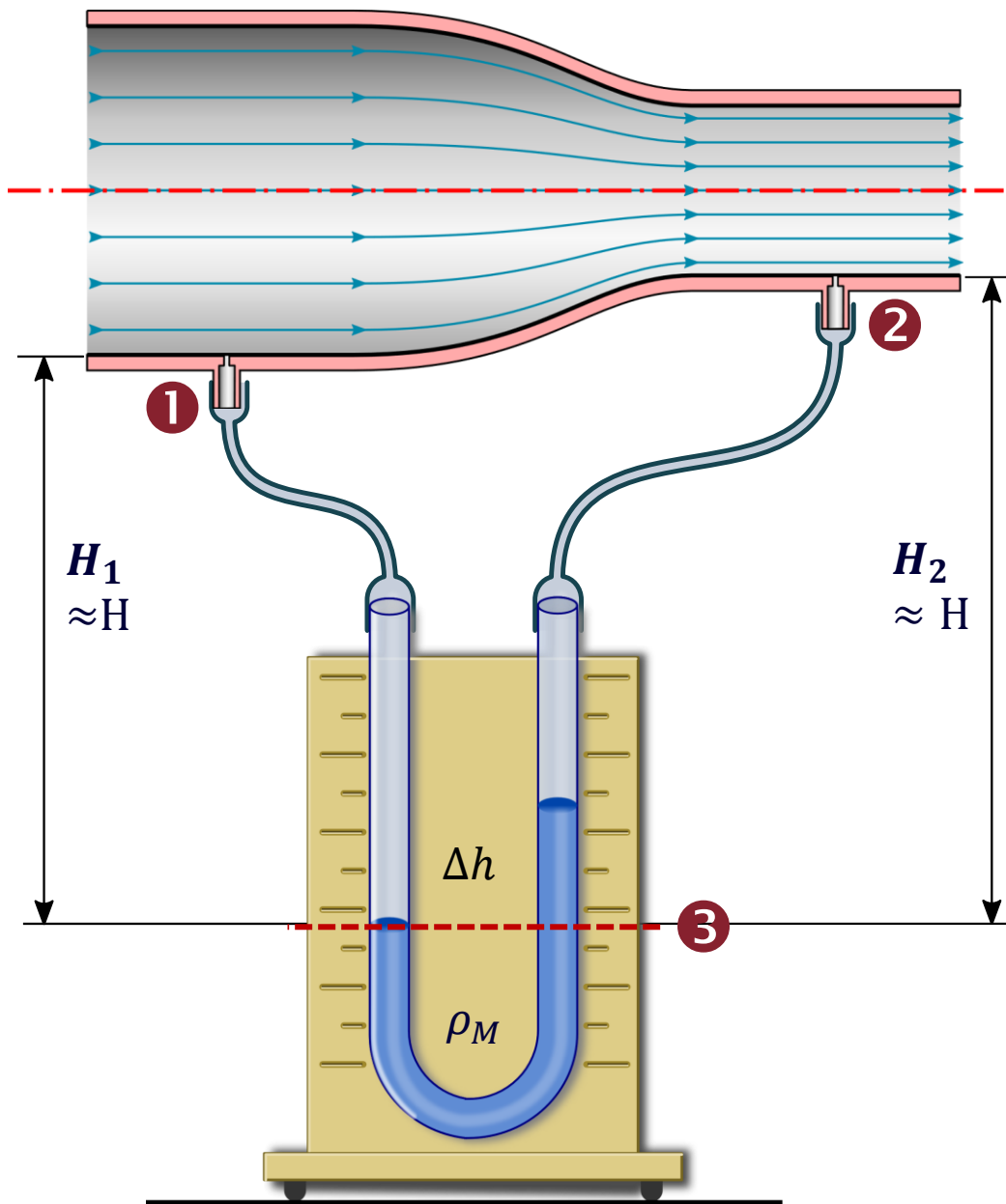
$$\left[ p_i + \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 + \rho \cdot U_i \right]_1^2 = \Delta p'$$

$p$  – statikus nyomás (az áramlással párhuzamos oldalfalon ható nyomás)

$\frac{\rho}{2} \cdot v^2$  – Dinamikus nyomás  
 $v$ -vel négyzetesen arányos

$p + \frac{\rho}{2} \cdot v^2$  – Össznyomás / torlónyomás  
(a megállított közeg nyomása)

$\rho \cdot U$  – Hidrosztatikai nyomás



A hidrosztatika alapengyenletéből (Feltétel:  $H_1 \approx H_2 = H$ ):

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

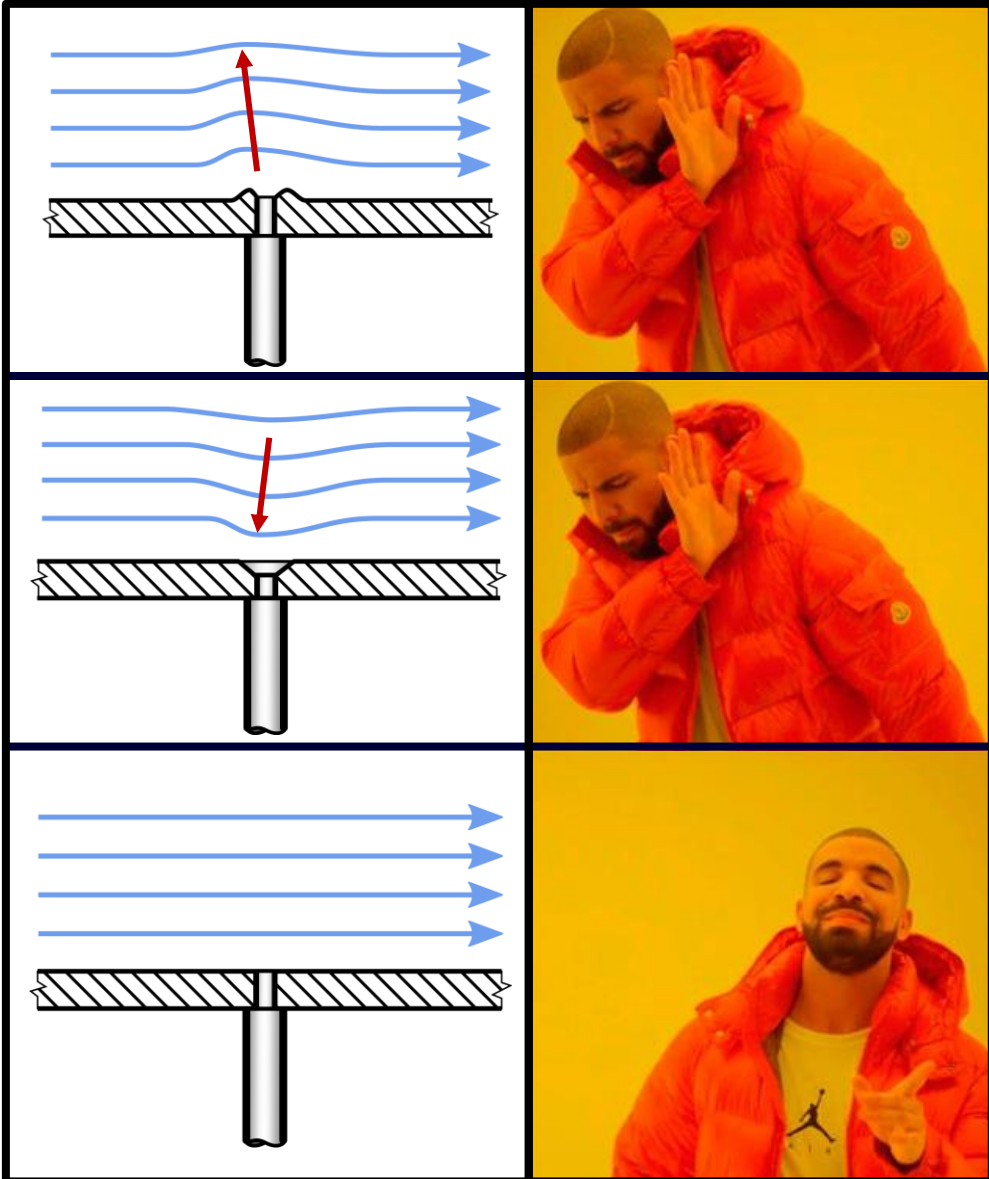
(ny: nyomásközvetítő folyadék , m: mérőfolyadék)

Az U csöves manométer egyenlete:

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

### Megállapítások

- $\Delta p = f(\Delta h)$
- $\Delta p \neq f(H)$
- Nem érvényes,  
ha  $H_1 \neq H_2$

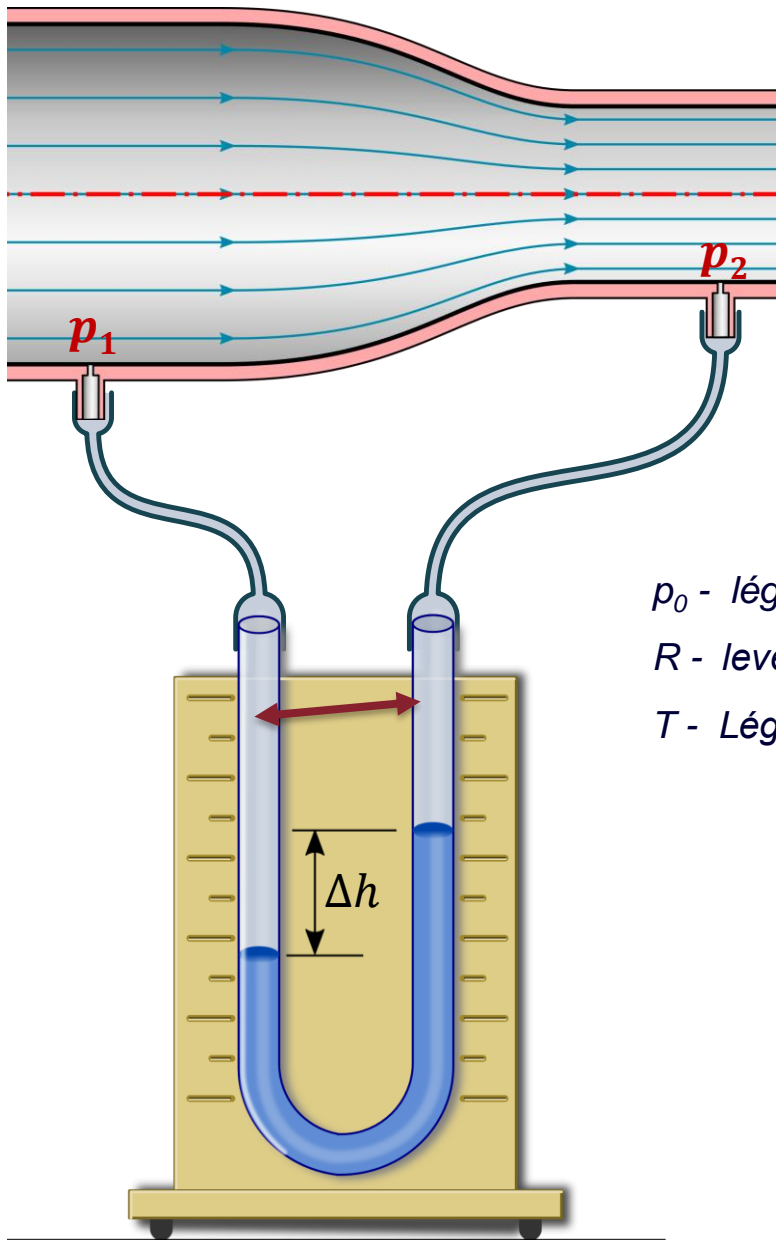


**Euler-egyenlet** itermészetes koordinátarendszerben, normál irány:

$$\frac{v^2}{R} = g_n - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = g_n - \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial p}{\partial n} \sim \frac{1}{R}$$

- Ha görbültek az áramvonalak: nyomásgradiens van normálirányban!
- Párhuzamos egyenes áramvonalak esetén:  $R = \infty$ 
  - ▶  $\partial p / \partial n$  csak  $\rho \underline{g}$  -től függ
  - ▶ ha  $\rho \underline{g}$  elhanyagolható, akkor párhuzamos, egyenes áramvonalakra merőlegesen nem változik a nyomás.



A manométer egyenlete:

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

Mérőfolyadék:  $\rho_{Hg} \approx 13600 \frac{kg}{m^3}$ ,  $\rho_{víz} \approx 1000 \frac{kg}{m^3}$ ,  $\rho_{alkohol} = 830 \frac{kg}{m^3}$

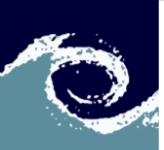
Nyomásközvetítő f.:  $\rho_{Levegő} = \frac{p_0}{R \cdot T} = 1,19 \frac{kg}{m^3}$

Ha  $\rho_{ny} \ll \rho_M$ :  $p_1 - p_2 = \rho_M \cdot g \cdot \Delta h$

$p_0$  - légköri nyomás [Pa]  $\sim 10^5$  Pa

$R$  - levegő fajlagos gázállandója 287 [J/kg/K]

$T$  - Léghőmérséklet [K]  $\sim 293$  K = 20°C



## Példa

Mért érték:

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

Leolvasási hiba (abszolút hiba):

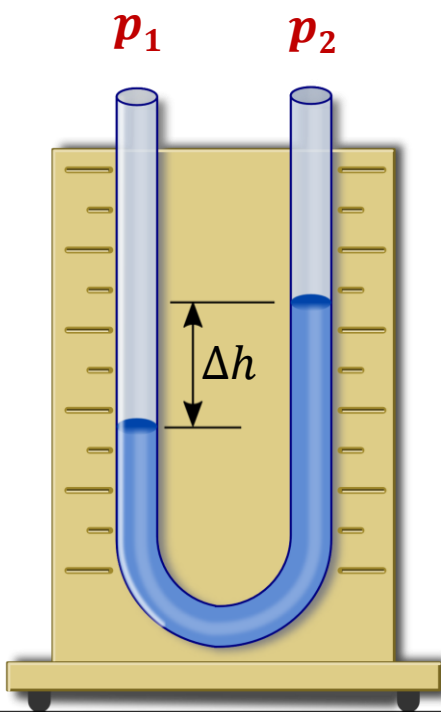
$$\delta(\Delta h) = \pm 1\text{mm}$$

Helyes írásmód hibával:

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

Relatív hiba:

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



## Hátrányok:

- Leolvasási hiba 2s megy bele a számításba
- Mérési hiba: 10-20 Pa

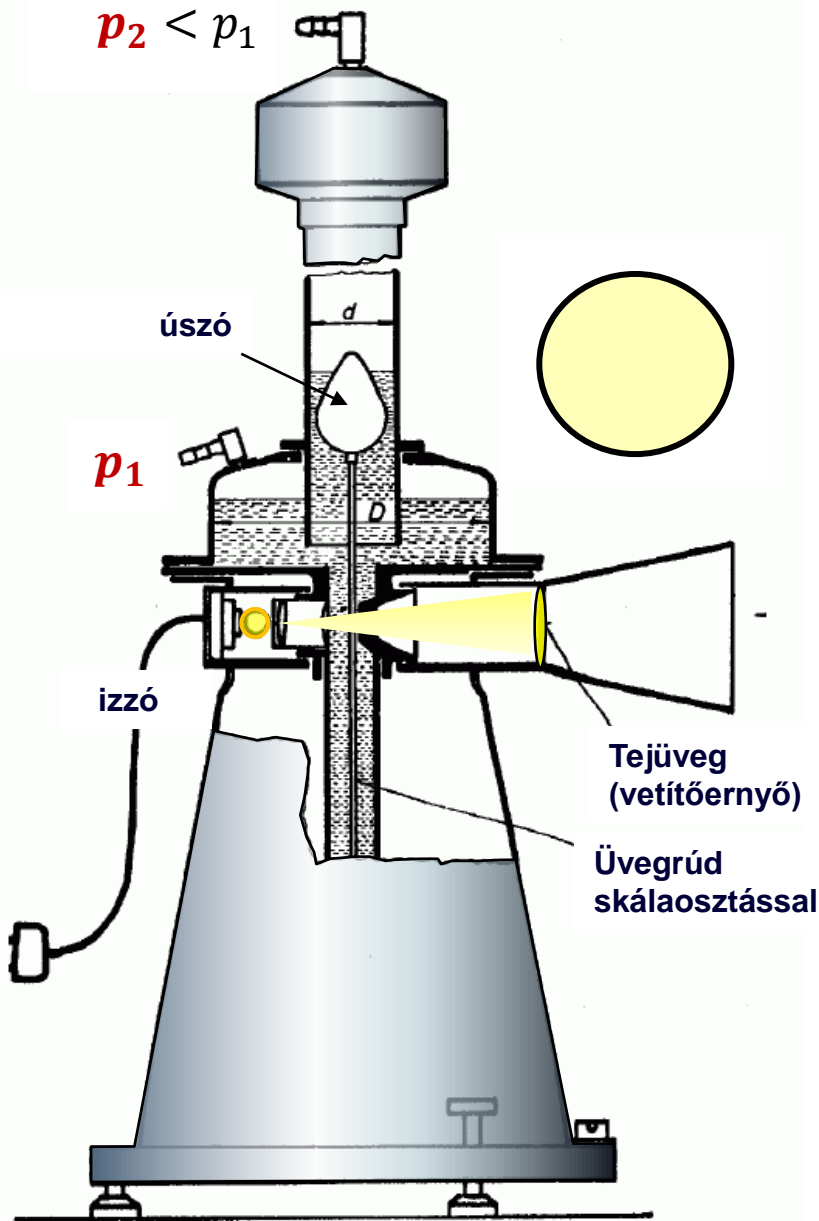
## Előnyök:

- Egyszerű, megbízható
- Nem kell kalibrálni (ha  $\rho g$  ismert)





$$p_2 < p_1$$



Leolvasási hiba ~0,1mm: mért érték hibával:

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

Relatív hiba:

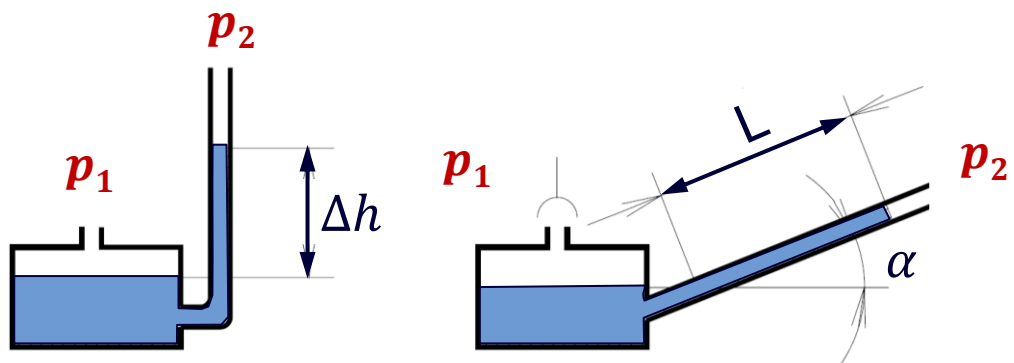
$$\frac{\delta(\Delta h)}{\Delta h} = \frac{0,1\text{mm}}{10\text{mm}} = 0,01 = 1\%$$

A mérési hibát **optikai úton** csökkentjük.

Csak egy magasságot kell leolvasni!

Kijelzés: [mm]-ben  
[mm H<sub>2</sub>O], [vízoszlop-mm]

$$1 [\text{mmH}_2\text{O}] = \frac{\rho g}{1000} [\text{Pa}] \approx 9.8\text{Pa}$$



$$\Delta p = (\rho_M - \rho_{ny}) \cdot g \cdot \Delta h \quad \text{ahol} \quad \Delta h = L \cdot \sin \alpha$$

$$\Delta p = \rho_M \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha$$

Leolvasási hiba:

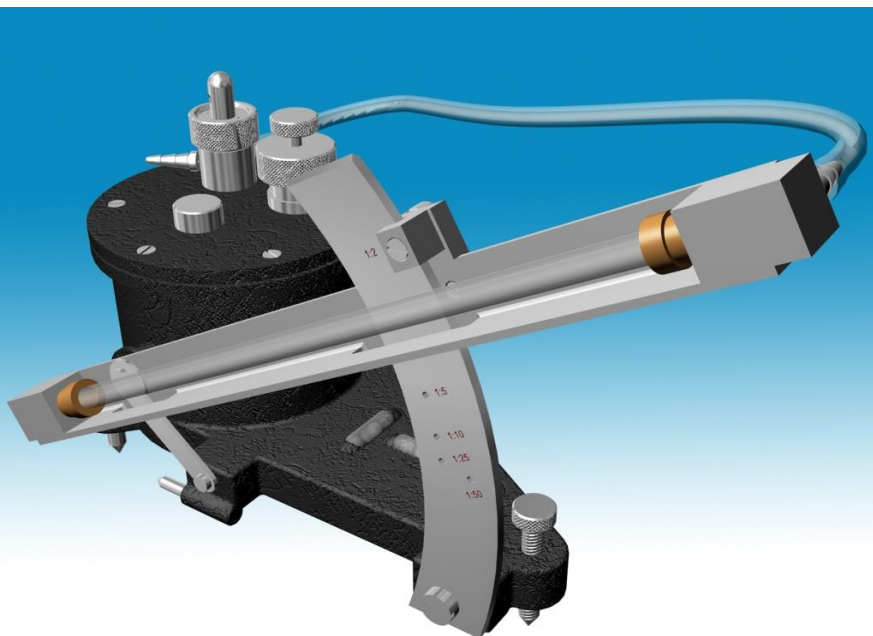
$$dL \approx \pm 1 \text{ mm},$$

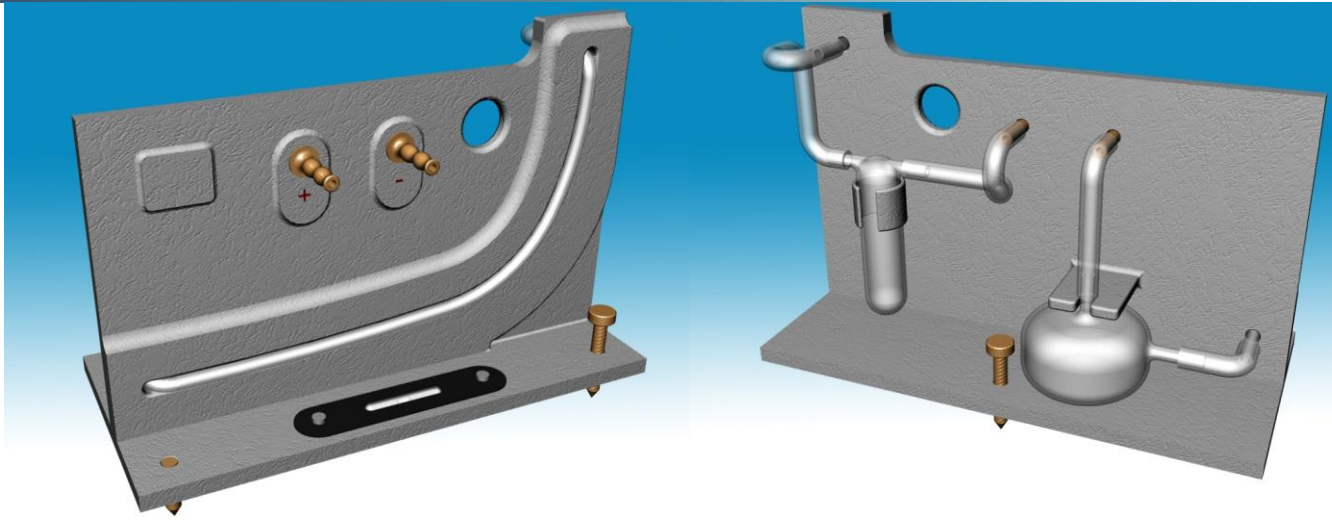
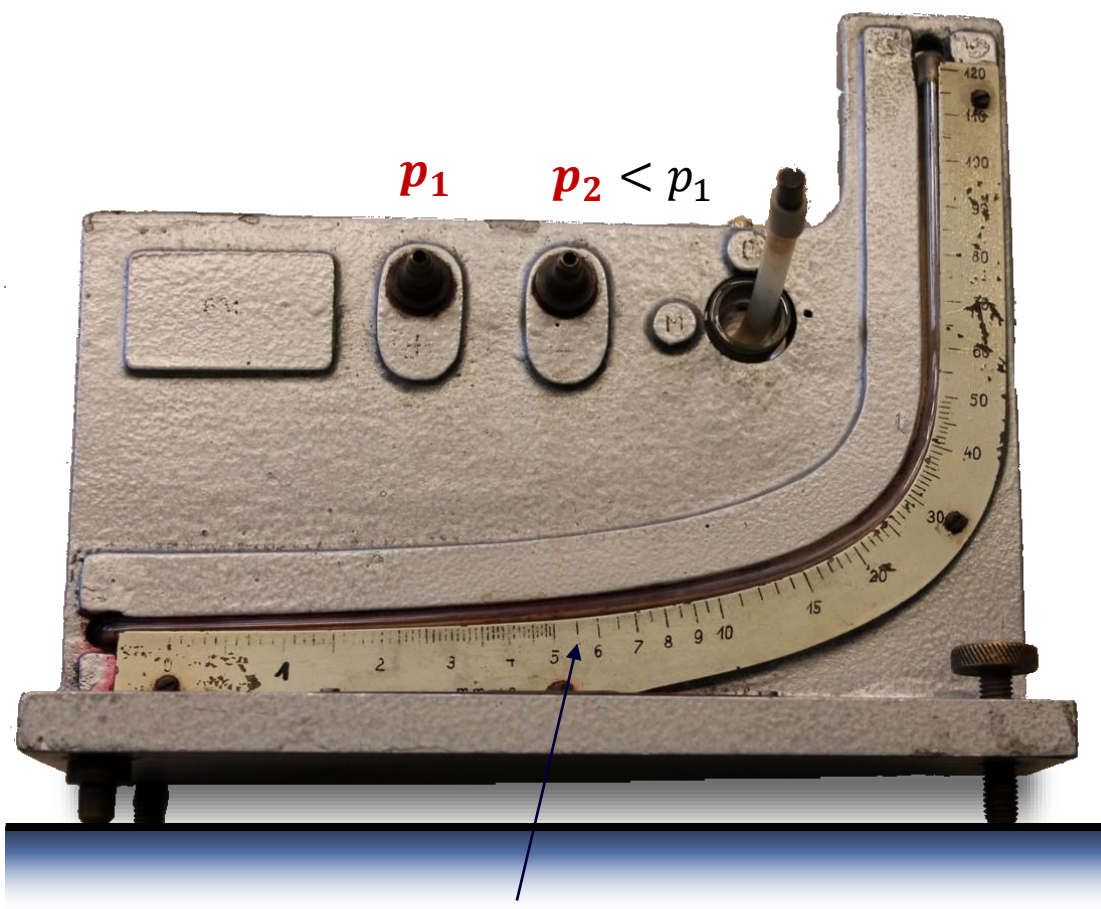
Leolvasás relatív hibája:

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

( $\alpha = 30^\circ$ )

- A nyomásmérés hibája csökken az  $\alpha$  döntési szöggel
- Csak egy magasságot kell leolvasni!
- A döntési szöggel a mérési tartomány ( $\Delta p_{max}$ ) is csökken!





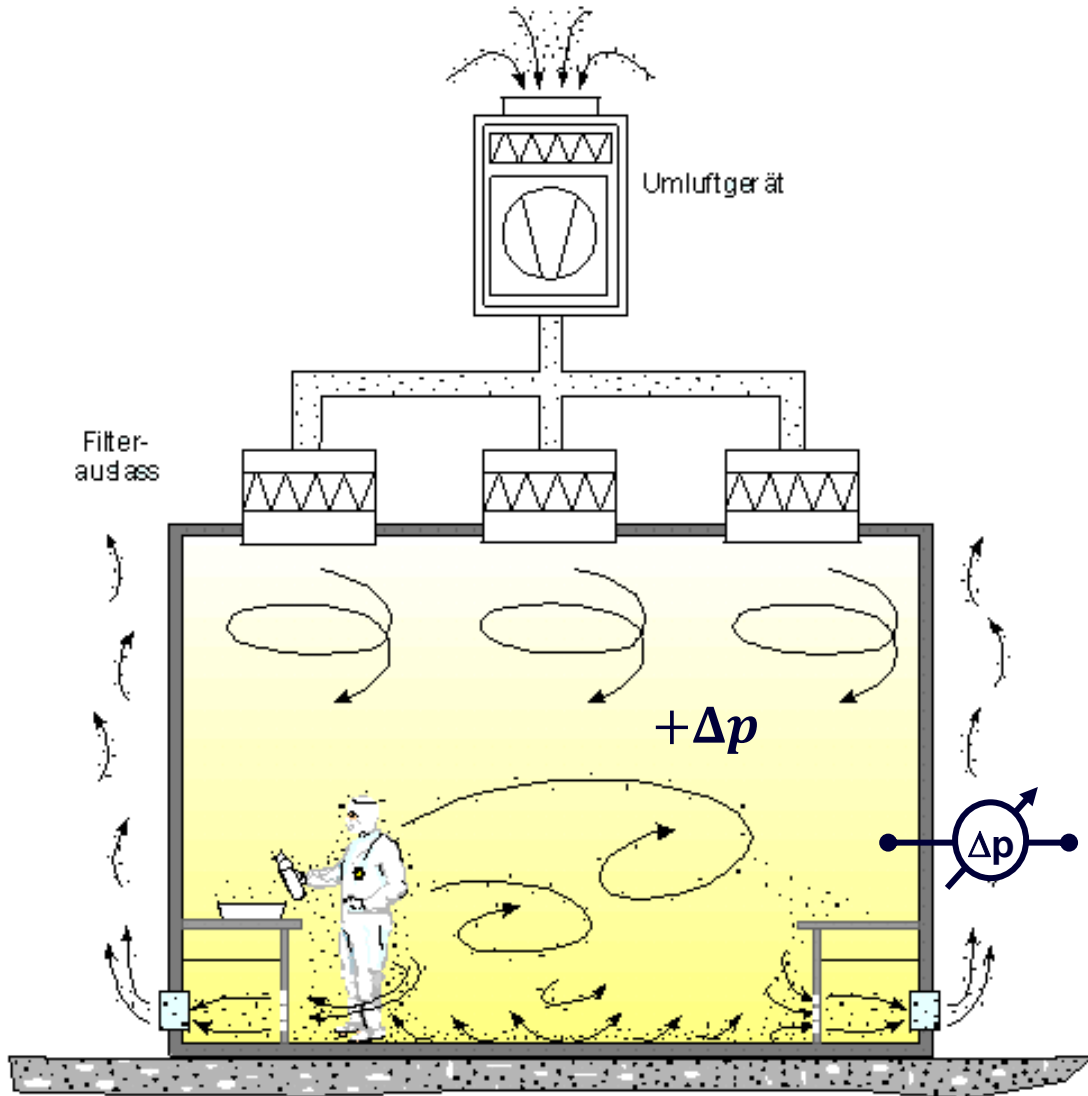
Skálaosztásmagasság-mm-ben!

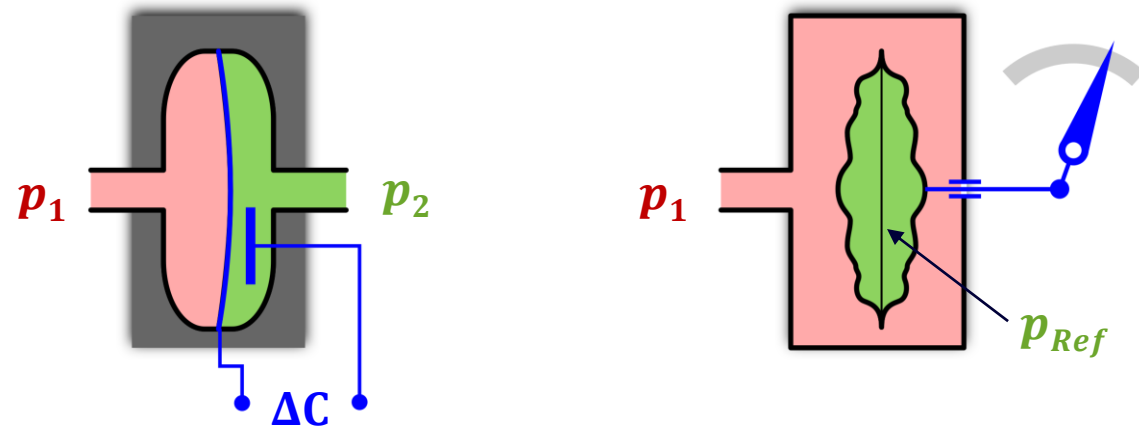
A cső görbületét úgy tervezték, hogy az alsó 50 mm-en a **relatív hiba** állandó legyen!

# HOL HASZNÁLNAK MA IS CSÖVES MANOMÉTEREKET?

**Tisztaterek:** hogy lék esetén a szobába ne jöjjön be por vagy baktérium, a szobának 5-50 Pa túlnyomás alatt kell állnia!

► Ennek meglétét egyszerű egy csöves manométerrel figyelni.





$\Delta p$  nyomáskülönbség ►  $\Delta L$  tágulás/alakváltozás ►

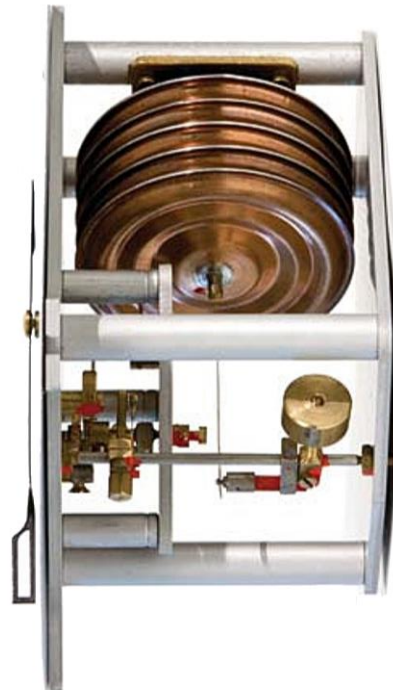
- mechanikus: mutató vagy író mozgatása
- elektromos: kapacitás, vagy ellenállás-változás
- $U$  [V] feszültség-változás és abból digitális kijelzés

**Aneroid barometer  
a laborban**



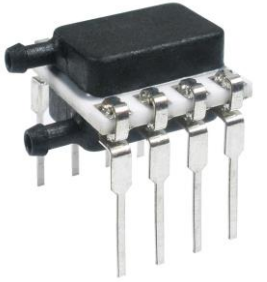
Típus:  
Mérési tartomány:  
Mérési bizonytalanság:

Fischer 103  
900-1060 hPa  
0.7 hPa



## AZ EMB-001 DIGITÁLIS MANOMÉTER

- Nyomáskülönbség mérésre
- Az Áramlástan Tanszék saját fejlesztése
- Két beépített Honeywell nyomásszenzor



Mérési tartomány:  $\Delta p = \pm 1250 Pa$

Mérési bizonytalanság:  $\delta \Delta p = 2 Pa$

Időbeli felbontás:  $< 10 ms$

(válaszidő)

KI/BE

Nullázás

I és II.  
szenzor  
közti  
váltás

Gyári kalibráció betöltése:  
(RECALL): „0” és utána „STR Nr”

Átlagolási idő  
váltása (1/3/15s)





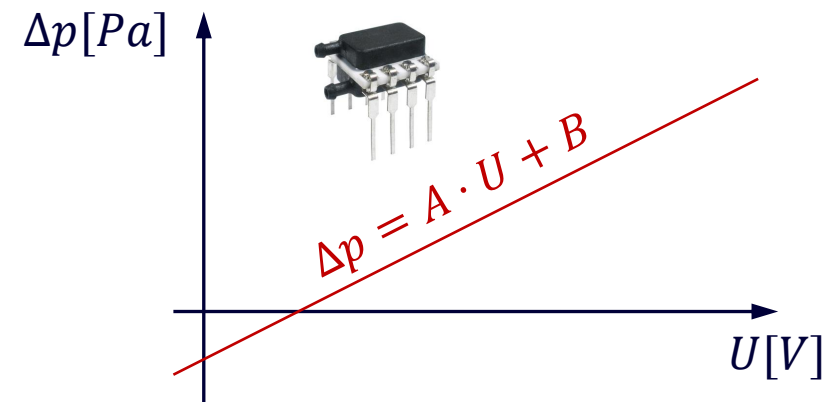
- Cél: a  $\Delta p = f(U), f(\Delta L)$  vagy a  $\Delta p = f(\text{kijelzett érték})$  összefüggés **meghatározása** vagy **ellenőrzése**
- referenciaműszer: a kalibrálandó manométernél 5-10-szer kisebb mérési bizonytalanságú manométer (pld. egy Betz-manométer)

## Lépések:

1. Mindkét manométert ugyanarra a pumpával felszerelt nyomásvezetékre csatlakoztatni
2. A pumpával a műszerek mérési tartományán belül több különböző nyomást előállítani
3. A két műszer által kijelzett értékeket leolvasni
4. A  $\Delta p = f(U), f(\Delta L)$  vagy a  $\Delta p = f(\text{kijelzett érték})$  pontpárokat X-Y-diagramban ábrázolni
5. A pontokra regressziós egyenest illeszteni (pld. Excelben lineáris trendvonal illesztése)

## ► Az illesztett egyenes egyenlete a

$\Delta p = f(U), f(\Delta L)$  vagy a  $\Delta p = f(\text{kijelzett érték})$  összefüggés





## Példa

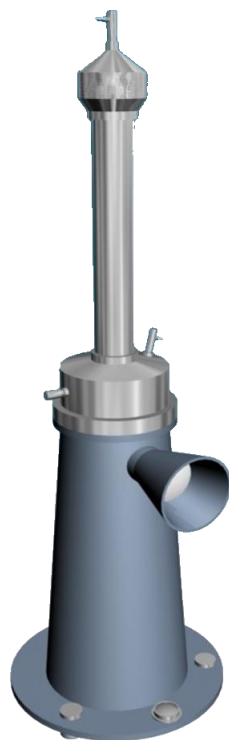
**Kalibrálandó műszer:** EMB-001, 1. csatorna

**Referencia:** Betz-mikromanométer

**Keresett:**  $\Delta p [Pa] = f(\text{kijelzett nyomás} [Pa])$

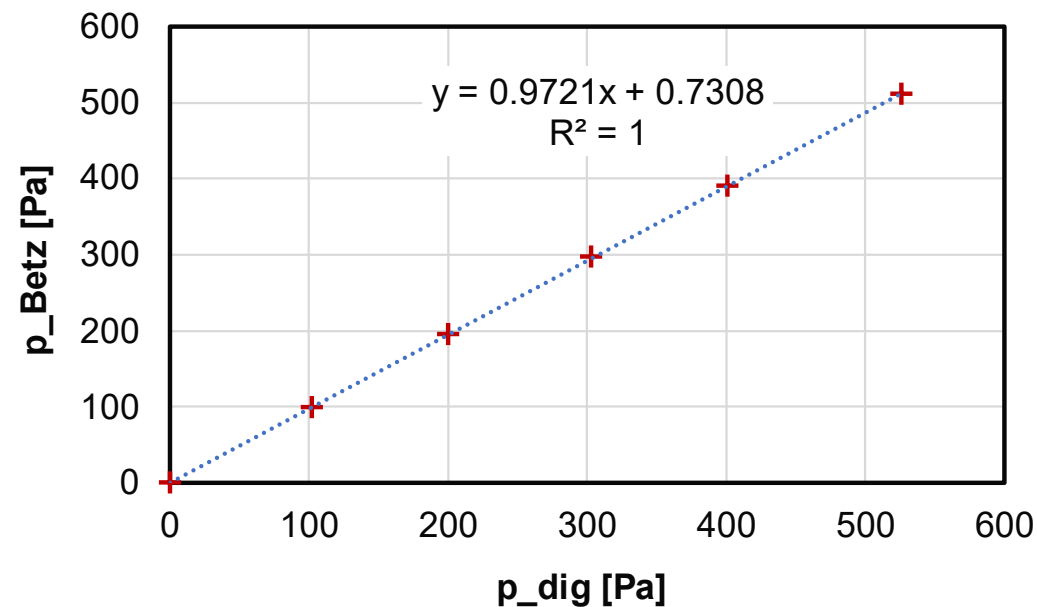
Mérési értékek:

| $p_{dig} [Pa]$ | $p_{Betz} [mmH_2O]$ | $p_{Betz} [Pa]$ |
|----------------|---------------------|-----------------|
| 0              | 0.0                 | 0.0             |
| 102            | 10.2                | 99.8            |
| 200            | 20.0                | 195.6           |
| 303            | 30.3                | 296.4           |
| 401            | 40.0                | 390.8           |
| 526            | 52.3                | 511.1           |



Környezeti jellemzők:

|                   |        |
|-------------------|--------|
| $t_0 [^{\circ}C]$ | 25     |
| $T_0 [K]$         | 298.15 |
| $\rho_v [kg/m^3]$ | 997.1  |
| $g [N/kg]$        | 9.81   |

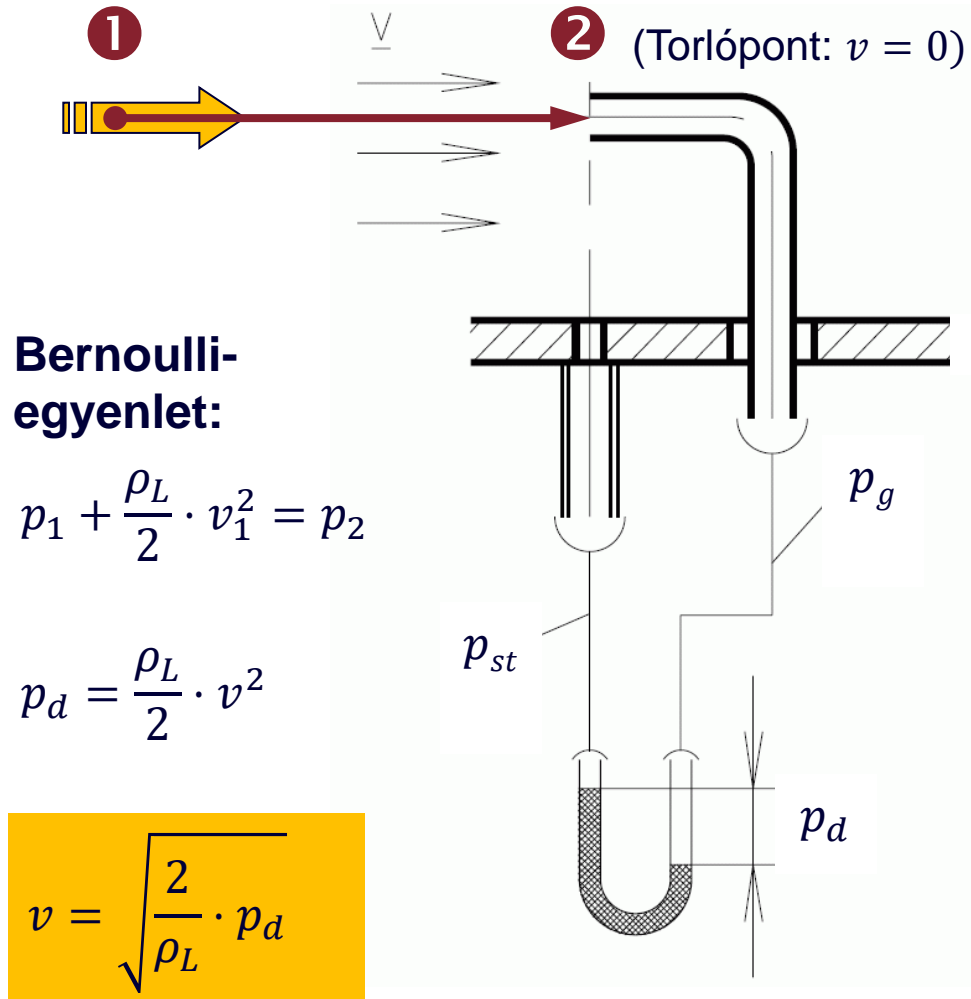


**Eredmény:**

$$\Delta p [Pa] = 0.9721 \cdot \Delta p_{dig} [Pa] + 0.7308$$



# AZ ÁRAMLÁSI SEBESSÉG MÉRÉSE



$p_2 = p_{\ddot{o}}$  össznyomás (a megállított közeg nyomása)

$p_1 = p_{st}$  statikus nyomás – a zavartalan áramlás nyomása (az áramlással párhuzamos oldalfalon ható nyomás)

$p_d = p_{\ddot{o}} - p_{st}$  : a zavartalan áramlás dinamikus nyomása

### Előnyök/hátrányok

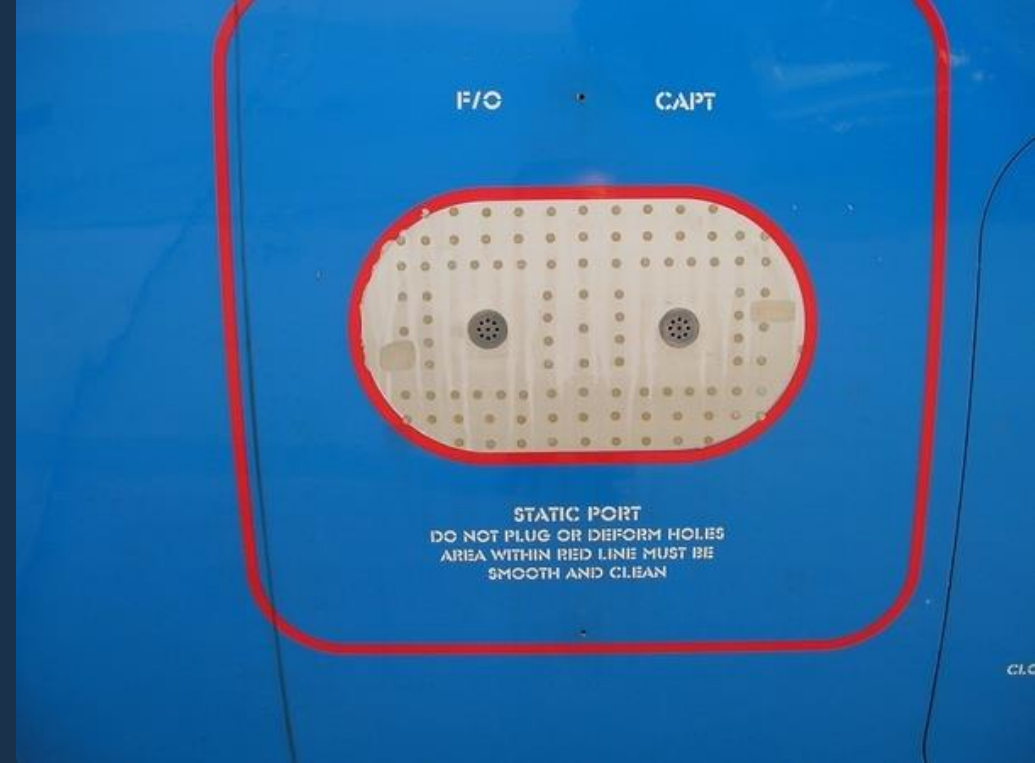
- Egyszerű
- Csak  $|\underline{v}|$ -t méri (irányt nem)
- Pontosan az áramlás irányába kell fordítani
- Megzavarja az áramlást
- Nem alkalmas nagyon kis sebességek mérésére



## Pitot-cső:

Ma is a repülőgép  
(levegőhöz képesti)  
sebességének elsődleges  
meghatározási eszköze!

Külön statikus  
nyomásmérő portok  
vannak a törzs oldalán  
 $p_{st}$  meghatározására



# Az Air France 447 járat tragédiája (2011): az egyik ok az egyik Pitot-cső eljegesedése volt!

## In Free Fall

The last minutes of flight AF 447 from Rio de Janeiro to Paris



**2.09 am GMT**  
The Airbus A330 has been flying through a storm front at an altitude of 10,700 meters (35,100 feet) for more than half an hour.

**2.10 am**  
Ice crystals from the clouds block the pitot probes underneath the cockpit. The airspeed display stops working. Several warning signals appear on the control screens in the cockpit. The autopilot and the automatic throttle stop working. The flight computer switches to emergency control (a mode known as Alternate Law 2).

**2.11 am**  
The pilots lose control of the aircraft. It is possible that a so-called deep stall occurred at this point.



**Impact**  
The plane, which is still intact, hits the ocean surface with a force equivalent to 36 times the force of gravity and with its nose raised by only five degrees. The vertical stabilizer becomes detached and flies forward.

**2.12 am**  
The out-of-control aircraft hurtles toward the ocean surface at an estimated speed of descent of 2,500 meters per minute.

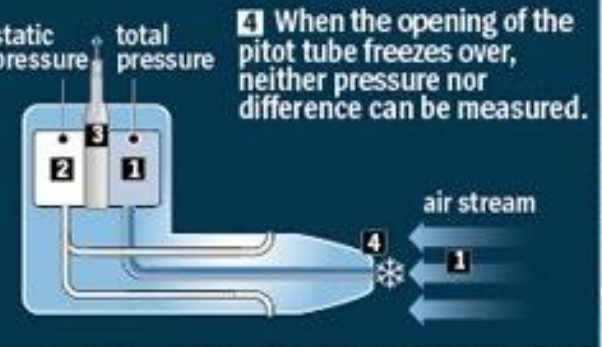
**2.13 am**  
The pilots are believed to have desperately tried to restart the flight computer in an attempt to regain control of the airplane.



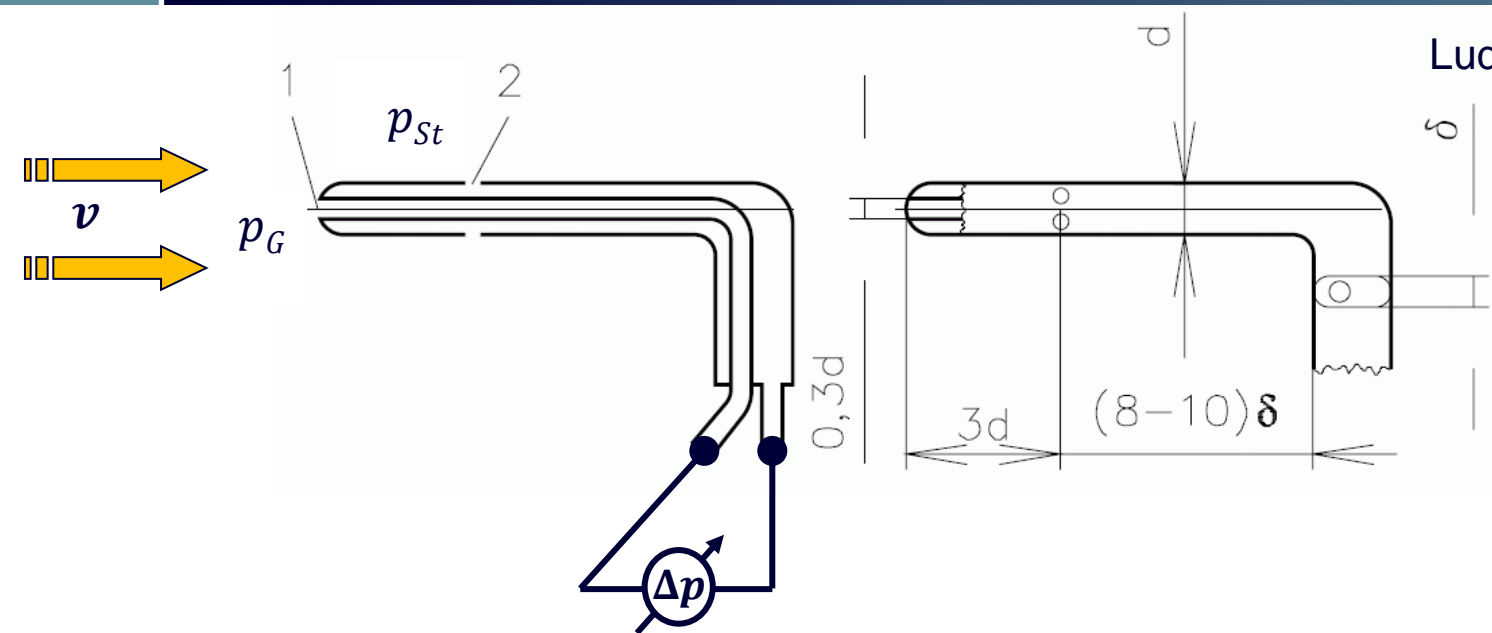
**2.14 am**  
The ground proximity warning system alerts the pilots when the aircraft descends below 600 meters above the ocean surface. Acoustic warnings sound in the cockpit: "Terrain! Terrain! Pull up! Pull up!"

## Functionality of the Pitot Tube

- 1 The speed of the aircraft determines the pressure of the air stream in contact with the pitot tube. A sensor measures the total pressure.
- 2 The air pressure around the pitot tube (known as the static pressure) is also measured.
- 3 The difference between the total pressure and the static pressure is used to calculate the airplane's speed. The speed is shown on a display in the cockpit.

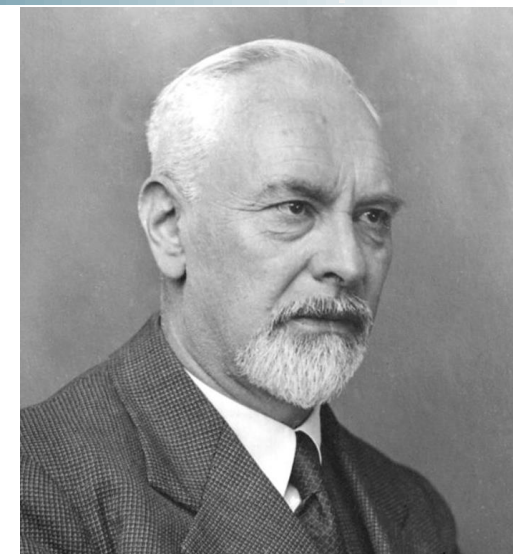


4 When the opening of the pitot tube freezes over, neither pressure nor difference can be measured.



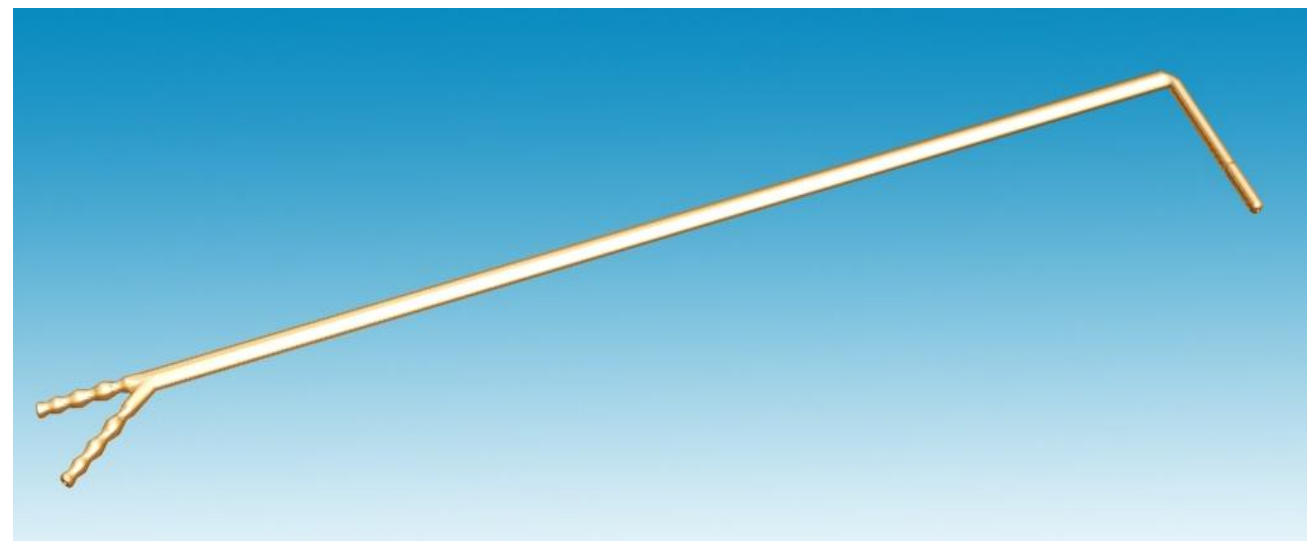
Ludwig von Prandtl (1875-1953),  
német áramlástanai kutató\*.

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



- Változó  $p_{St}$  esetén, vagy ha nincs fali statikus mérőfurat
- Alakja pontosan előírt (furatok helye, orr alakja)
- Csak  $|v|$ -t méri (irányt nem)
- Megfúvási szög: max.  $\pm 15\%$
- Megzavarja az áramlást
- Nem alkalmas nagyon kis sebességek mérésére

\* Sokak mellett Kármán Tódor és Abody (Anderlik) Előd doktori témavezetője is volt Göttingenben

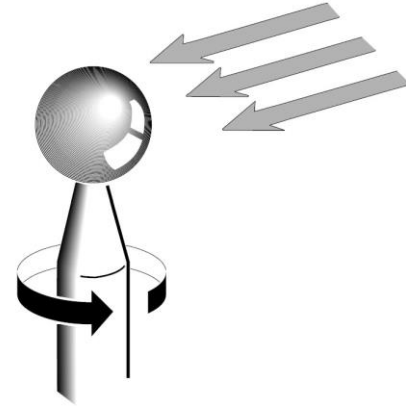




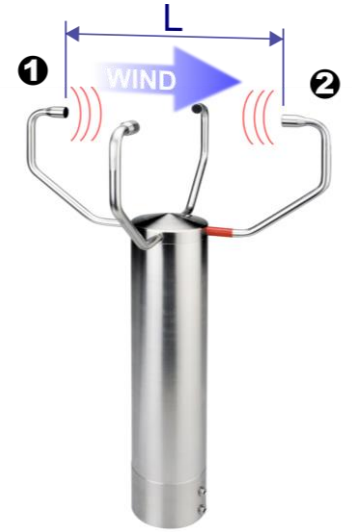
Kanalas anemométer



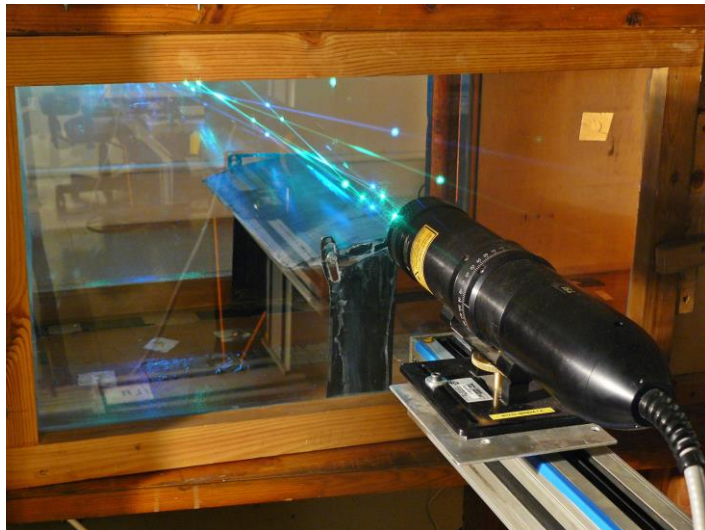
Propelleres anemométer



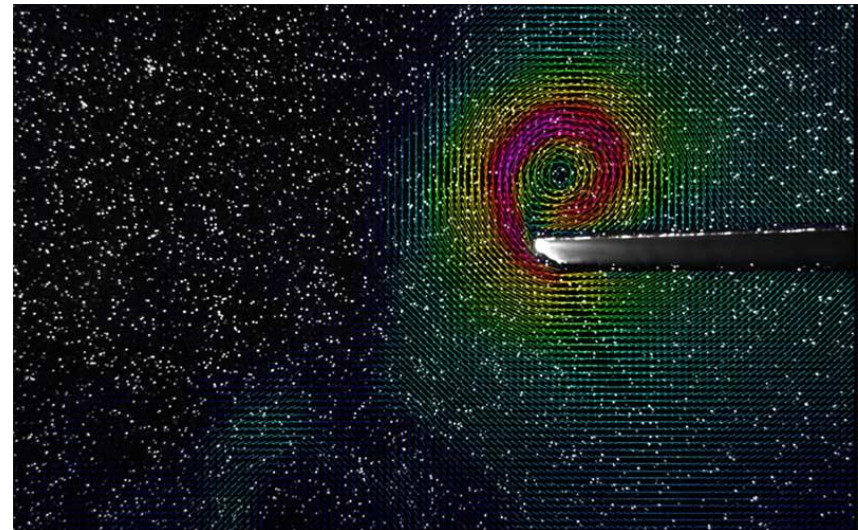
Hőgömbös anemométer



Szónikus anemométer



Lézer-Doppler anemométer



Részecskekép-elemző ~ (Particle Image Velocimetry, PIV)

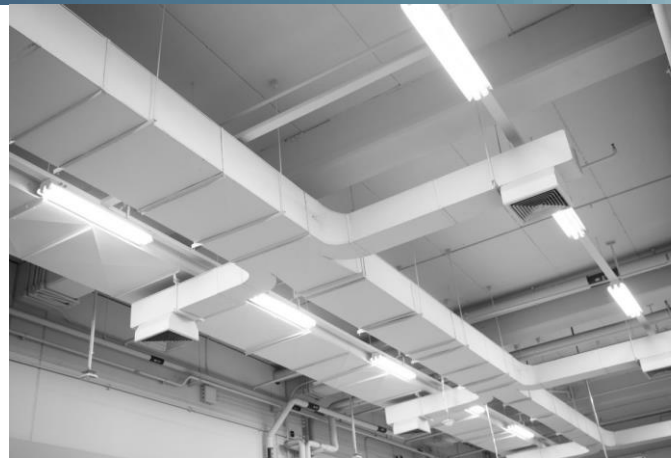
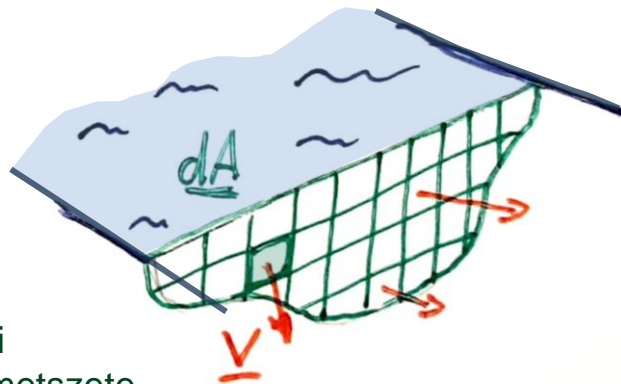
# A TÉRFOGATÁRAM MÉRÉSE



## Térfogatóram definíció

$$q_v \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \int dq_v = \int_A \underline{v} \cdot d\underline{A}$$

Folyam  
áramlási  
keresztmetszete

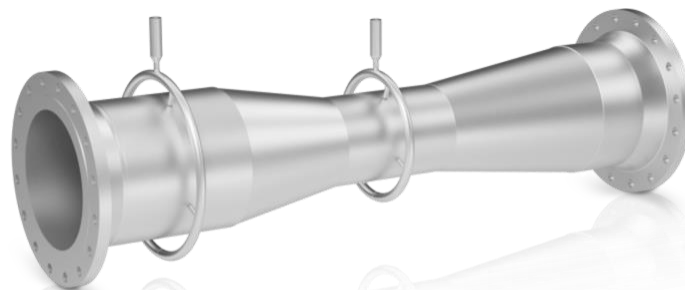


### 1. Pontonkénti sebességmérésen alapuló módszerek

- Nem kör keresztmetszetű vezeték
- Kör keresztmetszetű vezeték
  - 10-pont módszer
  - 6-pont módszer

### 2. Szűkítő elemes módszer

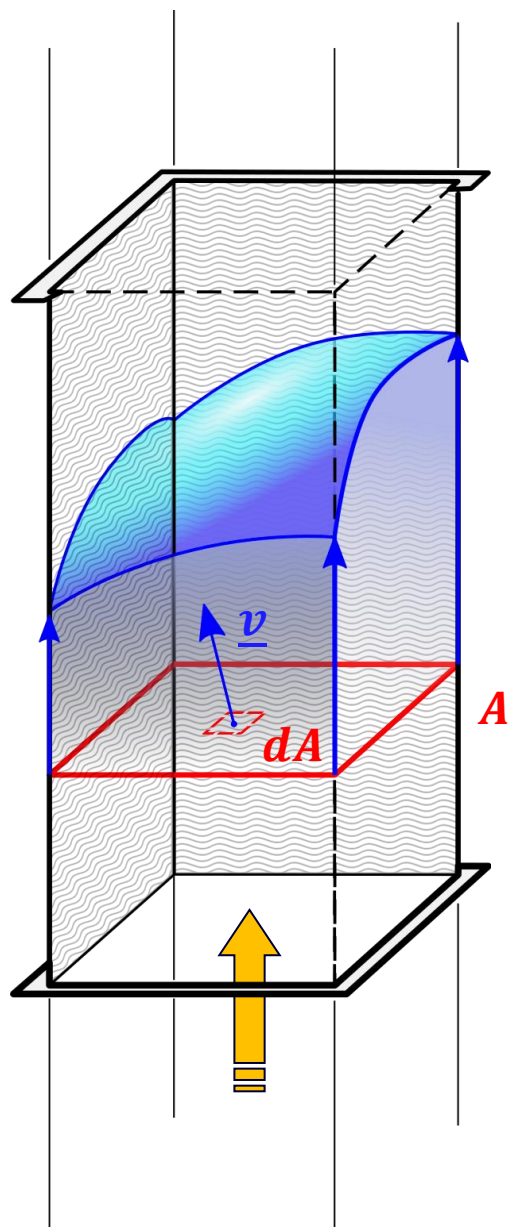
- Venturi-cső (vízszintes/ferde tengely)
- Átfolyó mérőperem (átfolyási szám, iteráció)
- Beszívó mérőperem
- Beszívó tölcser



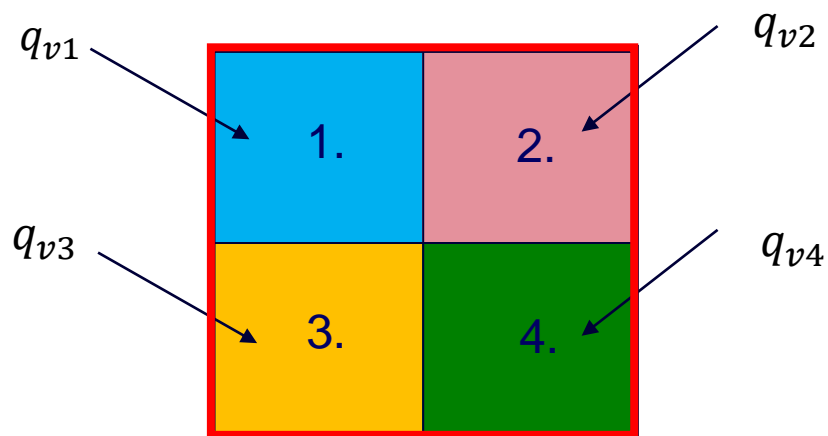
Kép: KROHNE Gruppe







$q_v = ?$  (az áramlás stacionárius)



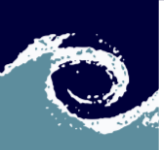
$$q_v = \int_A \underline{v} \cdot \underline{dA} \approx \sum_{i=1}^n v_{m,i} \cdot \Delta A_i$$

(ha  $\underline{v}_i \parallel \underline{\Delta A}_i$ )

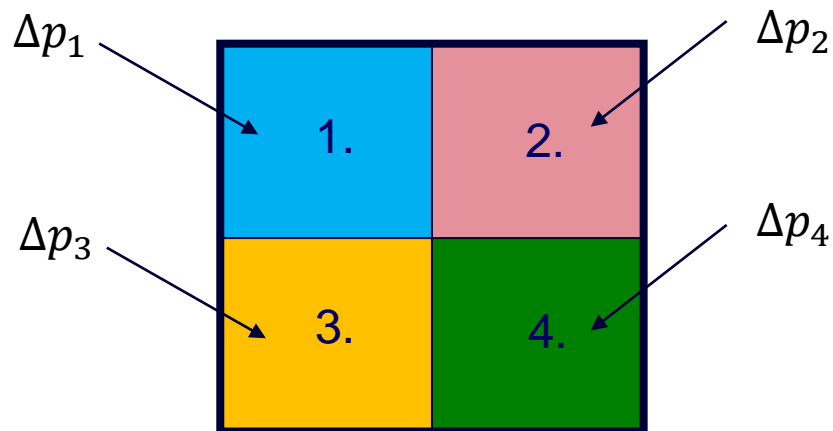
**További feltételek:**

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

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



*Ha több pontban mérjük a dinamikus nyomást, majd abból sebességet kívánunk számolni:*



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

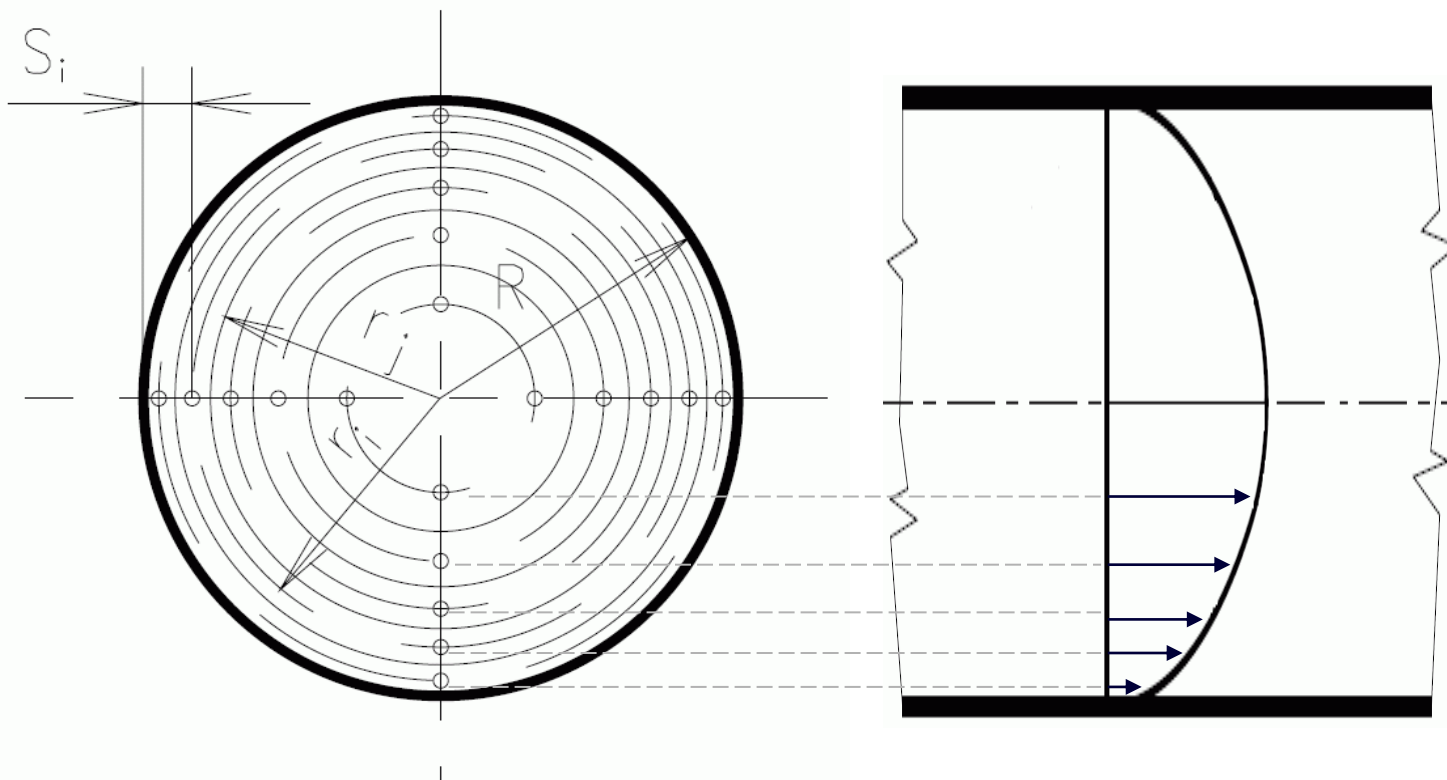
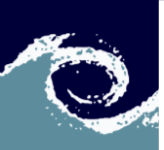
~~$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ny}} \cdot \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4}{4}}$$~~

**TÉVES**

átlagok gyöke  $\neq$  gyökök átlaga (!)

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

**HELYES**



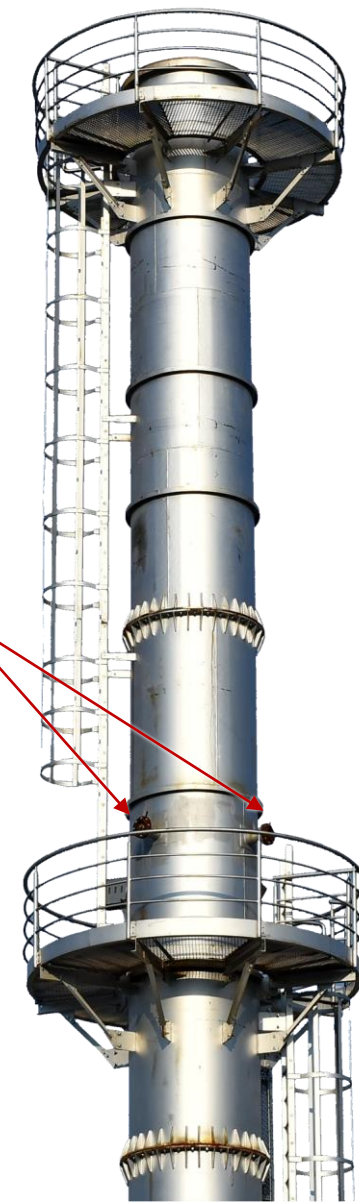
## Számítás

A részfelületek azonos nagyságúak:

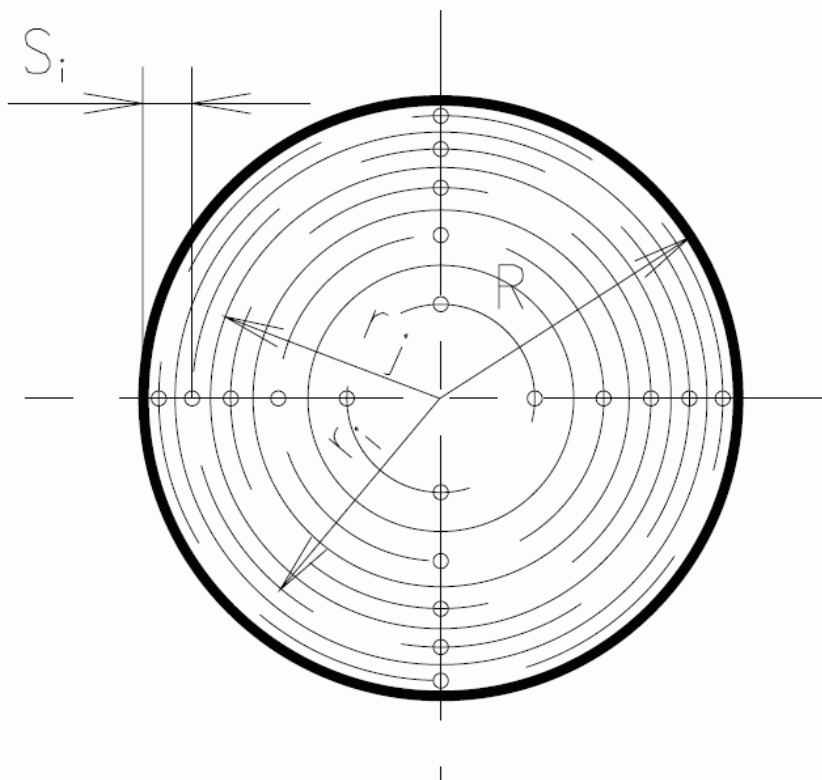
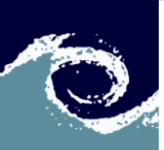
$$A_1 = A_2 = \dots = A_{10}$$

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

**Nyílások az eseti  
térfogatáram-  
mérés számára**



- Feltétel: stacionárius áramlás (állandósult üzemállapot)
- A sebességprofil feltételezetten n-ed fokú parabola
- lamináris áramlás esetén: **10-pont módszer**  
turbulens áramlásnál a **6-pont módszer** is elegendő.



## *Térfogatáram-mérés sebességmérés alapján*

### **Előnyök:**

- nem változtatja meg a mért berendezés üzemállapotát
- Alkalmi mérésre ideális
- Egyszerűen elvégezhető

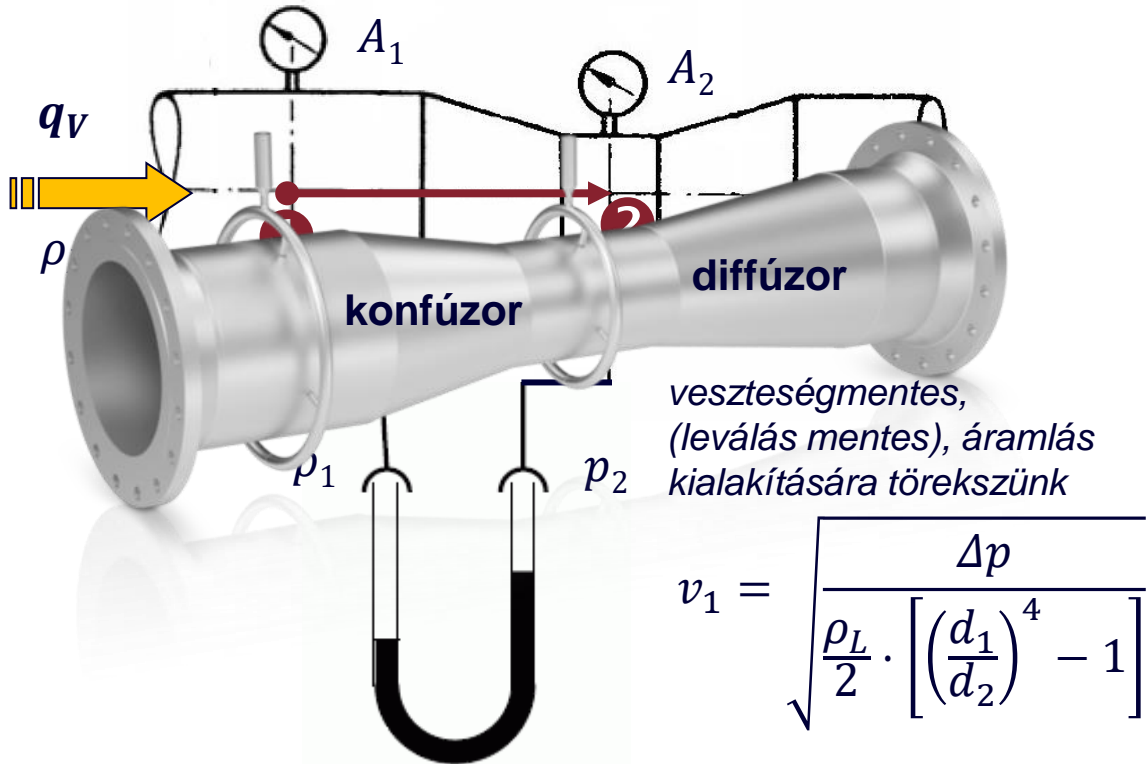
### **Hátrányok:**

- A mérés és az alatt biztosítani kell az állandó üzemállapotot
- Instacionárius áramlást nem lehet mérni vele.
- Hosszú ideig tart egy mérés, pld.  $10 \text{ pont} \times 1,5 \text{ perc} = 15 \text{ perc}$ .
- Mérési hiba nem elég kicsi.

### **Szabványosított eljárás:**

a mérési pontokat a szabvány (MSZ 21853/2) megadja:

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



1) Bernoulli-egyenlet:  $p_1 + \rho_L \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho_L \frac{v_2^2}{2}$

2) Kontinuitás ( $\rho = \text{áll.}$ ):

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

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

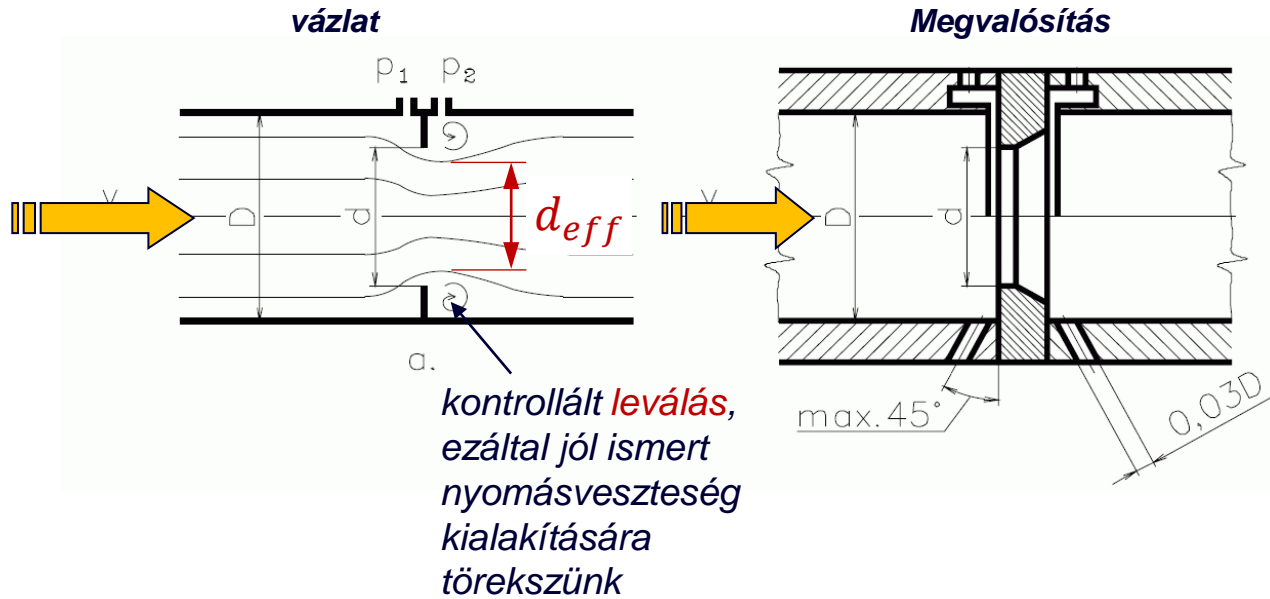
$$v_1 = \sqrt{\frac{\Delta p}{\frac{\rho_L}{2} \cdot \left[ \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right]}}$$

$$q_v = \frac{d_1^2 \pi}{4} \cdot v_1$$

- ☑ Kis áramlási veszteség
- ☑ Folyamatosan mér
- ☑ Instacioner áramlást is

- ☒ Megváltoztatja a berendezés üzemállapotát
- ☒ Be kell tervezni, be kell építeni
- ☒ Előtte és után a hosszú egyenes csőszakasz kell
- ☒ Drága konstrukció

## Átfolyó mérőperem: egy egyszerűsített Venturi-cső

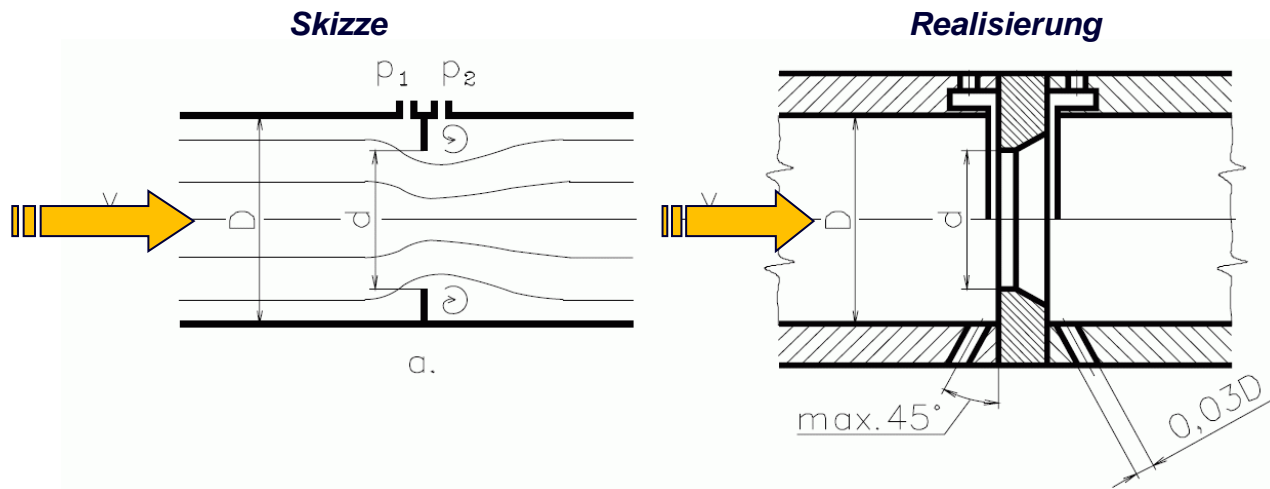


- Durchflußzahl:  $\alpha = \frac{A_{eff}}{A_{geom}} = f(Re, d/D)$ ;  $\alpha \approx 0.7$
  - Expansionszahl  $\varepsilon$  : Einfluss der Kompressibilität
    - für inkompressible Medien  $\varepsilon = 1$
- $(\Delta p_{mp} > 5000Pa, \text{ und } p_1 \text{ nahe atmosphärisch})$

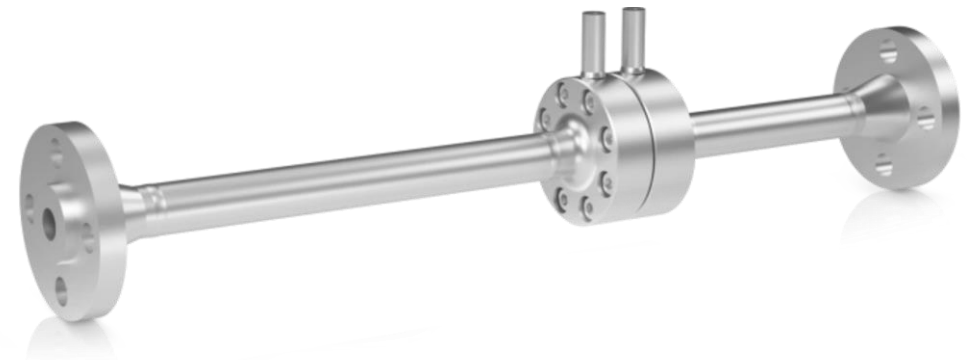
*Genaue Berechnung von  $\alpha, \varepsilon$  in Normen definiert!*

$$q_v = \underbrace{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d_{mp}^2 \cdot \pi}{4}}_{= A_{eff}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{2\Delta p_{mp}}{\rho}}}_{\sim v}$$

Durchflussmessblende : „eine vereinfachte Venturi-Rohr”



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



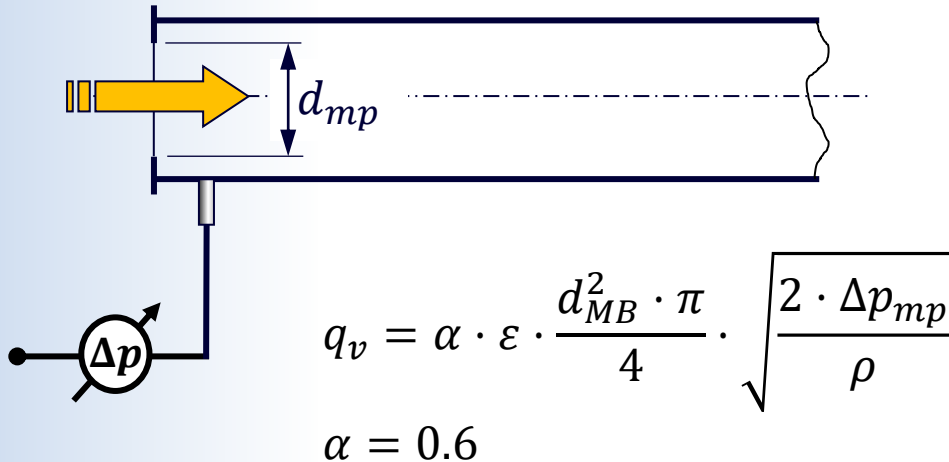
**Előnyök és hátrányok, mint a Venturi-csőnél, de:**

- ☑ Egyszerűbb kialakítás: rövidebb, olcsóbb
- ☑ Szabványban rögzített ► nagyon pontos
- ☒ Nagyobb nyomásveszteség

**Nyomásmérés:**

- Gyűrű alakú rés
- több nyomásfurat, **körvezetékkel** összekötve

$p_0$   
 $\underline{v} = 0$



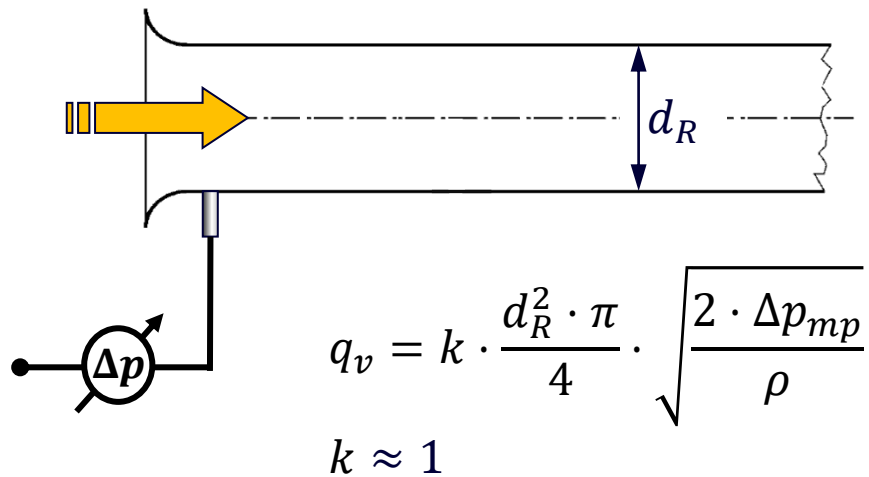
## Beszívó mérőperem

- Szabadból szív be

- Kevésbé pontos
- Nem szabványos

## Kifúvó mérőperem

- Szabadba fúj ki



## Beszívótölcsér

- Szabadból szív be
- Nem szabványos
- Szinte veszteségmentes

(adott, vagy egy pontosabb térfogatárammérési módszerhez kalibrálandó)





| Szempon                           | Szűkítőelemes módszer | Sebességmérésen alapuló módszer |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Beavatkozás a rendszerbe          |                       |                                 |
| Időben változó üzemállapot mérése |                       |                                 |
| Előírások                         |                       |                                 |
| Költségek                         |                       |                                 |
| Mérési pontosság                  |                       |                                 |



***Köszönöm a figyelmet!***