

# A LÉGZÉS BIOFIZIKÁJA

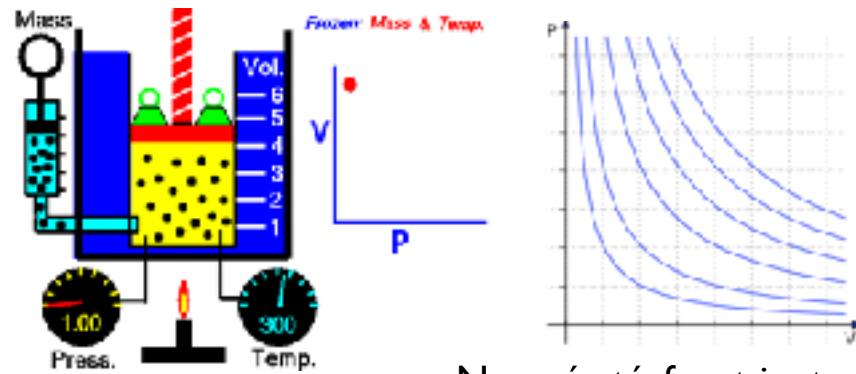
KELLERMAYER MIKLÓS

# Légzésbiofizika története

- Aristoteles (300 BC): a légzés hűti a szívet és a vért
- Galenus (170 BC): a légzés valamit hozzátesz a vérhez (“*spiritus vitalis*”)
- Leonardo da Vinci (1452-1519): a levegő felfrissülésétől elzárt kamrába zárt állatok elpusztulnak.
- Vesalius (1543): az emlősállat elpusztul, ha mellkasát felnyitjuk; azonban ha tüdejét ekkor ritmusosan felfújjuk, életben marad.
- Gáztörvények (17-18. sz., Clausius, Clapeyron, Boyle, Mariotte, Gay-Lussac, Charles)
- Black (1754): széndioxid felfedezése. Priestley (1771): oxigén felfedezése
- “Vérgázok”: Magnus (1837), Haldane (1900)
- Surfactant: Neergaard (1920-es évek), Pattle és Clements (1950-es évek)

# Releváns fizikai és fizikai-kémiai törvények

**1. Egyetemes gáztörvény** (Clausius-Clapeyron, Boyle-Mariotte, Charles törvények alapján): Összefüggés az ideális gáz nyomása, térfogata, hőmérséklete és mennyisége között.



Nyomás-térfogat izotermák

$$PV = nRT$$

$P$  = nyomás (Pa)  
 $V$  = térfogat ( $\text{m}^3$ )  
 $n$  = anyagmennyiség (moles)  
 $R$  = gázállandó ( $8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )  
 $T$  = abszolút hőmérséklet (K)

**2. Dalton-törvény** (John Dalton, 1801): Egy nemreaktív gázkeverék teljes nyomása egyenlő az egyes gázok parciális nyomásainak összegével.

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n p_i$$

$p_i$  =  $i$ -edik gáz parciális nyomása  
 $n$  = gázok száma a keverékben  
[ $p_i = P_{\text{total}} \times r$ ;  $r$  = gáz részaránya a keverékben]

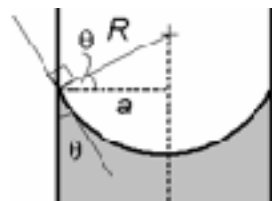
**3. Henry-törvény** (William Henry, 1803): Állandó hőmérsékleten egy adott gáz folyadékban oldott mennyisége egyenesen arányos ugyanazon, a folyadékban egyensúlyban levő gáz parciális nyomásával.

$$p = k_H c$$

$p$  = parciális nyomás (Pa; atm)  
 $k_H$  = Henry-állandó ( $\text{l} \cdot \text{atm/mol}$ )  
 $c$  = oldott gáz koncentrációja ( $\text{mol/l}$ )

**4. Young-Laplace egyenlet:** Leírja két sztatikus folyadék (pl. levegő, víz) határfelületén fellépő kapilláris nyomáskülönbséget a felületi feszültség függvényében.

Egy vékony, kör-  
keresztmetszetű csőben:

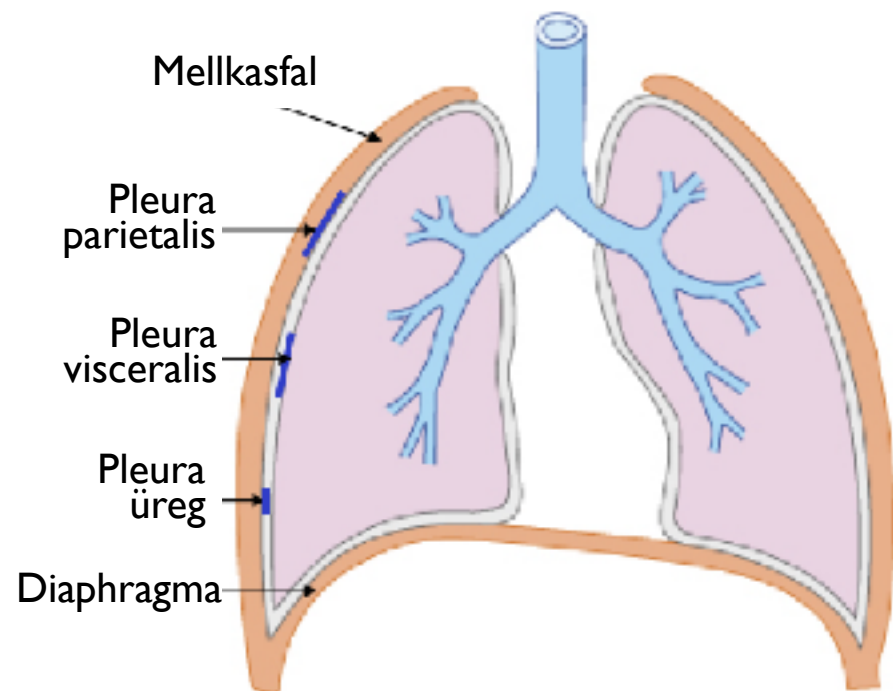


$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R}$$

$p$  = nyomás ( $\text{Nm}^{-2}$ )  
 $\gamma$  = felületi feszültség ( $\text{Nm}^{-1}$ ;  $\text{Jm}^{-2}$ )  
 $R$  = görbületi sugár (m)

# Egyszerűsített légzőrendszer

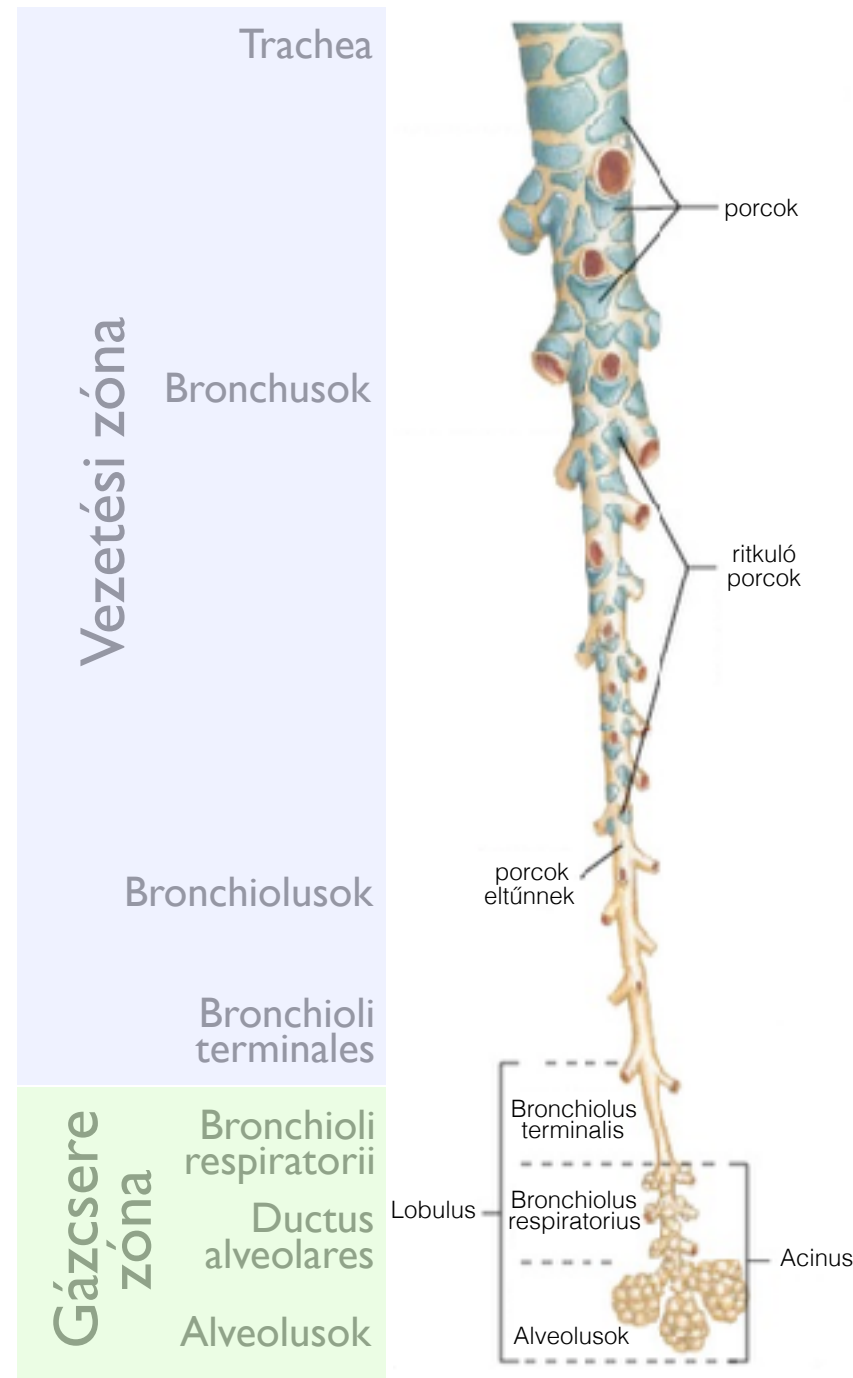
## 1. Doboz



- Intrapulmonáris nyomás ( $P_{pulm}$ ): atmoszferikus nyomás körül ingadozik
- Mellúri vagy intrapleurális nyomás ( $P_{pl}$ ): “negatív” (szubatmoszferikus; az atmoszferikus nyomás, az adhézíós és szöveti kontrakciós egyensúlya alakítja ki)
- Transzmurális (transpulmonáris) nyomás ( $P_{tm}$ ): a mellkasfal két oldala közötti nyomás

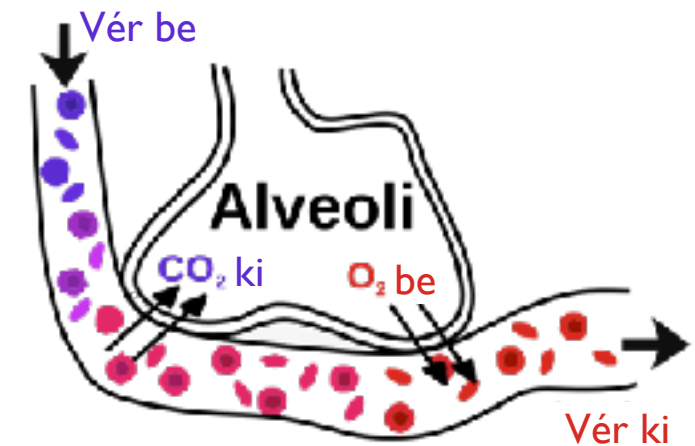
• **Pneumothorax!**

## 2. Csőrendszer



- 23-25 dichotom faágyszerű kettéoszlás
- Gáz (mint folyadék) áramlási szabályai (Hagen-Poiseuille!)

## 3. Gázcsere felület

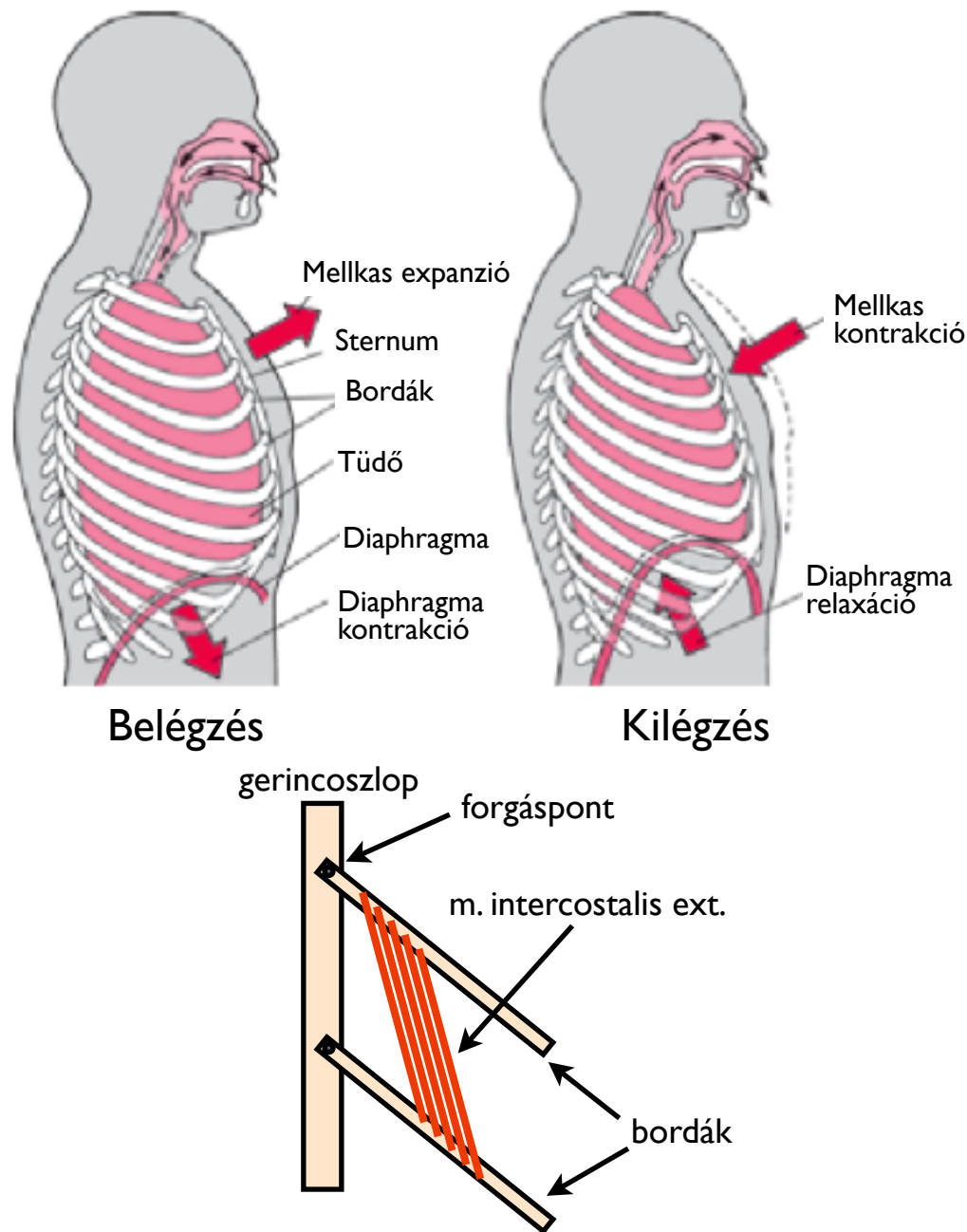


- Alveolus: nyitott termodinamikai rendszer
- A gázcsere felületét alakítják ki.
- Számuk: ~300 millió (N.B.:  $2^{25}=33,554,432$ )
- Méret ( $d \sim 200 \mu m$ ), felület ( $5 \times 10^{-7} m^2/\text{alveolus}$ )
- Teljes alveoláris felület:  $\sim 100 m^2$
- Alveolus fal ( $\sim 0.5 \mu m$ ): alveolaris epithelium ( $\sim 0.2 \mu m$ ) membrana basalis ( $\sim 0.1 \mu m$ ) kapilláris endothelium ( $\sim 0.2 \mu m$ )
- Gázcsere hajtóereje: diffúzió (Fick törvényei!)
- A gázterek parciális nyomásai igyekeznek kiegyenlítődni a vérplazma gázok tenzióival.

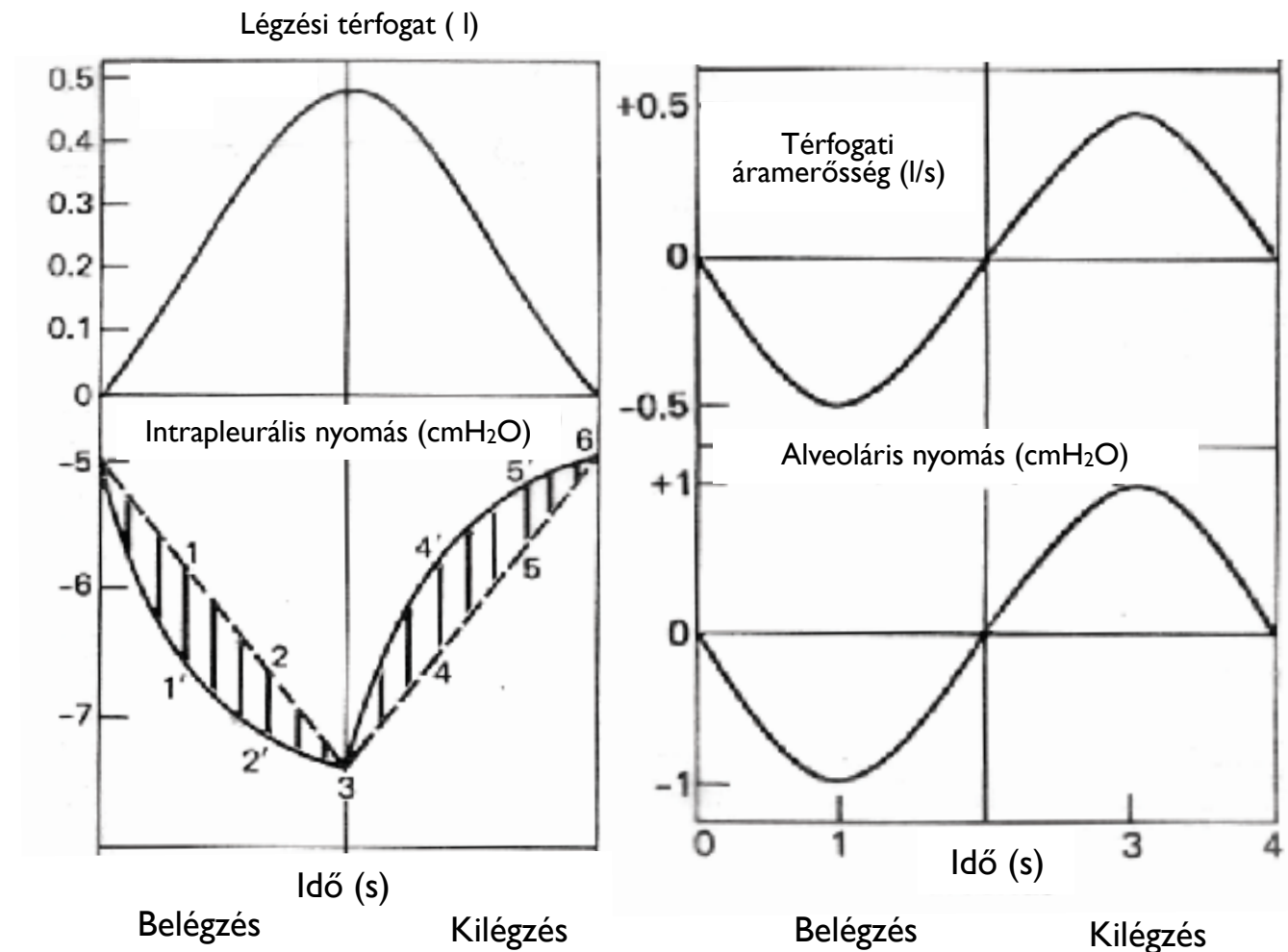


# A légzési ciklus

## I. Mechanikai vezérlés



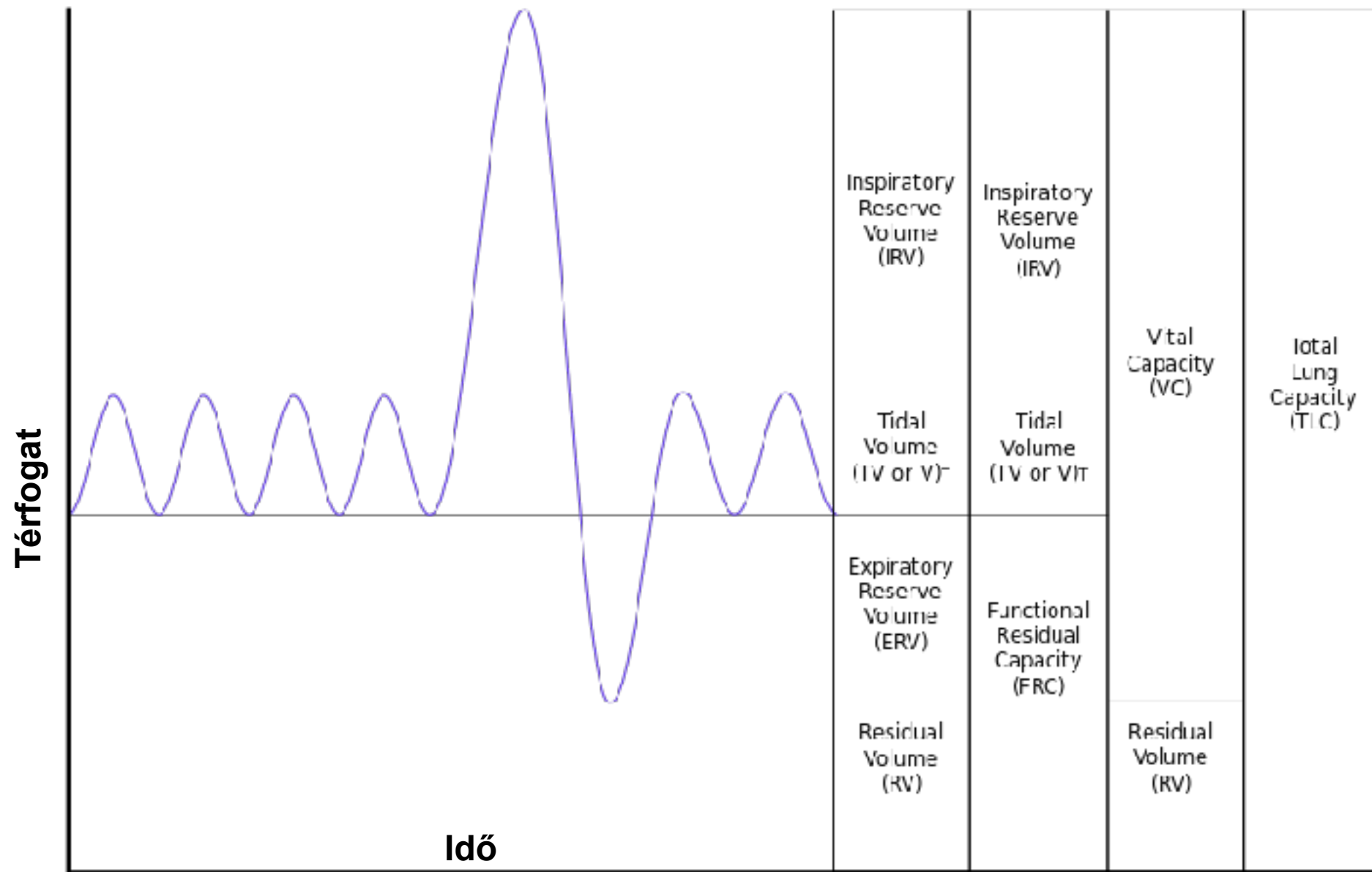
## 2. Fizikai paraméterek változásai



$$1 \text{ cmH}_2\text{O} = 0.1 \text{ kPa} = 0.7 \text{ mmHg}$$

- Eupnoe: nyugodt légzés (14-16/min)
- Polypnoe, tachypnoe: légvételek száma > 16/min
- Dyspnoe: nehézlélegzés

# Légzési térfogatok és kapacitások

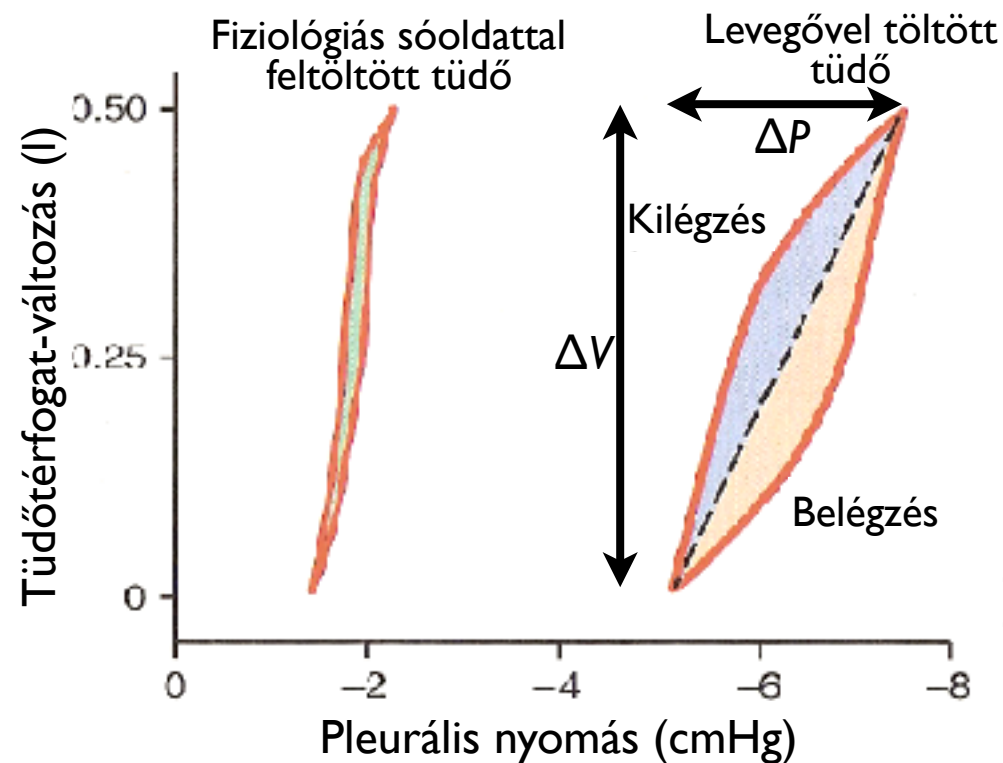


Térfogat (l)	Férfi	Nő
Belégzési rezerv	3.3	1.9
Respirációs térfogat ("tidal volume")	0.5	0.5
Kilégzési rezerv	1	0.7
Residuális térfogat	1.2	1.1
Vitálkapacitás	4.8	3.1
Funkcionális reziduális kapacitás	2.2	1.8
Teljes tüdőkapacitás	6	4.2

## Kapacitás: térfogatok összege

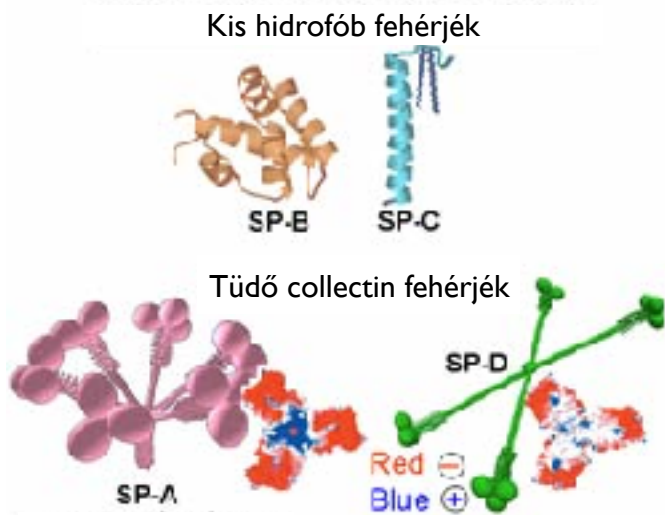
# A légzési ciklus eseményei

## I. A tüdő ciklikusan tágul-összehúzódik

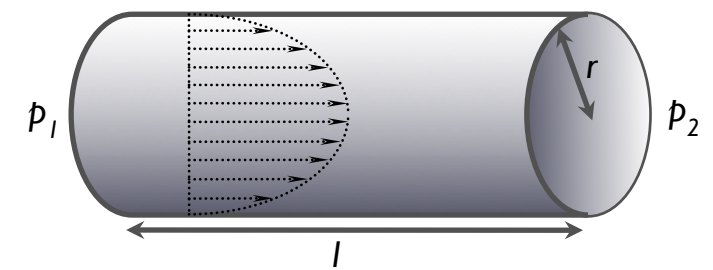


## Tüdő surfactant

- Felületaktív lipoprotein komplex (foszfolipoprotein), II. típusú alveoláris sejtek termelik (a 20. gesztációs héttől).
- 90% foszfolipid, 10 % fehérje ("surfactant protein" SP-A, SP-B, SP-C, SP-D)
- Szerepe: a felületi feszültséget csökkenti.
- Hatása: minél kisebb a felületi feszültség, annál kisebb nyomáskülönbség elegendő ahhoz, hogy az alveolusok nyitott állapotban maradjanak (Young-Laplace egyenlet!).
- **Restriktív tüdőbetegségek:** a tüdő compliance csökkent (fibrózis, csökkent surfactans termelés, stb.).



## 2. A légutakban gáz áramlik



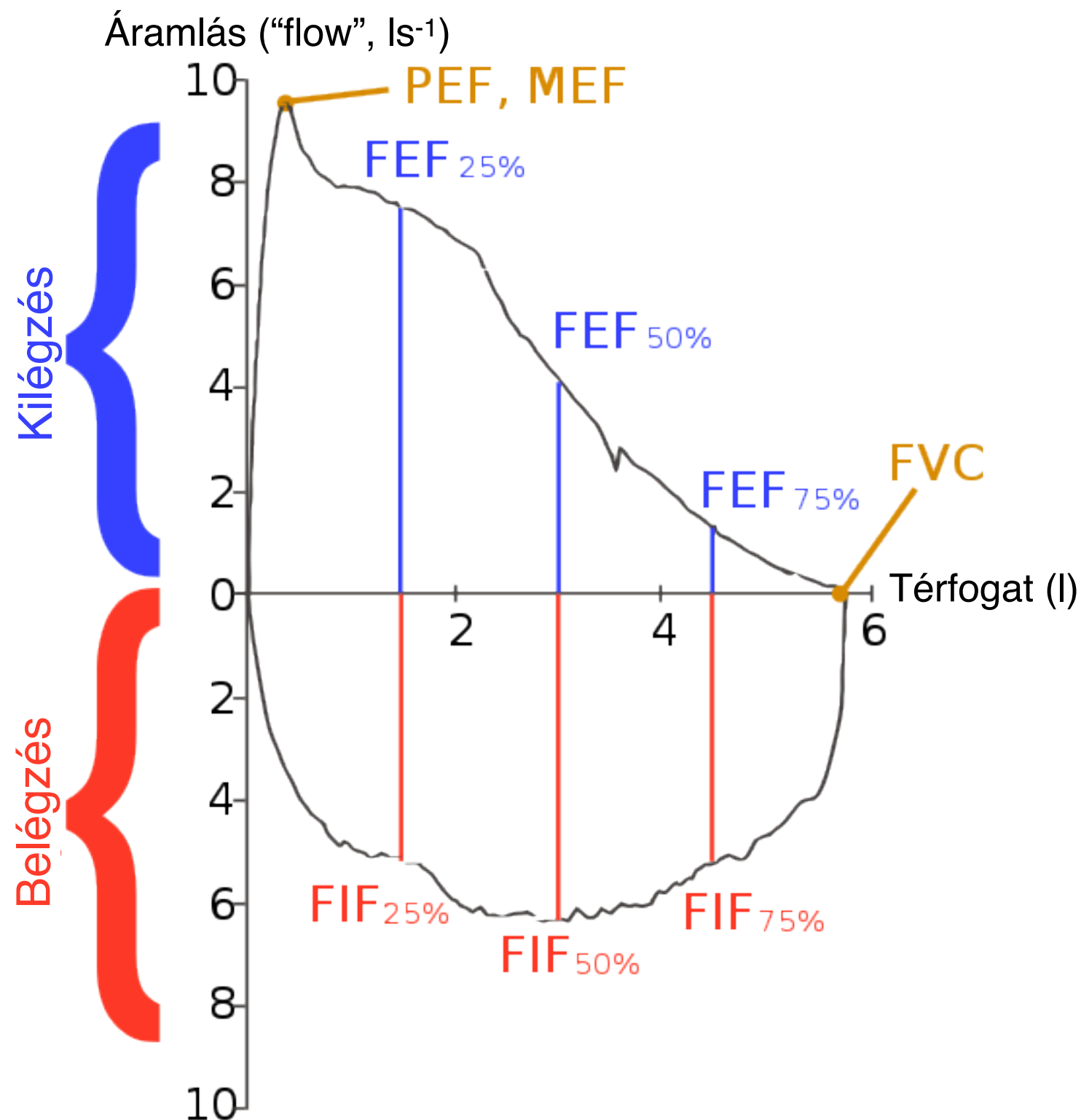
Hagen-Poiseuille törvény

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dl}$$

$V$  = térfogat  
 $t$  = idő  
 $(V/t = Q = \text{térfogati áramerősség})$   
 $r$  = cső sugara  
 $\eta$  = viszkozitás  
 $p$  = nyomás  
 $l$  = cső hossza  
 $(dp/dl = \text{nyomásgradiens, fenntartója } p_1 - p_2)$

- Normális légzés (eupnoe): lamináris áramlás.
- Tachypnoe, pathologia: turbulens áramlás.
- **Obstruktív tüdőbetegségek:** pulmonáris légáramlási sebesség csökkent (COPD - "chronic obstructive pulmonary disease").

# A légzés dinamikus analízise



## Spirometria:

- PEF, MEF: peak expiratory flow, maximal expiratory flow
- FEF: forced expiratory flow
- FIF: forced inspiratory flow
- FVC: forced vital capacity



# Légzési munka

- Átlagos transzmurális nyomás ellenében végzett térfogatváltozás
- Légzési perctérfogat = 7 l
- Légzési frekvencia = 14/min
- Nyomás ( $P_{tm}$ ) = 0.7 kPa
- Respirációs térfogat ( $V$ ) = 0.5 l ( $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ )
- Munka ( $W$ ) =  $P_{tm} \times V = 0.35 \text{ J/belégzés}$  (294 J/h)
- Nagy megterhelésnél elérhet 8400 J/h értéket is

# A FIZIKÁLIS VIZSGÁLAT BIOFIZIKAI ALAPJAI

# Fizikális vizsgálat

- Megtekintés (inspectio)
- Tapintás (palpatio)
- Kopogtatás (percussio)
- Hallgatózás (auscultatio)

# Megtekintés (Inspectio)

## **Mi ez?**

A beteg vizuális vizsgálata

## **Mit vizualizálunk?**

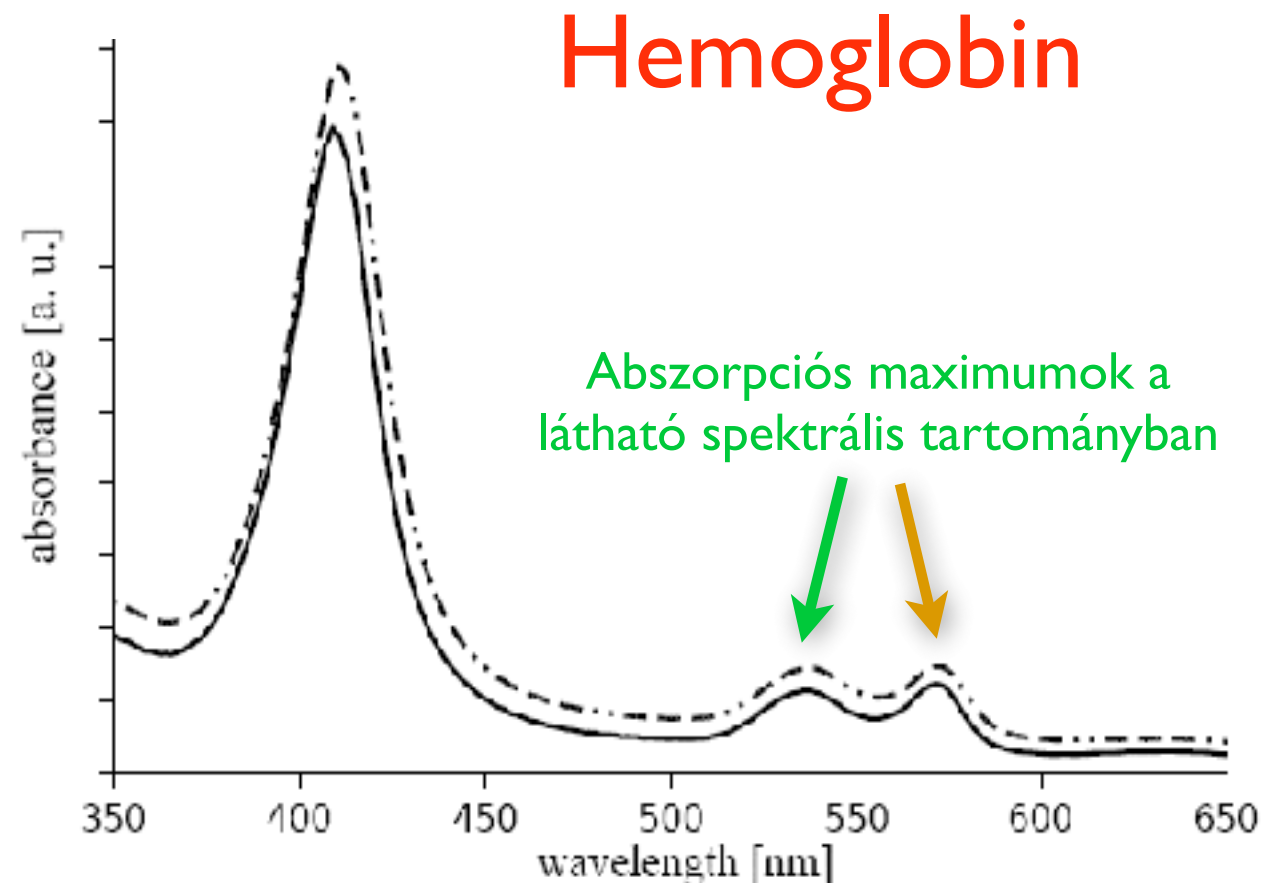
Viselkedés, morfológia, szerkezet, ***szín***

## **Kapcsolat a biofizikával:**

Abszorpciós spektroszkópia



# Fényabszorpció



$$J = J_0 e^{-\mu x}$$

$$\lg \frac{J_0}{J} = \mu x \lg e$$

$$\lg \frac{J_0}{J} \approx \mu$$

abszorbancia, optikai sűrűség

$$\lg \frac{J_0}{J} = \varepsilon_\lambda c x$$

Lambert-Beer törvény

$\varepsilon_\lambda$  = moláris extinkciós együttható

c = koncentráció

# Példák



Cyanosis (plazma  
dezoxihemoglobin  
megemelkedett)



Icterus (sárgaság,  
hyperbilirubinaemia)



Erythema  
(bőrpír)

# Tapintás (palpatio)

## **Mi ez?**

A beteg vizsgálata közvetlen, kézzel történő tapogatás révén

## **Mit tapintunk?**

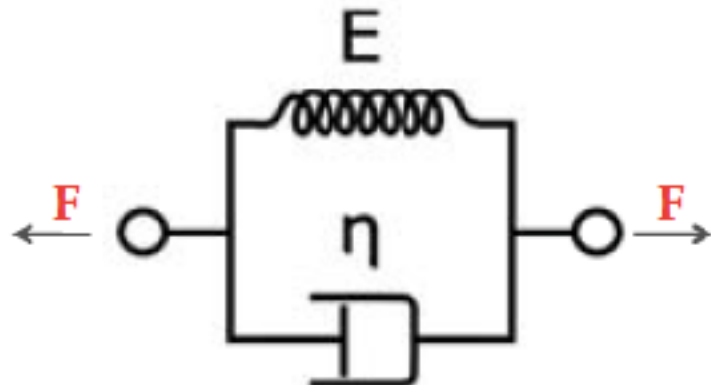
Méret, alak, lokalizáció, ***rugalmasság, viszkozitás***

## **Kapcsolat a biofizikával:**

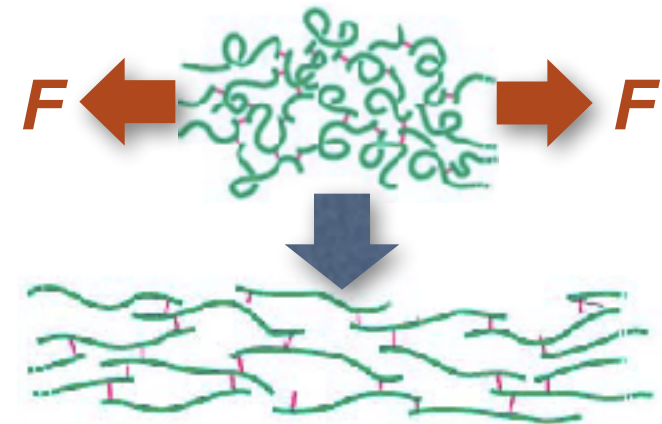
Biomechanika

# Viszkoelaszticitás

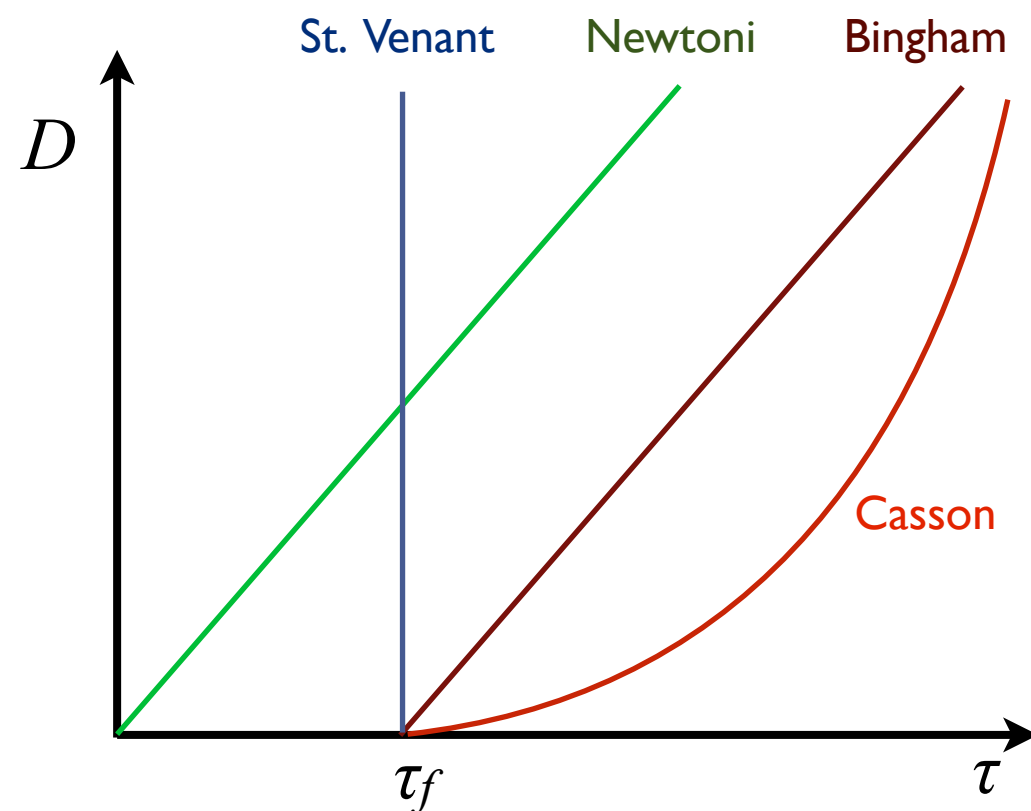
Rugó-dugattyú model



Egyszerűsített mechanizmus



Sebesség-grádiens a nyírófeszültség függvényében  
newtoni és nem-newtoni folyadékokban



Példa: oedema (ujjbenyomatot tartó,  
tésztatapintat)



# Kopogtatás (percussio)

## **Mi ez?**

A beteg vizsgálata éles, rövid, lokális ütések, koppantások segítségével

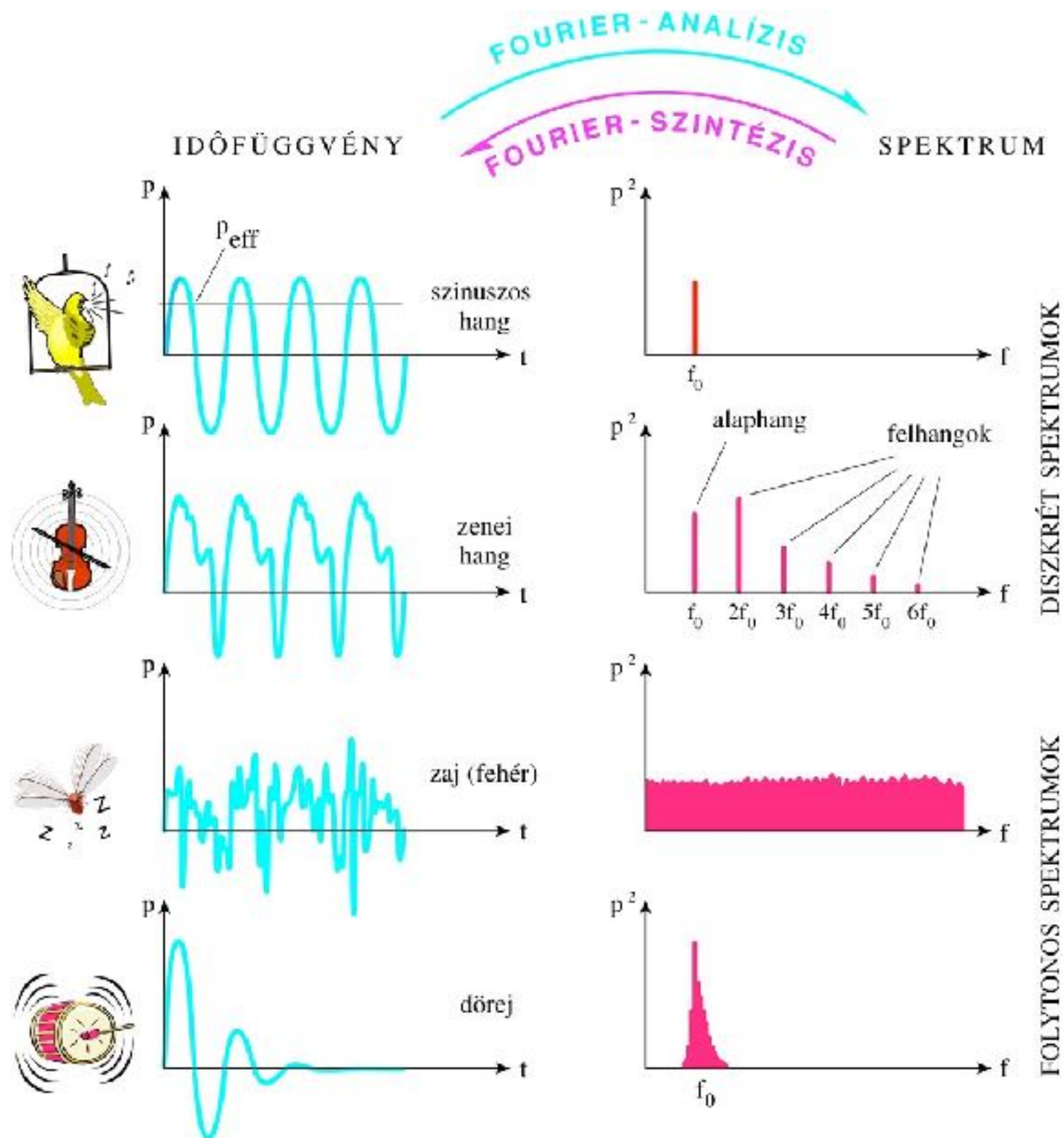
## **Mit kopogtatunk?**

Anyagi tartalom, alak, határok

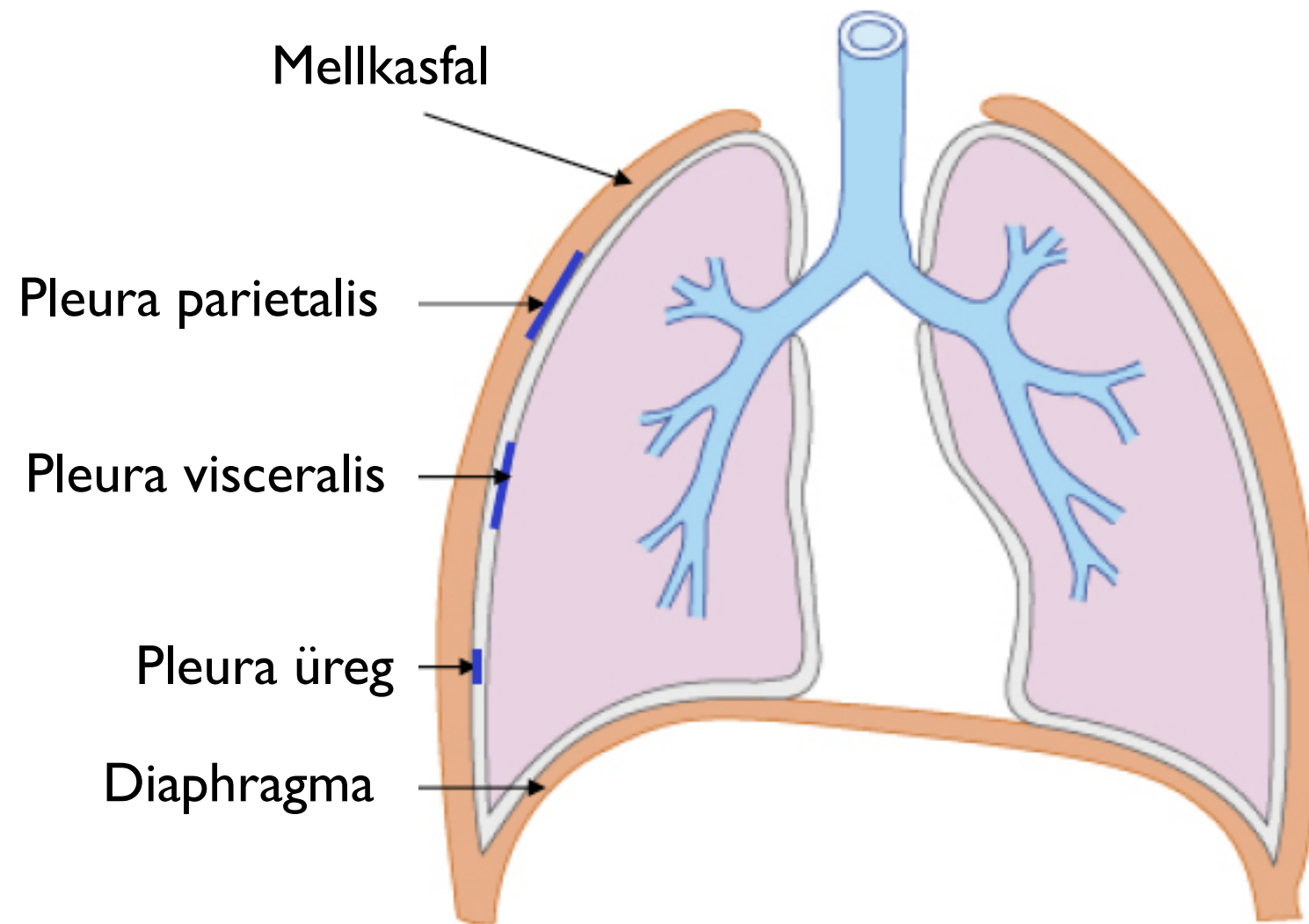
## **Kapcsolat a biofizikával:**

Hang generálása, terjedése és detektálása

# Hangok és spektrumaik



# A légzőrendszer mint doboz



1. Tompa (izom, máj)
2. Éles nem dobos (tüdő)
3. Dobos (üreg)

A rekesz, szív, máj (és más parenchymás szervek) határait detektálhatjuk kopogtatással.

# Hallgatózás (auscultatio)

## **Mi ez?**

Beteg vizsgálata a benne keletkezett hangok és zörejek meghallgatásával (sztetoszkóppal)

## **Mit hallgatunk?**

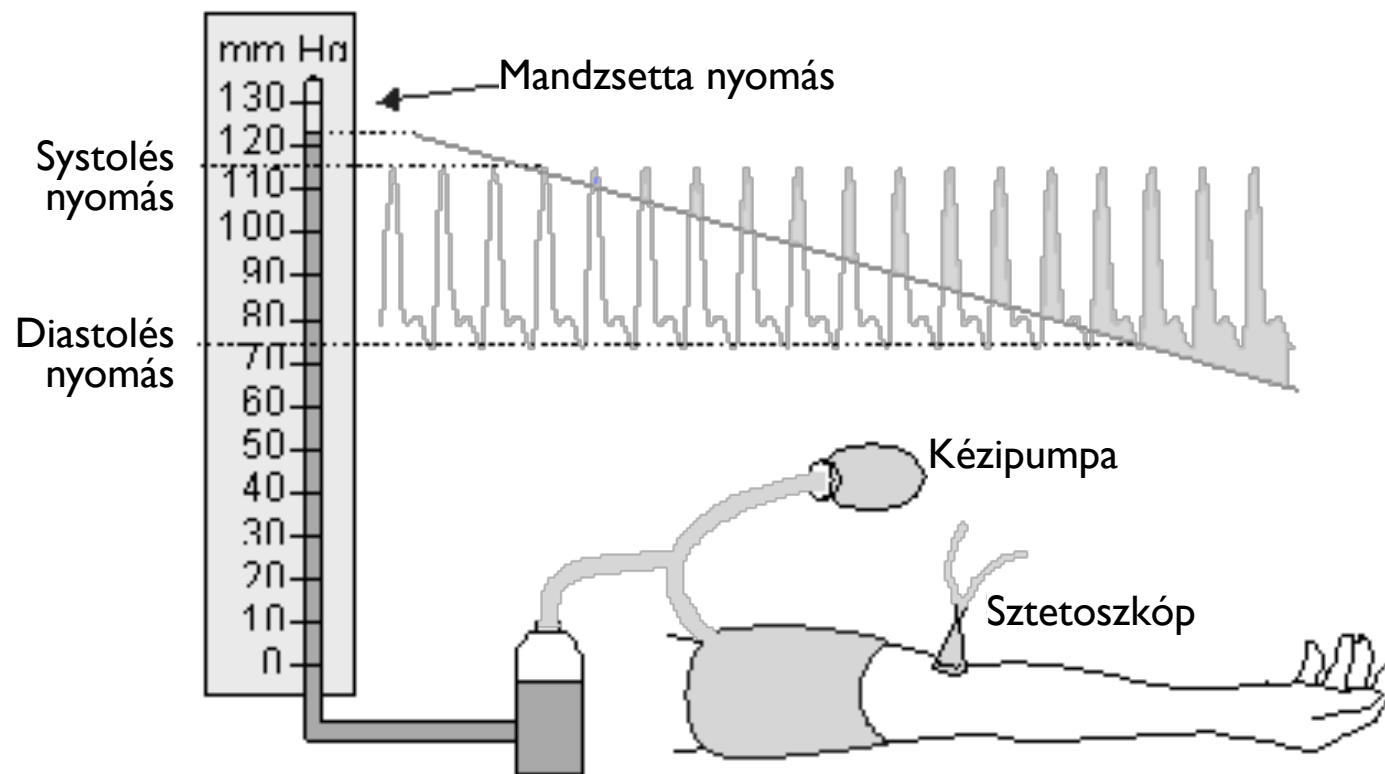
Hangosság, hangmagasság, hangszín, időtartam, időbeli változás (ritmus)

## **Kapcsolat a biofizikával:**

Hang generálása és terjedése, folyadékáramlás, turbulencia



# Korotkow-féle hang



1. toppanás
2. surranás
3. koppanás
4. tompulás

## Reynolds-szám:

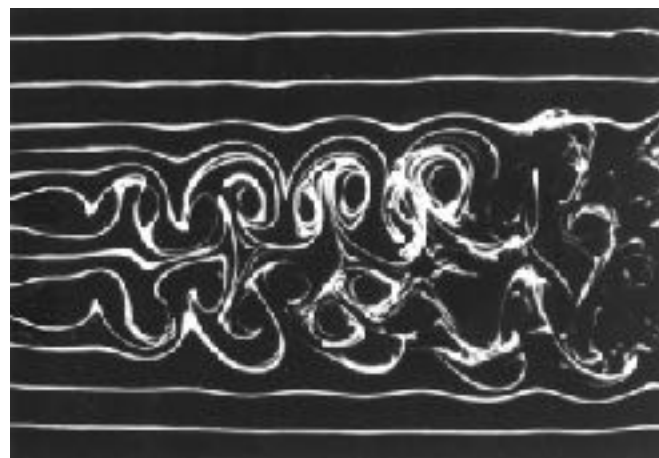
$$R = \frac{vr\rho}{\eta}$$

$v$ =áramlási sebesség (m/s)

$r$ =cső sugara (m)

$\rho$ =sűrűség (kg/m<sup>3</sup>)

$\eta$ =viszkozitás (Ns/m<sup>2</sup>)



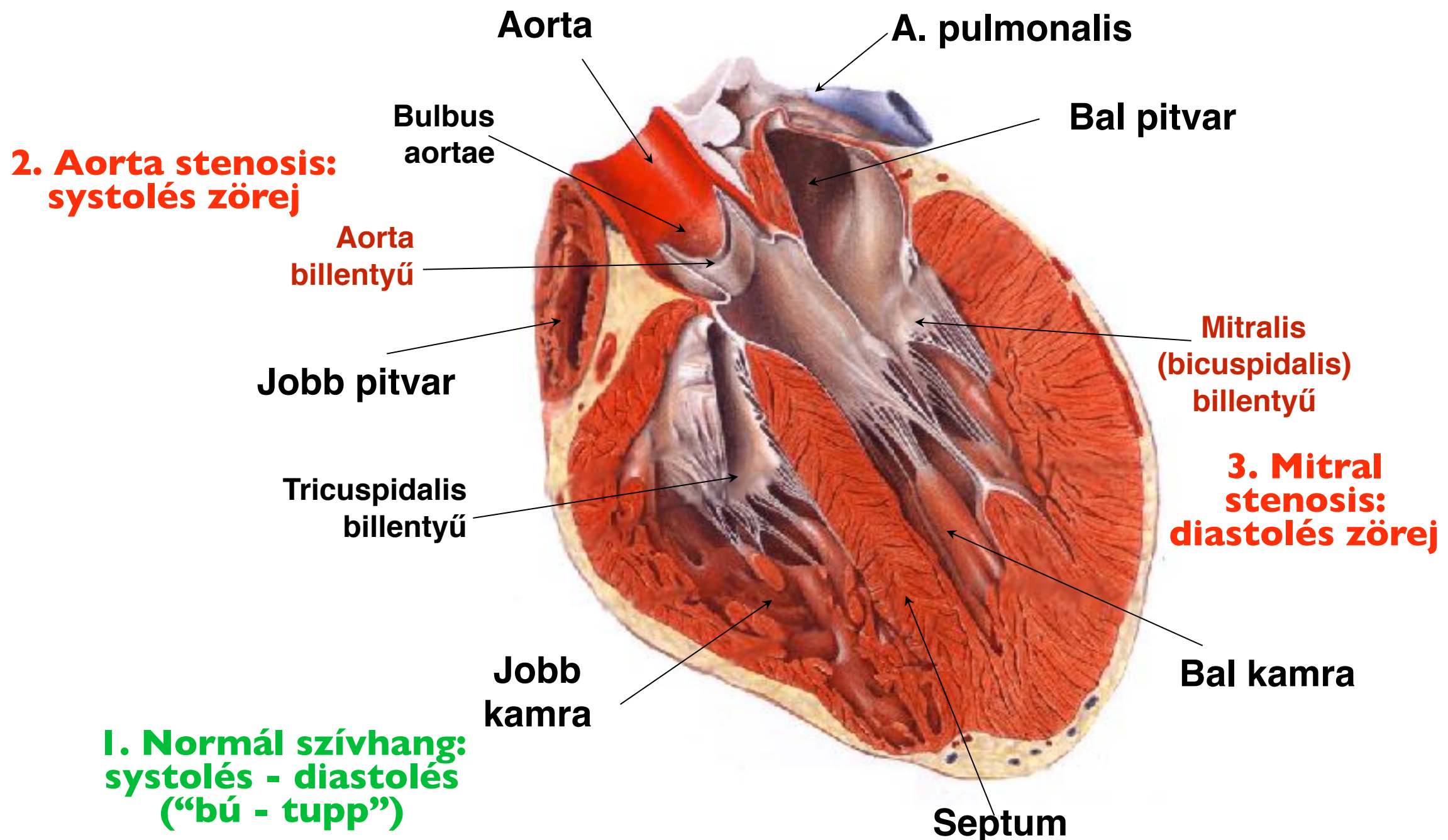
Turbulens áramlás ( $R > \sim 1160$ )  
hangeffektussal jár

- Ér szűkítése mandzsettával - áramlási sebesség megnő a kontinuitási egyenlet alapján
- Ha az áramlási sebesség meghaladja a kritikus sebességet, turbulencia és következményes hangeffektus lép fel

# Szívhangok és zörejek

**Forrás:** mechanikai vibráció (pl. billentyű záródás), turbulens áramlás

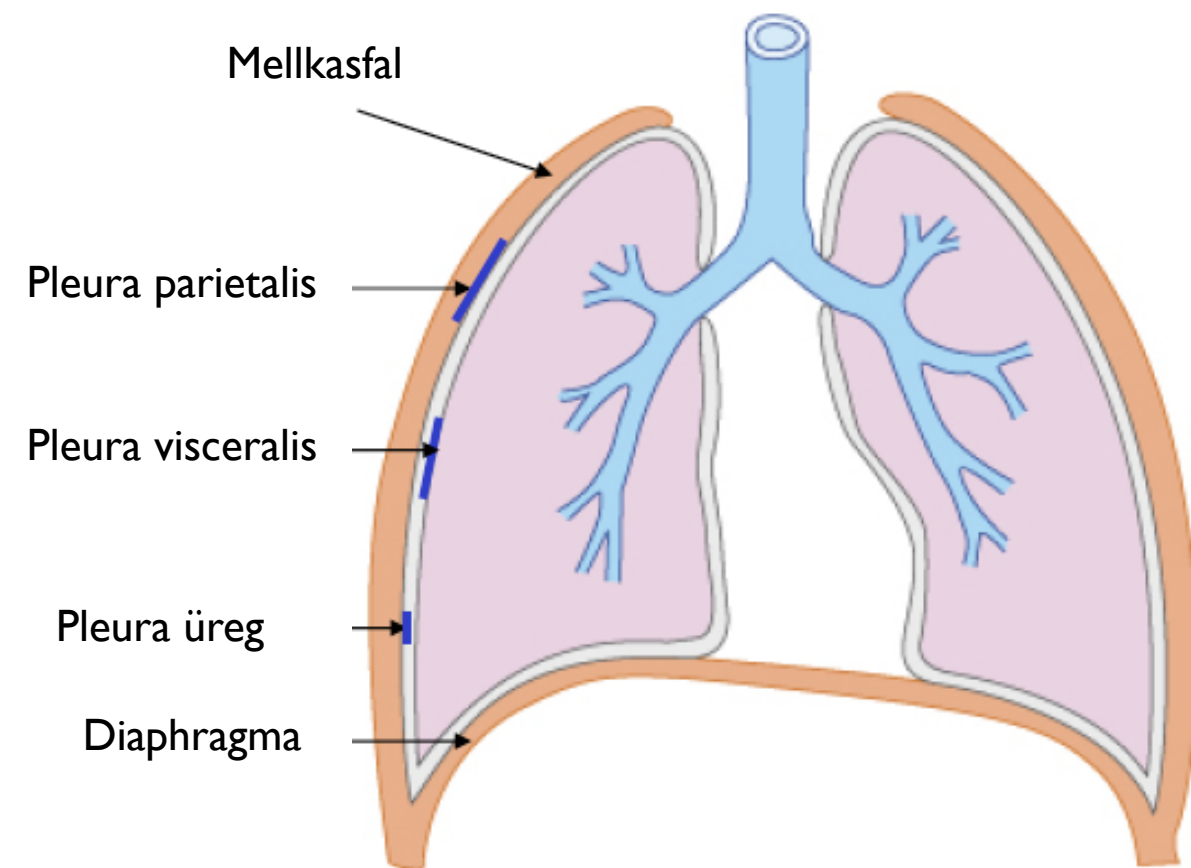
**Vezetődés:** vérrel telt üregek irányába



# Légzési hangok

## Forrás és mechanizmus:

- 1.mechanikai vibráció (dörzsölés - zaj)
- 2.mechanikai rezonancia (orgonasíp - “zenei” hang)
- 3.buborékáramlás folyadékban



**1. pleurális dörzszörej**  
(pleuralemezek közötti súrlódás)

Tracheobronchialis hangok

## Vezetési zóna

Trachea

Bronchusok

Bronchiolusok

Bronchioli terminales

**2. sípolás, stridor**  
(légúti obstrukció)

## Gázcsere zóna

Bronchioli respiratori

Ductus alveolares

Alveolusok

Vesicularis hangok

**3. szörcszörej**  
(apró-, közép-, nagyhólyagú;  
csöveken történő átbuborékolás)  
**-crepitatio**  
(alveolus nyílás-záródás)

