

A LÉGZÉS BIOFIZIKÁJA

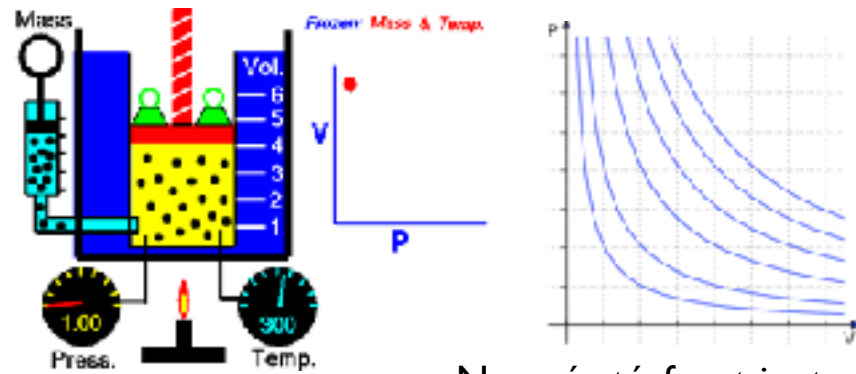
KELLERMAYER MIKLÓS

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 (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]

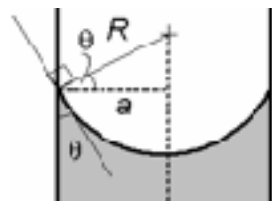
3. Henry-törvény (William Henry, 1803): Állandó hőmérsékleten egy adott gáz folyadékban oldott mennyisége egyenesen arányos ugyanazon, a folyadékban egyensúlyban levő gáz parciális nyomásával.

$$p = k_H c$$

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

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

Egy vékony, kör-
keresztmetszetű csőben:

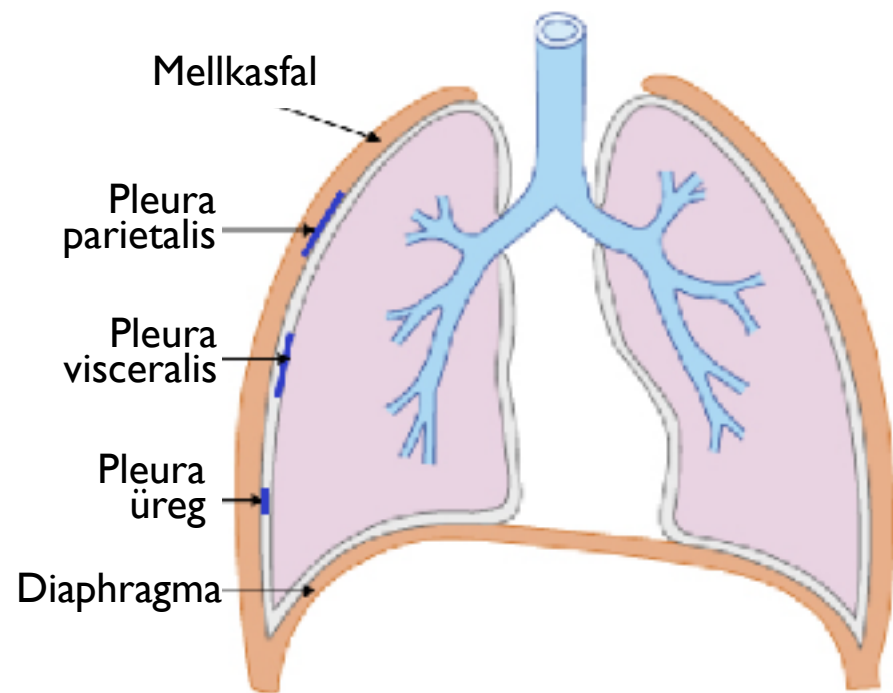


$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R}$$

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

Egyszerűsített légzőrendszer

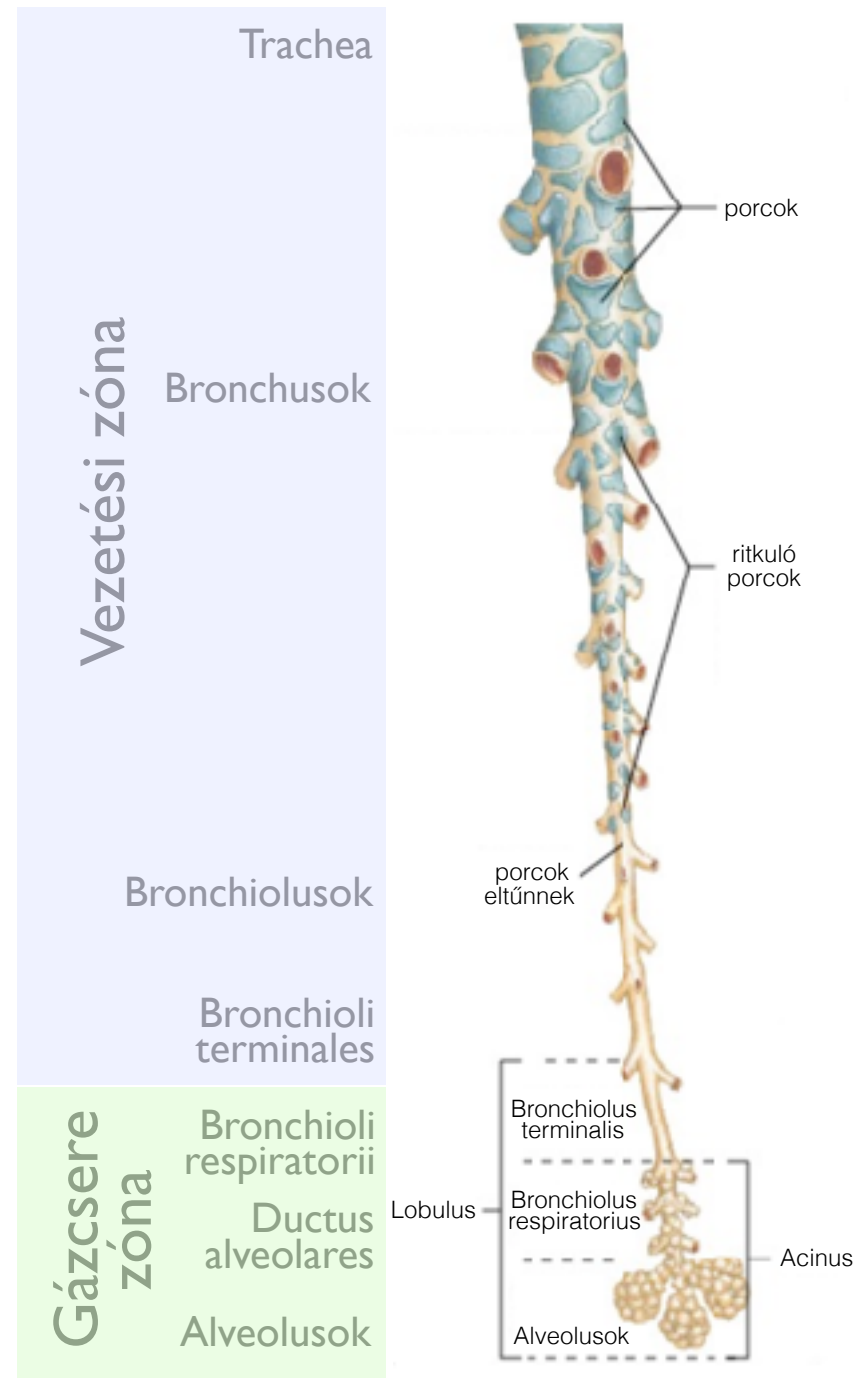
1. Doboz



- 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

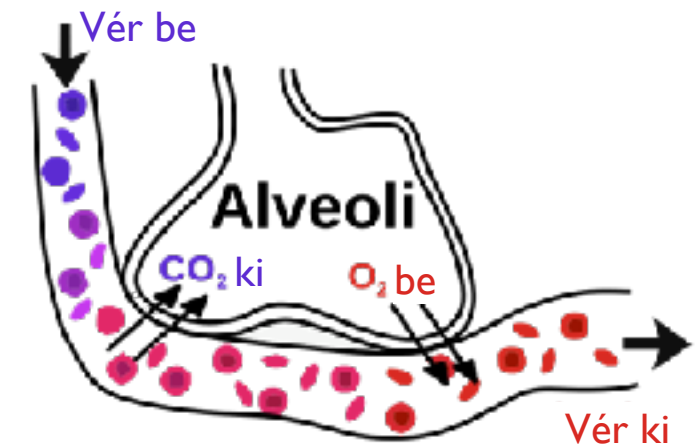
• **Pneumothorax!**

2. Csőrendszer



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

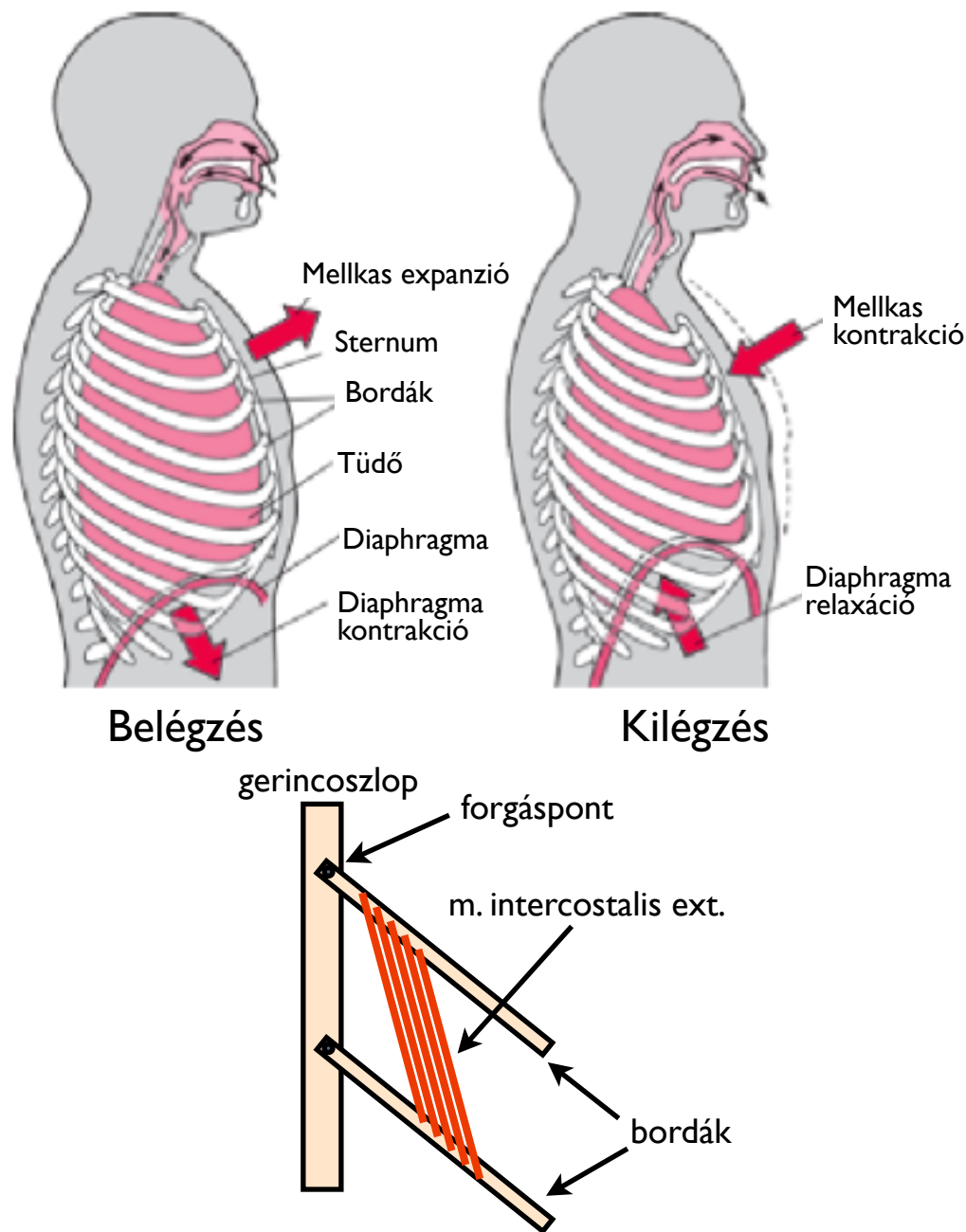
3. Gázcsere felület



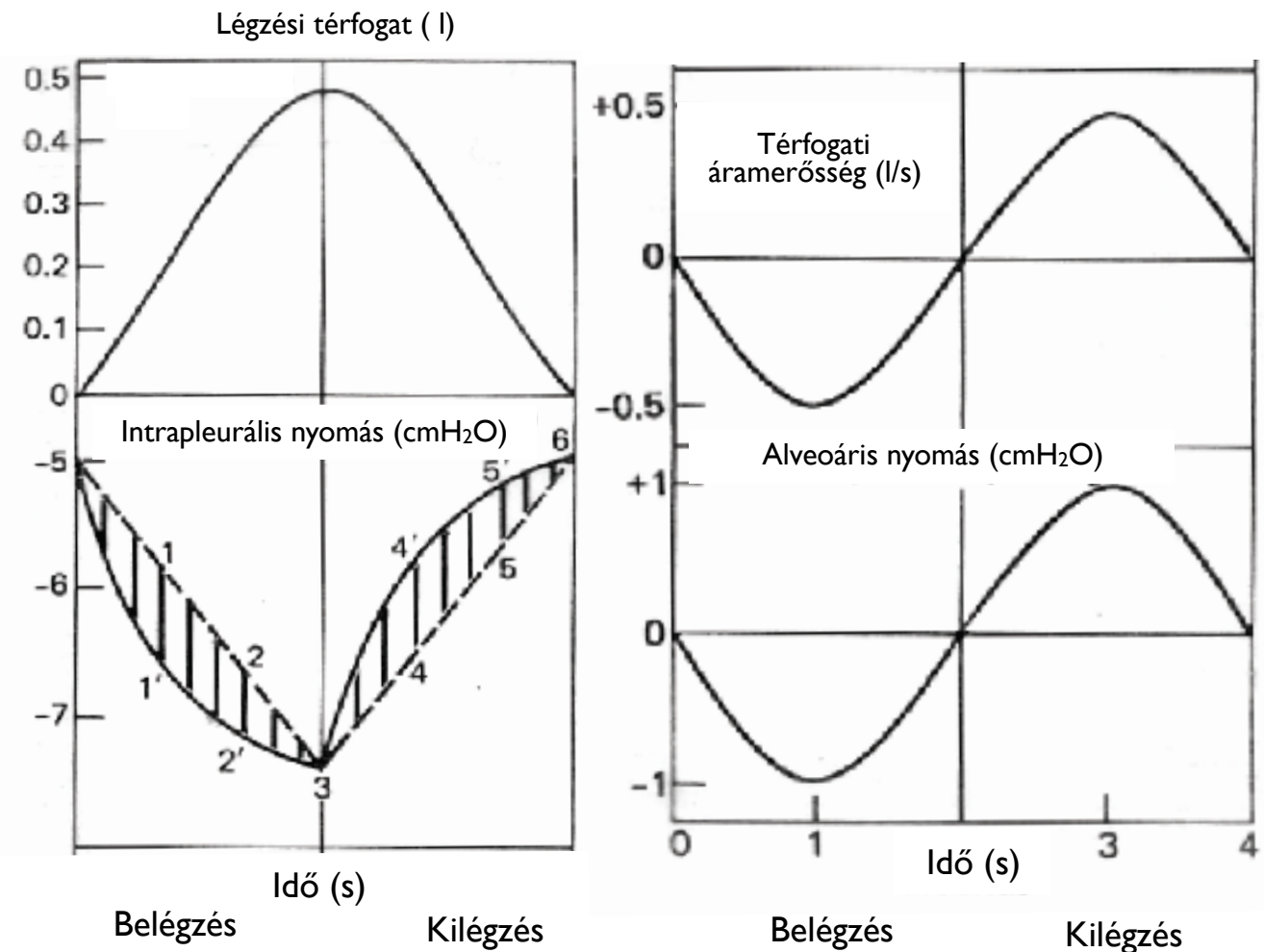
- Alveolus: nyitott termodinamikai rendszer
- A gázcsere felületét alakítják ki.
- Számuk: ~300 millió (N.B.: $2^{25}=33,554,432$)
- Méret ($d \sim 200 \mu m$), felület ($5 \times 10^{-7} m^2/\text{alveolus}$)
- Teljes alveoláris felület: $\sim 100 m^2$
- Alveolus fal ($\sim 0.5 \mu m$): alveolaris epithelium ($\sim 0.2 \mu m$) 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



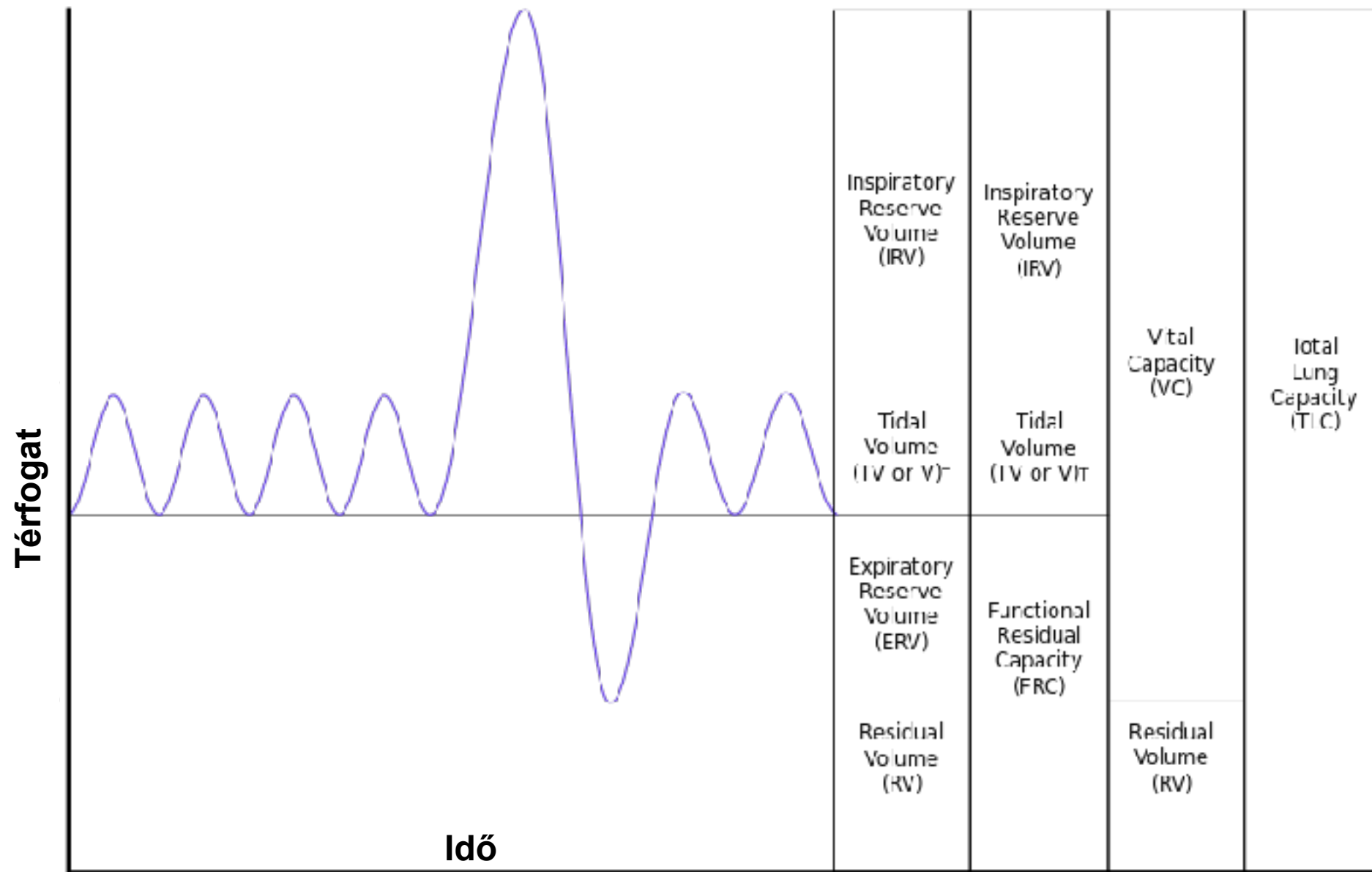
2. Fizikai paraméterek változásai



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

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

Légzési térfogatok és kapacitások

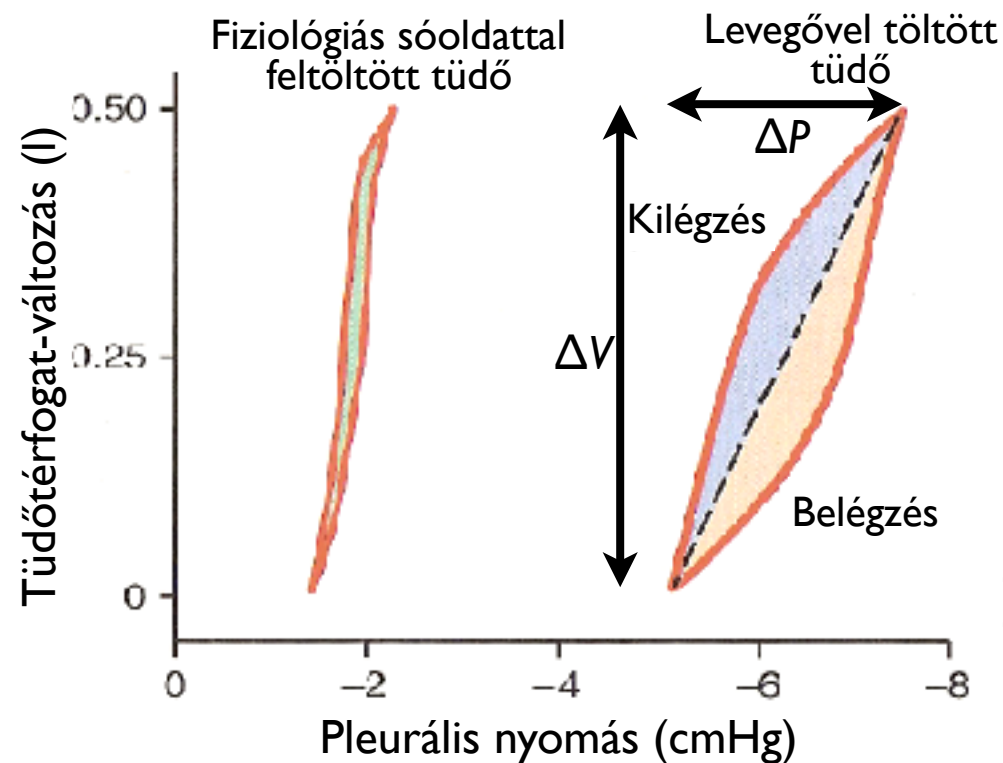


Térfogat (l)	Férfi	Nő
Belégzési rezerv	3.3	1.9
Respirációs térfogat ("tidal volume")	0.5	0.5
Kilégzési rezerv	1	0.7
Residuális térfogat	1.2	1.1
Vitálkapacitás	4.8	3.1
Funkcionális reziduális kapacitás	2.2	1.8
Teljes tüdőkapacitás	6	4.2

Kapacitás: térfogatok összege

A légzési ciklus eseményei

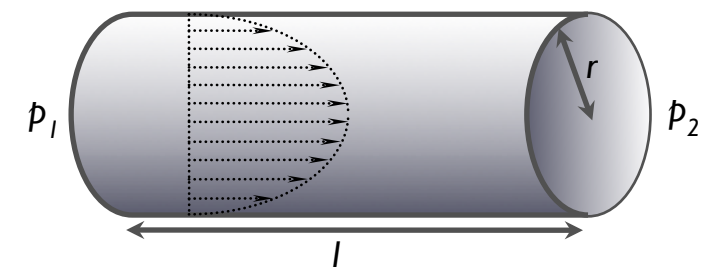
I. A tüdő ciklikusan tágul-összehúzódik



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



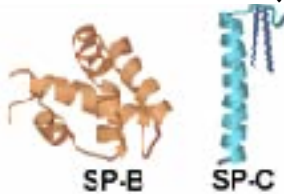
Hagen-Poiseuille törvény

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

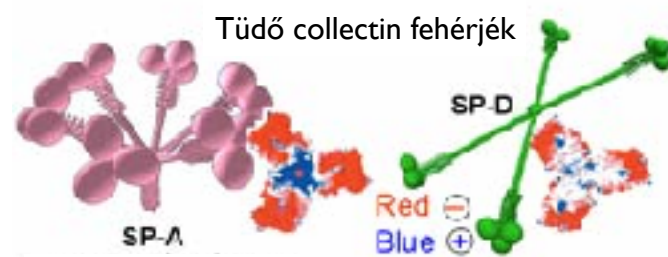
V = térfogat
 t = idő
 $(V/t = Q = \text{térfogati áramerősség})$
 r = cső sugara
 η = viszkozitás
 p = nyomás
 l = cső hossza
 $(dp/dl = \text{nyomásgradiens, fenntartója } p_1 - p_2)$

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

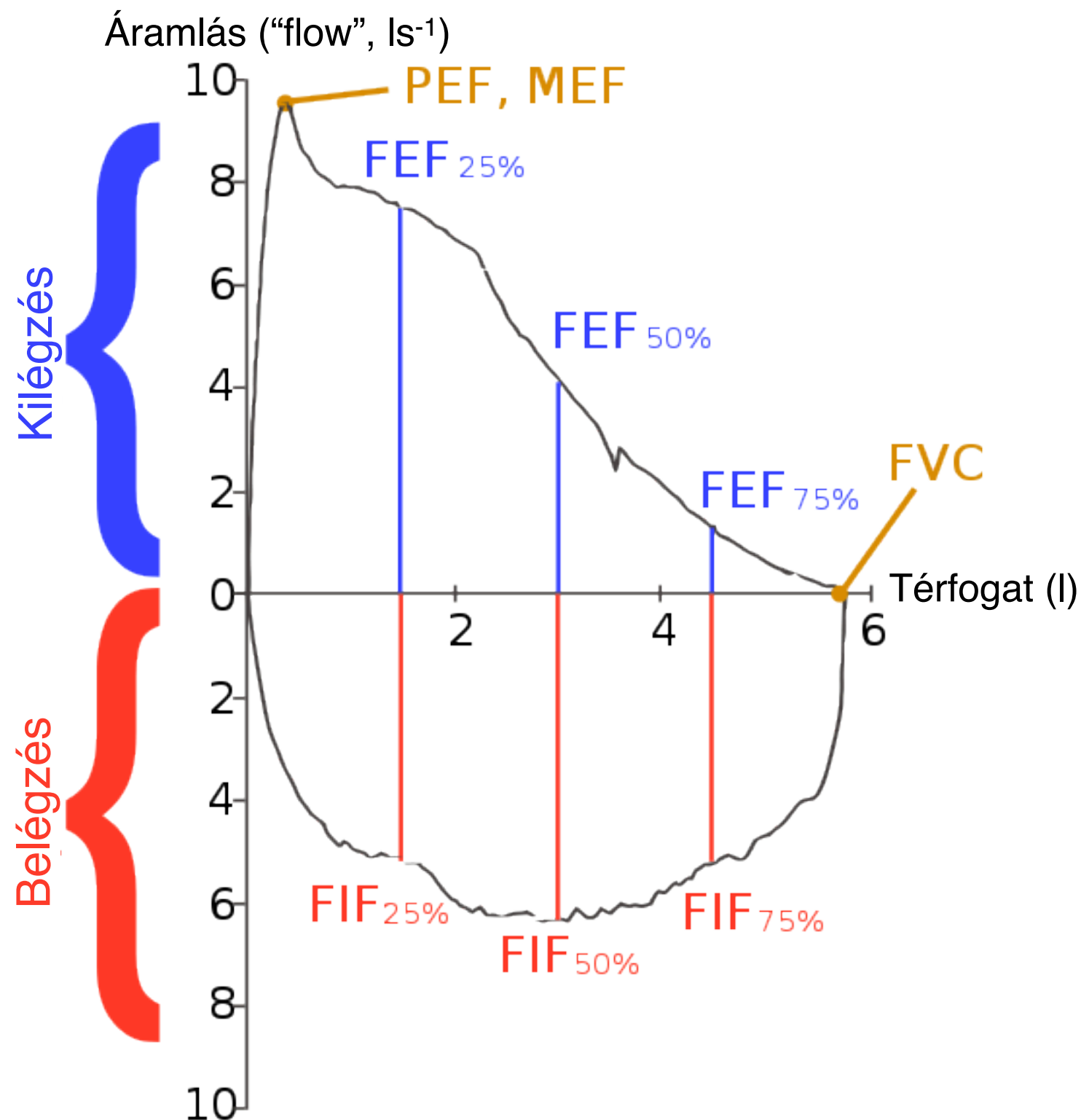
Kis hidrofób fehérjék



Tüdő collectin fehérjék



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

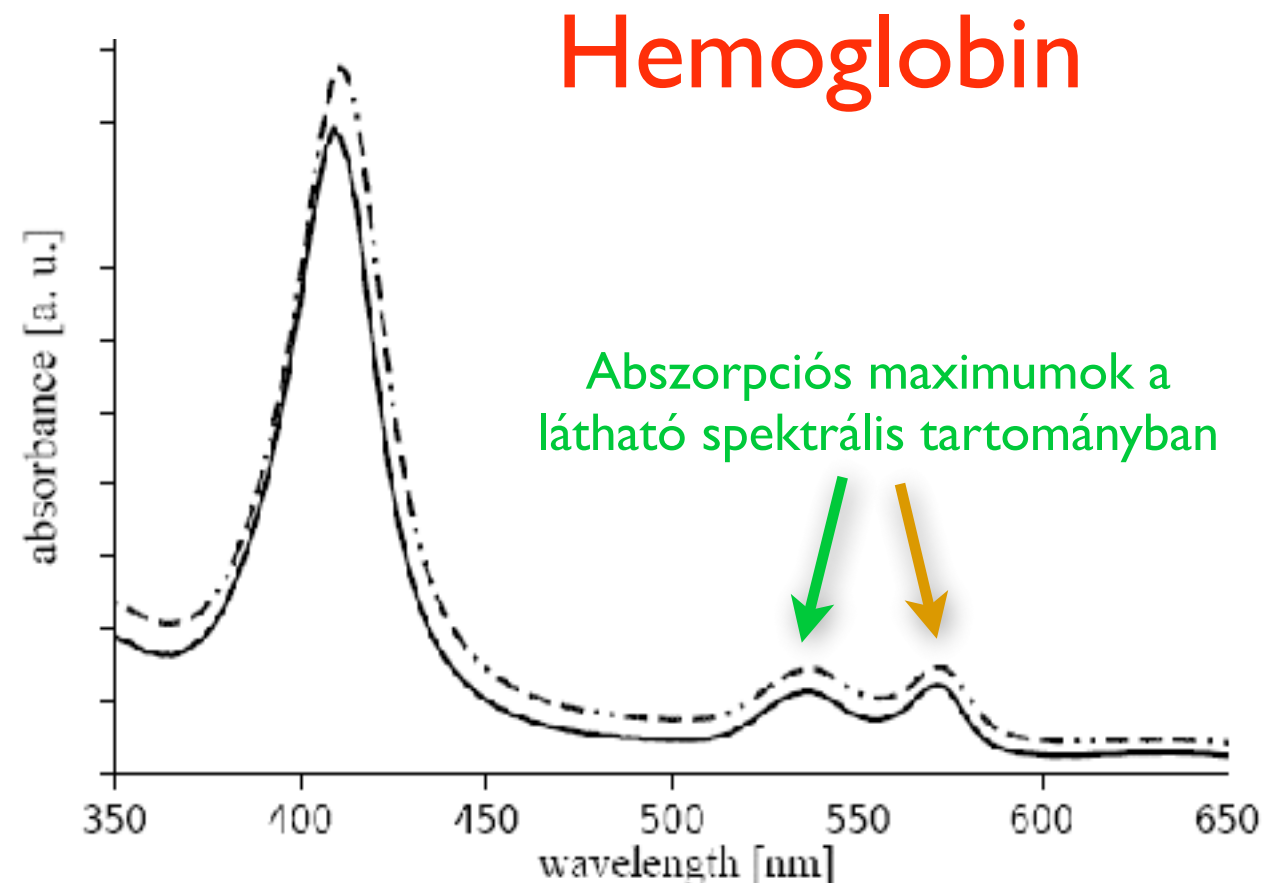
Mit vizualizálunk?

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

ε_λ = 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?

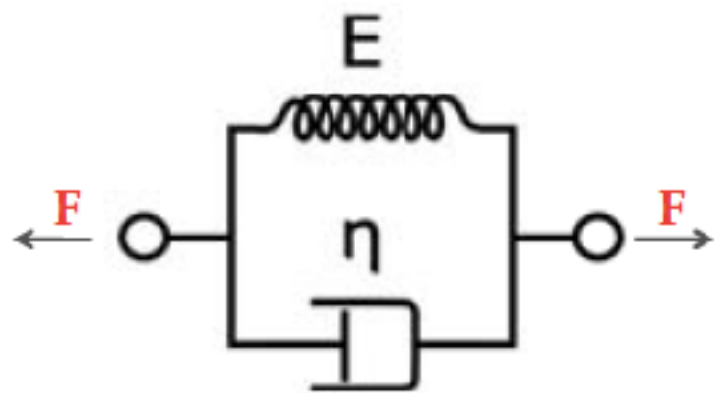
Méret, alak, lokalizáció, ***rugalmasság, viszkozitás***

Kapcsolat a biofizikával:

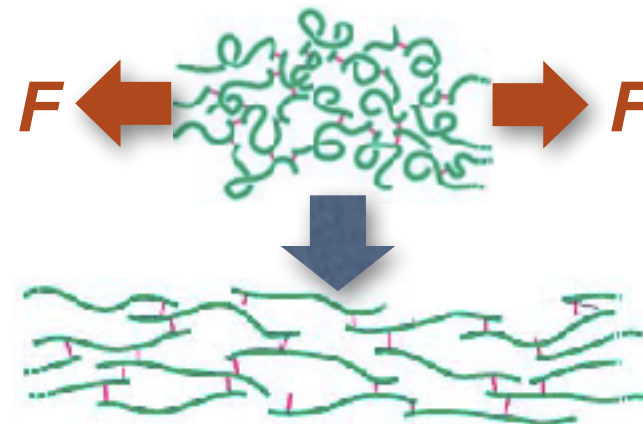
Biomechanika

Viszkoelaszticitás

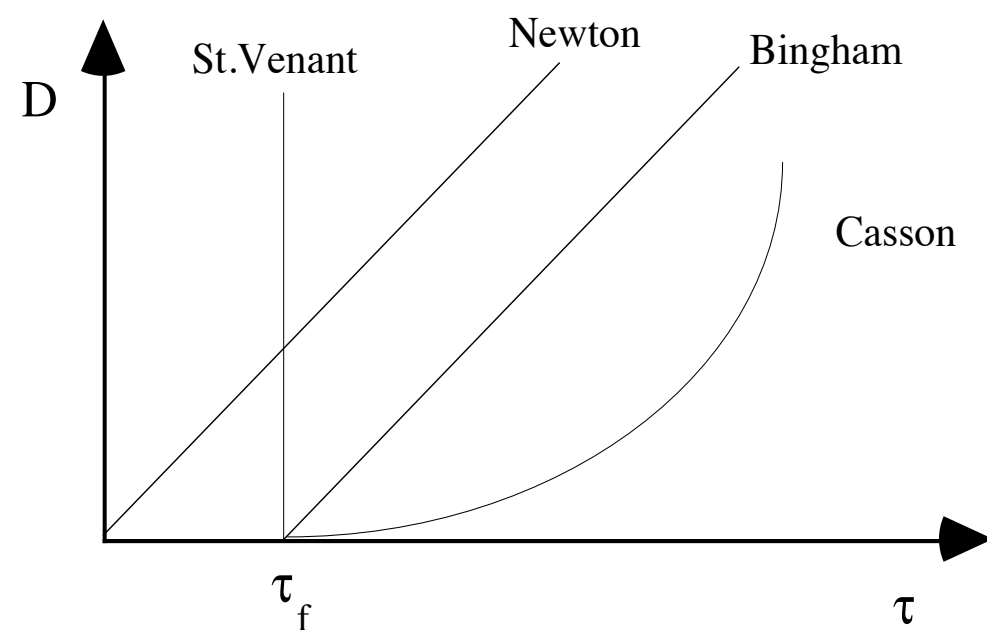
Rugó-dugattyú model



Egyszerűsített mechanizmus



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



Példa: oedema (ujjbenyomatot tartó,
tésztaapintat)

Kopogtatás (percussio)

Mi ez?

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

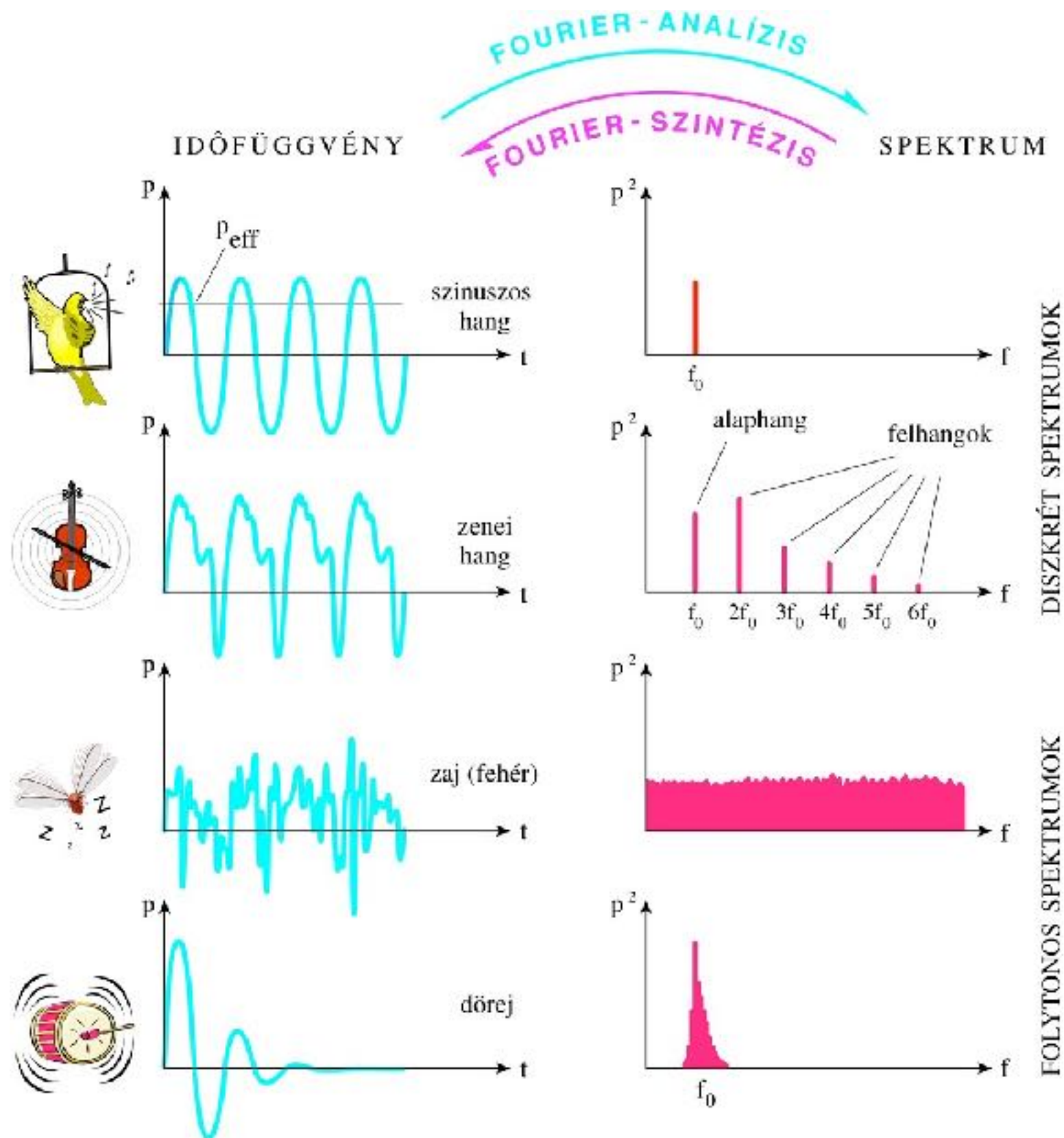
Mit kopogtatunk?

Anyagi tartalom, alak, határok

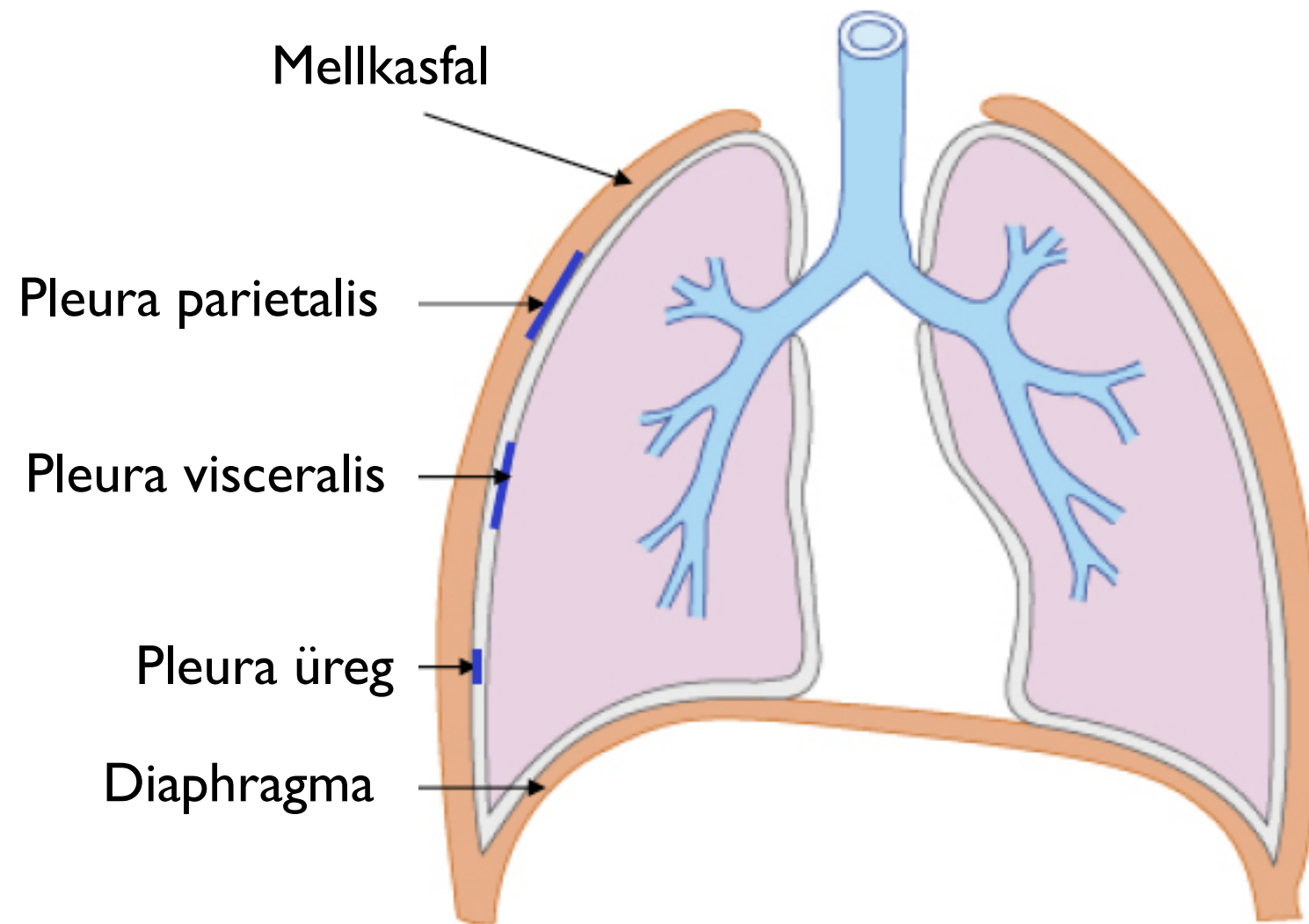
Kapcsolat a biofizikával:

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)

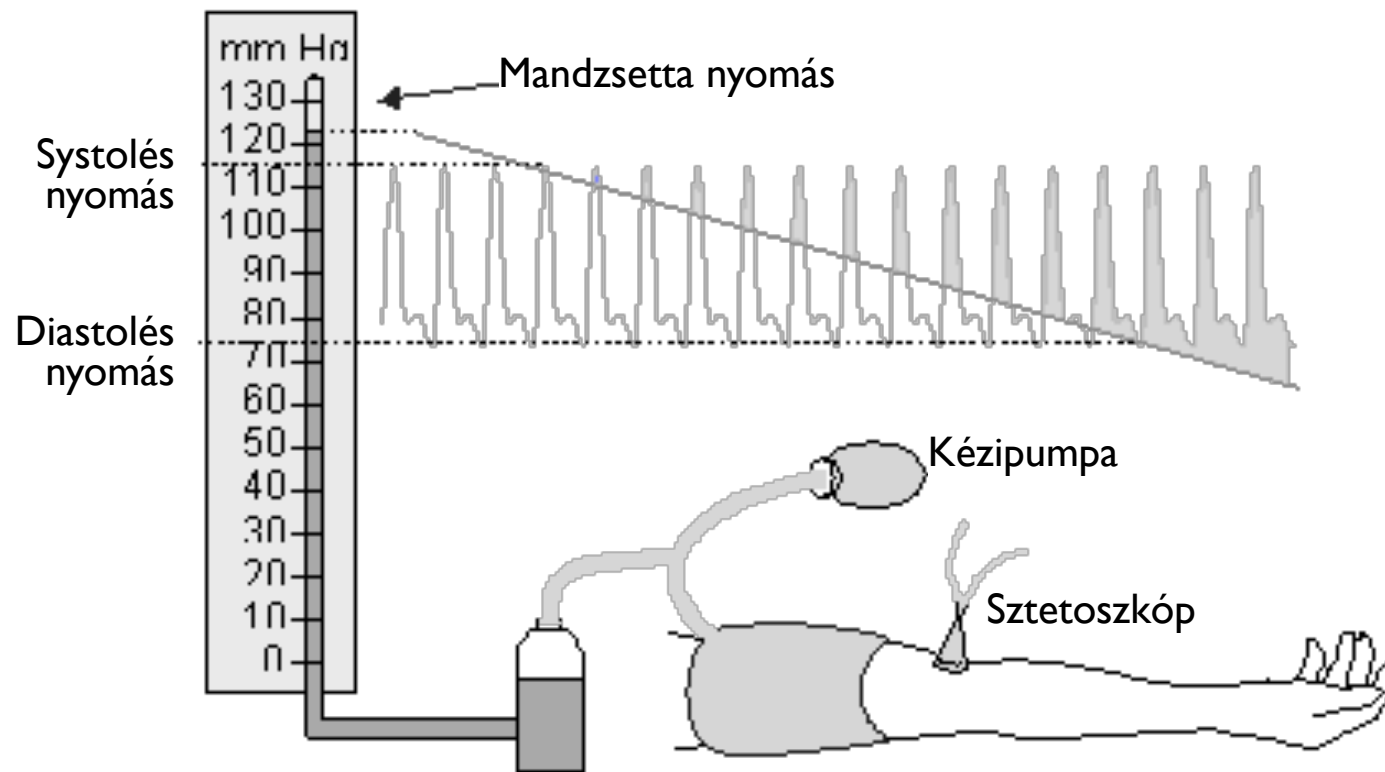
Mit hallgatunk?

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)

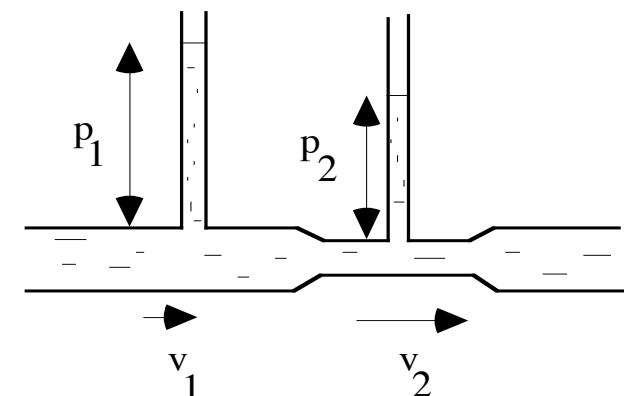
ρ =sűrűség (kg/m³)

η =viszkozitás (Ns/m²)



Turbulens áramlás ($R > \sim 1000$)
hangeffektussal jár

Bernoulli-törvény

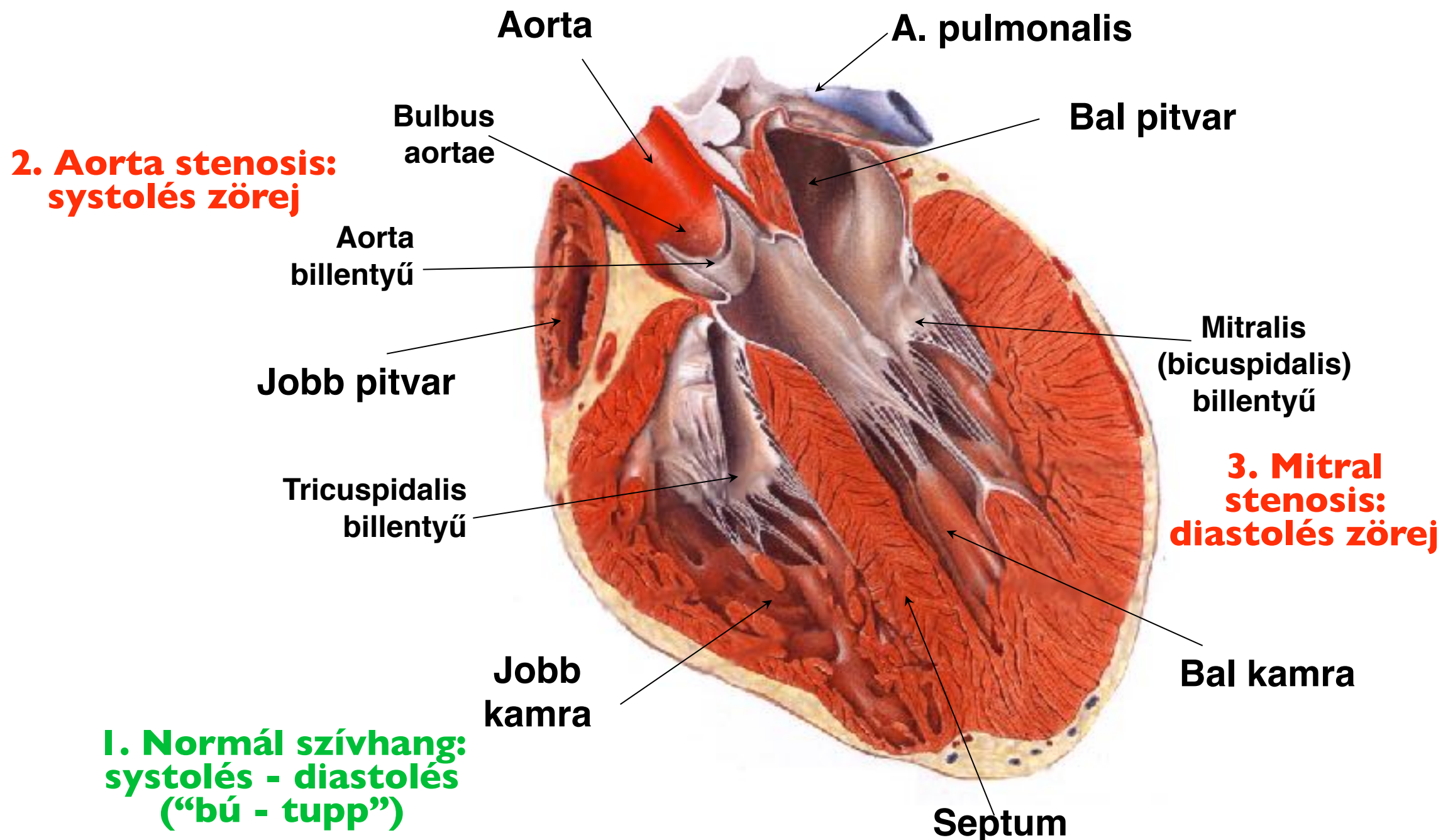


A sztatikus és dinamikus nyomások közötti fluktuáció az *a. brachiális* gyors záródásával-nyílásával jár.

Szívhangok és zörejek

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

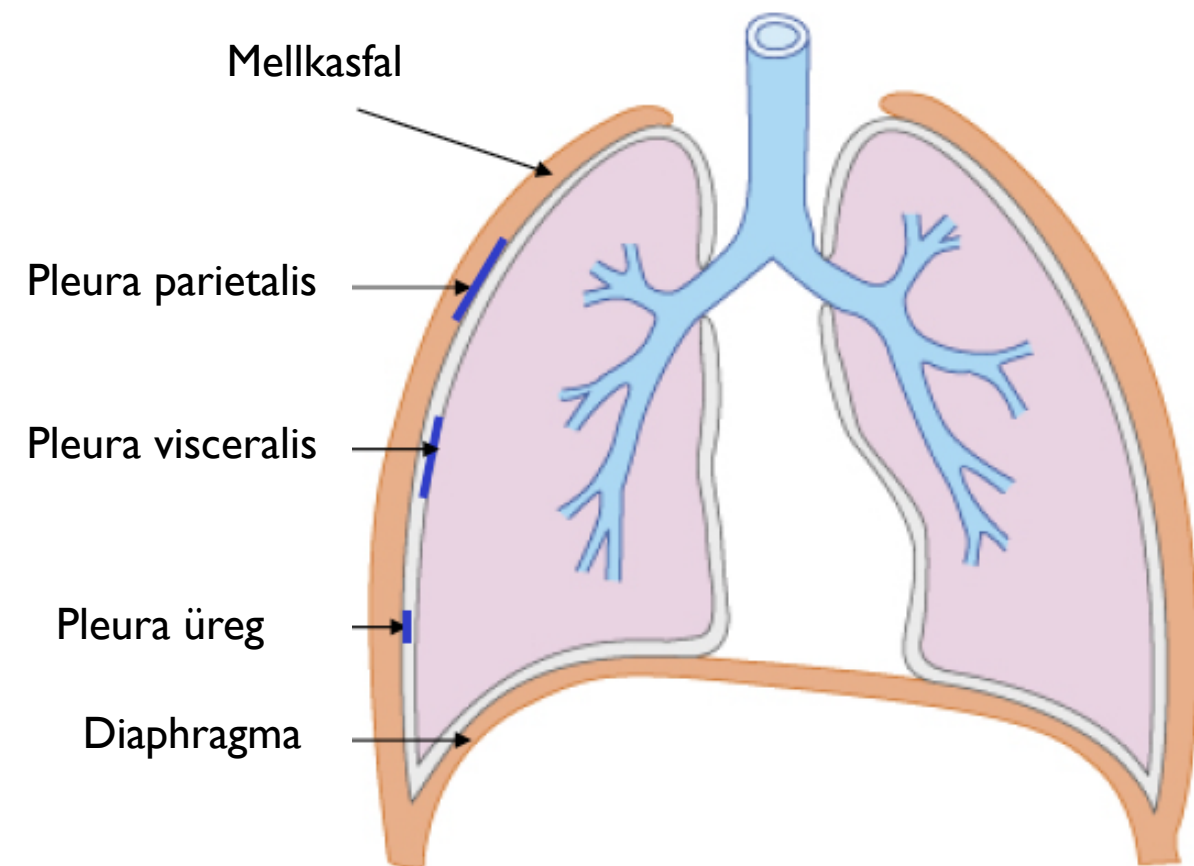
Vezetődés: vérrel telt üregek irányába



Légzési hangok

Forrás:

- 1.mechanikai vibráció (dörzsölés),
- 2.mechanikai rezonancia (orgonasíp),
- 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)

