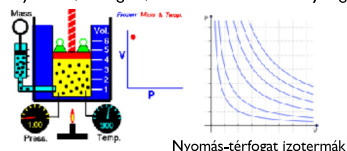


# A LÉGZÉS BIOFIZIKÁJA

KELLERMAYER MIKLÓS

## 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.



$$PV = nRT$$

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

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

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

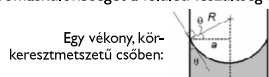
$p_i$  =  $i$ -edik gáz parciális nyomása  
 $n$  = gázok száma a keverékben  
 $[p = P_{\text{total}} \times r; r = \text{gáz részaránya a keverékben}]$

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

$$p = k_H c$$

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

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



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

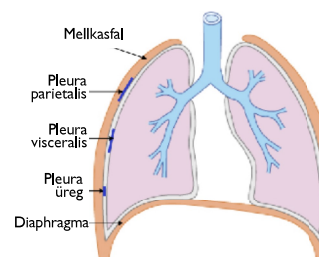
$p$  = nyomás ( $\text{Nm}^{-2}$ )  
 $\gamma$  = felületi feszültség ( $\text{Nm}^{-1}; \text{Jm}^{-2}$ )  
 $R$  = görbületi sugár (m)

## Légzésbiofizika története

- Aristoteles (300 BC): a légzés hűti a szívet és a vért
- Galenus (170 BC): a légzés valamit hozzászít a vérhez ("spiritus vitalis")
- Leonardo da Vinci (1452-1519): a levegő felfrissülésétől elzárt kamrába zárt állatok elpusztulnak.
- Vesalius (1543): az emlőszállat 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)

## Egyszerűsített légzőrendszer

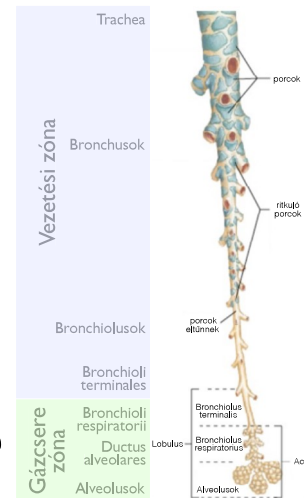
### 1. Doboz



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

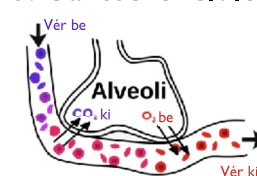
• **Pneumothorax!**

### 2. Csőrendszer



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

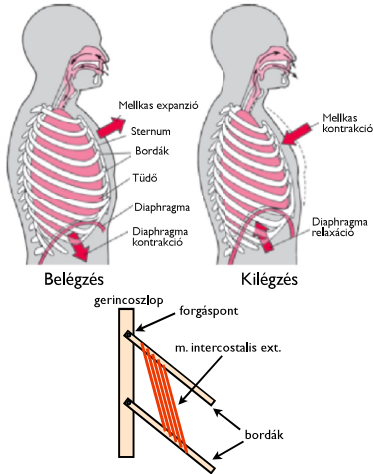
### 3. Gázcseres felület



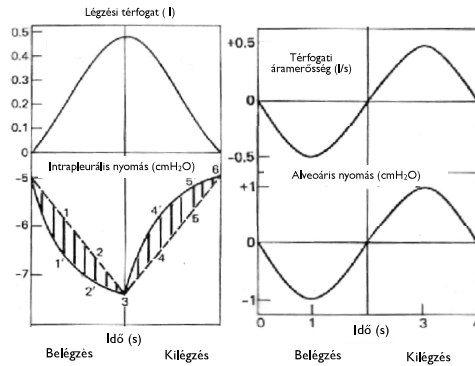
- Alveolus: nyitott termodinamikai rendszer
- A gázcseres felületét alakítják ki.
- Számuk: ~300 millió (N.B.:  $2^{25} = 33,554,432$ )
- Méret ( $d \sim 200 \mu\text{m}$ ), felület ( $5 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{alveolus}$ )
- Teljes alveoláris felület:  $\sim 100 \text{ m}^2$
- Alveolus fal ( $\sim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

# A légzési ciklus

## I. Mechanikai vezérlés



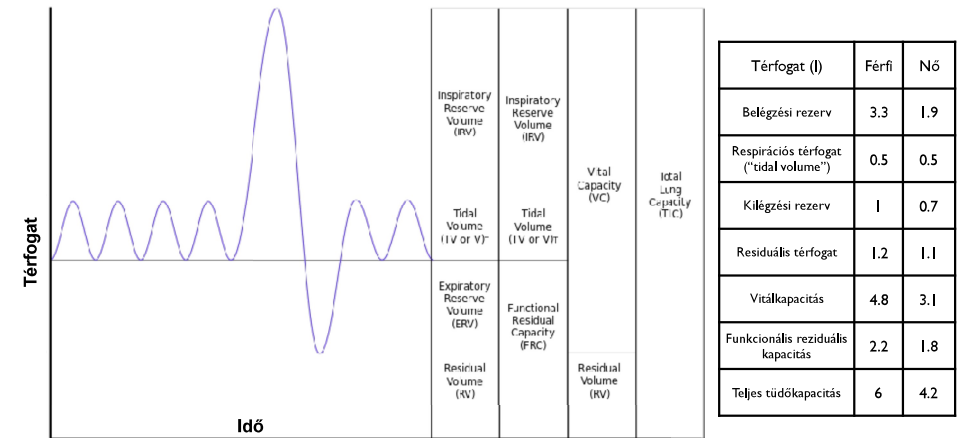
## 2. Fizikai paraméterek változásai



1 cmH<sub>2</sub>O = 0.1 kPa = 0.7 mmHg

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

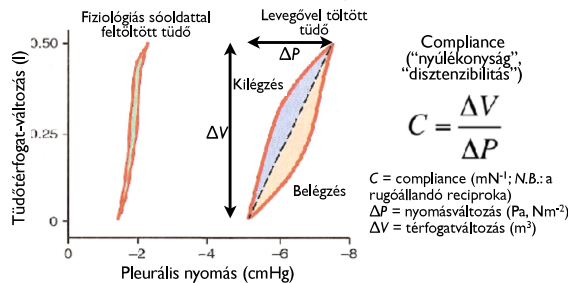
# Légzési térfogatok és kapacitások



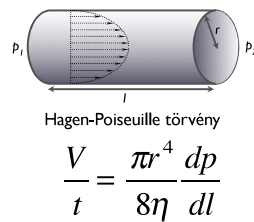
Kapacitás: térfogatok összege

# A légzési ciklus eseményei

## I. A tüdő ciklikusan tágul-összehúzódik

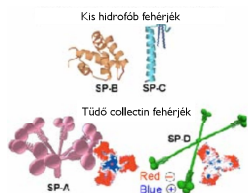


## 2. A légutakban gáz áramlik



V = térfogat  
t = idő  
(V/t = Q = térfogati áramerősség)  
r = cső sugara  
η = viszkozitás  
p = nyomás  
l = cső hossza  
(dp/dl = nyomásgradiens, fenntartója p<sub>1</sub>-p<sub>2</sub>)

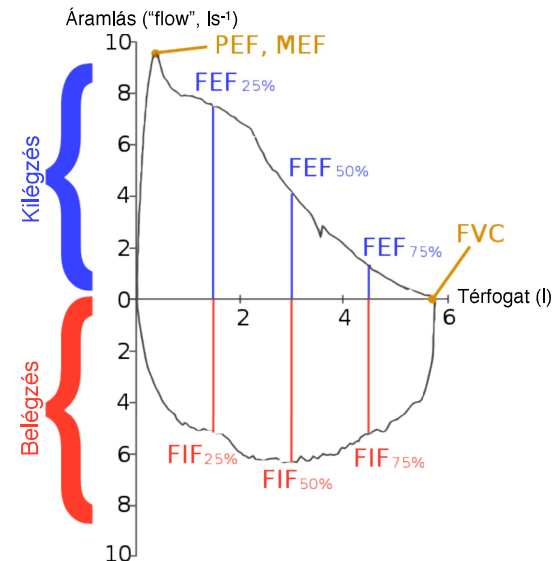
## Tüdő surfactant



- 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.).

- 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

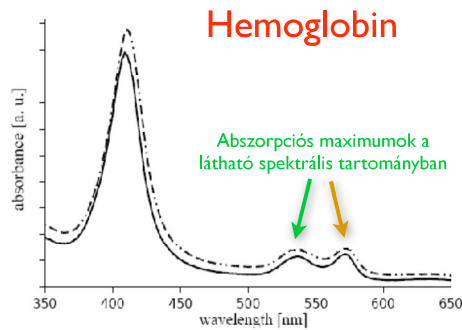
### **Mit vizualizálunk?**

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

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

Lambert-Beer törvény  
 $\epsilon_{\lambda}$  = moláris extinkciós együttható  
 $c$  = koncentráció

# Példák



Cyanosis (plazma deoxihemoglobin megemelkedett)



Icterus (sárgaság, hyperbilirubinaemia)



Erythema (bőrpír)

# Tapintás (palpatio)

## Mi ez?

A beteg vizsgálata közvetlen, kézzel történő tapogatás révén

## Mit tapintunk?

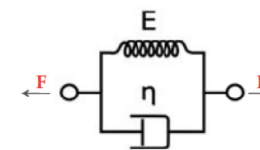
Méret, alak, lokalizáció, **rugalmasság**, **viszkozitás**

## Kapcsolat a biofizikával:

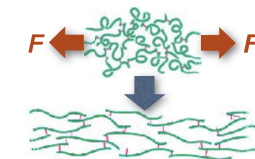
Biomechanika

# Viszkoelaszticitás

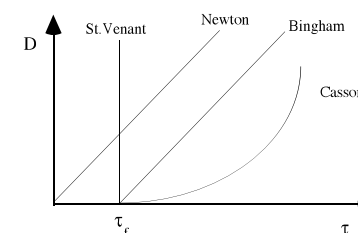
Rugó-dugattyú model



Egyszerűsített mechanizmus



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



Példa: oedema (ujjbenyomatot tartó, tésztapintat)

# Kopogtatás (percussio)

## Mi ez?

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

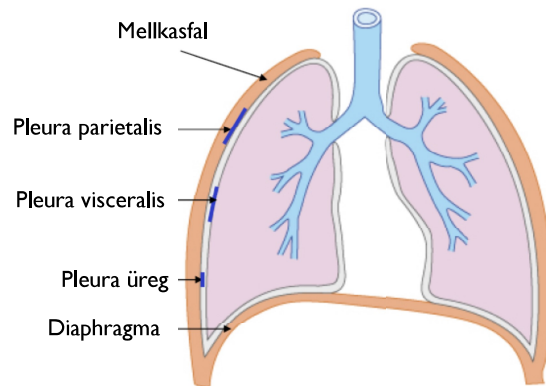
## Mit kopogtatunk?

Anyagi tartalom, alak, határok

## Kapcsolat a biofizikával:

Hang generálása, terjedése és detektálása

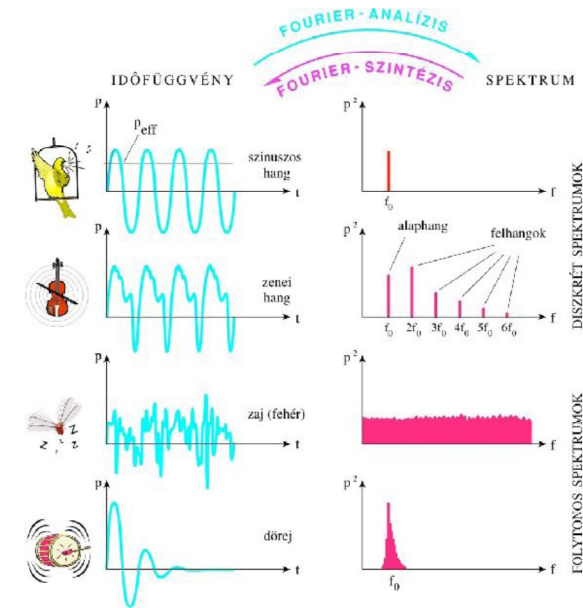
# A légzőrendszer mint doboz



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

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

# Hangok és spektrumaik



# Hallgatózás (auscultatio)

## Mi ez?

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

## Mit hallgatunk?

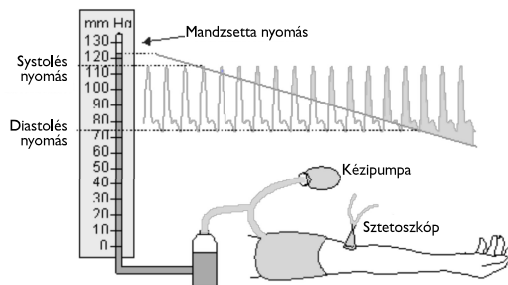
Hangosság, hangmagasság, hangszín, időtartam, időbeli változás (ritmus)

## Kapcsolat a biofizikával:

Hang generálása és terjedése, folyadékáramlás, turbulencia



# Korotkow-féle hang



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

Reynolds-szám:

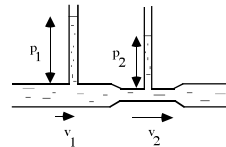
$$R = \frac{vr\rho}{\eta}$$

$v$ =áramlási sebesség (m/s)  
 $r$ =cső sugara (m)  
 $\rho$ =sűrűség (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\eta$ =viszkozitás (Ns/m<sup>2</sup>)



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

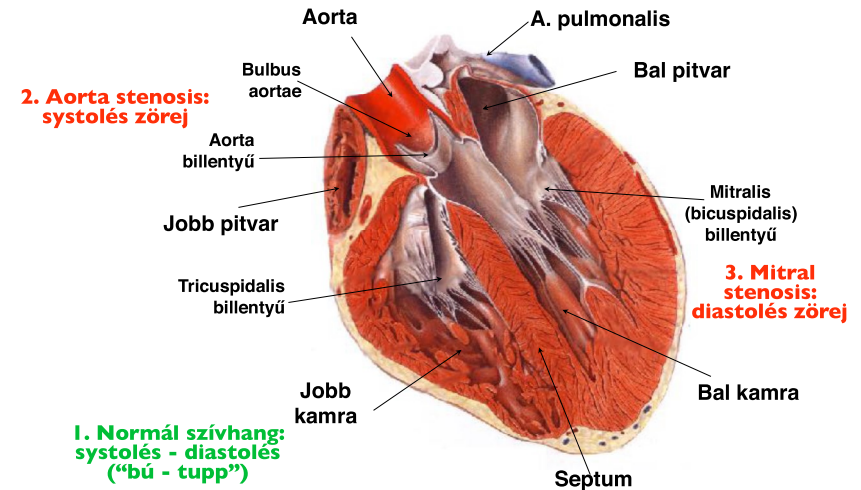
Bernoulli-törvény



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

# Szívhangok és zörejek

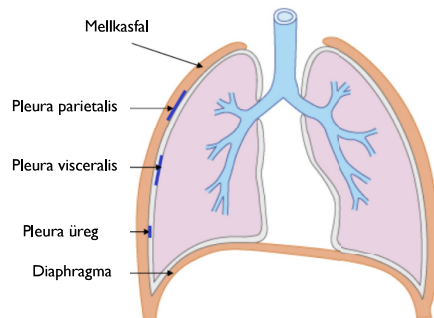
**Forrás:** mechanikai vibráció (pl. billentyű záródás), turbulens áramlás  
**Vezetődés:** vérrel telt üregek irányába



# Légzési hangok

**Forrás:**

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



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

**Tracheobronchialis hangok**

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

**Vésicularis hangok**

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

**Vezetési zóna**

Trachea  
 Bronchusok  
 Bronchiolusok  
 Bronchioli terminales

**Gázcsere zóna**

Bronchioli respiratori  
 Ductus alveolares  
 Alveolusok

