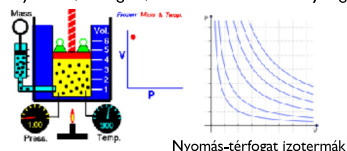


A LÉGZÉS BIOFIZIKÁJA

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.

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

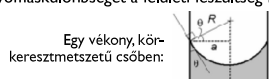
p_i = i -edik gáz parciális nyomása
 n = gázok száma a keverékben
 $[p = P_{\text{total}} \times r_i, r = \text{gáz részaránya a keverékben}]$

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.



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

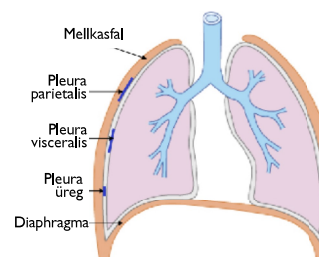
p = nyomás (Nm^{-2})
 γ = felületi feszültség ($\text{Nm}^{-1}; \text{Jm}^{-2}$)
 R = görbületi sugár (m)

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

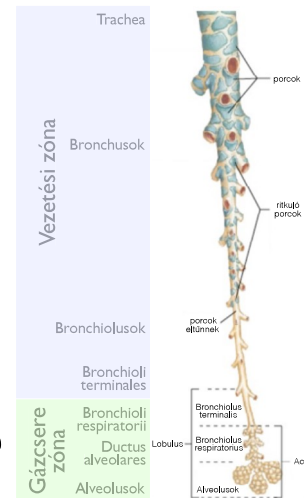
1. Doboz



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

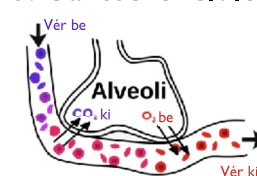
• **Pneumothorax!**

2. Csőrendszer



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

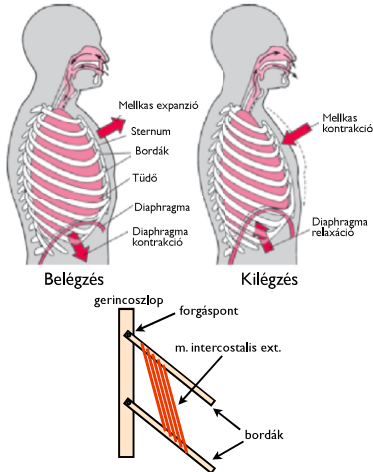
3. Gázcseré felület



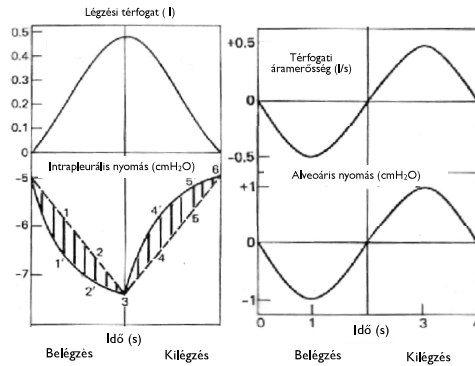
- Alveolus: nyitott termodinamikai rendszer
- A gázcseré felületét alakítják ki.
- Számuk: ~300 millió (N.B.: $2^{25} = 33,554,432$)
- Méret ($d \sim 200 \mu m$), felület ($5 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{alveolus}$)
- Teljes alveoláris felület: $\sim 100 \text{ m}^2$
- Alveolus fal ($\sim 0.5 \mu m$):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

A légzési ciklus

I. Mechanikai vezérlés



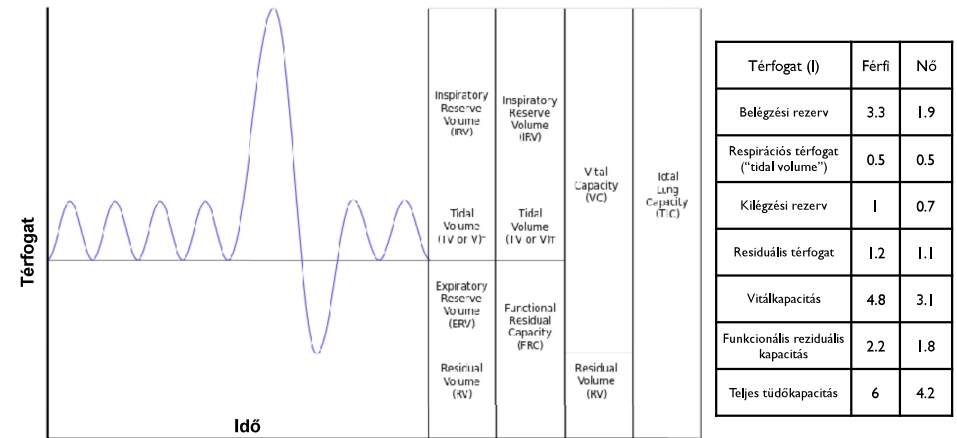
2. Fizikai paraméterek változásai



1 cmH₂O = 0.1 kPa = 0.7 mmHg

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

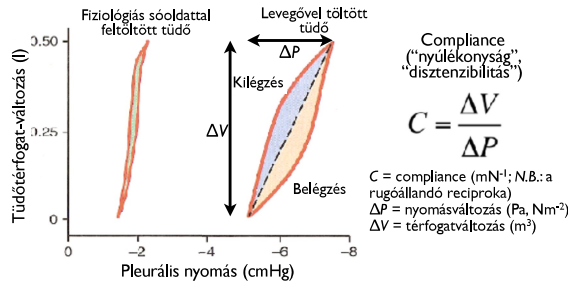
Légzési térfogatok és kapacitások



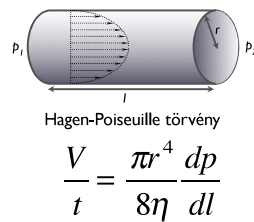
Kapacitás: térfogatok összege

A légzési ciklus eseményei

1. A tüdő ciklikusan tágul-összehúzódik

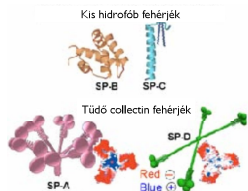


2. A légutakban gáz áramlik



V = térfogat
t = idő
(V/t = Q = térfogati áramerősség)
r = cső sugara
η = viszkozitás
p = nyomás
l = cső hossza
(dp/dl = nyomásgradiens, fenntartója p₁-p₂)

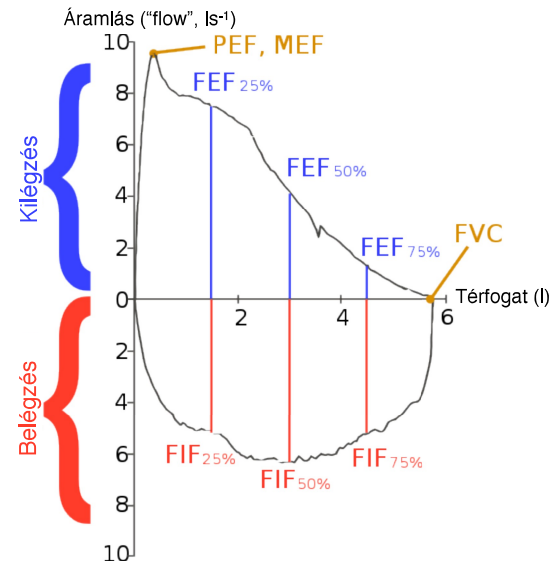
Tüdő surfactant



- 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

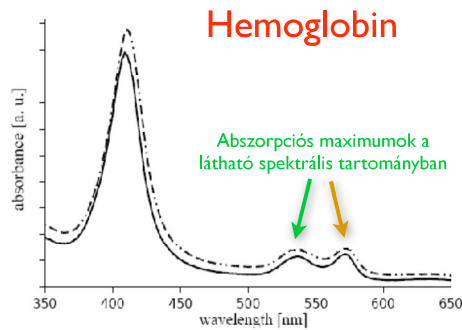
Mit vizualizálunk?

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
 ϵ_{λ} = 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?

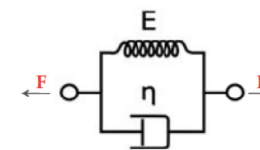
Méret, alak, lokalizáció, **rugalmasság**, **viszkozitás**

Kapcsolat a biofizikával:

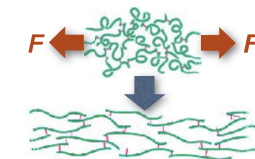
Biomechanika

Viszkoelaszticitás

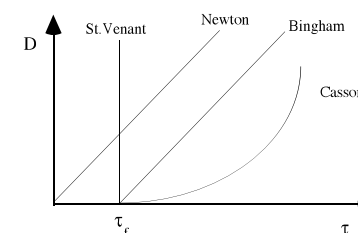
Rugó-dugattyú model



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

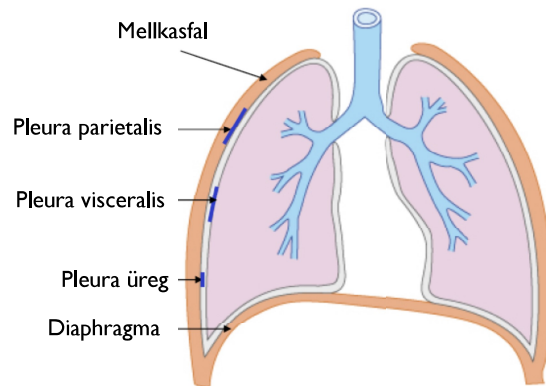
Mit kopogtatunk?

Anyagi tartalom, alak, határok

Kapcsolat a biofizikával:

Hang generálása, terjedése és detektálása

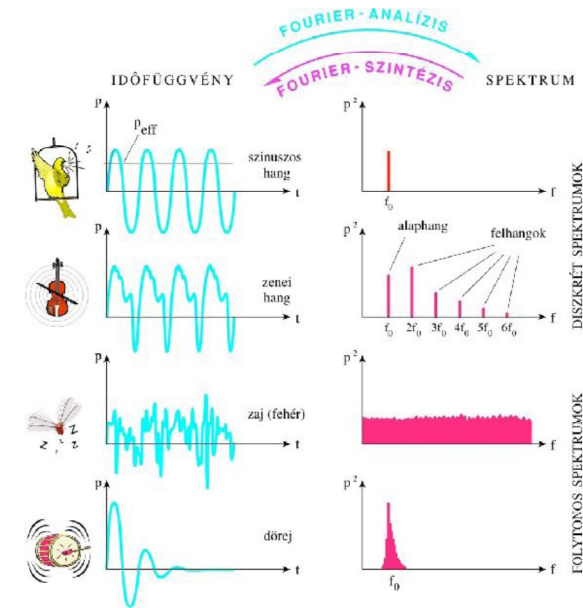
A légzőrendszer mint doboz



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)

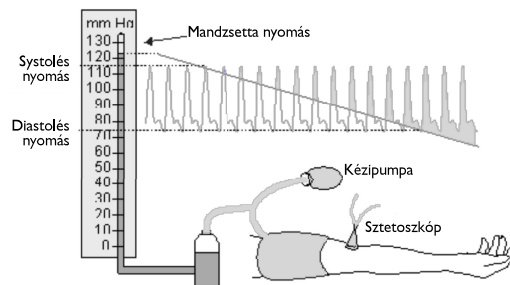
Mit hallgatunk?

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:

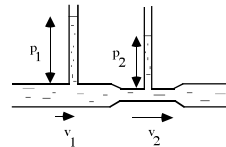
$$R = \frac{vr\rho}{\eta}$$

v =áramlási sebesség (m/s)
 r =cső sugara (m)
 ρ =sűrűség (kg/m³)
 η =viszkozitás (Ns/m²)



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

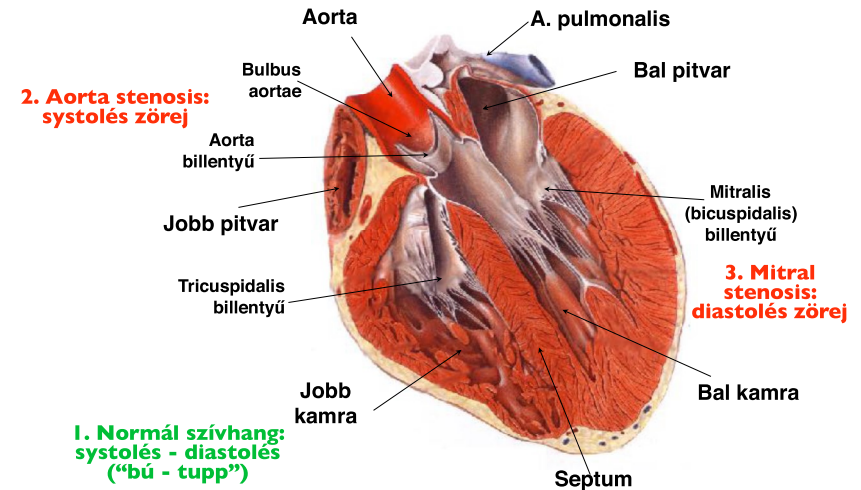
Bernoulli-törvény



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

Szívhangok és zörejek

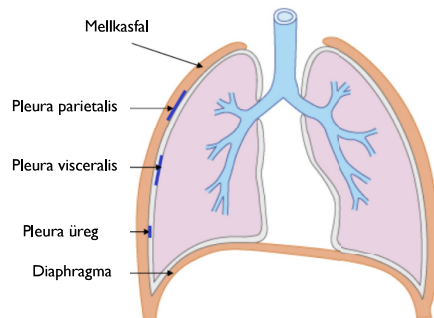
Forrás: mechanikai vibráció (pl. billentyű záródás), turbulens áramlás
Vezetődés: vérrel telt üregek irányába



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

