

# A LÉGZÉS BIOFIZIKÁJA

KELLERMAYER MIKLÓS

## LÉGZŐRENDSZER

- A metabolizmus során használt vagy felszabadult gázok kicserélését szolgáló szervrendszer

## A LÉGZÉS BIOFIZIKÁJA VÁZLAT

- Rövid történet
- Releváns fizikai és fizikai-kémiai törvények
- Az emberi légzőrendszer egyszerűsített felépítése
- A légzés folyamata - a légzési ciklus - a légzés munkája
- Légzési gázcsere
- Néhány releváns patológiás állapot

## TÖRTÉNET

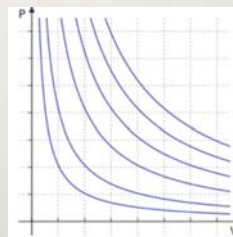
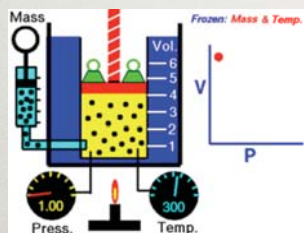
- Aristoteles (300 BC): a légzés hűti a szívet és a vért
- Galenus (170 BC): a légzés valamit hozzátesz a vérhez ("*spiritus vitalis*")
- Leonardo da Vinci (1452-1519): a levegő felfrissülésétől elzárt kamrába zárt állatok elpusztulnak.
- Vesalius (1543): az emlősállat elpusztul, ha mellkasát felnyitjuk; 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 I.

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

$$PV = nRT$$

$P$  = 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)



Nyomás-térfogat izotermák

# RELEVÁNS FIZIKAI ÉS FIZIKAI-KÉMIAI TÖRVÉNYEK II.

*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  
 $[p_i = P_{\text{total}} \times r; r = \text{gáz részaránya a keverékben}]$

*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 ( $\text{l} \cdot \text{atm} / \text{mol}$ )  
 $c$  = oldott gáz koncentrációja ( $\text{mol} / \text{l}$ )

*Young-Laplace egyenlet:*

Leírja két sztatikus folyadék (pl. levegő, víz) határfelületén fellépő kapillaris nyomáskülönbséget a felületi feszültség függvényében.

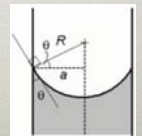
Egy vékony, körkeresztmetszetű csőben:

$$\Delta p = 2\gamma H$$

$p$  = nyomás ( $\text{Nm}^{-2}$ )  
 $\gamma$  = felületi feszültség ( $\text{Nm}^{-1}; \text{J m}^{-2}$ )  
 $H$  = átlagos görbület ( $\text{m}^{-1}$ )

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

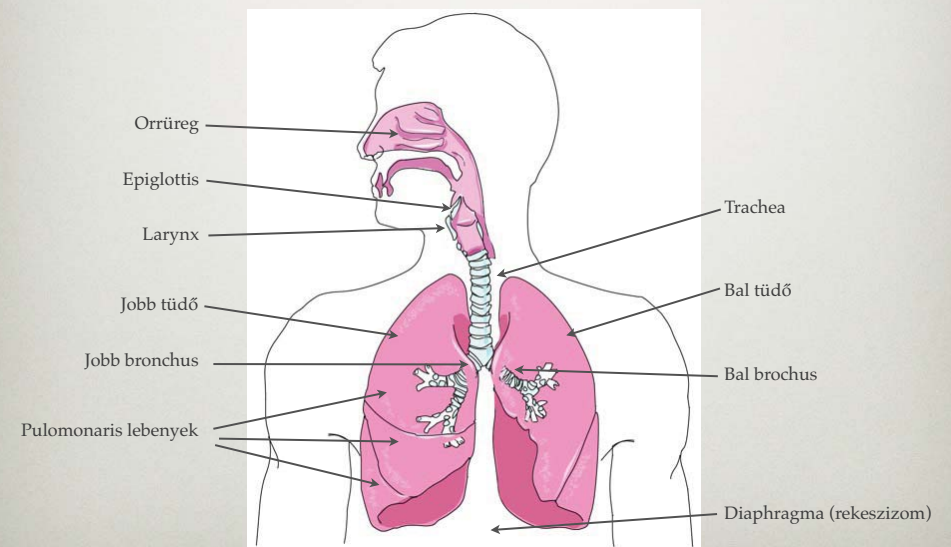
$R$  = görbületi sugar (m)



## AZ EMBERI LÉGZŐRENDSZER EGYSZERŰSÍTETT FELÉPÍTÉSE

- Csőrendszer (gázáramlás)
- Doboz (térfogat, nyomás, ezek változásai, mechanikai tulajdonságok)
- Gázcsere felülete (terület, relatív gáznyomások, diffúzió)

## AZ EMBERI LÉGZŐRENDSZER





# CSŐRENDSZER

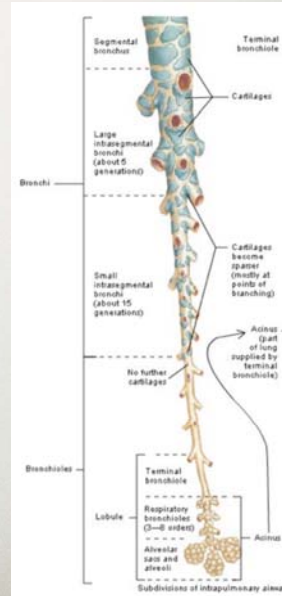
## Vezetési zóna

Trachea  
Bronchusok  
Bronchiolusok  
Bronchioli terminales

## Gázcsere zóna

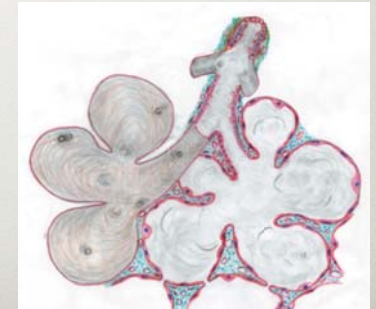
Bronchioli respiratorii  
Ductus alveolares  
Alveolusok

23-25 dichotom faágyszerű kettéoszlás!

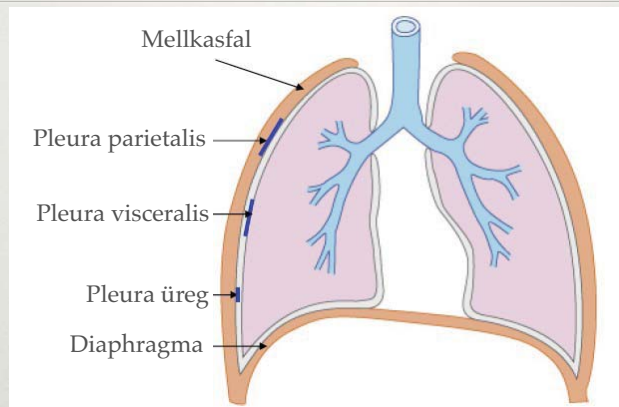


# ALVEOLUSOK

- A gázcsere felületét alakítják ki
- Számuk: ~300 millió (N.B.:  $2^{25}=33,554,432$ )
- Méret ( $d \sim 200 \mu m$ ), felület ( $5 \times 10^{-7} m^2 / alveolus$ )
- Teljes alveolus 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 ( $\sim 0.2 \mu m$ )

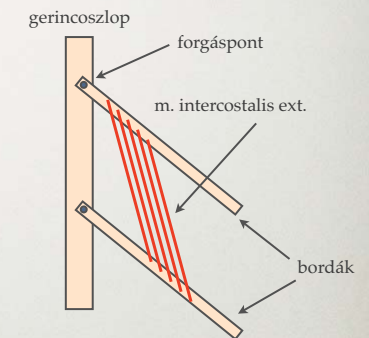
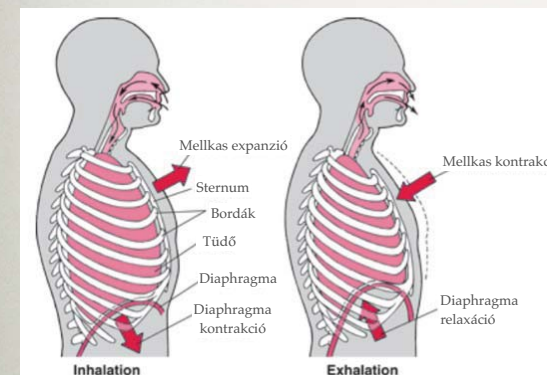


# A LÉGZŐRENDSZER MINT DOBOZ



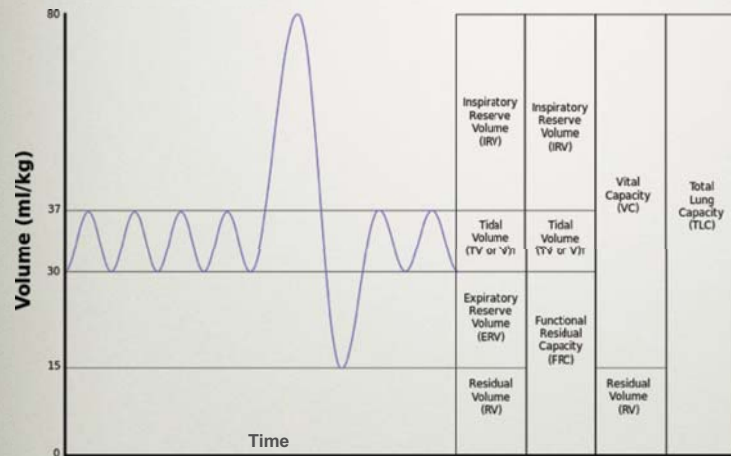
- Intrapulmonáris nyomás ( $P_{pulm}$ ): atmoszferikus nyomás körül ingadozik
- Mellúri vagy intrapleurális nyomás ( $P_{pi}$ ): "negatív" (szubatmoszferikus; az atmoszferikus nyomás, az adhézíós és szöveti kontrakciós egyensúlya alakítja ki)
- Transzmurális (transpulmonáris) nyomás ( $P_{tm}$ ): a mellkasfal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

# A LÉGZÉSI CIKLUS



- A légzés vezérlőerei: diaphragma, musculi intercostales
- Eupnoe: nyugodt légzés (14-16/min)
- Polypnoe, tachypnoe: légvételek száma  $>16/min$
- Dyspnoe: nehéz légzés

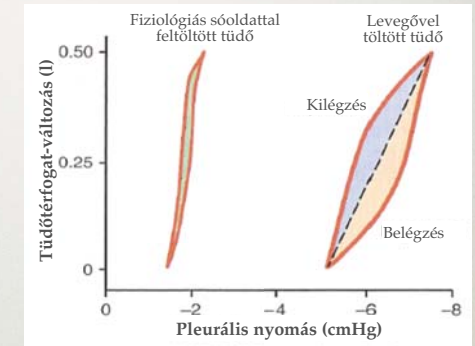
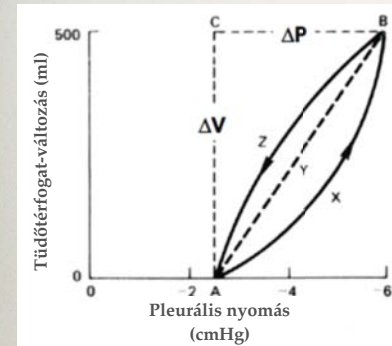
# LÉGZÉSI TÉRFOGATOK ÉS KAPACITÁSOK



- Kapacitás: térfogatok összege (m<sup>3</sup>)

# TÜDŐ COMPLIANCE

("nyúlékonyság", "disztenzibilitás")



$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

C = compliance (mN<sup>-1</sup>; N.B.: a rugóállandó reciproka)  
 $\Delta P$  = nyomásváltozás (Pa, Nm<sup>-2</sup>)  
 $\Delta V$  = térfogatváltozás (m<sup>3</sup>)

# FELÜLETI FESZÜLTSG

Felületi feszültség: erőhatásnak kitett folyadék kontrakciós készsége.

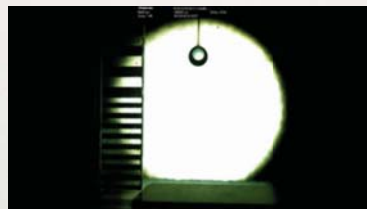
Eredete: kohéziós erők egyensúlyában való különbség a folyadék felülete és belseje között.



| Vegyület  | Felületi fesz. (mN/m) |
|-----------|-----------------------|
| Etanol    | 24.4                  |
| Metanol   | 22.7                  |
| Aceton    | 23.7                  |
| Kloroform | 27.1                  |
| Benzol    | 28.5                  |
| Víz       | 72.9                  |

## Nagy felületi feszültség következményei

Hidrofób felületen



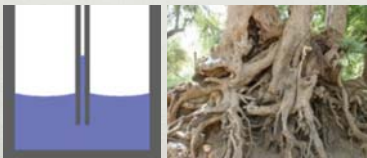
A folyadékcsepp perzisztál

Makroszkópikus biológiai rendszerekben



Molnárdka

Hidrofil felületen



Kapilláráktívítás

A kapilláráktívítás fontos szerepet játszik a növényi gyökérzetben



"Jézus Krisztus-gyík" (basiliscus)

# SURFACTANT (SURFACTANS)

Young-Laplace egyenlet:  $\Delta p = \frac{2\gamma}{R}$

p = nyomás  
 $\gamma$  = felületi feszültség  
R = görbületi sugár

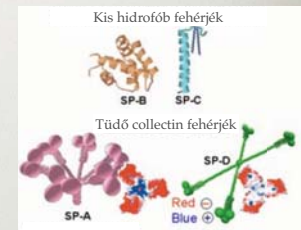
- Tüdő surfactant:** felületaktív lipoprotein komplex (foszfolipoprotein), a II. típusú alveoláris sejtek termelik.

- Összetétel:** 90% lipid, 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.

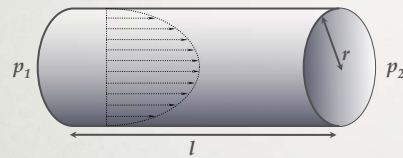
- Restriktív tüdőbetegségek:** a tüdő compliance csökkent (fibrózis, csökkent surfactans termelés, stb.).





# LEVEGŐÁRAMLÁS SZEREPE

## Hagen-Poiseuille törvény

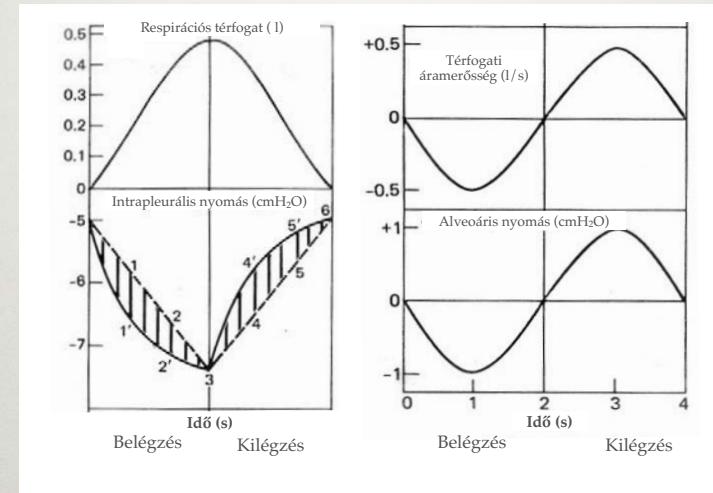


$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dl}$$

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

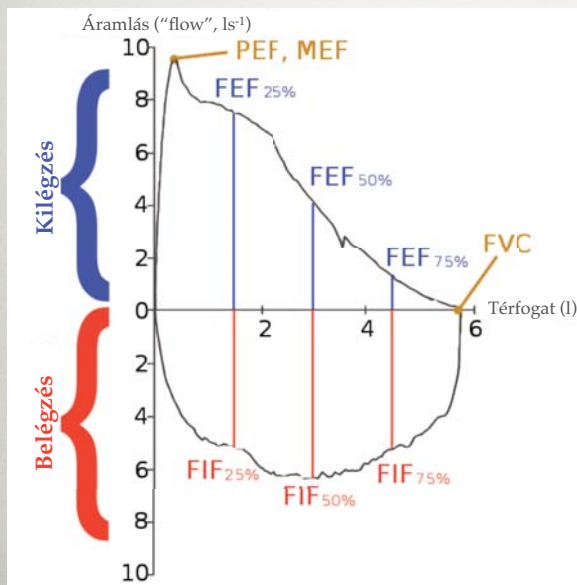
- **Normális légzés (eupnoe):** lamináris áramlás.
- **Tachypnoe, pathologia:** turbulens áramlás.
- **Obstruktív tüdőbetegségek:** pulmonáris légáramlási sebesség csökkent (COPD - "chronic obstructive pulmonary disease").

# A LÉGZÉSI CIKLUS



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

# A LÉGZÉSI CIKLUS DINAMIKUS ANALÍZISE

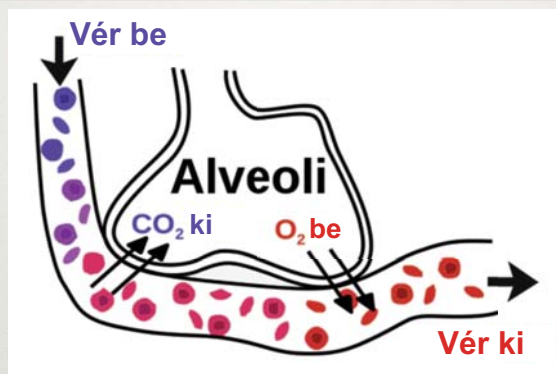


- Spirometria
- PEF, MEF: peak expiratory flow, maximal expiratory flow
- FEF: forced expiratory flow
- FIF: forced inspiratory flow
- FVC: forced vital capacity

# 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

## LÉGZÉSI GÁZCSERE



- Alveolus: nyitott termodinamikai rendszer
- A légterek parciális gáznyomásai fontosak
- A folyadékban (vérplazma) oldott gáztenziók fontosak
- Gázcsere hajtóereje: gázdiffúzió (parciális nyomásgrádiens vezérli)

## PARCIÁLIS GÁZNYOMÁSOK

|                 | Alveoláris gáz | Belégtett gáz (levegő) | Kilégtett gáz |
|-----------------|----------------|------------------------|---------------|
| Oxigén          | 100 mmHg       | 158 mmHg               | 116 mmHg      |
| CO <sub>2</sub> | 40 mmHg        | 0.2 mmHg               | 29 mmHg       |
| Nitrogén        | 573 mmHg       | 597 mmHg               | 568 mmHg      |
| Vízgőz          | 47 mmHg        | 5 mmHg                 | 47 mmHg       |

|                | pO <sub>2</sub> | pCO <sub>2</sub> | pN <sub>2</sub> |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Alveoláris gáz | 100 mmHg        | 40 mmHg          | 573 mmHg        |
| Artériás vér   | 95 mmHg         | 40 mmHg          | 573 mmHg        |
| Vénás vér      | 5.3 mmHg        | 46 mmHg          | 573 mmHg        |

- Alveoláris gázcsere: parciális nyomásokat megszabja (~350 ml / belégzés)
- Tapasztalati diffuzivitás ("diffúziós állandó"): kicserélt gáz mennyisége / (felület x rétegvastagság x nyomáskülönbség)
- Normálisan: a gázcsere ~0.25 s alatt lezajlik

## PATHOLOGIAS MEGFONTOLÁSOK

- Pneumothorax
- Restriktív tüdőbetegség (compliance)
- Obstruktív tüdőbetegség (térfogati áram)
- Köhögés (hirtelen áramlási sebesség növekedés)
- Dekompressziós betegség (Caisson, vérben oldott gázok)