

A LÉGZÉS BIOFIZIKÁJA

KELLERMAYER MIKLÓS

LÉGŐRENDSZER

- 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 pathológiai állapot

TÖRTÉNET

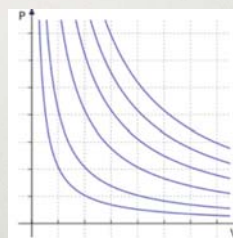
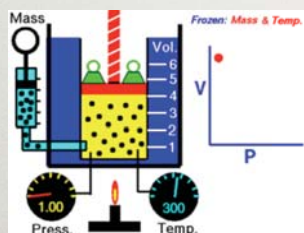
- Aristoteles (300 BC): a légzés hűti a szívet és a vért
- Galenus (170 BC): a légzés valamit hozzátesz a vérhez ("*spiritus vitalis*")
- Leonardo da Vinci (1452-1519): a levegő felfrissülésétől elzárt kamrába zárt állatok elpusztulnak.
- Vesalius (1543): az emlősállat elpusztul, ha mellkasát felnyitjuk; 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 (m³)
n = anyagmennyiség (moles)
R = gázállandó (8.314 JK⁻¹mol⁻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.

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

p_i = i-edik gáz parciális nyomása
 n = gázok száma 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
 k_H = Henry-állandó
 c = oldott gáz koncentrációja

Young-Laplace egyenlet:

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

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

p = nyomás
 γ = felületi feszültség
 H = átlagos görbület

Egy vékony, körkeresztmetszetű csőben:

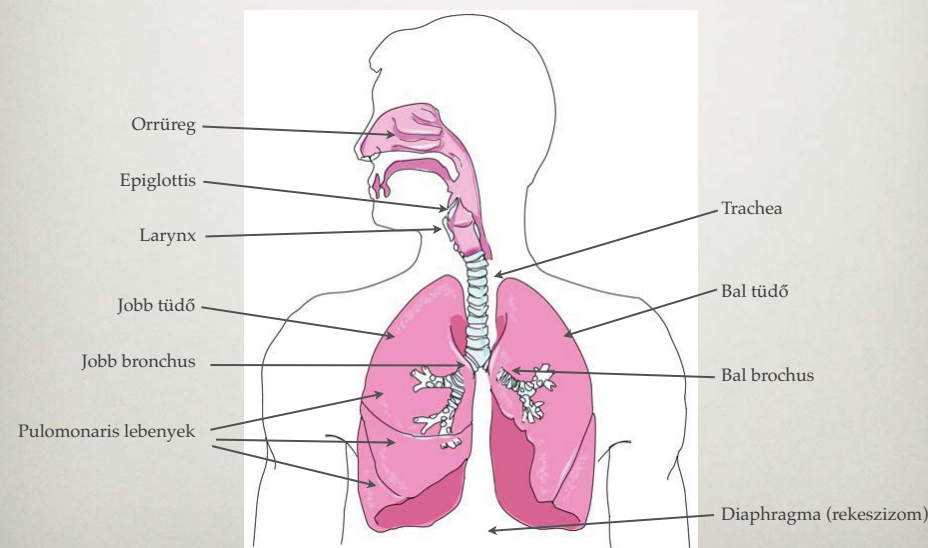
$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R}$$

R = görbületi sugár

AZ EMBERI LÉGZŐRENDSZER EGYSZERŰSÍTETT FELÉPÍTÉSE

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

AZ EMBERI LÉGZŐRENDSZER



CSŐRENDSZER

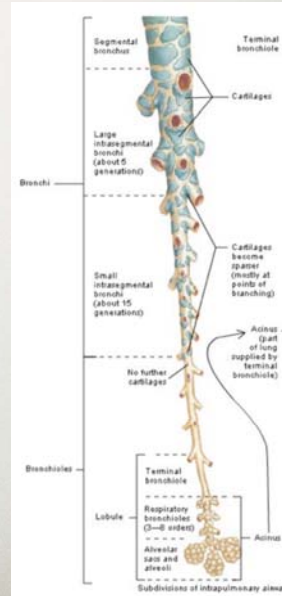
Vezetési zóna

Trachea
Bronchusok
Bronchiolusok
Bronchioli terminales

Gázcsere zóna

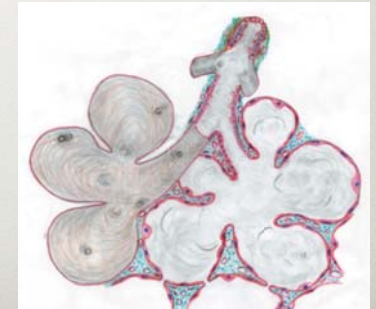
Bronchioli respiratorii
Ductus alveolares
Alveolusok

23-25 dichotom faágyszerű kettéoszlás!

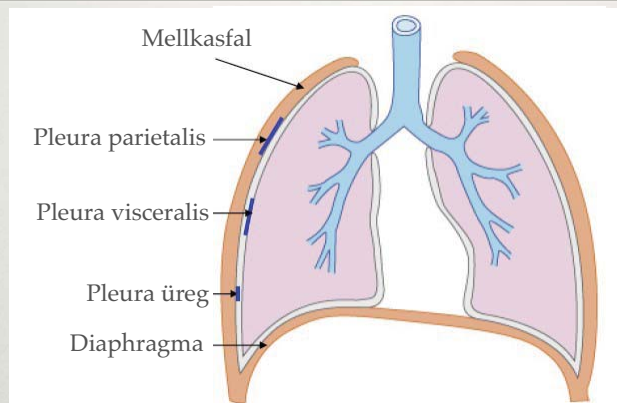


ALVEOLUSOK

- 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 ($\sim 0.2 \mu m$)

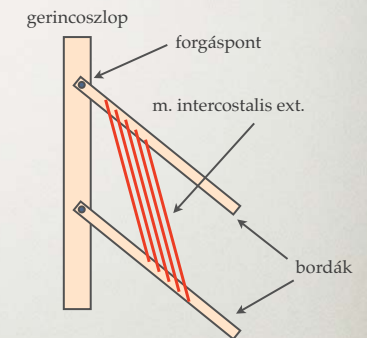
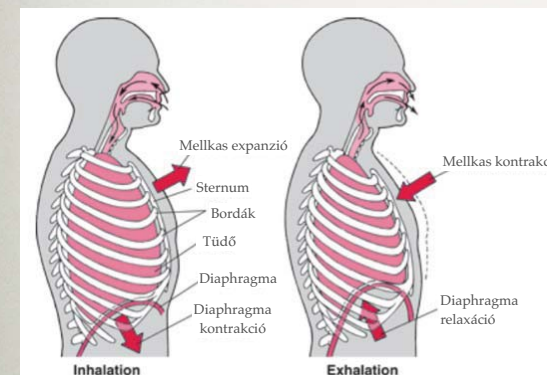


A LÉGZŐRENDSZER MINT DOBOZ



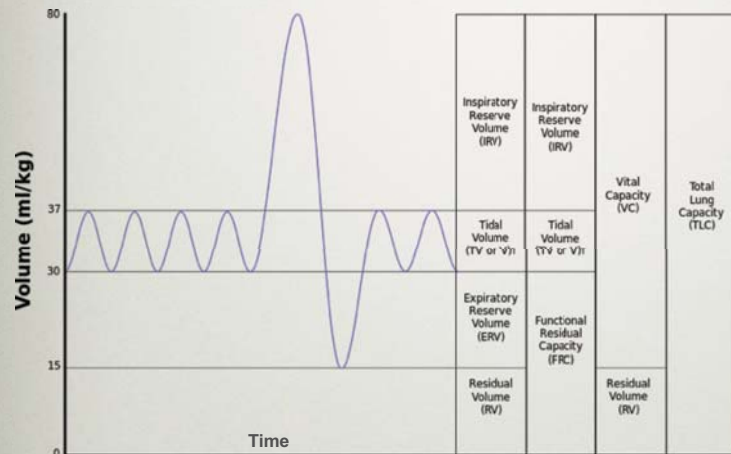
- Intrapulmonáris nyomás (P_{pulm}): atmoszferikus nyomás
- Mellúri vagy intrapleurális nyomás (P_{pl}): "negatív" (szubatmoszferikus; az atmoszferikus nyomás, az adhézíós és szöveti kontrakciós egyensúlya alakítja ki)
- Transzmurális nyomás (P_{tm}): a mellkasfal két oldala közötti nyomás
- Pneumothorax!

A LÉGZÉSI CIKLUS



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

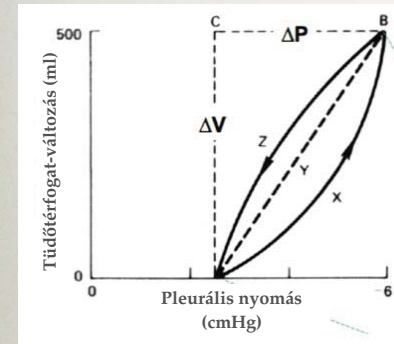
LÉGZÉSI TÉRFOGATOK ÉS KAPACITÁSOK



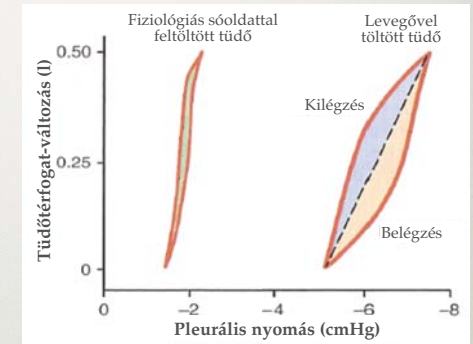
Térfogat (l)	Férfi	Nő
Belégzési rezerv	3.3	1.9
Respirációs térfogat (tidal volume)	0.5	0.5
Kilégzési rezerv	1.0	0.7
Residuális térfogat	1.2	1.1
Vitálkapacitás	4.8	3.1
Funkcionális reziduális kapacitás	2.2	1.8
Teljes tüdőkapacitás	6.0	4.2

- Kapacitás: térfogatok összege (m³)

TÜDŐ COMPLIANCE



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



C = compliance
 ΔP = nyomásváltozás (Pa)
 ΔV = térfogatváltozás (m³)

FELÜLETI FESZÜLTSG

Felületi feszültség: erőhatásnak kitett folyadék kontrakciós készsége.

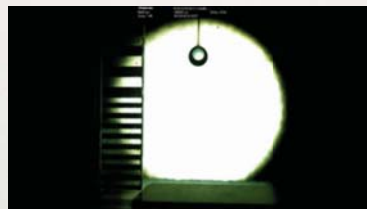
Eredete: kohéziós erők egyensúlyában való különbség a folyadék felülete és belseje között.



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



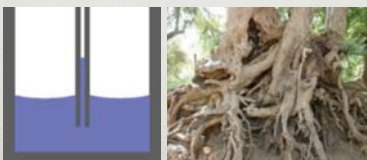
A folyadékcsepp periszisztál

Makroszkópikus biológiai rendszerekben



Molnárdka

Hidrofil felületen



Kapilláráktívítás

A kapilláráktívítás fontos szerepet játszik a növényi gyökérzetben



"Jézus Krisztus-gyík" (basiliscus)

SURFACTANT (SURFACTANS)

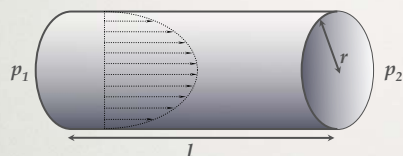
$$\text{Laplace törvény: } \Delta p = \frac{2\gamma}{R}$$

p = nyomás
 γ = felületi feszültség
R = görbületi sugár

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

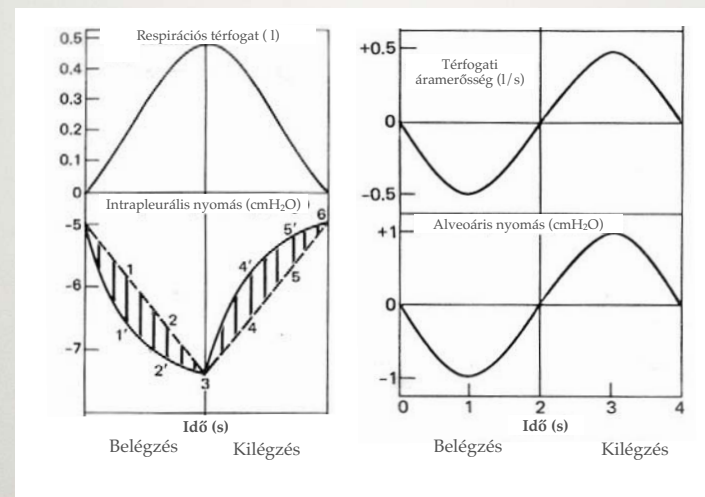


$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dl}$$

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

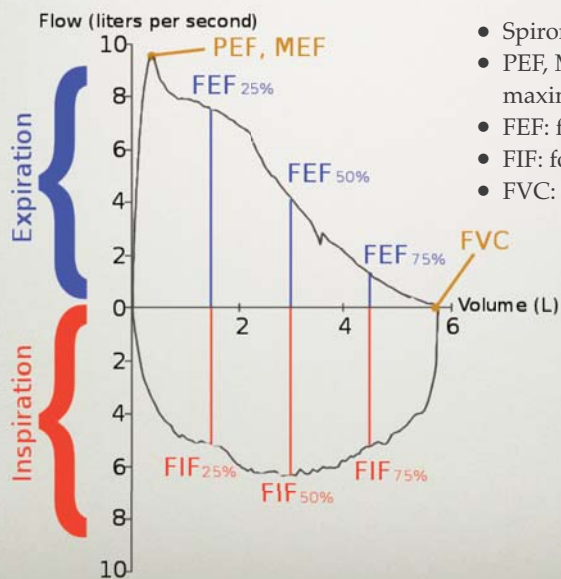
- Normális légzés (eupnoe): lamináris áramlás.
- Tachypnoe, pathologia: turbulens áramlás.
- Obstruktív tüdőbetegségek: pulmonáris légáramlási sebesség csökkent (COPD).

A LÉGZÉSI CIKLUS



• 1 cmH₂O = 0.1 kPa = 0.7 mmHg

A LÉGZÉSI CIKLUS DINAMIKUS ANALÍZISE

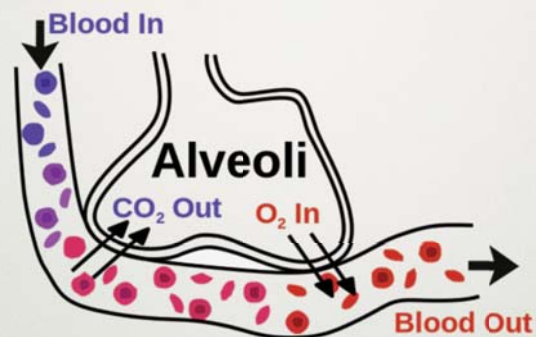


- Spirometria
- PEF, MEF: peak expiratory flow, maximal expiratory flow
- FEF: forced expiratory flow
- FIF: forced inspiratory flow
- FVC: forced vital capacity

LÉGZÉSI MUNKA

- Átlagos transzmurális nyomás ellenében végzett térfogatváltozás
- Légzési perctérfogat = 7 l
- Légzési frekvencia = 14 / min
- Nyomás = 0.7 kPa
- Respirációs térfogat (V) = 0.5 l (5x10⁻⁴ m³)
- Munka (W) = 0.35 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 ₂	40 mmHg	0.2 mmHg	29 mmHg
Nitrogén	573 mmHg	597 mmHg	568 mmHg
Vízgőz	47 mmHg	5 mmHg	47 mmHg

	pO ₂	pCO ₂	pN ₂
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

PATHOLOGIÁS MEGFONTOLÁSOK

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