

Transzportfolyamatok I.

Hő (és folyadék) transzport

Jedlovsky-Hajdú Angéla

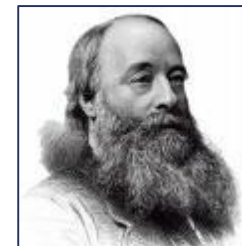
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet, Nanokémiai Kutatócsoport



SEMMELWEIS
EGYETEM 1769



Az energiamegmaradás tétele



Leibniz (1676-1689) megfigyelte, hogy sok mechanikai rendszerben a mozgási energia (*élőerő*) megmarad.



Newton és **Descartes** megfogalmazzák az impulzusmegmaradás törvényét.



Rumford 1798-ban megfigyelte, hogy az ágyúcsövek fúrása hőkelletéssel jár: a mechanikai munka hővé alakítható!

Mayer felismerte, hogy a hő is, meg a mechanikai munka is, az energia egy formája.

Joule 1843-ban kísérletekkel meghatározta a hő mechanikai egyenértékét.

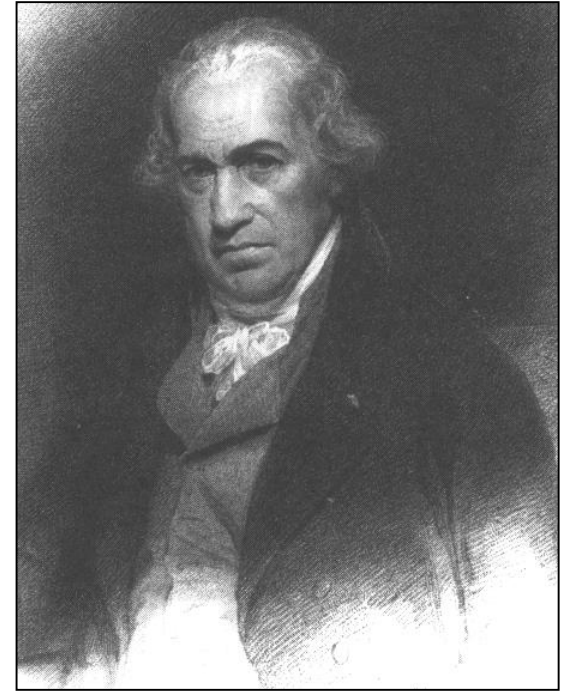
Helmholtz 1847-ben megfogalmazza az energiamegmaradás tételét



$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$



A **termodinamika** a fizikának a **hő**-jelenségekkel foglalkozó ágából mára az **energetikai kölcsönhatások folytán fellépő egyensúlyok és folyamatok** tudományává vált.



James Watt (1736-1819) skót feltaláló

Fő feladata:

- a **változások** és átalakulások irányának és az egyensúlyi végállapot felé való törekvésének értelmezése, valamint
- az **egyensúlyt** és a hozzá vezető folyamatot befolyásoló tényezők felderítése.

A bio-termodinamika úttörői

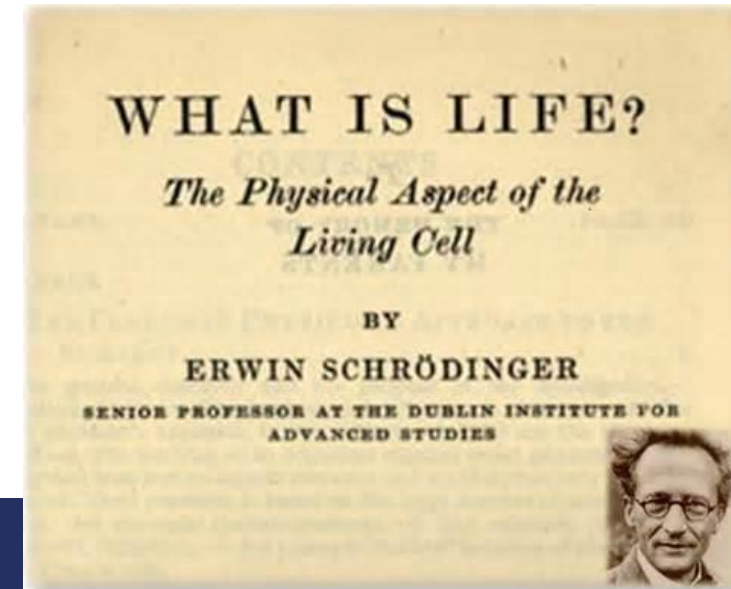


(A.L. Lavoisier 1743-1794)
(P.S. Laplace)1749-1827)

“...respiration is nothing but a slow combustion of carbon and hydrogen...”



Rubner 1894-ben elsőként állította, hogy a termodinamika törvényei alkalmazhatók élő rendszerekre.



A termodinamika mára már az igen változatos fizikai és kémiai energetikai kölcsönhatások folytán fellépő **egyensúlyok** és **folyamatok** általános tudományává vált.

A termodinamika elmélete **három tapasztalati megfigyelésen**, un. **főtételen** nyugszik. Az első és második főtétel korlátokat szab a lehetséges változásoknak, valamint irányt szab a spontán folyamatoknak.

Sem az első, sem pedig a második főtétel nem bizonyítható, érvényességükről nagyszámú tapasztalat győz meg bennünket.

Fő feladata: a kölcsönhatások folytán fellépő változások és átalakulások

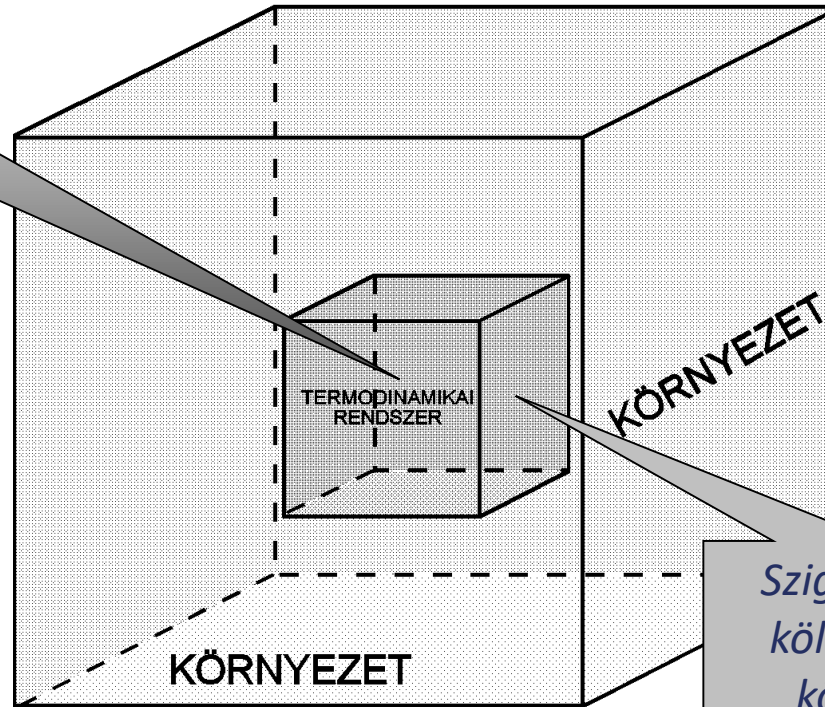
**irányának,
mozgató erőinek, és
befolyásoló tényezőinek**

felderítése.

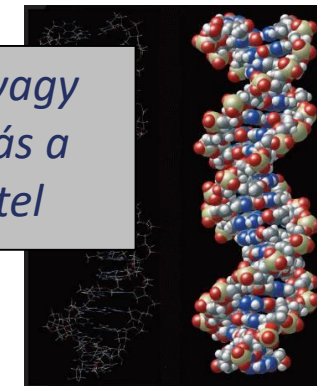
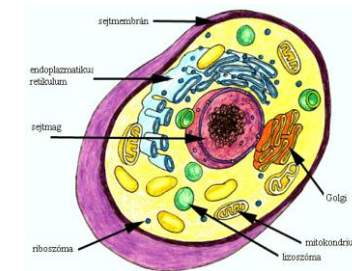
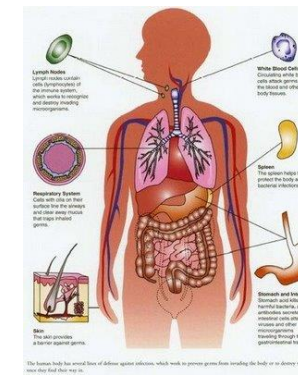


TERMODINAMIKAI RENDSZER

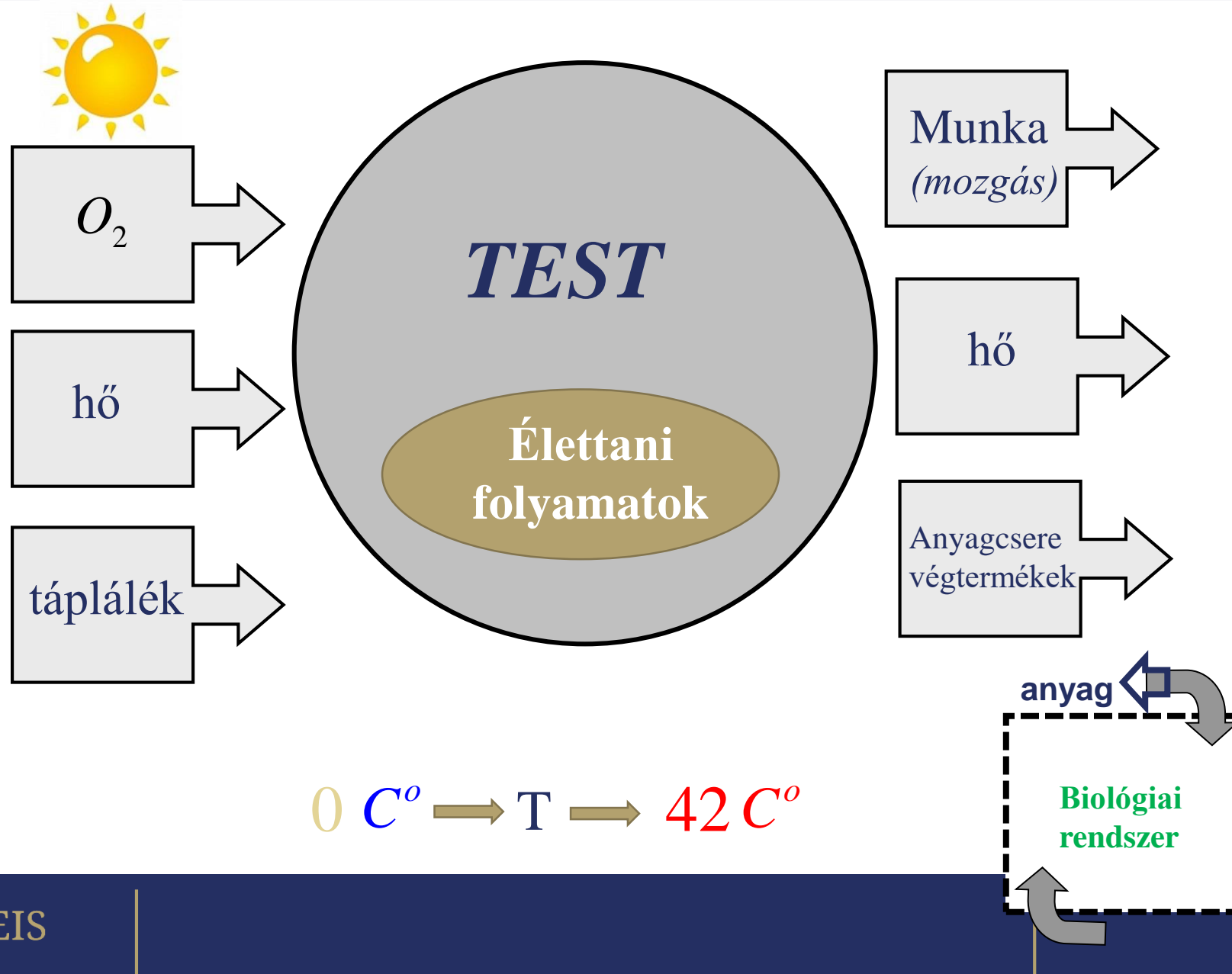
*Kölcsönható
termodinamikai
testek*



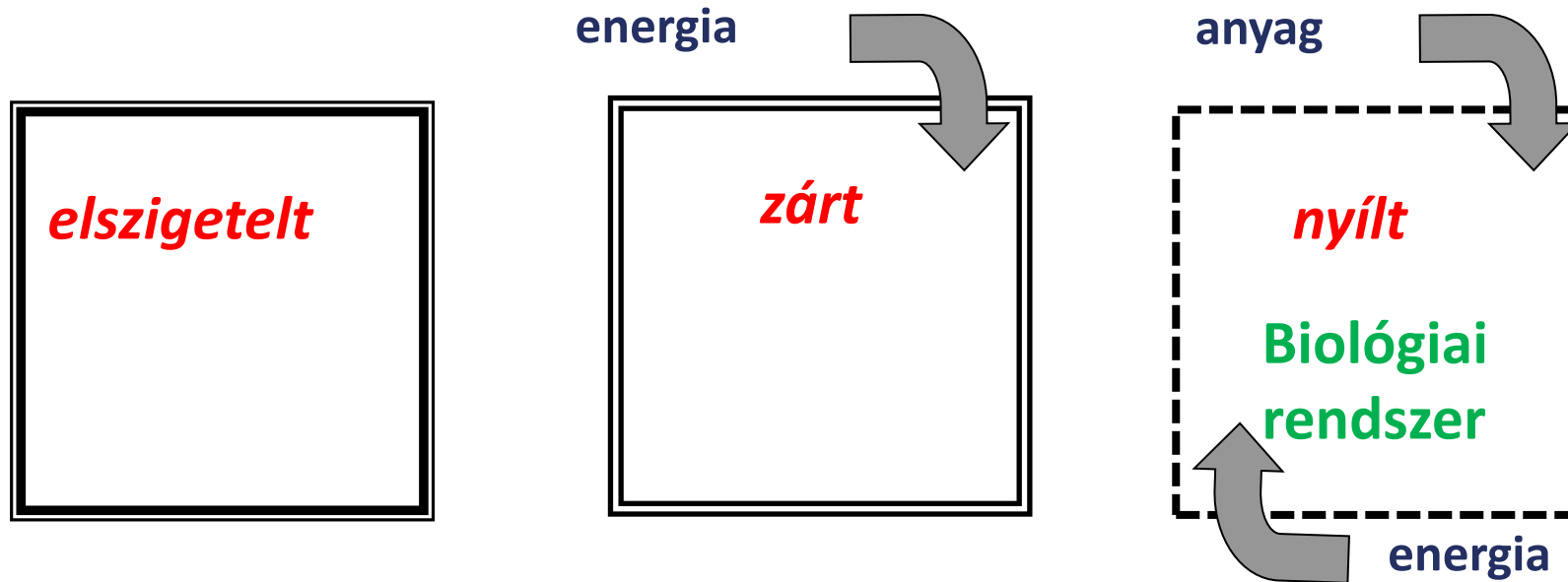
*Szigetelés, vagy
kölcsönhatás a
környezettel*



HUMÁN BIOLÓGIAI TERMODINAMIKAI RENDSZER



Termodinamikai rendszerek típusai környezeti kapcsolatuk alapján



A környezet tulajdonságai alapján

izoterm
 $T = \text{állandó}$

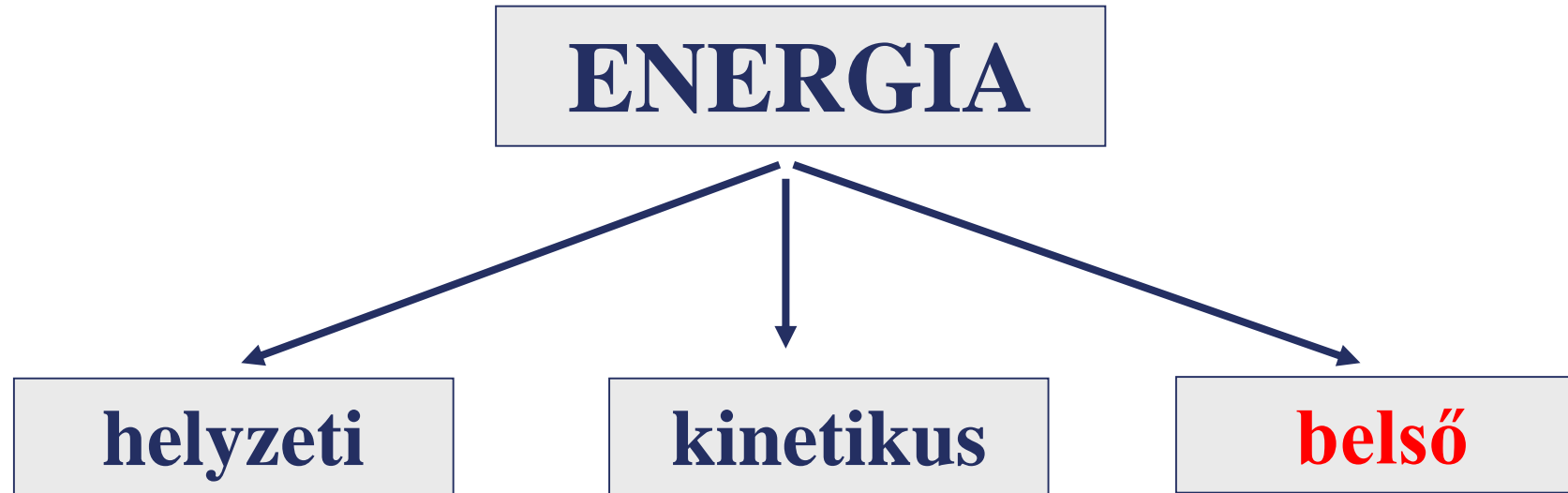


izobár
 $p = \text{állandó}$



adiabatikus
 $\Delta Q = 0$





$$E = E_{pot} + E_{kin} + U$$

makroszkopikus test

Termodinamikai alapok

Makroszkopikus állapot megadása makroszkopikus paraméterekkel (extenzív-intenzív párok):

extenzív intenzív

S

T

V

p

N

μ

A

γ

Q

u

Belső energia: extenzív-
intenzív állapotjelző párok
szorzatösszege:

$$U = TS - pV + \sum n_i \mu_i + \gamma A + uQ$$

termodinamikai állapotfüggvények:

belső energia U

entalpia $H = U + pV$

szabadenergia $F = U - TS$

szabadentalpia $G = H - TS$

entrópiatag $-TS$

**folyamatok spontán végbemeneteléről döntő
állapotfüggvények:**

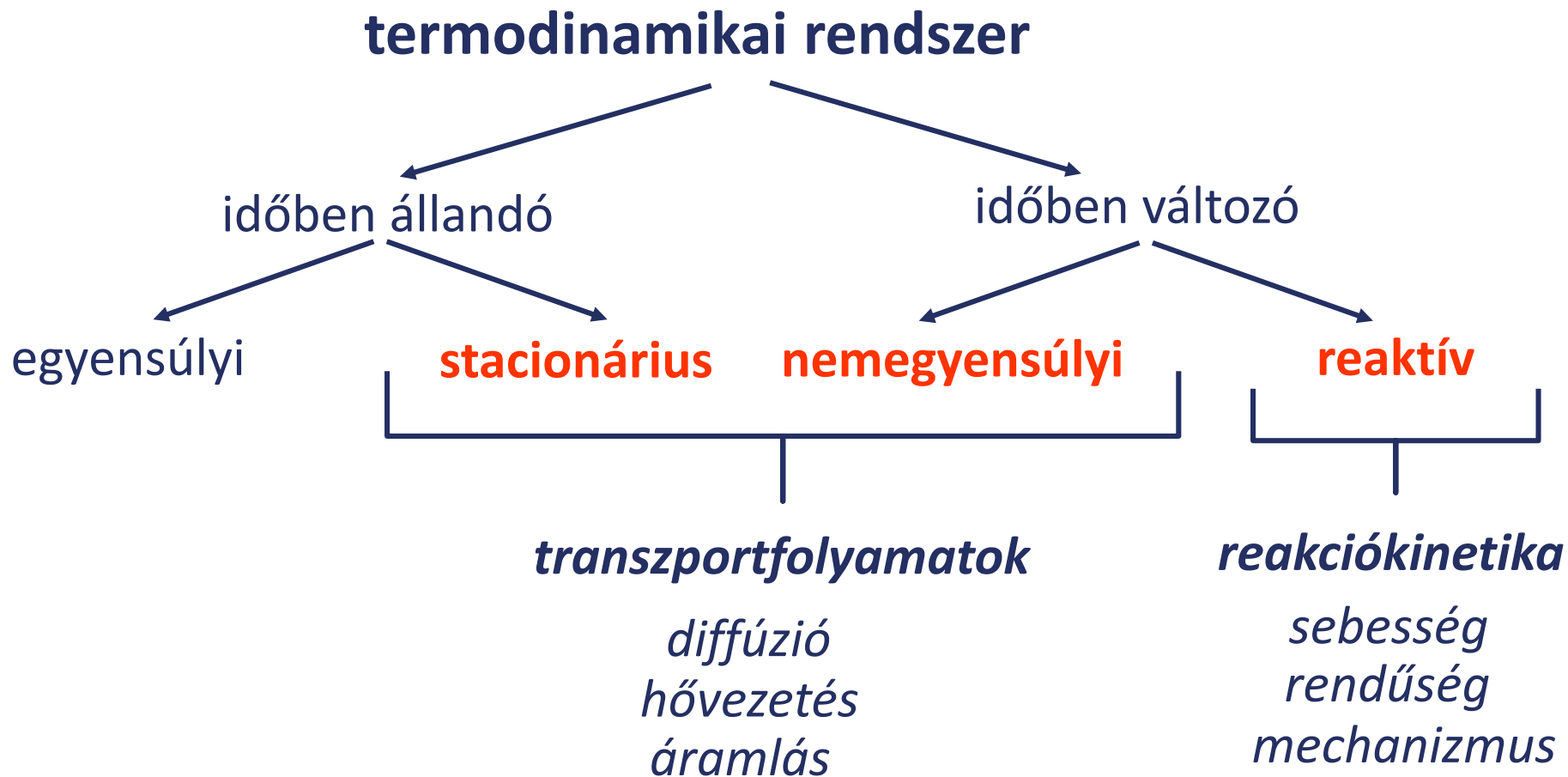
ha U, V, n_i ($A, Q...$) (az extenzív paraméterek)

$-TS$ állandóak (zárt rendszer)

ha T, V, n_i ($A, Q...$) állandóak **F**

ha T, p, n_i ($A, Q...$) állandóak **G**

A termodinamikai rendszerek típusai



Transzportfolyamatok

- Azokat a folyamatokat, amelyek során energia, anyag, töltés vagy valamilyen más extenzív jellegű mennyiség egyik helyről egy másik helyre jut, **transzportfolyamatoknak nevezzük**.
- A transzportfolyamatok jellemzésénél alapvető fontosságú mennyiségek: **az extenzív mennyiség árama** és az áramot létrehozó hatás, a **termodinamikai hajtóerő**.

Az *extenzív mennyiségek* transzportját az árammal és az áramsűrűséggel (fluxussal) jellemezhetjük.

Az áramsűrűség: megadja a szóban forgó mennyiség egységnyi keresztmetszeten történő áthaladásának mértékét egységnyi idő alatt.

Egy tetszőleges E extenzív mennyiségre vonatkozó áram, és áramsűrűség:

$$I_E = \frac{dE}{dt}$$

$$j_E = \frac{1}{A_s} \frac{dE}{dt}$$

ahol A_s és I_E az áram irányára merőleges felület.

Transzportfolyamatok

Transzportfolyamatok megjelenése mindig valamilyen extenzív mennyiséget hordozó mozgásával függ össze:

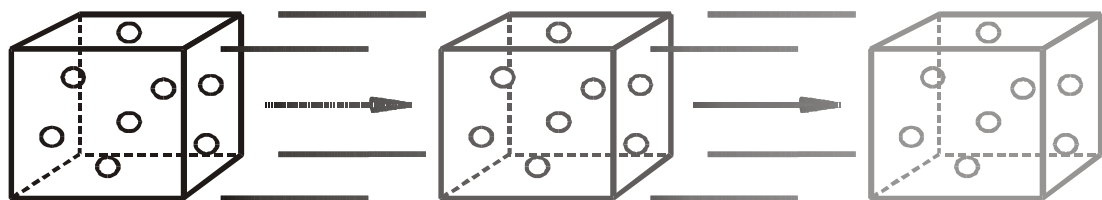
- részecskék (atomok, molekulák és ionok), amelyek anyagot, energiát, impulzust és töltést hordozhatnak,
- elektronok, amelyek energiát, impulzust és töltést hordozhatnak,
- fotonok, amelyek energiát hordozhatnak.

Az extenzív mennyiség áramát nemcsak annak nagysága, hanem iránya is jellemzi, ezért az áramsűrűség vektor mennyiség.

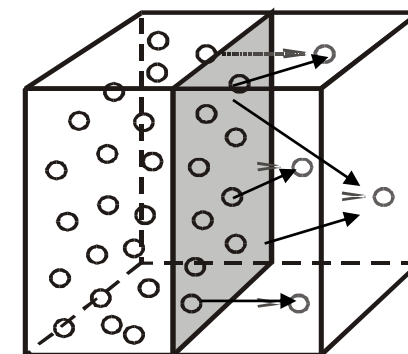
A transzportfolyamatokat megkülönböztethetjük aszerint, hogy együtt járnak-e a **közeg makroszkopikus mozgásával, vagy sem**. Eszerint beszélhetünk **áramlásos (konvektív)** és **vezetési (konduktív)**, vagy nyugvó közegű transzportfolyamatokról.

Transzportfolyamatok

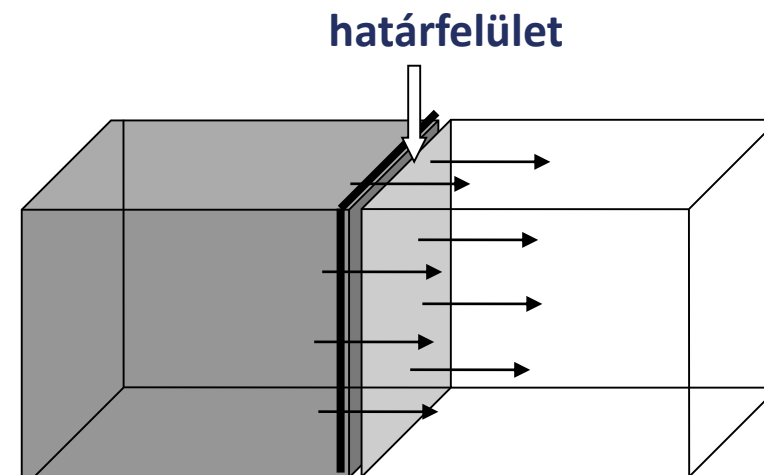
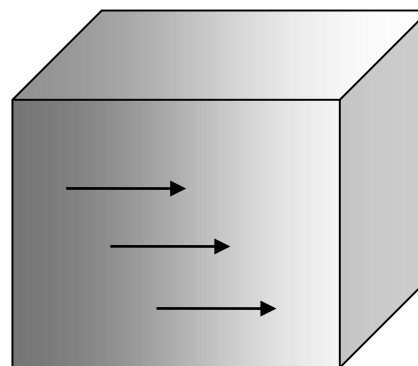
A transzportfolyamatokat megkülönböztethetjük aszerint, hogy együtt járnak-e a közeg makroszkopikus mozgásával, vagy sem. Eszerint beszélhetünk **áramlásos (konvektív)** és **vezetési (konduktív)**, vagy nyugvó közegű transzportfolyamatokról.



konduktív
anyagtranszport:
molekulák elmozdulása
"nyugvó közegben"



konvektív
anyagtranszport:
molekulahalmaz együttes
elmozdulása



Vezetési transzport

Átadási transzport

Konduktív transzportfolyamatok egységes leírása

	diffúzió	hővezetés	reológia
ÁRAM:	komponens áram (tömeg áram)	energia áram	impulzus áram
HAJTÓERŐ:	∇c	∇T	∇v
ÁRAMSŰRŰSÉG:	$j_n = -D \nabla c$	$j_Q = -k \nabla T$	$j_i = -\eta \nabla v$
LOKÁLIS VÁLTOZÁS:	$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c$	$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T$	

Fick

Fourier

Newton

A transzportfolyamatok biológiai jelentősége

- A termodinamikai egyensúly → a biológiai rendszer számára a halált jelenti
- A biológiai egyensúly → az élő szervezet a környezetében fenn tudja tartani állapota állandóságát

A termodinamika törvényei az élő rendszerek leírására is alkalmazhatók.

**Az életműködés
szempontjából fontos
transzportfolyamatok**

szerv	transzport
légzőrendszer	oxigén → vér széndioxid → tüdő
keringési rendszer	oxigén → vörösvértestek fertőzés → antitestek
emésztőrendszer	emésztés → felszívódás
vese	plazma szűrés metabolikus bomlástermékek kiválasztása plazma térfogat és vér pH állandó szinten tartása

Biológiai anyagtranszport

Sejten belül

- konvektív
- konduktív

Sejmembránon át

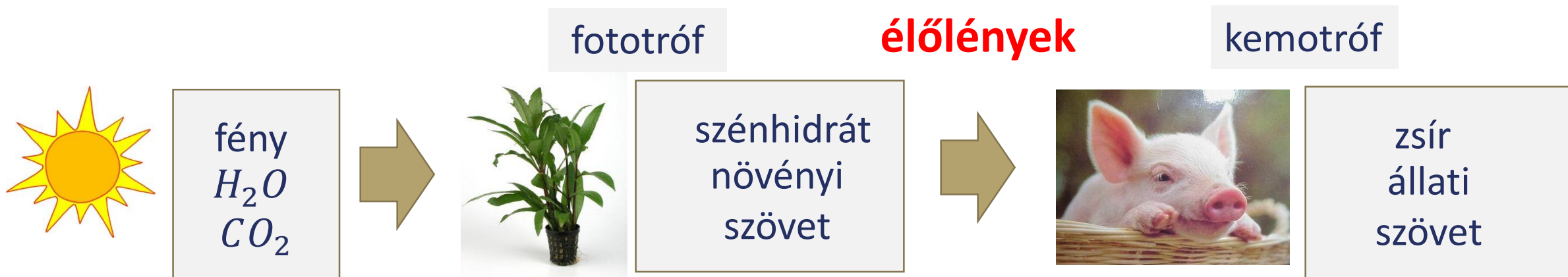
- konduktív (átadásos)

Sejten kívül

- konvektív
- konduktív

	diffúzió	hővezetés	reológia
ÁRAM:	komponens áram (tömeg áram)	energia áram	impulzus áram
HAJTÓERŐ:	∇c	∇T	∇v
ÁRAMSŰRŰSÉG:	$j_n = -D\nabla c$	$j_Q = -k\nabla T$	$j_i = -\eta\nabla v$
LOKÁLIS VÁLTOZÁS:	$\frac{\partial c}{\partial t} = D\nabla^2 c$	$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\nabla^2 T$	

A nap a földi élet energiaforrása



Az élő szervezet sejtjeiben végbemenő folyamatok összessége: **metabolizmus**

felépítő folyamatok
anabolizmus

rendezetlen + **energia** → rend

lebontó folyamatok
katabolizmus

rend → rendezetlen + **energia**

Konduktív hővezetés: **Fourier törvények**

$$j_Q = -k_T \frac{dT}{dx}$$

áramsűrűség

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \leftarrow \text{függvény görbülete} \quad \alpha = \frac{k_T}{\rho \cdot c_p}$$

lokális változás

anyag	T/K	$k_T / \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	$\alpha / \text{m}^2\text{s}^{-1}$	$c_p / \text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
levegő	300	0,025	$2,11 \cdot 10^{-5}$	1,006
víz	300	0,609	$1,5 \cdot 10^{-7}$	4,186
zsír	298	0,21	$0,69 \cdot 10^{-7}$	3,258
vér	298	0,642	$1,76 \cdot 10^{-7}$	3,889
bőr	310	0,442	$1,19 \cdot 10^{-7}$	3,471

$$\frac{dQ_{\text{hővezetés}}}{dt} = -k_T \cdot A_s \cdot \frac{dT}{dx}$$

k_T : Hővezetési tényező [W / mK]

α : Hőmérséklet-vezetési tényező [m^2 / s]

c_p : Fajlagos hőkapacitás [J / kgK]

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Alap – energiaforgalom: **BMR**
Basal metabolic rate

$$BMR = \left. \frac{dQ}{dt} \right|_{nyugalom}$$

$$BMR \propto m_b^{3/4}$$

Kleiber törvény

A BMR a korral csökken

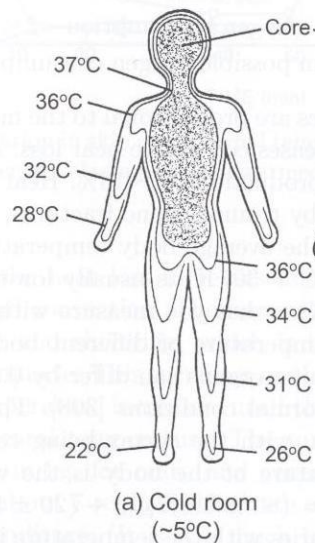
$m_b = 70 \text{ kg}$ 7029 kJ/nap 293 kJ/óra 81 W férfi
60 W nő

Energiaforgalom: (**MR**) és oxigén fogyasztás

alvás	83 W	O_2 : 0,24 L/perc
séta	265 W	O_2 : 0,76 L/perc
kerékpározás	400 W	O_2 : 1,13 L/perc

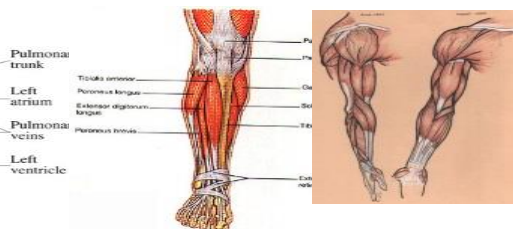
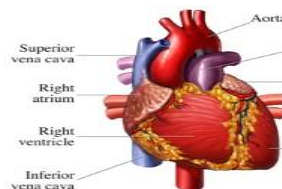
Hol keletkezik a nyugalmi metabolikus hő?

A szervezetben belül a hőmérséklet eloszlás nem homogén.



mag

köpeny



<i>agyvelő</i>	25%
<i>szív</i>	15%
<i>vázizom</i>	25%
<i>hasi zsigerek</i>	25%
<i>vese</i>	6%
<i>bőr</i>	4%

$$\Delta Q = Q_{\text{metabolizmus}} + Q_{\text{veszteség}}$$

Átlagos ember átlagos termikus jellemzői:

Fajhő: 3,47 kJ/kgK

70 kg-os (m_b) személy hőkapacitása (C): 243 kJ/C°

$$Q = C \cdot m_b \cdot \Delta T$$

$$\frac{dQ}{dt} = C \cdot m_b \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C \cdot m_b} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C \cdot m_b} \cdot BMR$$

Alap – energiaforgalom: **BMR**

$$\frac{dT}{dt} = \frac{BMR}{C \cdot m_b}$$



$$\frac{dT}{dt} = 1,2 \text{ C}^\circ/\text{óra}$$

**Ha nem lenne veszteség
és fizikai aktivitás!**

Fizikai aktivitás esetén



$$\frac{dQ}{dt} = f \cdot BMR$$

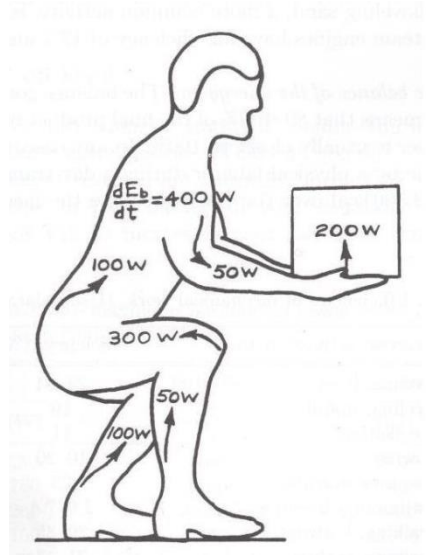
$$\frac{dT}{dt} = f \cdot \frac{BMR}{C \cdot m_b} \approx 1,2 f \text{ C}^\circ / h$$

$$0 < f < 20$$

Fizikai aktivitás

aktivitás	f
alvás	1
ülés	1,5
állás	1,7
gyaloglás	4,7

Energiaforgalom és mozgás

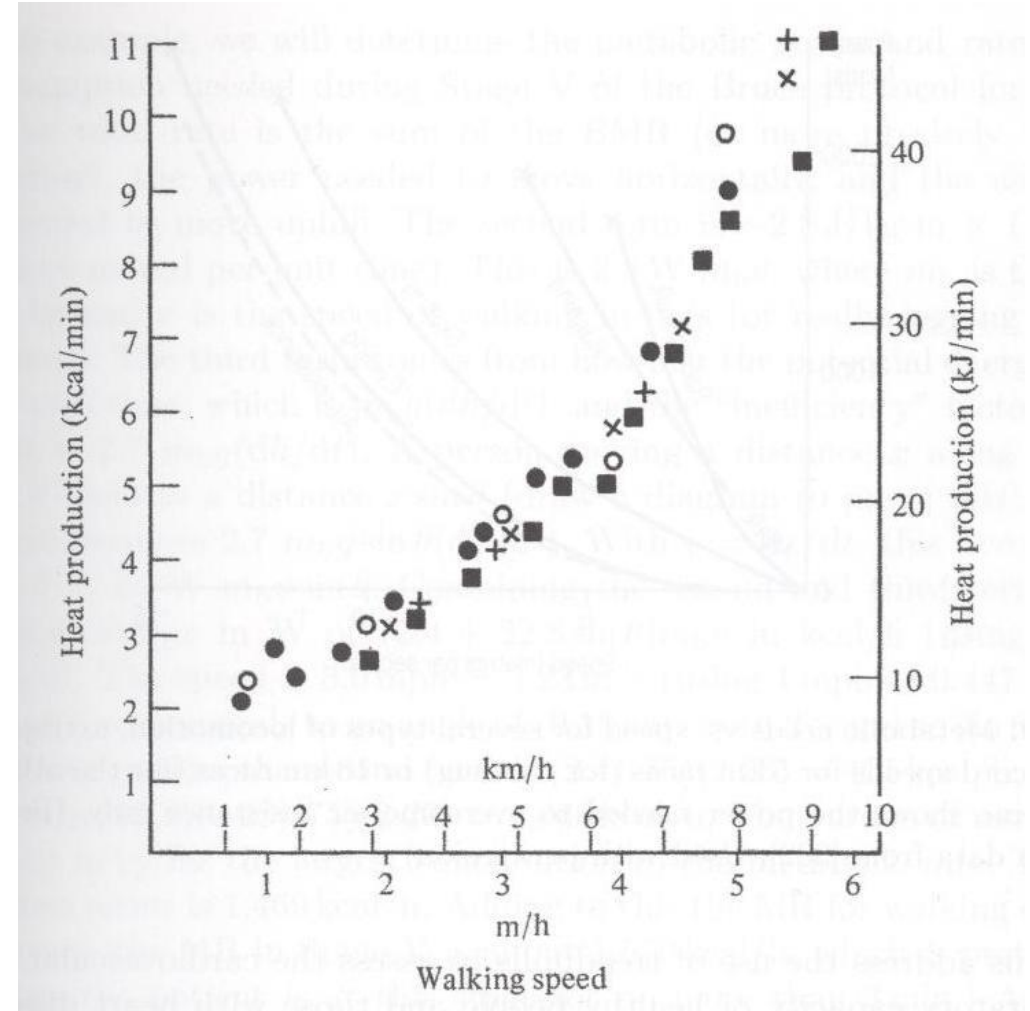


munka(fizika) \neq munka(biológia)

külső

belső

Gyaloglással felszabadított hő függése a sebességtől.



Biológiai hőforgalom mérése

Direkt kalorimetria

Indirekt kalorimetria

$$\Delta Q = Q_{\text{metabolizmus}} + Q_{\text{veszteség}}$$

Oxigén fogyasztás és/vagy
CO₂ termelés arányos a
hőtermeléssel

$$Q_{\text{veszteség}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

kötési energia

- hő
- munka
- (vég)termék

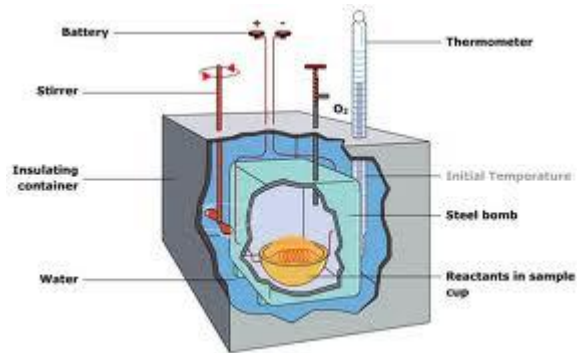
54-60 %

25 %

7 %

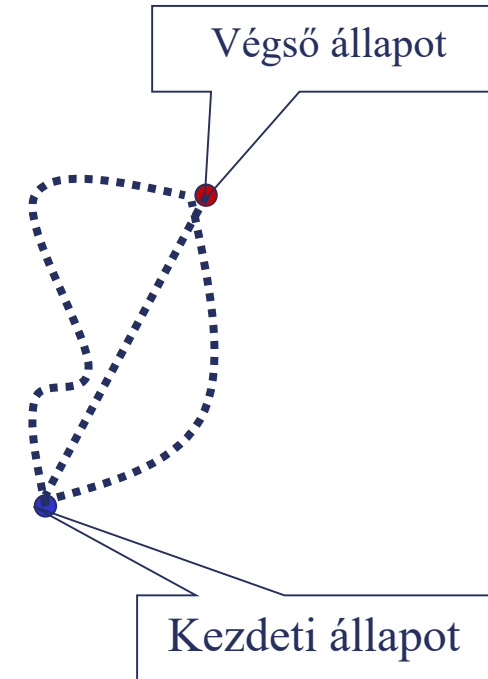
14 %

Direkt kalorimetria



Hess tétele:

anyag	kalorimetrikus energia kJ/g
szénhidrát	17,1
fehérje	23,6
etanol	29,7
zsír	39,6



anyag	energia sűrűség J/Kg
ATP	$1,0 \cdot 10^5$
H_2	$1,2 \cdot 10^8$
zsír	$3,9 \cdot 10^7$
glükóz	$1,6 \cdot 10^7$

Direkt és indirekt kalorimetria

1 mól glükóz oxidációjához 6 mól=134,46 L oxigén kell!

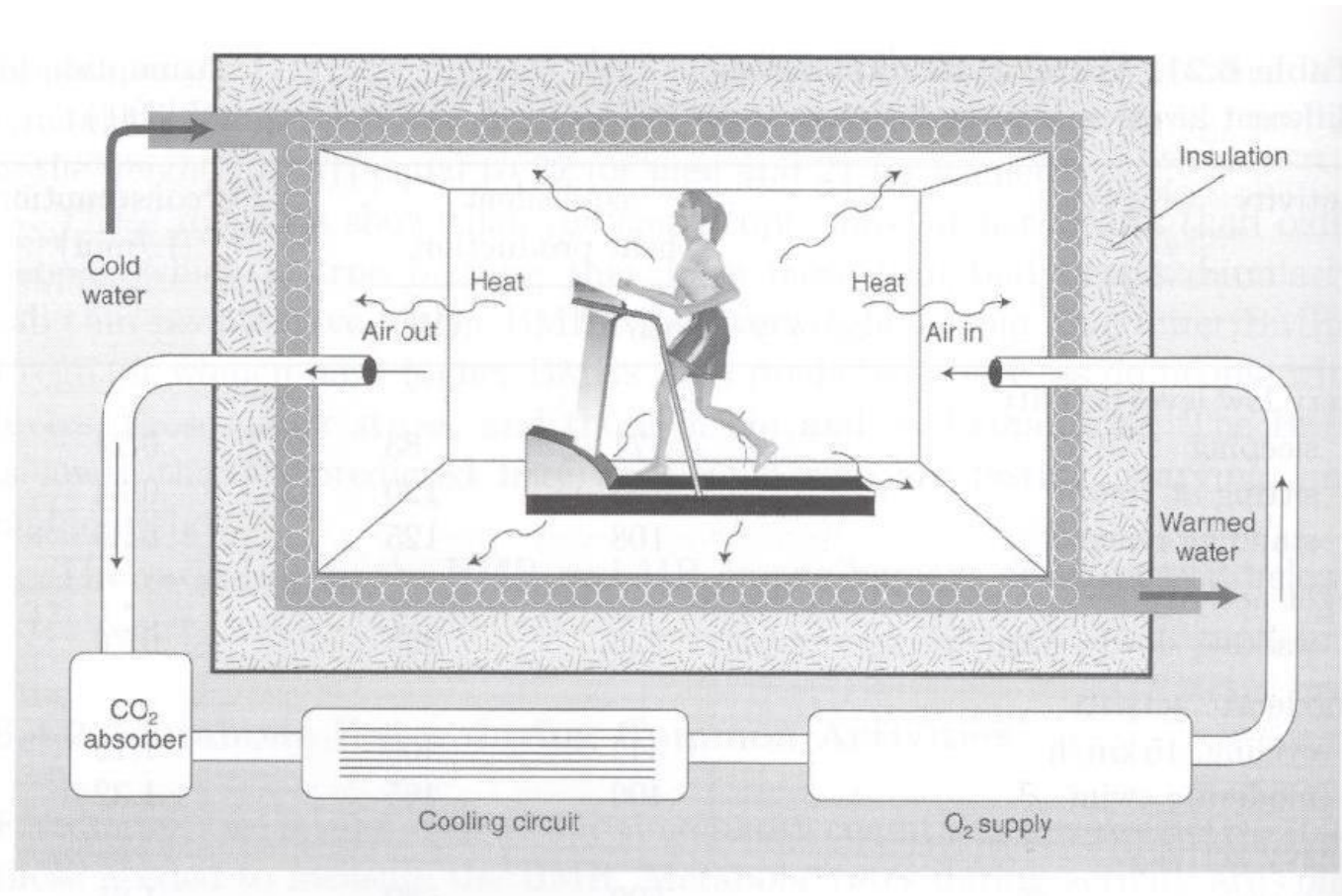
$$\Delta H = +2817 \text{ kJ}$$

Oxigén energia egyenérték

1 L oxigén fogyasztására 21 kJ energiát jelent

komponens	kalorimetrikus energia kJ/g	Oxigén egyenérték kJ/L	Széndioxid egyenérték kJ/L
szénhidrát	17,1	21,1	21,1
fehérje	23,6	18,7	23,3
etanol	29,7	20,3	30,3
zsír	39,6	19,8	27,9

Direkt és indirekt kalorimetria



Kalorimetria \triangleright metabolikus
(V=konst.) (p=konst.)

A BELSŐ ENERGIA (*HŐ*) TRANSZPORTJA

Hol keletkezik a nyugalmi metabolikus hő?

agyvelő	25%
szív	15%
vázizom	25%
hasi zsigerek	25%
vese	6%
bőr	4%

Hol veszik el a metabolikus hő?

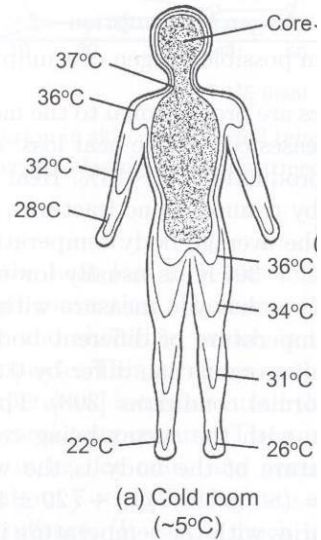
$$Q_{\text{veszteség}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

54-60 %

25 %

7 %

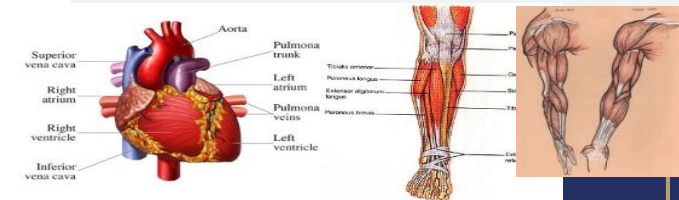
14 %



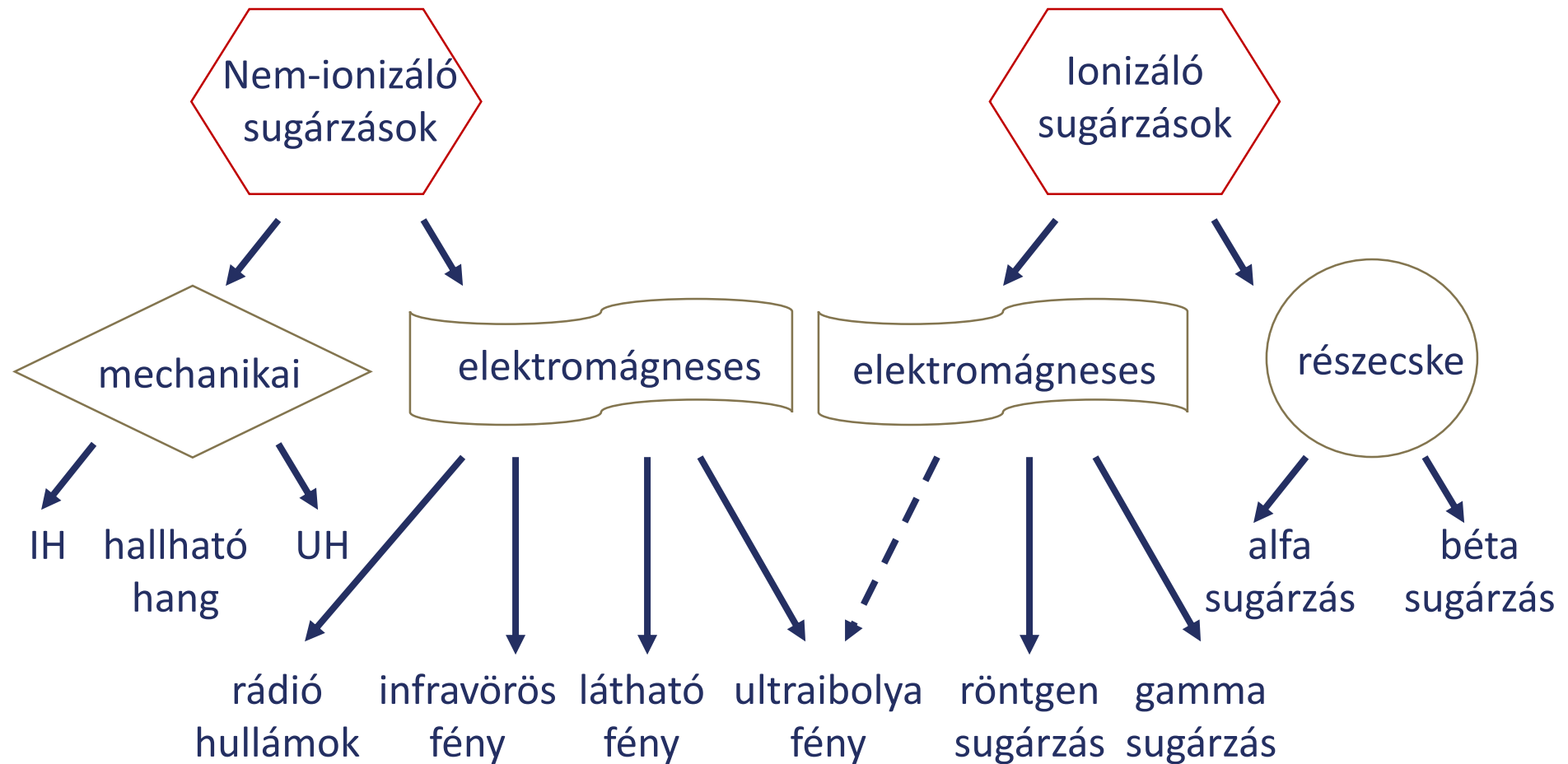
A szervezetben belül a hőmérséklet eloszlás nem homogén.

mag

köpeny



Sugárzások



https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/2011_0001_524_Biofizika/adatok.html

Hőmérsékleti feketetest sugárzás

Környezetének hőfokától függetlenül **minden test** az abszolút nulla foktól különböző **hőmérsékleten** elektromágneses sugárzást bocsát ki.

Abszolút fekete test: minden rá eső energiát elnyel $\alpha = 1$

$$\alpha = \frac{J_{\text{absz}}}{J_{\text{össz}}}$$

Test által elnyelt/
Testet ért összes
sugárzás intenzitása



Kirchhoff megfigyelése: ha egy test „erősebben” sugároz, akkor jobban el is nyel

Az emberi test kb. 95%-os fekete testnek tekinthető.

$$\frac{M_{\lambda i}}{M_{\lambda j}} = \frac{\alpha_{\lambda i}}{\alpha_{\lambda j}}$$

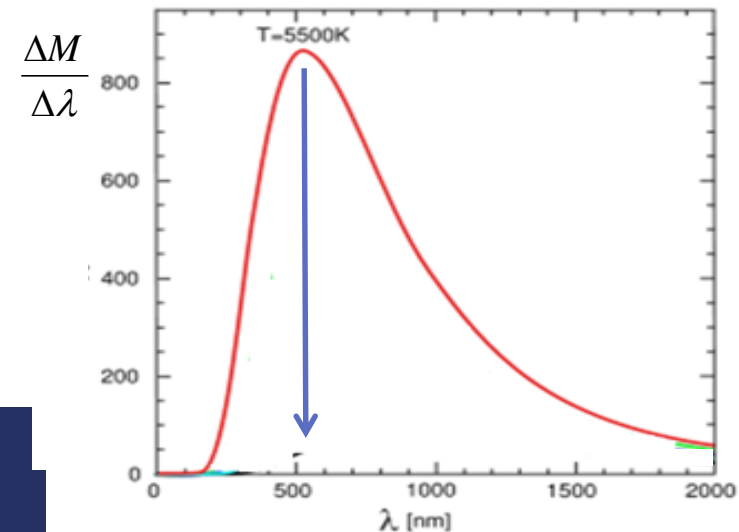
M : kisugárzott felületi teljesítmény [W/m^2]

$$M_i < M_{\lambda(\text{fekete})}$$

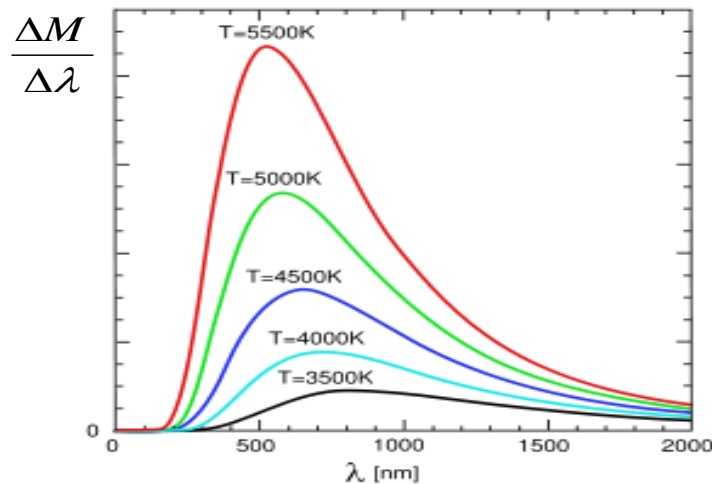
A hőmérsékleti sugárzás emissziós spektruma

- a spektrum folytonos
- egy maximuma van : λ_{max}
- a görbe alatti terület: $M = \sigma T^4$

**Stefan –
Boltzmann
törvény**



Hőmérsékleti feketetest sugárzás



$$T \times \lambda_{\max} = \text{állandó}$$

$$T \times \lambda_{\max} = k$$

Wien-féle eltolódási törvény

Alkalmazások: Stefan Boltzmann törvény alapján
intenzitásokat mérünk

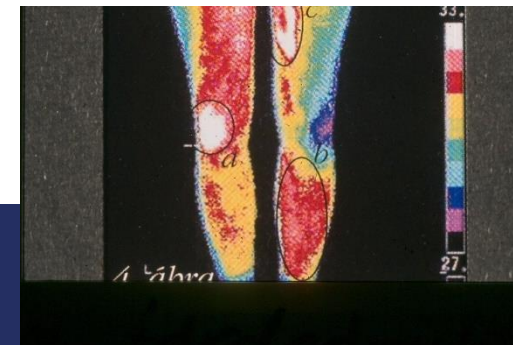
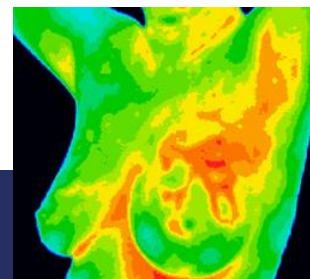
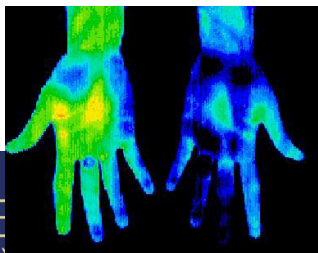
Hőmérsékleti sugárzás detektálása teletermográfia - infradiagnosztika

A köpeny hőtérképe – daganatok, gyulladások, érszűkületek diagnosztikája

Wien-féle eltolódás alapján az emberi test spektrumának maximuma

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2.898 \times 10^6 \text{ K} \cdot \text{nm}}{305 \text{ K}} = 9500 \text{ nm}$$

Emberi hőtérképek készítésében alkalmazott
készülékek érzékenységi maximuma: **7-14
microméter**





Konvektív hővezetés

$$Q_{\text{veszteség}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

$$-\frac{1}{A_s} \frac{dQ_{\text{konvektív}}}{dt} = h_c \cdot (T_{\text{bőr}} - T_{\text{levegő}})$$

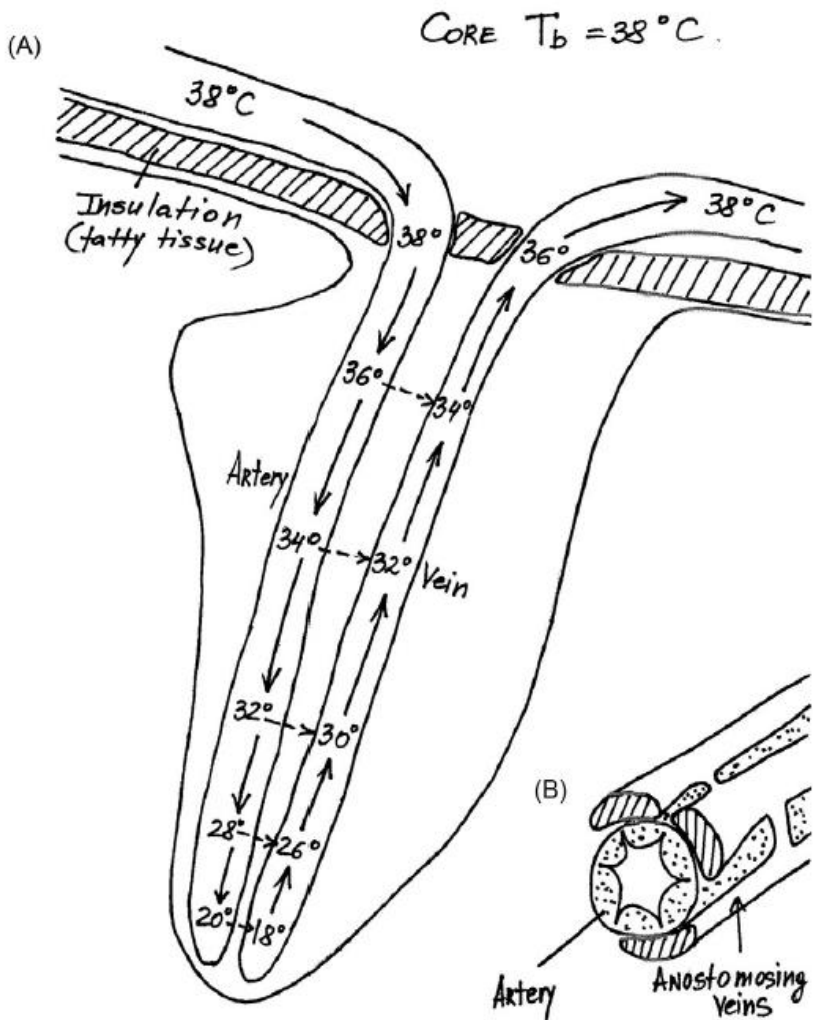
h_c :egységnyi felületre vonatkozó

$W / m^2 C^o$ konvektív hővezetési tényező

Szél sebessége [m/s]	h_c [$W / m^2 C^o$]
0,1	2,6
0,6	6,4
2,0	11,7
4,0	16,6

Szélben: $h_c = 10,45 - v + 10v^{1/2}$
(közelítés)

v : áramló levegő sebesség: m/sec



--> Heat transfer
-> BLOOD FLOW

Testen belüli hővezetés

$$Q_{\text{veszteség}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

(Test és vér közötti hővezetés)

$$-\frac{1}{A_s} \frac{dQ_{\text{véráram}}}{dt} = h_c \cdot (T_{\text{vér}} - T_{\text{testrész}})$$

Pennes bio-hő egyenlete

Ujjbegy
hőmérsékletének
méréséből véráramlás
nyomon követése

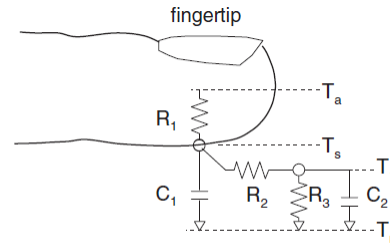
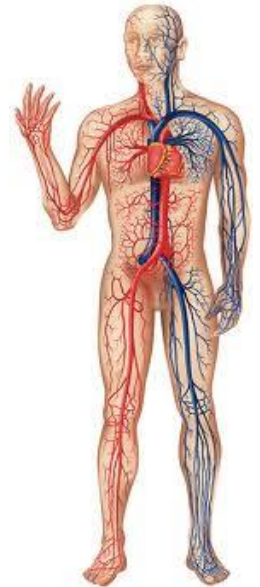


FIG. 3. Heat transfer analysis model with thermal loading (b).

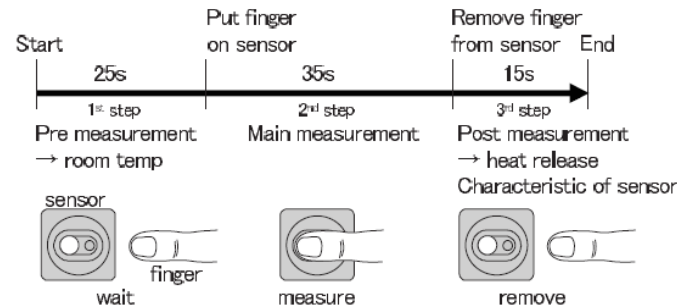


FIG. 7. Measurement procedure.

Nagata et al,2009

$$Q_{\text{veszteség}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

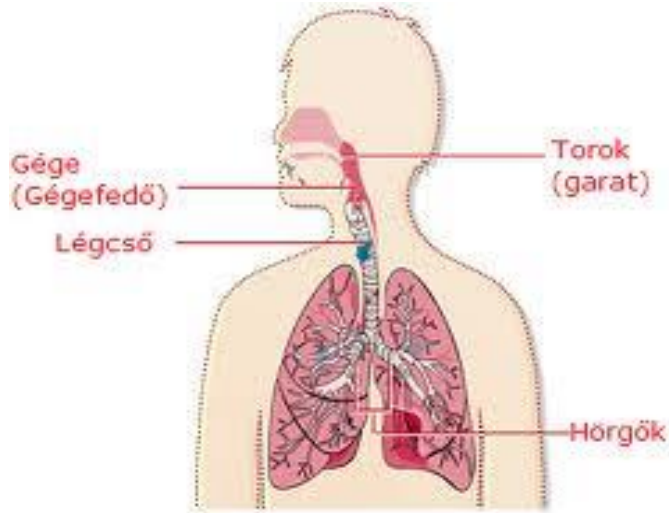
Hőveszteség párolgással izzadás

Víz párolgáshője: $\Delta h_{\text{párolgás}} = 2,25 \text{ kJ} / \text{g}$

V_{izz}

$$-\frac{dQ}{dt} = \Delta h_{\text{párolgás}} \cdot (\rho_{\text{lev}}^{\text{ki}} - \rho_{\text{lev}}^{\text{be}}) \frac{dV_{\text{izz}}}{dt}$$

Hővesztés légzéssel



$$Q_{\text{vesztés}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

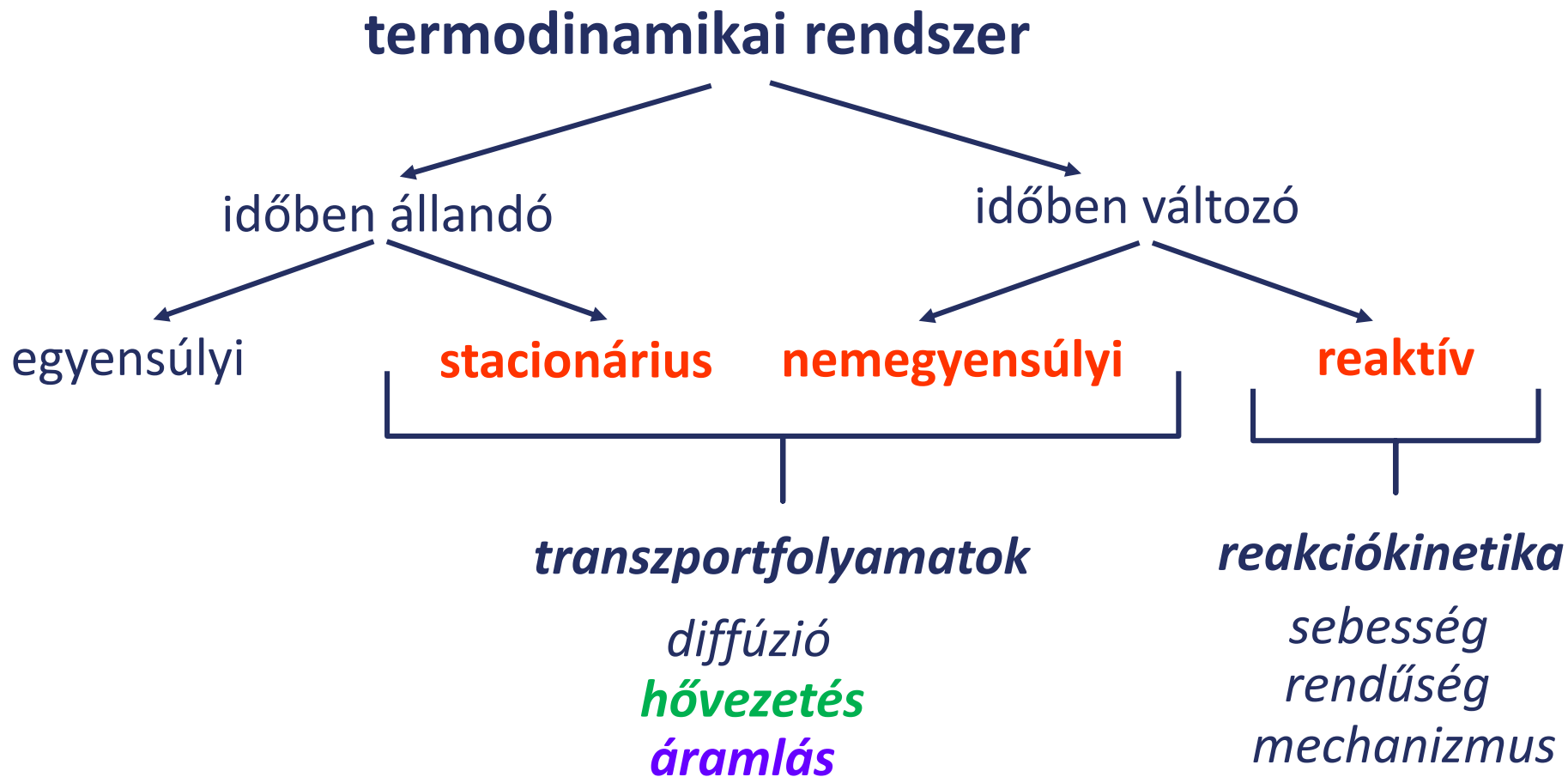
Ki- és belégzés térfogata nyugalomban: 500 ml

Ki- és belégzés frekvenciája nyugalomban: 12 – 14 / perc

$$I_{\text{levegő}} = \frac{dV_l}{dt} \approx 0,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$-\frac{dQ}{dt} = \rho_l c_{p,l} (T_{ki} - T_{be}) \frac{dV_l}{dt}$$

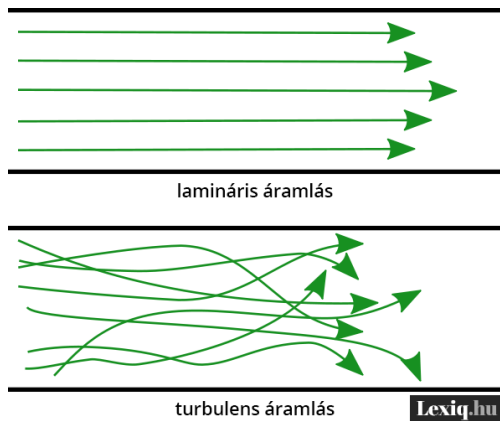
A termodinamikai rendszerek típusai



Fluid rendszerekkel kapcsolatos alapfogalmak

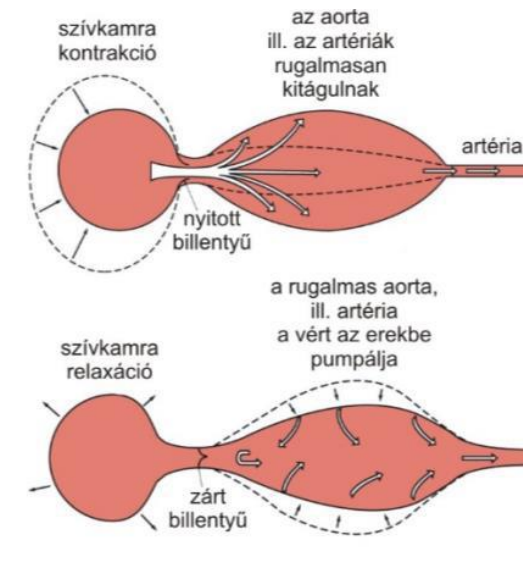
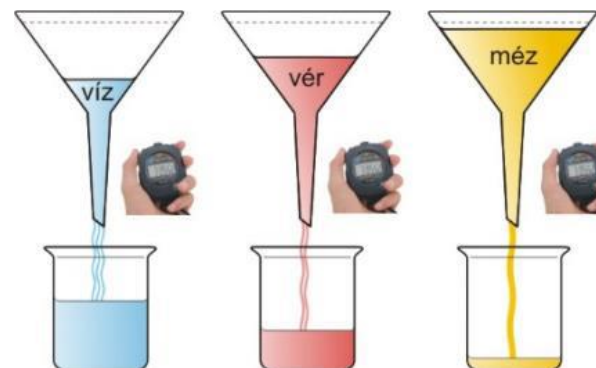
Áramlás

- Lamináris
- Turbulens
- Összenyomható
- Összenyomhatatlan
- „Folyékony”
- Viskózus
- Állandó
- Pulzáló



$$v_1 A_1 \neq v_2 A_2$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = konst.$$



$$R_e = \frac{\text{tehetetlenségi}}{\text{viszkózus}} \left. \vphantom{\frac{\text{tehetetlenségi}}{\text{viszkózus}}} \right\} \text{erők}$$



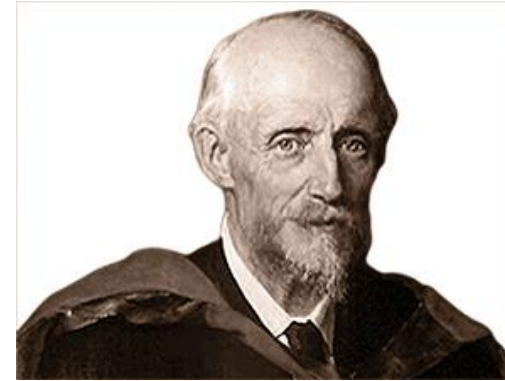
$$R_e = \frac{v \cdot \rho \cdot d}{\eta}$$

v : átlagos áramlási sebesség

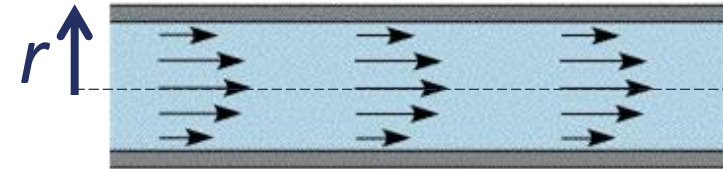
ρ : folyadék sűrűsége

η : viszkozitás

d : átmérő



Osborne Reynolds
1842-1912

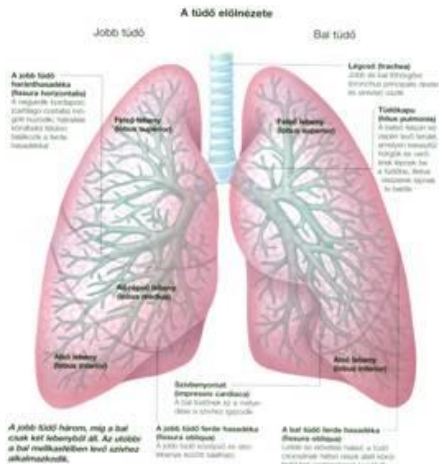


ha $R_e < 2300$



Lamináris áramlás

Levegő áramlása a tüdőben



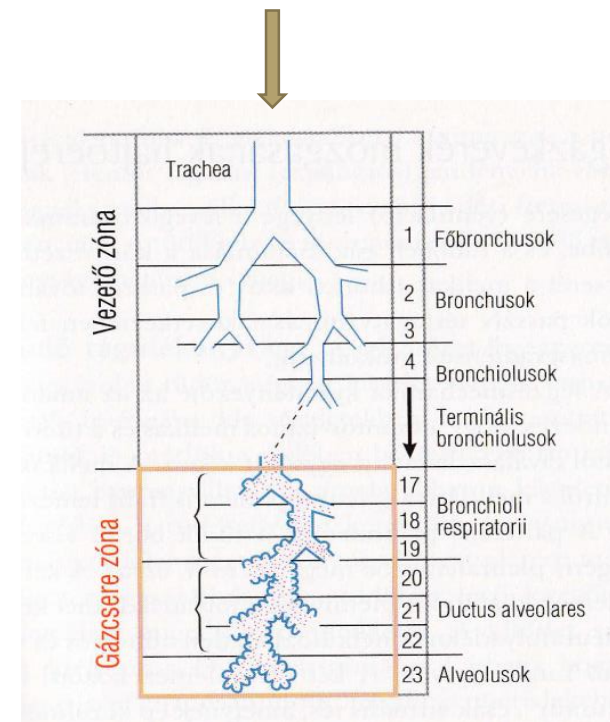
23 generáció a légcsövek átmérőjében

Normál légzés 12/perc

Heves légzés 30/perc

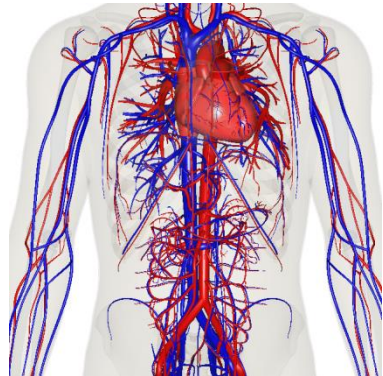
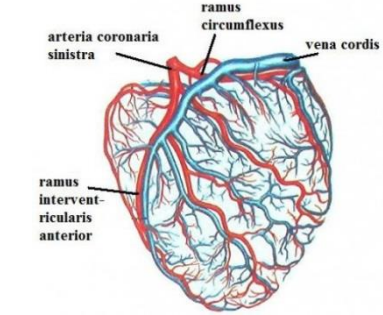
átmérő (cm)	v (cm/s)	Re	v (cm/s)	Re
1,8	197	2325	790	9324
0,56	250	921	1002	3684
0,35	161	369	643	1476
0,13	38	32	151	127

$$I_V = \frac{dV}{dt}$$



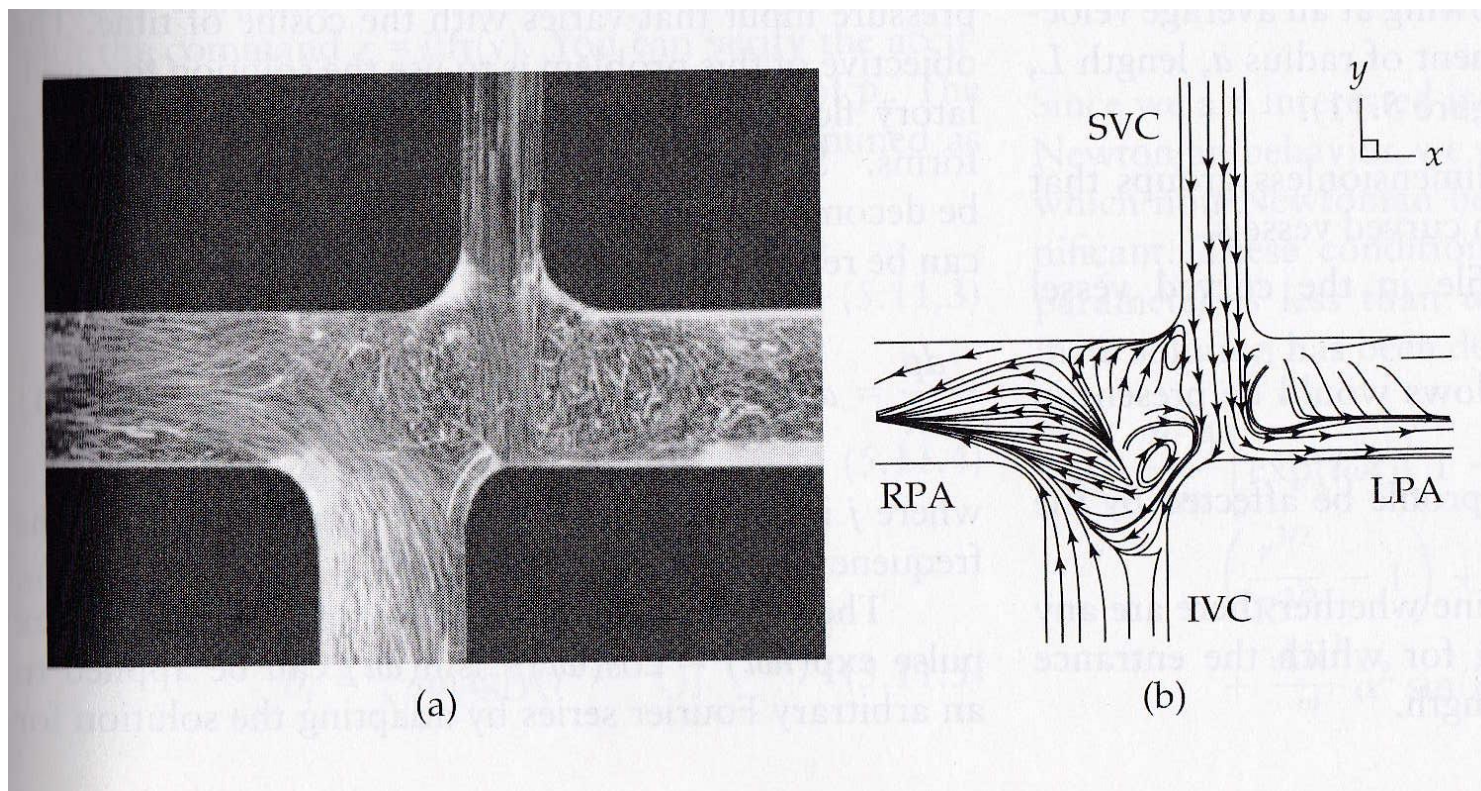
$$\frac{dV_{lev.}}{dt} \approx 5 \text{ L/min} \quad \longrightarrow \quad O_2 \sim 2 \text{ kg / nap}$$

Vér áramlása a szív- és érrendszerben



erek	átmérő cm	Max seb. cm/s	Re Max.	Átl. seb. cm/s	Re átlag
↑ aorta	1,5	120	4500	20	750
↓ aorta	1,3	105	3400	20	648
femorális artéria	0,4	100	1000	10	100
kapilláris	0,0006	7	0,001	0,02	10^{-6}

A keringési rendszer (cardiovascularis) többségében **az áramlás lamináris**. Kivétel a szívből az aortába kilökődő vér áramlása.



Elágazásoknál és szűkületeknél könnyen kialakulhat turbulencia!

Köszönöm a figyelmet!



SEMMELWEIS
EGYETEM 1769