

FOLYADÉKOK ÉS GÁZOK ÁRAMLÁSA A VÉR MINT FOLYADÉK

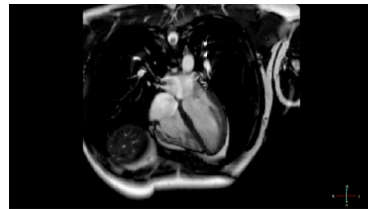
KELLERMAYER MIKLÓS

Áramlások jelentősége

I. Hemodinamika

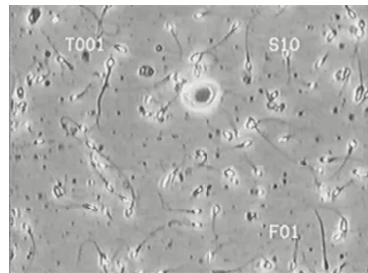
Pl.: Milyenek a véráramlási viszonyok az érrendszerben?

(ugyanígy: gázok áramlása a légutakban)



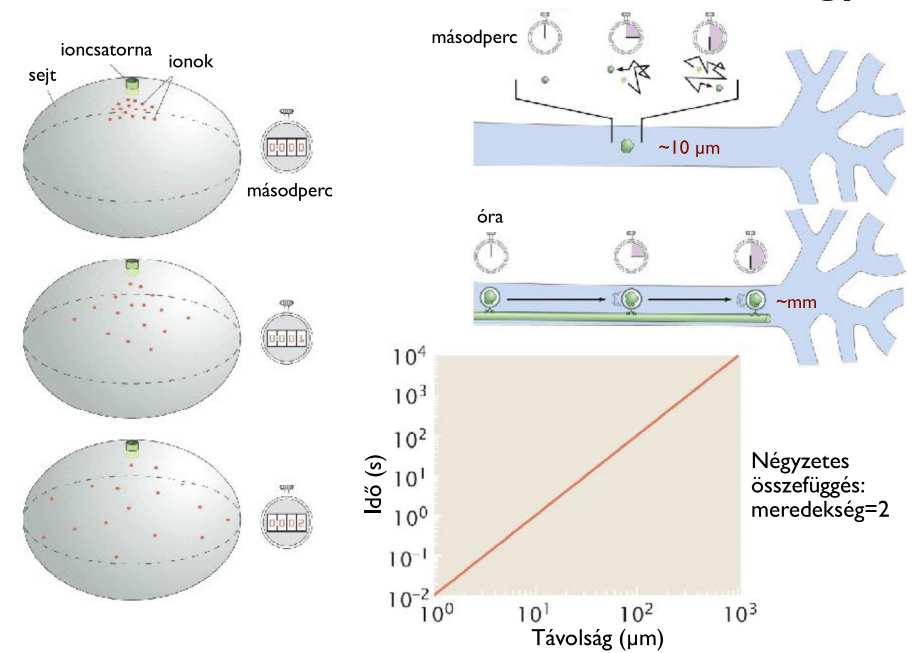
II. Viszkózus folyadékban történő mozgások

Pl.: Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen spermaticitának mozgása során?



N.B.: a gázok - ellentétben a folyadékokkal - összenyomhatók. Élettanilag releváns nyomáskülönbségek (~100 Pa) esetén azonban térfogat-/sűrűségváltozásuk elhanyagolható.

A diffúzió csak rövid méretsálán gyors



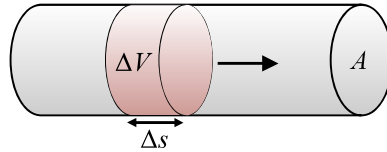
Folyadékok és gázok áramlása A vér fizikai tulajdonságai

- Alapfogalmak
- Folyadékok fajtái
- Áramlások fajtái
- Törvények, összefüggések
- Vér mint folyadék; a vérviszkozitás meghatározói

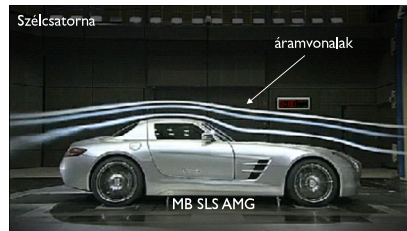
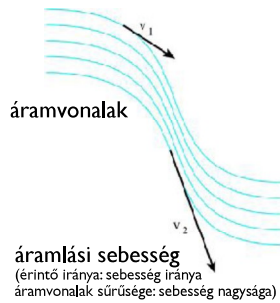
Alapfogalmak I.

Térfogati áramerősség (I_V):

$$I_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} = A \frac{\Delta s}{\Delta t} = A \bar{v}$$

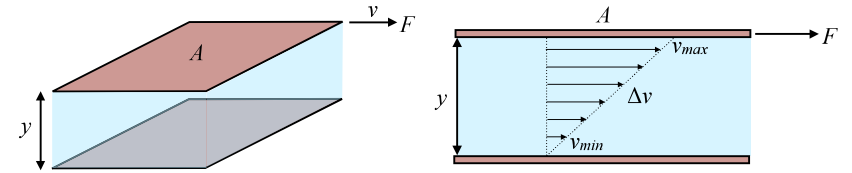


Átlagsebesség: $\bar{v} = \frac{I_V}{A}$



Az áramlás láthatóvá tehető

Alapfogalmak II. Viszkozitás (belső súrlódás)



F = nyíróerő
 A = folyadéklemez területe
 η = viszkozitás
 v = áramlási sebesség
 y = folyadéklemezek közötti távolság
 F/A = nyírófeszültség (τ)
 $\Delta v/\Delta y$ = sebesség grádiens (D)

$\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y}$ (Newton-féle súrlódási törvény)
 $\eta = \frac{\tau}{D}$

A viszkozitás mértékegységei: $1 \text{ Pas} = 1 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} = 10 \text{ P (poise)}$

Desztillált víz viszkozitása (25 °C): ~1 mPas (1 centipoise)

N.B.: gázokban $\eta \sim T$

Részecskék közötti impulzuscsere a lemezek egymáson való elcsúszása ellen hat.

folyadékokban $\eta \sim e^{E/k_B T}$

A részecskék közötti "lyukak" relatív koncentrációjával csökken a viszkozitás.

Folyadékok fajtái

1. Ideális

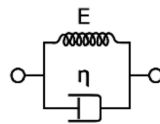
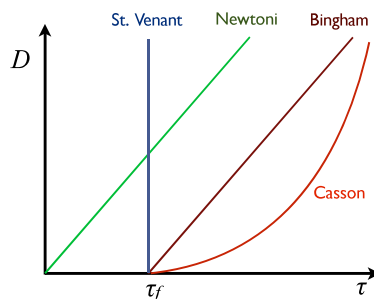
súrlódásmentes, nem összenyomható
 $\rho = \text{konstans}, \eta = 0$

2. Nem ideális (reális)

a. Newtoni (viszkózus)
 η független a nyírófeszültségtől

b. Nem-newtoni (anomális)
 η a nyírófeszültséggel változik

Sebességgrádiens és nyírófeszültség összefüggése **reális** folyadékokban



Viszkoelasztikus test model - Kelvin-test: párhuzamosan csatolt rugó és dugattyú

- τ_f = folyási határ (küszöbfeszültség)
- Viszkoelasztikus anyagok: elastikus test + viszkózus folyadék (pl. polimer-, makromolekula-oldatok)
- Stressz-relaxáció: feszültség lecsengése idő függvényében hirtelen megnyújtott viszkoelasztikus testben.
- A vér nem-newtoni folyadék, viszkoelasztikus tulajdonságokkal rendelkezik!

Áramlások fajtái

1. Stacionárius

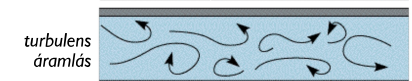
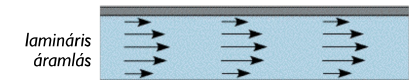
Csőkeresztmetszeten időegység alatt átáramló folyadékmennyiség konstans (az áramlást jellemző mennyiségek nem változnak)

2. Lamináris

Folyadékrétegek nem keverednek

3. Turbulens

Folyadékrétegek keverednek



Reynolds-szám (Re):

$$\text{Re} = \frac{vr\rho}{\eta}$$

v = folyadékáramlási sebesség (m/s)
 r = cső sugara (m)
 ρ = folyadék sűrűsége (kg/m³)
 η = viszkozitás (Ns/m²)



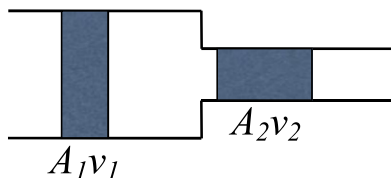
Osborne Reynolds (1842-1912)



"Ha találkozom Istennel, két kérdésem lesz: Miért relativitás? Miért turbulencia? Szerintem az elsőre fog tudni válaszolni!" (Werner Heisenberg)

Törvényszerűségek ideális folyadékokban I.

Kontinuitási egyenlet:
térfogati áramerősség konstans



$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = konst$$

A = keresztmetszet
 v = áramlási sebesség

Törvényszerűségek ideális folyadékokban II.

Bernoulli törvény - energiamegmaradás törvénye



Daniel Bernoulli
(1700-1782)

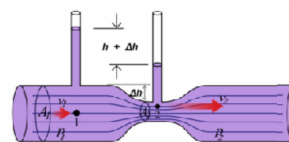
$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = konst$$

p = sztatikus nyomás
 $\frac{1}{2} \rho v^2$ = dinamikus nyomás (torló nyomás)
 $\rho g h$ = hidrosztatikai nyomás

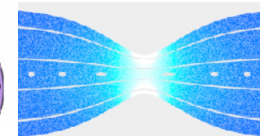
Alkalmazás: Venturi-effektus



Giovanni Battista Venturi
(1746-1822)



A sztatikus nyomás lecsökken a cső szűkülésében



Venturi cső

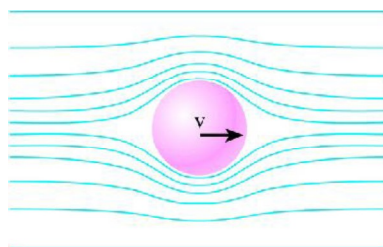
- Kettős pulzus (*pulsus bisferiens*) aorta insuficienciában
- Aspirátor (vákuum szivattyú)
- Inspirátor (Bunsen-égő)
- Merőeszközök (térfogati áramerősség)
- Szódás szifon
- Porlasztó (atomizátor, spray, karburátor)
- Fúvós hangszerek fúvókái
- Diffúzor

Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban I.

Stokes törvény



Georg Gabriel Stokes
(1819-1903)

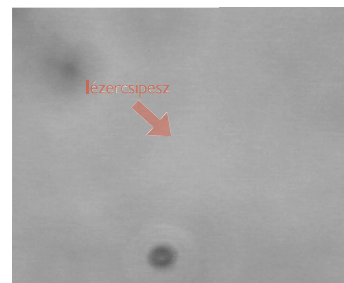


$$F = \gamma = 6r\pi\eta v$$

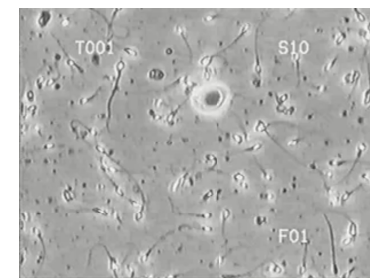
F = erő
 γ = közegellenállási (súrlódási) együttható, alakifaktor
 v = folyadékáramlási sebesség
 r = gömb sugara
 η = viszkozitás

Stokes erő

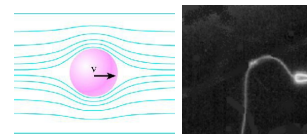
Hidrodinamikai húzóerő (Stokes erő): $F = \gamma = 6r\pi\eta v$



Hat folyadékban álló részecskékre
(lezeresipeszben megragadott mikrogönggy)



Hat álló folyadékban mozgó részecskékre
(mozgó spermaticiták)



$r = 1.6 \mu m = 1.6 \times 10^{-6} m$
 $v = 50 \mu m/s = 5 \times 10^{-5} m/s$
 $\eta = 10^{-3} Pas$

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen spermaticitának mozgása során?

$$\gamma = 6r\pi\eta = 6 \cdot 1.6 \times 10^{-6} \cdot \pi \cdot 10^{-3} = 3 \times 10^{-8} Ns/m$$

$$F = \gamma = 3 \times 10^{-8} Ns/m \cdot 5 \times 10^{-5} m/s = 1.5 \times 10^{-12} N = 1.5 pN$$

Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban II.

Hagen-Poiseuille törvény



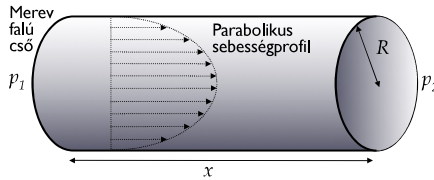
G.H.L. Hagen
(1797-1884)



J.-L.-M. Poiseuille
(1799-1869)

Termodinamikai áram	Áramot fenntartó intenzív mennyiség-különbség	Áramsűrűség	Törvény
Térfogati áram	Nyomás (p)	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$	Hagen-Poiseuille

$$J_V = \frac{V}{tA} = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$



V = térfogat
 t = idő
 R = sugár
 η = viszkozitás
 p = nyomás
 x = csőhossz
 $V/t = I_V$ = térfogati áramerősség
 $\Delta p / \Delta x$ = nyomásgradiens, fenntartója $p_2 - p_1$ (negatív!)
 A = csőkeresztmetszet
 I_V = térfogati áramerősség

N.B. 1: $A = R^2 \pi \Rightarrow I_V = \frac{V}{t} = -\frac{R^4 \pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$

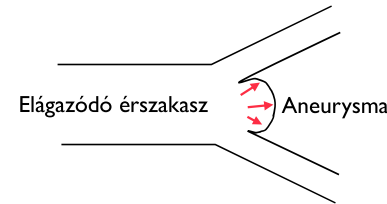
N.B. 2: $I_V = -\frac{R^4 \pi}{8\eta \Delta x} \Delta p \Rightarrow -\Delta p = R_{cső} \cdot I_V \Rightarrow U = R \cdot I$
 1/ $R_{cső}$ Ohm-törvény!

N.B. 3: $\frac{\Delta v}{\Delta r} \sim r \Rightarrow \left(\frac{\Delta v}{\Delta r} \right)_{\max} = R \Rightarrow \tau_{\max} = R$

A nyírófeszültség a fal közelében maximális (von Willebrand-faktor az érfal közelében nyúlik ki a nyíróerő hatására)

A folyadékáramlásban közvetlen orvosi jelentősége

Bernoulli törvény:



Hagen-Poiseuille törvény:

$$\frac{V}{t} = \frac{R^4 \pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

Aneurysma, értágulat kialakulása:

- Tágulás: érátmérő nő
- Áramlási sebesség csökken a kontinuitási egyenlet miatt
- Érfalra ható (sztatikus) nyomás nő a Bernoulli törvény miatt
- Értágulat fokozódik - összességében pozitív visszacsatolású, katasztrófához vezető állapot.

Átáramló **vérmennyiség** - és vele **együtt a szállított oxigén mennyisége** - **drasztikusan csökken** pathológiás állapotokban:

- érszűkület (pl. diabetes, Bürger-kór)
- vérviszkozitás-változás (pl. láz, anaemia)
- pl.: érátmérő felére csökkenése a térfogati áramerősséget 1/16-ára csökkenti!

A vér mint folyadék

Testtömeg 55-60%-a víz 42 kg (70 kg testsúly)		
2/3 intracelluláris 28 kg	1/3 extracelluláris 14 kg	
	1/3 vérplazma 4-5 kg	2/3 intersticium 9-10 kg

Átlagos térfogat: 5 l

Átlagos viszkozitás: 5 mPas

Átlagos sűrűség: 1.05 g/cm³

Összetétel: 40-45 % alakos elem, 55-60 % plazma

Vér:

A vérviszkozitás meghatározói

I. Hematokrit (htc, ϕ):

$$htc = \frac{\text{sejtek}}{\text{össztérfogat}}$$

Normálérték: 0.4-0.5.

A vér mint szuszpenzió viszkozitása (az élettanilag releváns htc tartományban):

$$\lg \eta_s = A + B\phi$$

η_s = szuszpenzió viszkozitása
 A, B = tapasztalati állandók

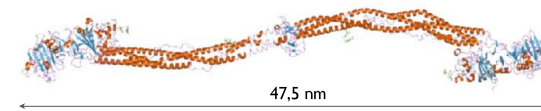
A vérviszkozitás meghatározói

2. Plazmaviszkozitás

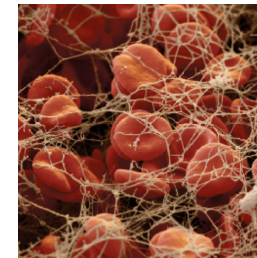
- Elsősorban a plazmafehérjéktől függ.
- *Paraproteinaemiákban* (myeloma multiplex v. plasmocytoma) az immunglobulinok mennyisége kórosan fokozódott, mely viszkozitásnövekedéshez vezet.

Plazmafehérje	Normális koncentráció	%-os megoszlás	Feladat
Albumin	35-50 g/l	55%	kolloid ozmotikus nyomás fenntartása, transzport
Globulinok	20-25 g/l	38%	Immunrendszer részei
Fibrinogén	2-4.5 g/l	7%	Véralvadás

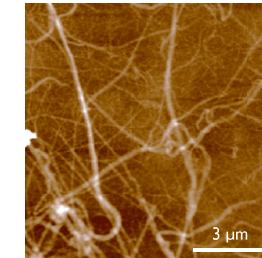
Fibrinogén, fibrin



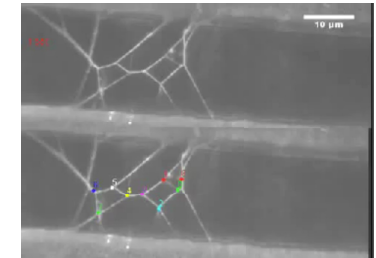
Fibrinogén:
 MW = 340.000 Da
 Plazmában 2-4 g/l \approx 10 μ M
 Átlagos távolság a fibrinogén-molekulák között: 55 nm!



Vörösvértestek
fibrinhálóban



In vitro polimerizált fibrin
(AFM)

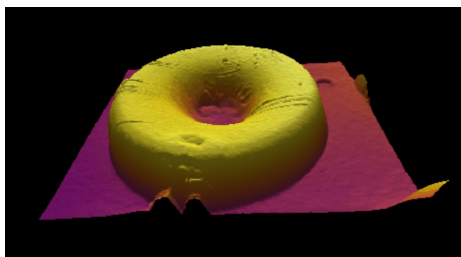


Fluoreszcensten jelölt fibrinszálak
rugalmassága, nyúlékonysága

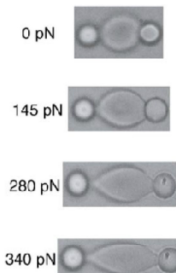
A vérviszkozitás meghatározói

3. Vörösvértestek deformálhatósága

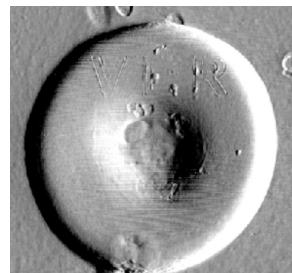
- Vvt-méretű szilárd részecskék 65%-os szuszpenziója téglakemény.
- 95%-os vvt-szuszpénzió viszkozitása csupán 20 mPas!
- Deformáció: csepp, ejtóernyő, nyílhegy alakú sejtek.



7-11 μ m átmérőjű korong alakú sejt



VVT deformálás
lézercsipesszel

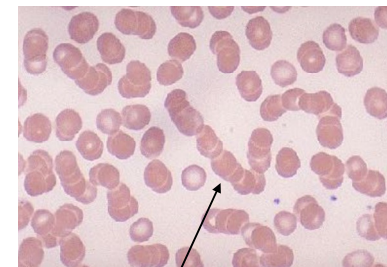


Fixált, benyomatot
tartó VVT (AFM)

A vérviszkozitás meghatározói

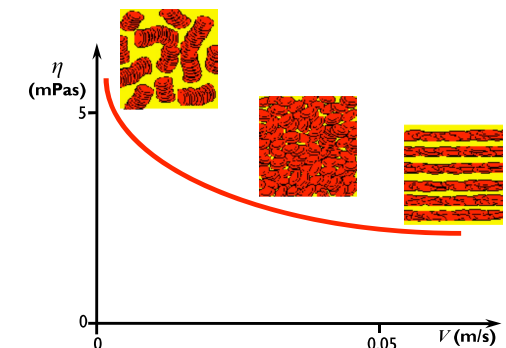
4. Vörösvértestek aggregációs készsége

- Pénztekercsképződés (Rouleaux).
- Alacsony áramlási sebességnél fokozott hajlam.



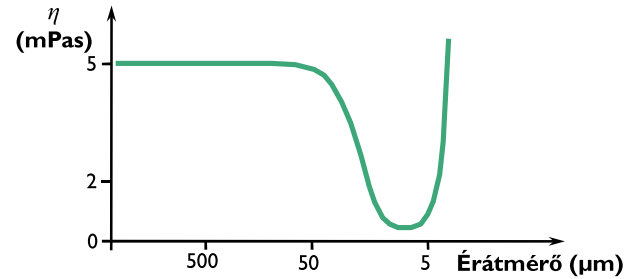
Pénztekercs

5. Áramlási sebesség, sebességgrádiens



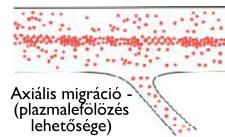
A vérviszkozitás meghatározói IV.

6. Érátmérő



N.B.:

- Érátmérő csökkenésével a vér anomális (nem-newtoni) viselkedése kerül előtérbe.
- Axialis migráció: a vvt-k az ér tengelyébe, sejtoszlopba állnak be (Bernoulli-törvény!): tengely közelében csökken, az érfal közelében nő a sebességgrádiens (csökken a látszólagos viszkozitás, Fåhræus-Lindquist effektus).



Axialis migráció -
(plazmaleföldözés
lehetősége)