

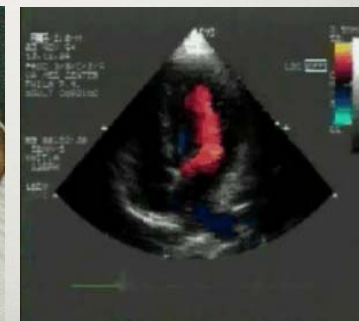
FOLYADÉKÁRAMLÁS VÉRKERINGÉS

KELLERMAYER MIKLÓS

Folyadékok fizikájának jelentősége

I. Hemodinamika

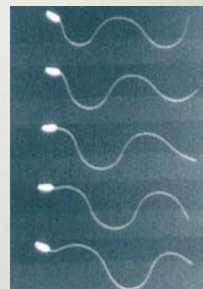
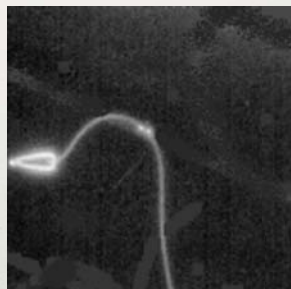
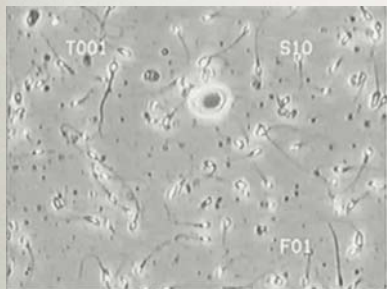
Milyenek a véráramlási
viszonyok az
érrendszerben?



Folyadékok fizikájának jelentősége

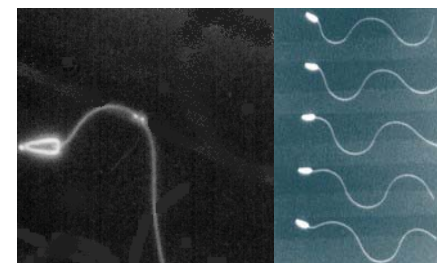
II. Folyadékban történő mozgások

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen spermaticitának mozgása során?

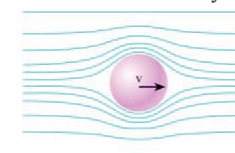


Spermaticita motilitás

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen spermaticitának mozgása során?



Stokes törvény:



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

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

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

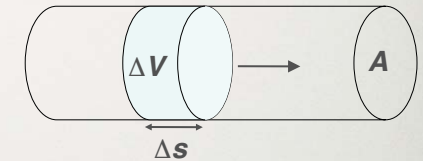
$$F = \gamma = 3 \times 10^{-8} \text{ Ns/m} \cdot 5 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 1.5 \times 10^{-12} \text{ N} = 1.5 \text{ pN}$$

A FOLYADÉKÁRAMLÁS BIOFIZIKÁJA

- Alapfogalmak
- Folyadékok fajtái
- Áramlások fajtái
- Törvények, összefüggések
- Orvosi, biológiai jelentőség

Alapfogalmak I.

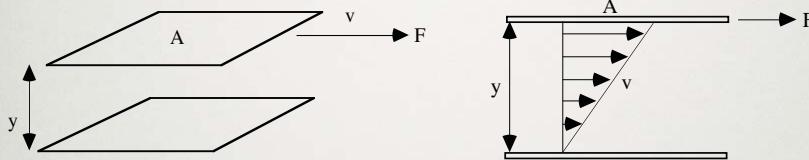
Térfogati áramerősség (Q):



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

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

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)

A viszkozitás mértékegységei:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

$$\eta = \frac{\tau}{D}$$

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

Folyadékok fajtái I.

1. Ideális

súrlódásmentes, nem összenyomható

$$\rho = \text{konstans}, \eta = 0$$

2. Nem ideális (reális)

a. Newtoni (viszkózus)

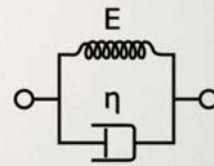
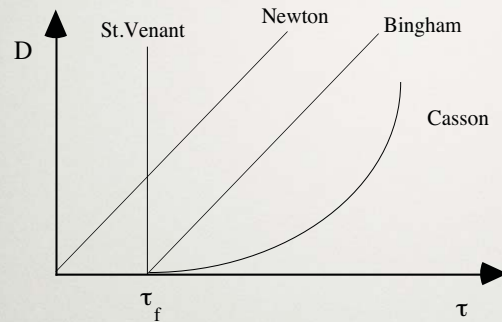
η független a nyírófeszültségtől

b. Nem-newtoni (anomális)

η a nyírófeszültséggel változik

Folyadékok fajtái II.

Sebességgrádiens és nyírófeszültség összefüggése reális folyadékokban



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

τ_f = folyási határ (küszöbfeszültség)

Viszkoelasztikus anyagok: elasztikus test + viszkózus folyadék (pl. polimer-, makromolekula-oldatok)

Stressz-relaxáció: feszültség lecsengése idő függvényében hirtelen megnyújtott viszkoelasztikus testben.

N.B.: A vér nem-newtoni folyadék, viszkoelasztikus tulajdonságokkal rendelkezik!

Áramlások fajtái

- Stacionárius**
Csőkeresztmetszeten időegység alatt átáramló folyadékmennyiség konstans
- Lamináris**
Folyadékrétegek nem keverednek
- Turbulens**
Folyadékrétegek keverednek



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

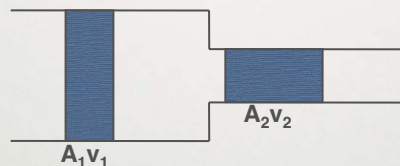
v = folyadékáramlási sebesség (m/s)
 r = cső sugara (m)
 ρ = folyadék sűrűsége (kg/m³)
 η = viszkozitás (Ns/m²)



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

Törvényszerűségek ideális folyadékokban I.

Kontinuitási egyenlet



$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = konst$$

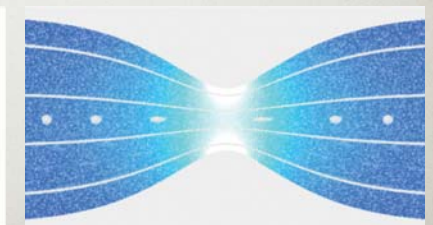
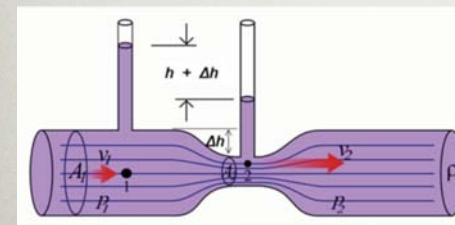
A = keresztmetszet
v = áramlási sebesség

Törvényszerűségek ideális folyadékokban II.

Bernoulli törvény

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

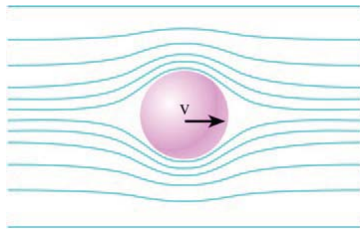
p = sztatikus nyomás
 $\frac{1}{2} \rho v^2$ = dinamikus nyomás
 ρgh = hidrosztatikai nyomás



Venturi effektus

Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban I.

Stokes törvény



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

F = erő

γ = közegellenállási (súrlódási) együttható, alaki faktor

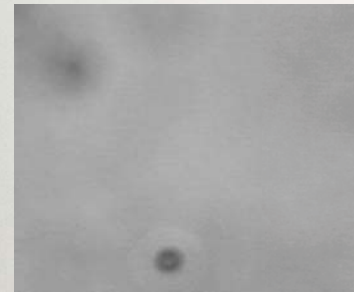
v = folyadékáramlási sebesség

r = gömb sugara

η = viszkozitás

Stokes erő

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



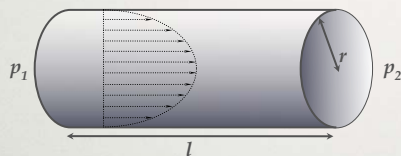
Hat folyadékban álló részecskékre



Hat álló folyadékban mozgó részecskékre

Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban II.

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

η = viszkozitás

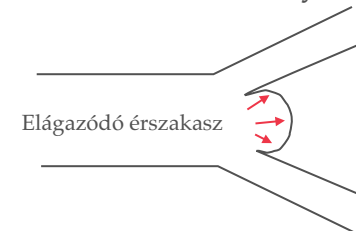
p = nyomás

l = cső hossza

$(dp/dl = \text{nyomásgrádiens, fenntartója } p_1 - p_2)$

Orvosi, biológiai jelentőség

Bernoulli törvény:



aneurysma, értágulat:

- ➔ áramlás csökken (kontinuitási egyenlet alapján)
- ➔ nyomás nő
- ➔ tárgulat fokozódik

Hagen-Poiseuille törvény:

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

Átáramló **vérmennyiség drasztikusan csökken** pathológiás állapotokban:

érszűkület (pl. diabetes, Bürger-kór)

vérviszkozitás-változás (pl. láz, anaemia)

A VÉRKERINGÉS BIOFIZIKÁJA

1. Vér mint folyadék
2. A vérviszkózitás meghatározói
3. Az érrendszer
4. Erek mint rugalmas falú csövek
5. A vérkeringés segéderői

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

Vér

Átlagos térfogat: 5 l
Átlagos viszkozitás: 5 mPas
Átlagos sűrűség: 1.05 g/cm³
Összetétel: 40-45 % alakos elem, 55-60 % plazma

A VÉRVISZKOZITÁS MEGHATÁROZÓI I.

1. 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 II.

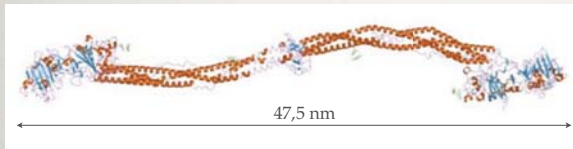
2. Plazmaviszkózitás

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

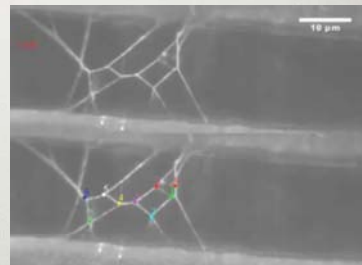
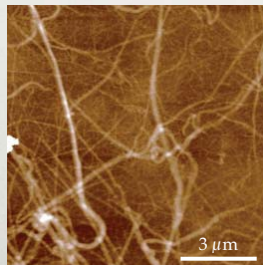
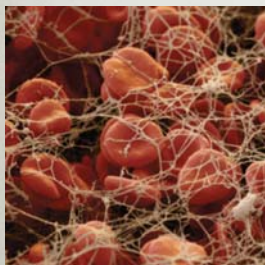


Fibrinogén:

MW = 340.000 Da

Plazmában 2-4 g/l $\approx 10 \mu\text{M}$

Átlagos távolság a fibrinogén-molekulák között: 55 nm!



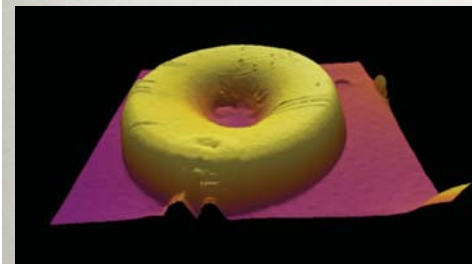
A VÉRVISZKOZITÁS MEGHATÁROZÓI III.

3. Vörösvértestek deformálhatósága

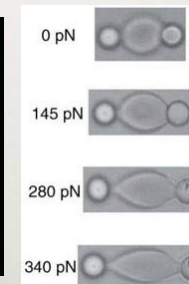
Vvt-méretű szilárd részecskék 65%-os szuszpenziója téglakemény.

95%-os vvt-szuszpénzió viszkozitása csupán 20 mPas!

Deformáció: csepp, ejtőernyő, nyílhegy alakú sejtek.



7-11 μm átmérőjű korong alakú sejt



VVT deformálás
lézercsippessel



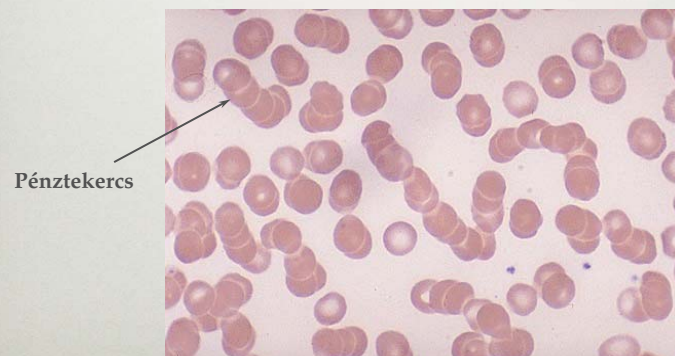
Fixált, benyomatot tartó
VVT (AFM)

A VÉRVISZKOZITÁS MEGHATÁROZÓI III.

4. Vörösvértestek aggregációs készsége

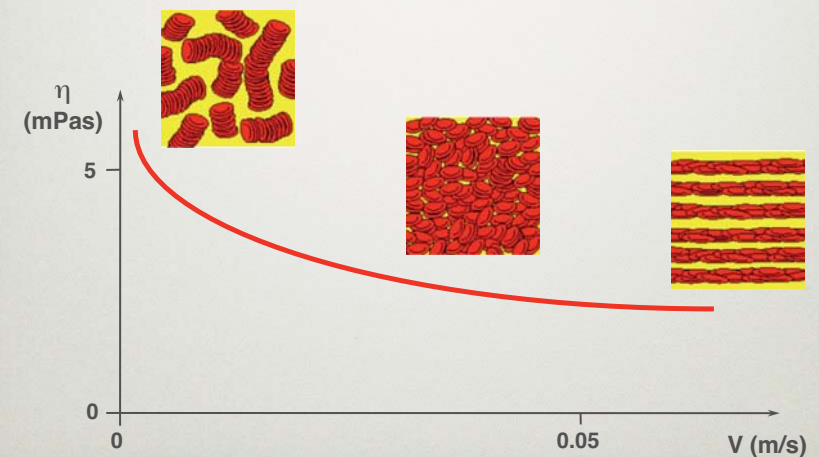
Pénztekercsképződés (Rouleaux).

Alacsony áramlási sebességnél fokozott hajlam.



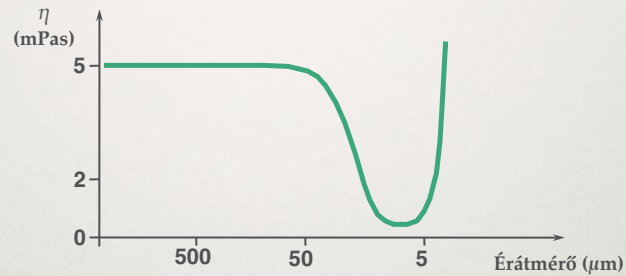
A VÉRVISZKOZITÁS MEGHATÁROZÓI IV.

5. Áramlási sebesség, sebességgrádiens



A vérviszkozitás meghatározói V.

6. Érátmérő



N.B.:

-Érátmérő csökkenésével a vér anomális (nem-newtoni) viselkedése kerül előtérbe.

-Axiális migráció: a vvt-k az ér tengelyébe, sejtoszlopba állnak be: tengely közelében csökken, az érfal közelében nő a sebességgrádiens (csökken a látszólagos viszkozitás, Fåhræus-Lindquist effektus).