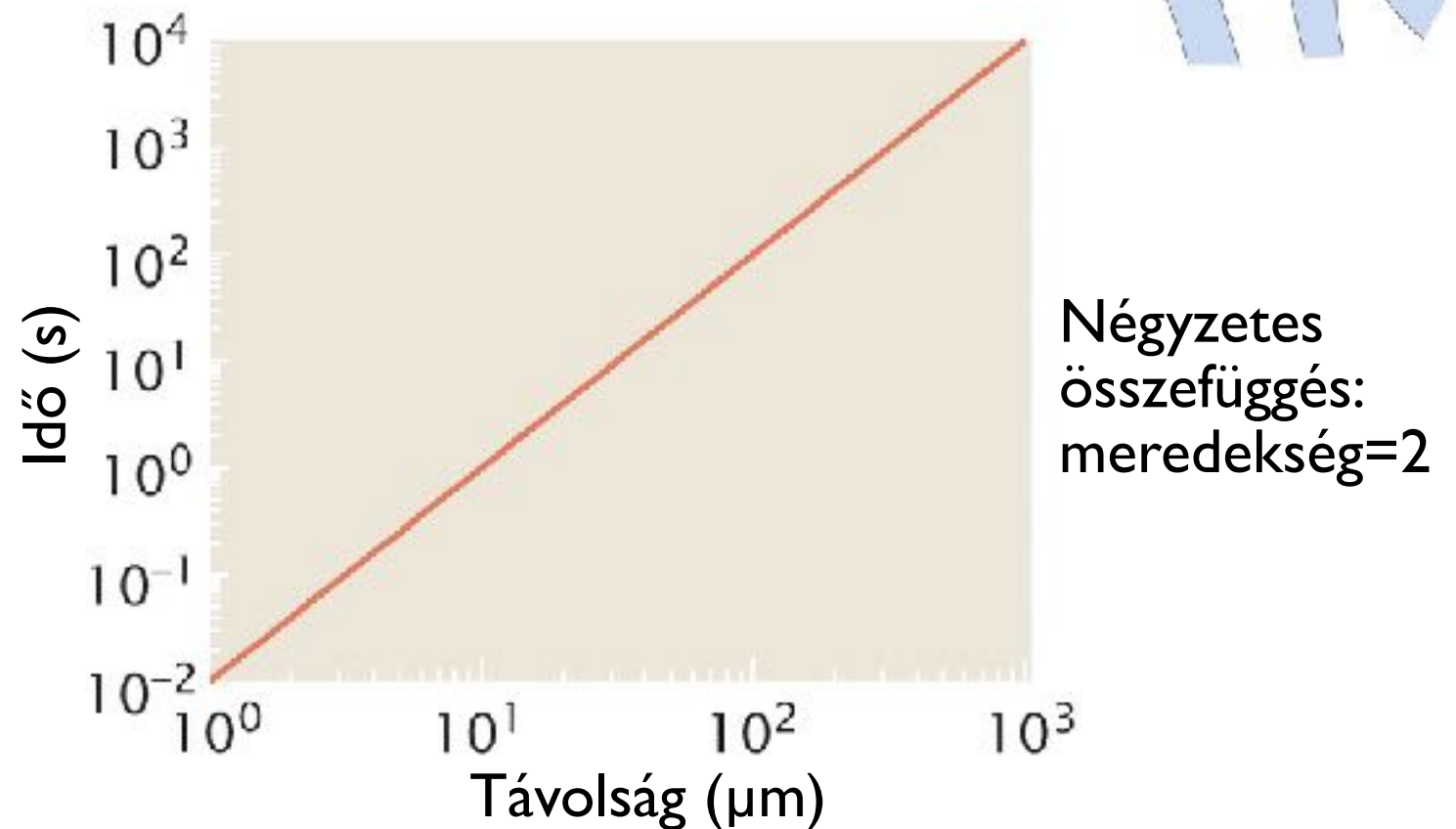
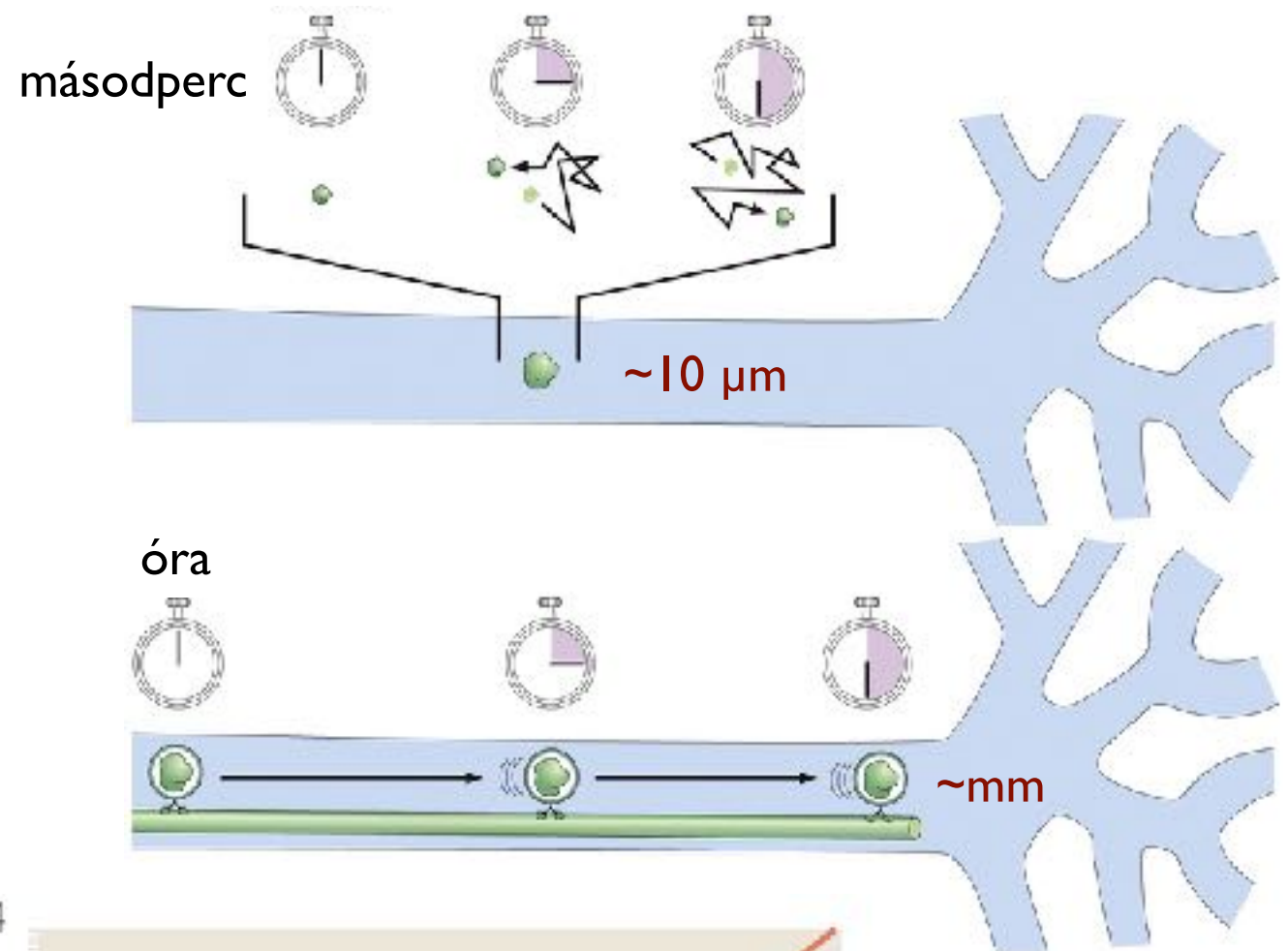
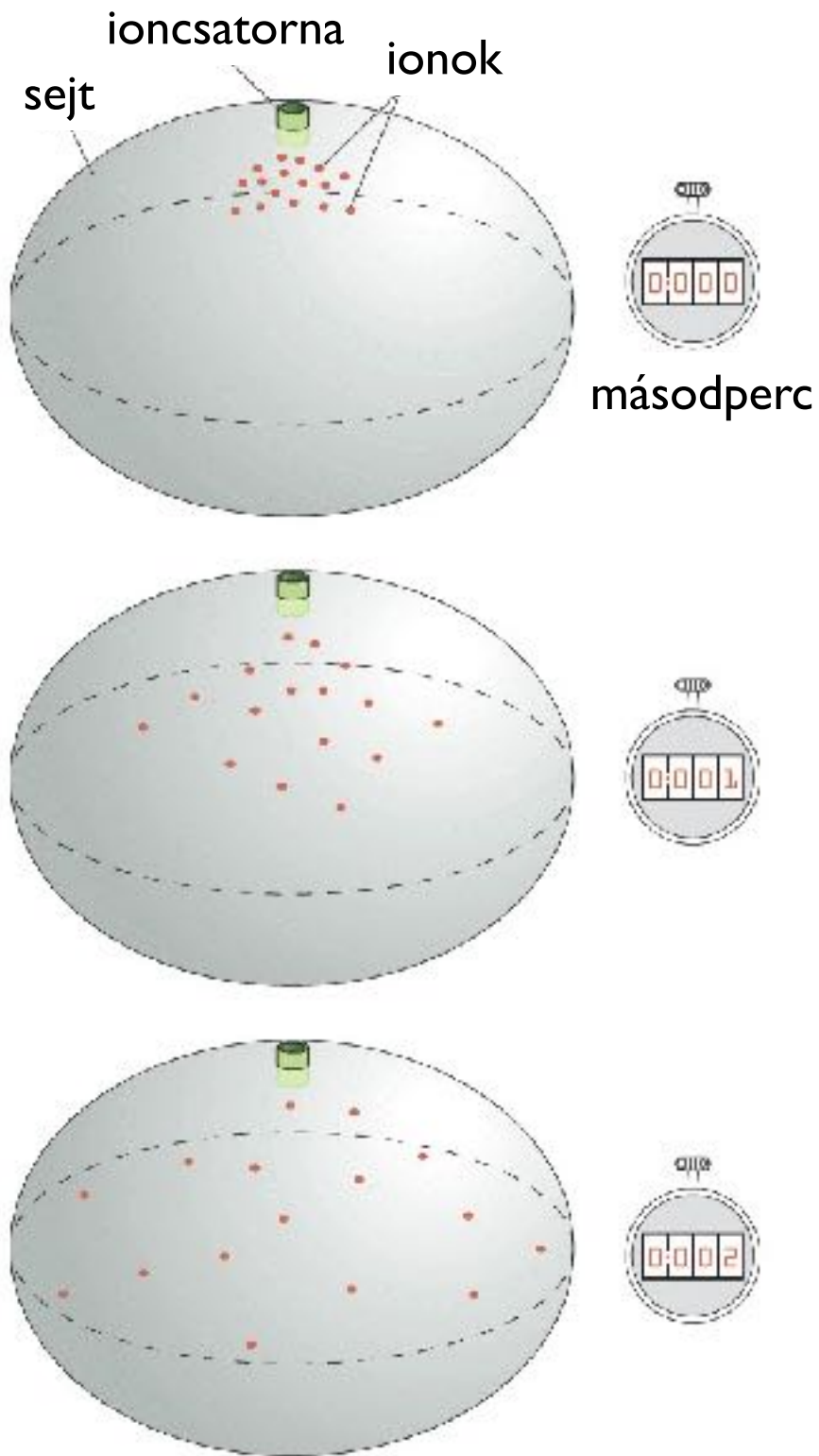


FOLYADÉKOK ÉS GÁZOK ÁRAMLÁSA A VÉR MINT FOLYADÉK

KELLERMAYER MIKLÓS

A diffúzió csak rövid méretsálán gyors

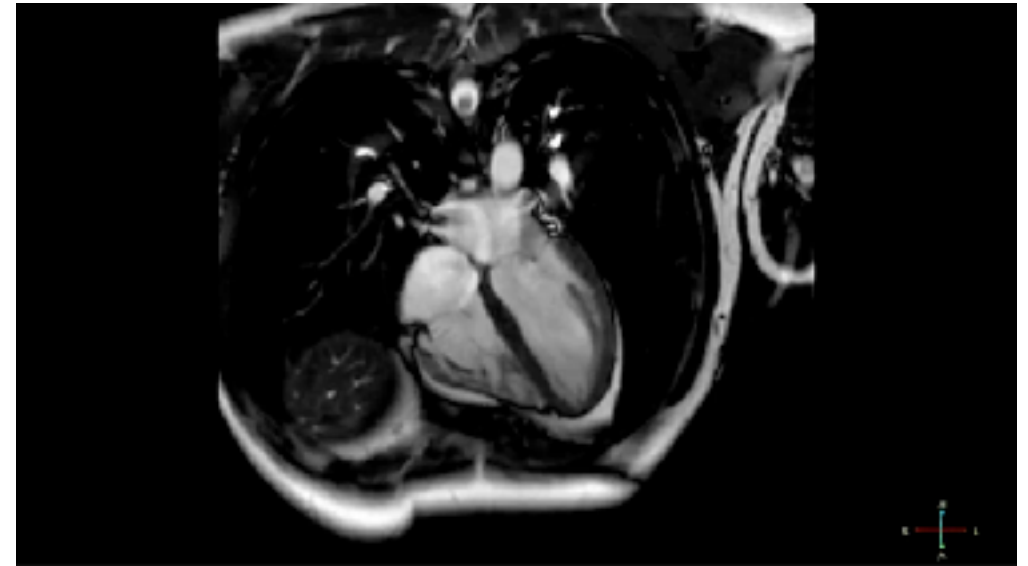


Áramlások jelentősége

I. Hemodinamika

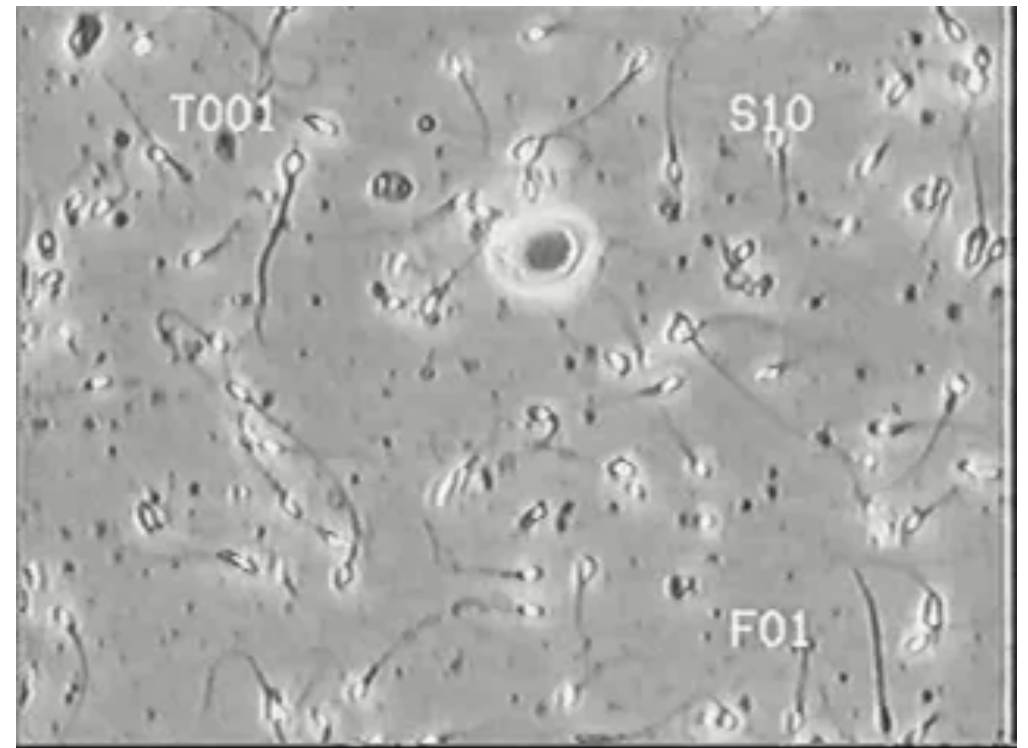
Pl.: Milyenek a véráramlási viszonyok az érrendszerben?

(ugyanígy: gázok áramlása a légutakban)



II. Viskózus folyadékokban 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.

Folyadékok és gázok áramlása

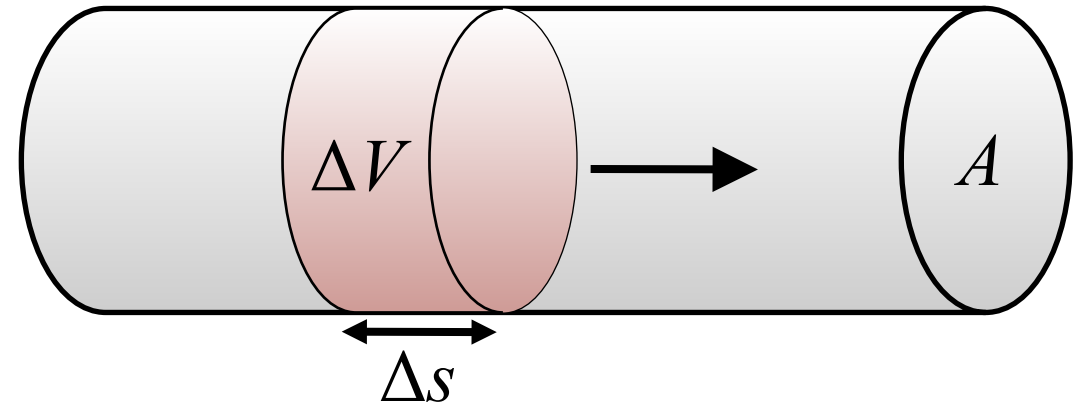
A vér fizikai tulajdonságai

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

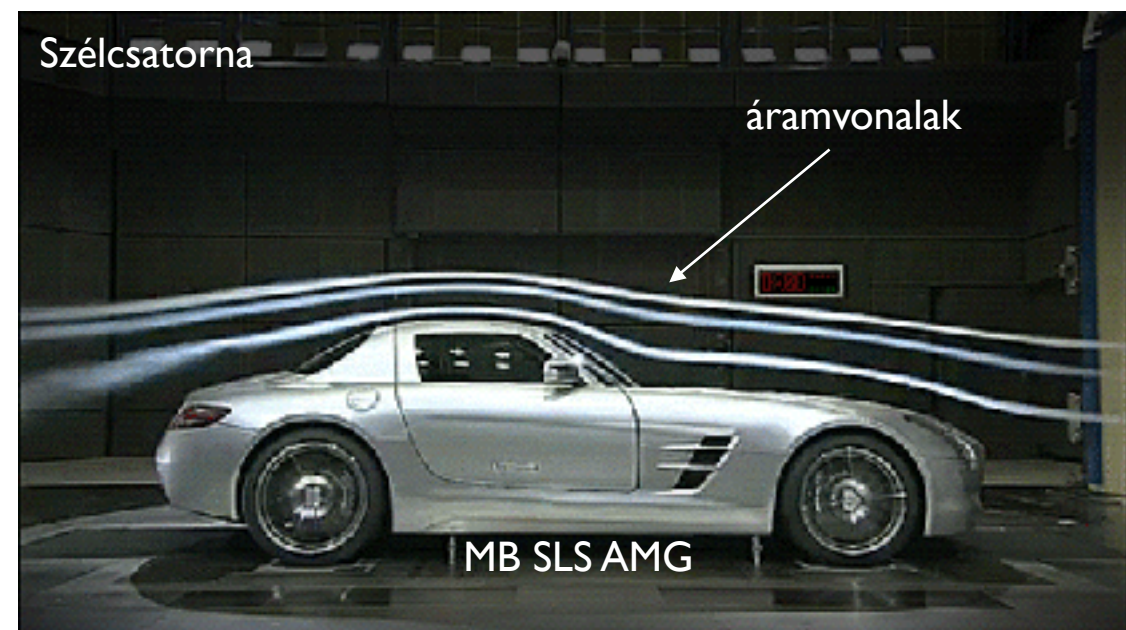
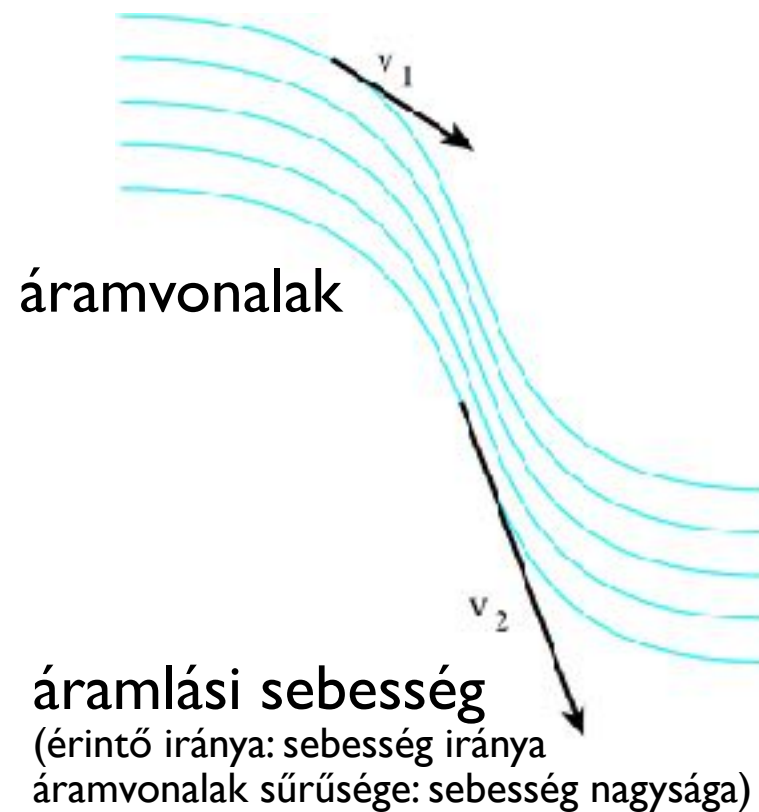
Alapfogalmak I.

Térfogati áramerősség (I_V):

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



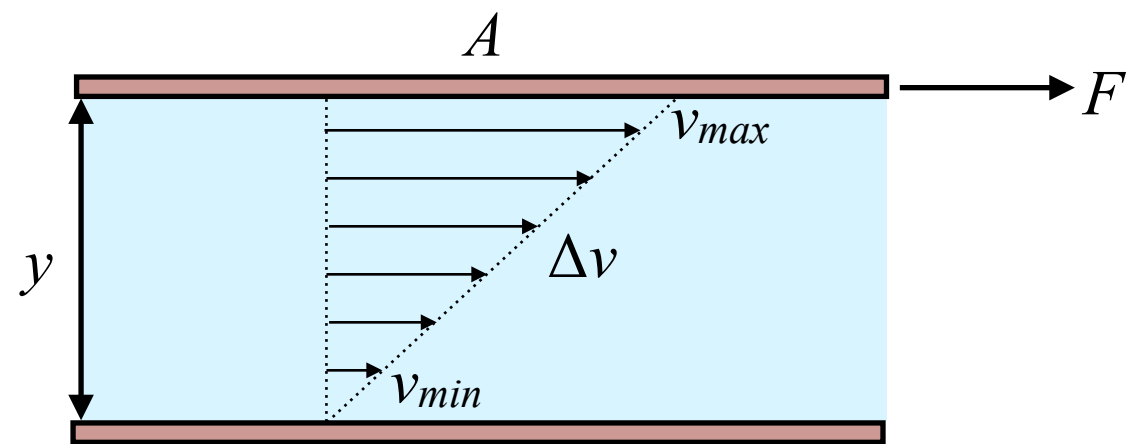
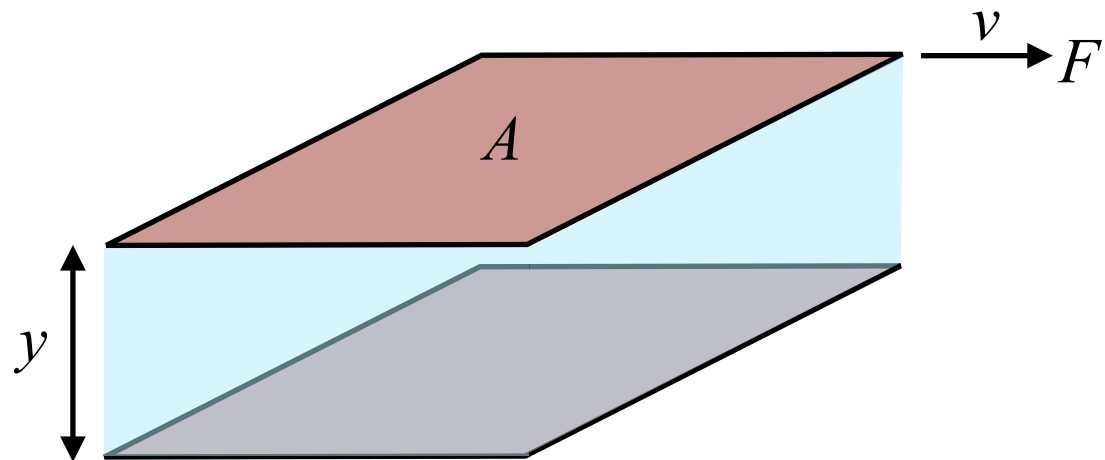
Átlagsebesség: $\bar{v} = \frac{I_V}{A}$



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)

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

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

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

Desztillált víz viszkozitása (25 °C): $\sim 1 \text{ mPas}$ (1centipoise)

N.B.: gázokban $\eta \sim T$

Részecskék közötti impulzuscsera 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

Sebességgrádiens és nyírófeszültség összefüggése
reális folyadékokban

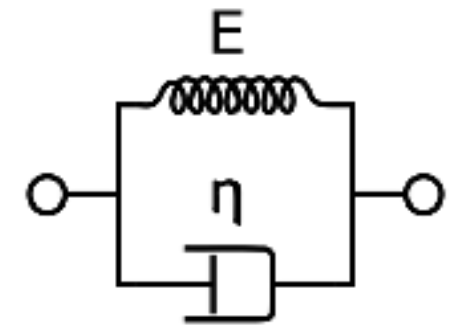
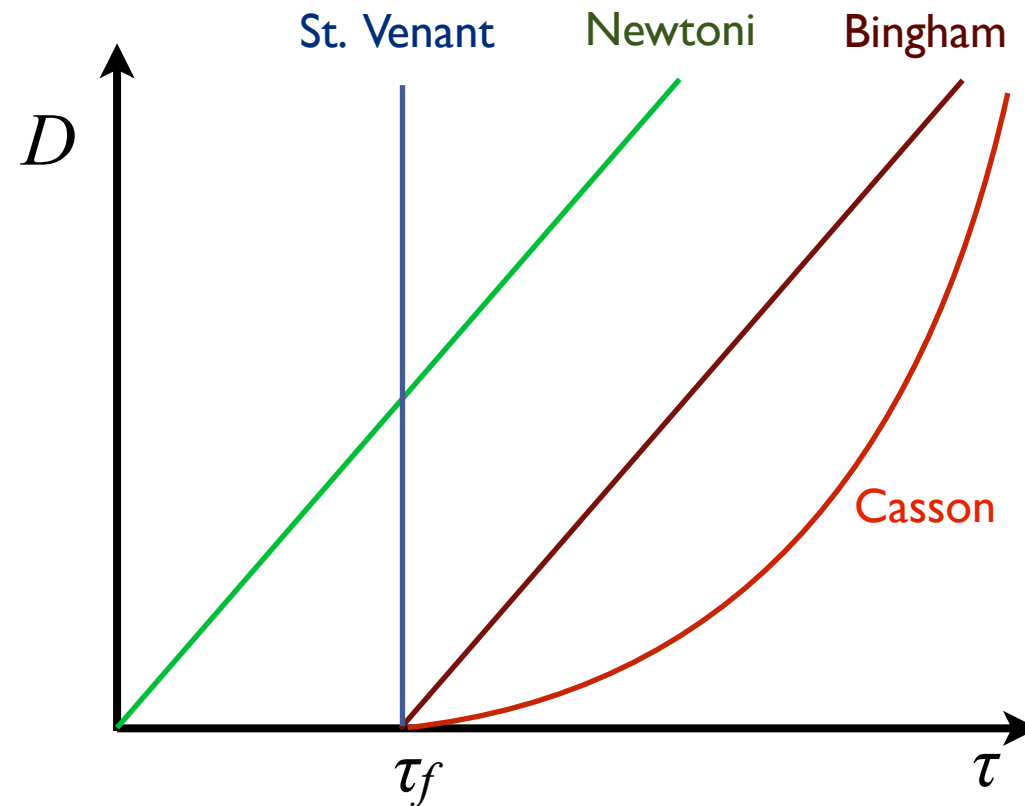
1. Ideális

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



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)

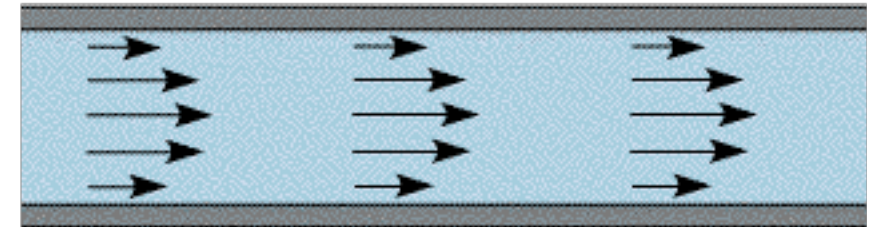
2. Lamináris

Folyadékrétegek nem keverednek

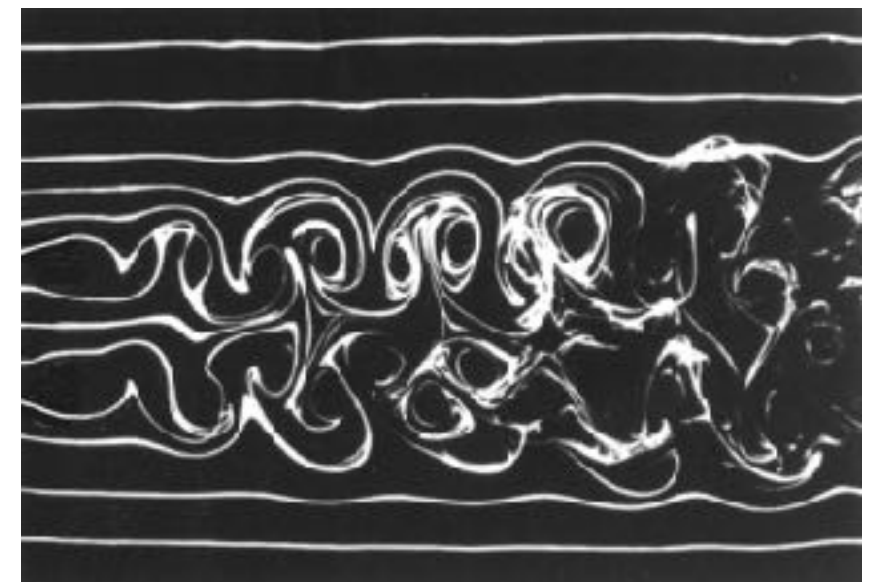
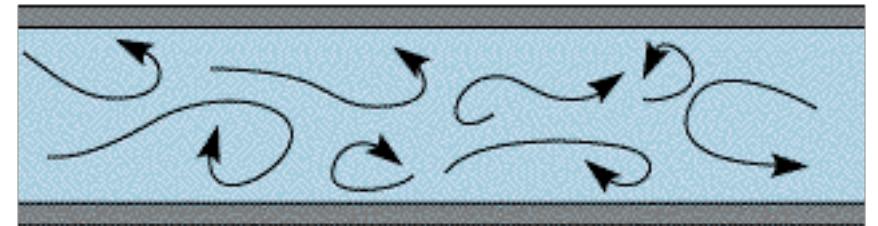
3. Turbulens

Folyadékrétegek keverednek

*lamináris
áramlás*



*turbulens
áramlás*



Reynolds-szám (Re):

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

v = folyadékáramlási sebesség (m/s)

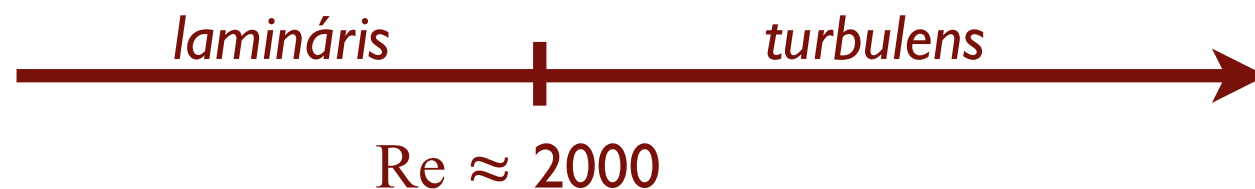
r = cső sugara (m)

ρ = folyadék sűrűsége (kg/m³)

η = viszkozitás (Ns/m²)



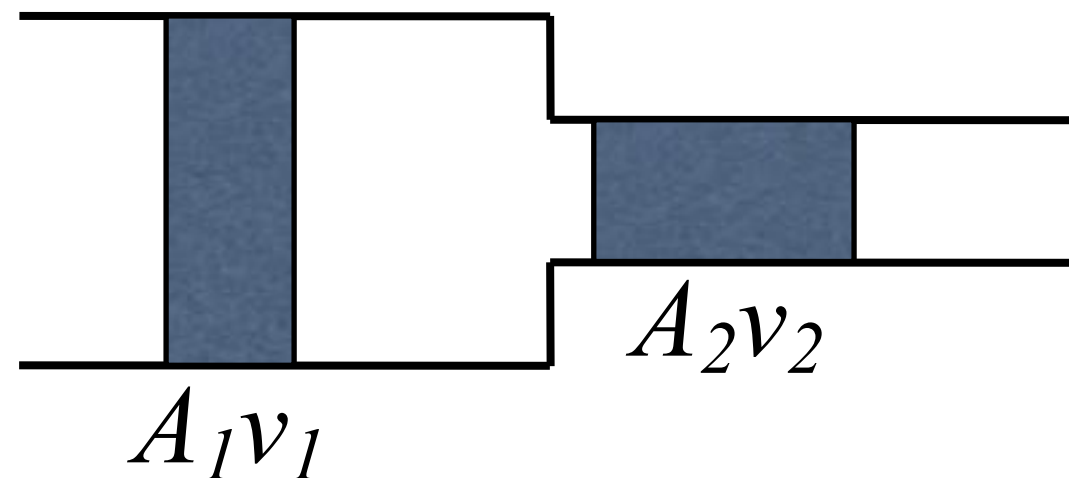
Osborne Reynolds
(1842-1912)



“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



$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \textit{konst}$$

A =keresztmetszet
 v =áramlási sebesség

Törvényszerűségek ideális folyadékokban II.

Bernoulli törvény - energiamegmaradás törvénye



Daniel Bernoulli
(1700-1782)

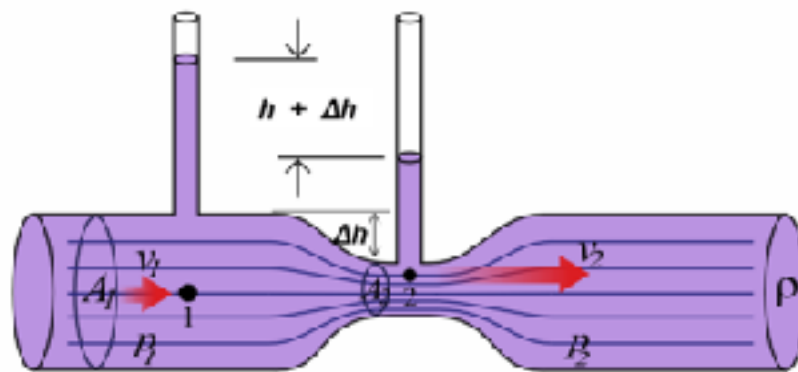
$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = konst$$

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

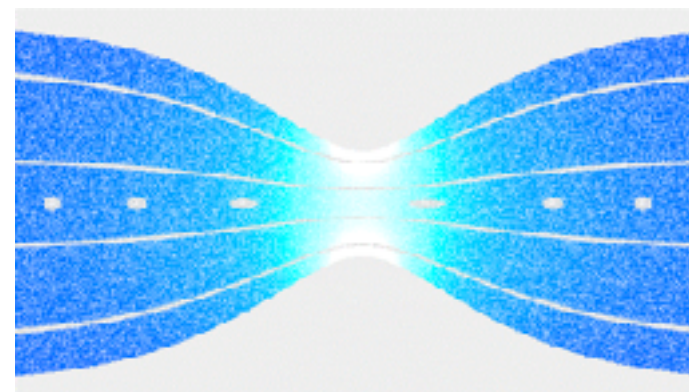
Alkalmazás: Venturi-effektus



Giovanni Battista Venturi
(1746-1822)



A sztatikus nyomás lecsökken
a cső szűkületében



Venturi cső

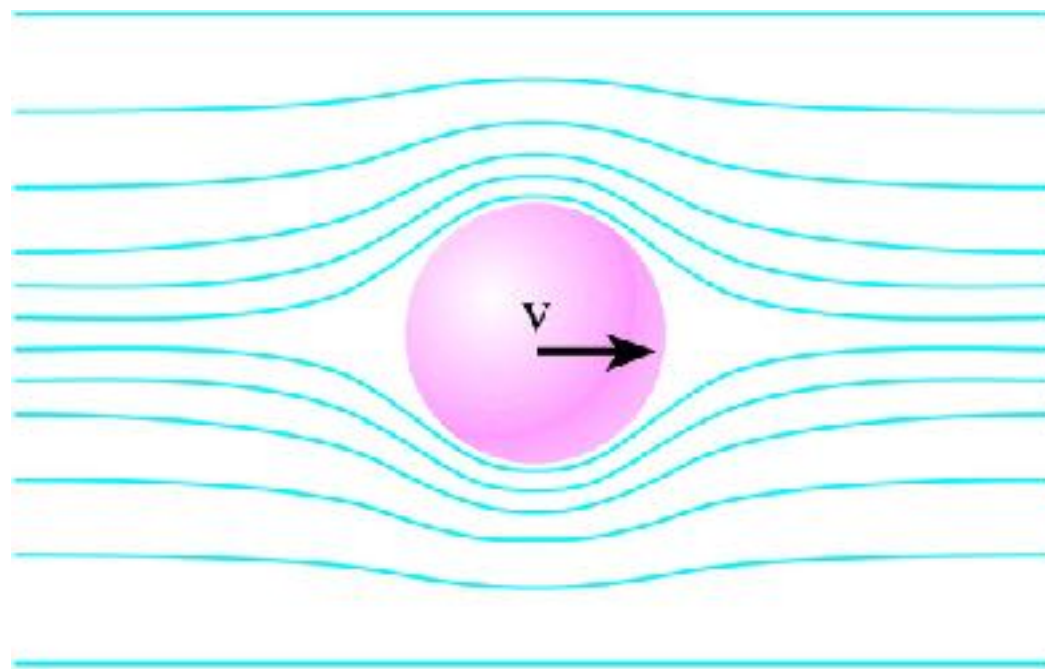
- Kettős pulzus (*pulsus bisferiens*) aorta insufficienciában
- Aspirátor (vákuum szivattyú)
- Inspirátor (Bunsen-égő)
- Mérőeszközök (térfogati áramerősség)
- Szódás szifon
- Porlasztó (atomizátor, spray, karburátor)
- Fúvós hangszerek fúvókái
- Diffúzor

Törvényszerűségek viszkozus folyadékokban I.

Stokes törvény



Georg Gabriel Stokes
(1819-1903)



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

F = erő

γ = közegellenállási (súrlódási) együttható, alaki faktor

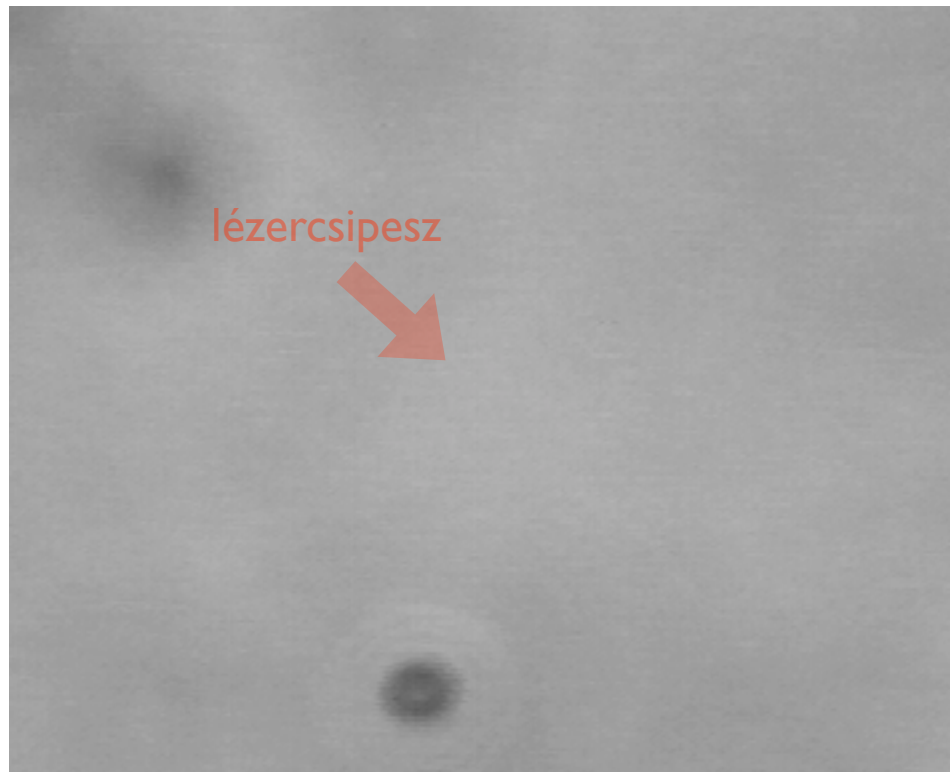
v = folyadékáramlási sebesség

r = gömb sugara

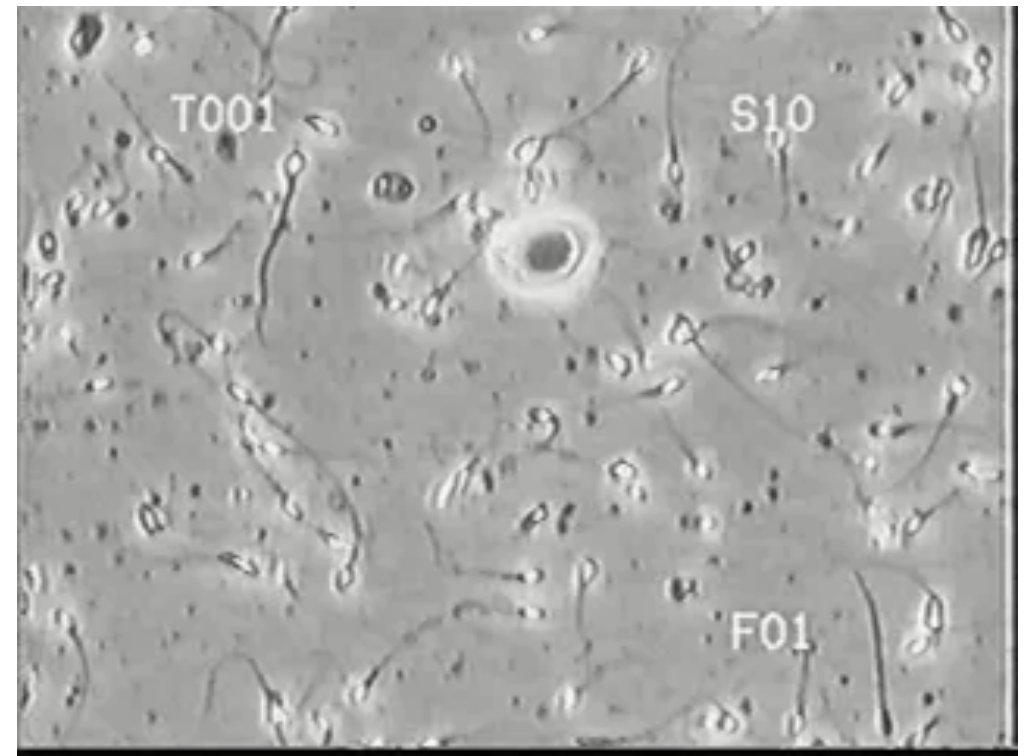
η = viszkozitás

Stokes erő

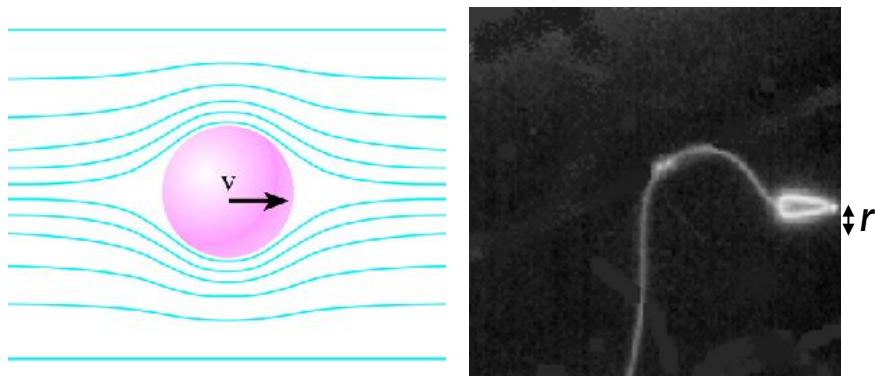
Hidrodinamikai húzóerő (Stokes erő): $F = \gamma = 6r\pi\eta v$



Hat folyadékban álló részecskékre
(lézercsipeszben megragadott mikrogyöngy)



Hat álló folyadékban mozgó részecskékre
(mozgó spermatociták)



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

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen spermatocitának mozgása során?

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

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

Törvényszerűségek viszkozus folyadékokban II.

Hagen-Poiseuille törvény



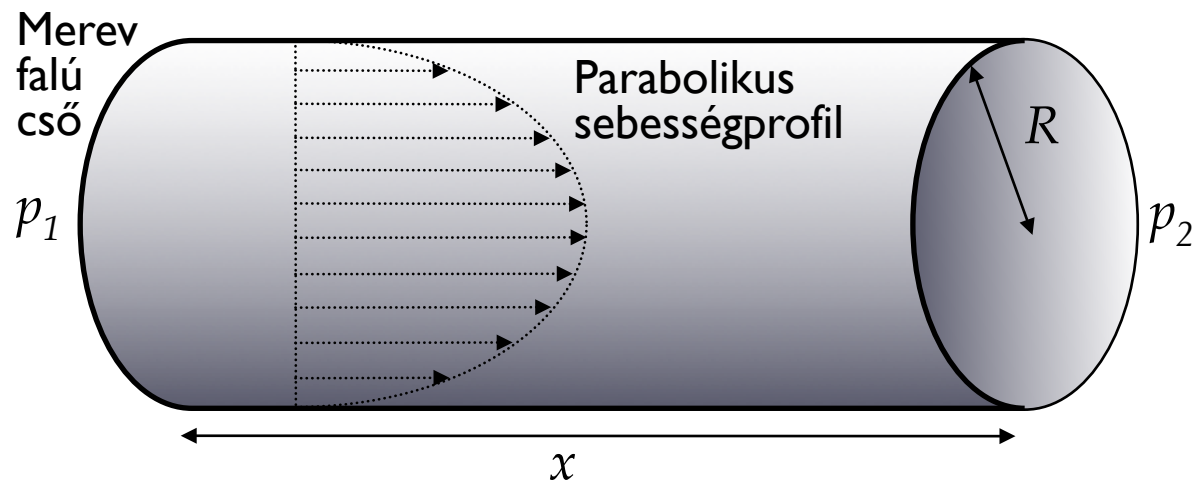
G.H.L. Hagen
(1797-1884)



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

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



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:

$$I_V = -\frac{R^4 \pi}{8\eta \Delta x} \Delta p \Rightarrow -\Delta p = R_{cső} \cdot I_V \Rightarrow U = R \cdot I$$

Ohm-törvény!

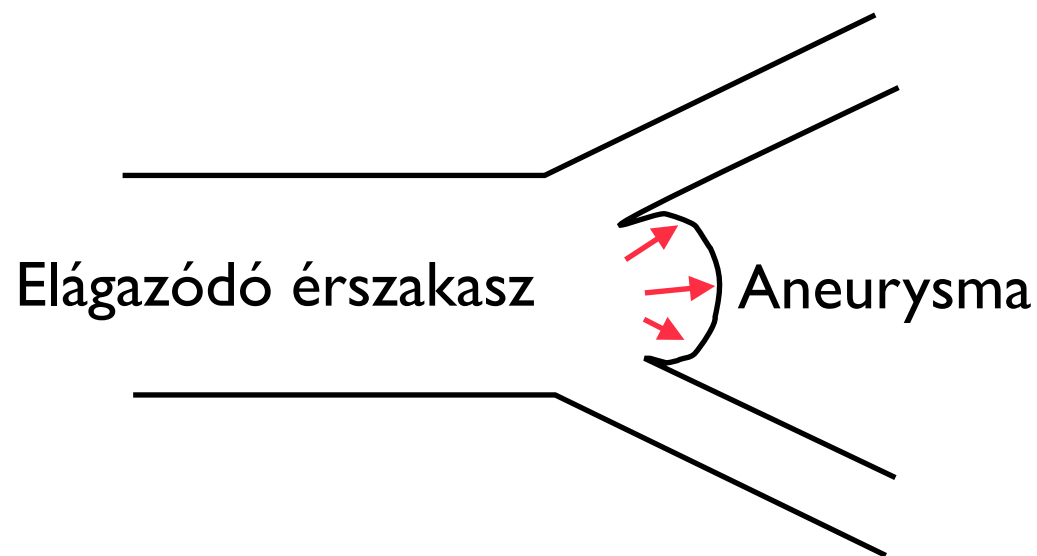
$$\text{N.B. 3: } \frac{\Delta v}{\Delta r} \sim r \Rightarrow \left(\frac{\Delta v}{\Delta r} \right)_{\max} = R \Rightarrow \tau_{\max} = R$$

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

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

A folyadékáramlásban közvetlen orvosi jelentősége

Bernoulli törvény:



Hagen-Poiseuille törvény:

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

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)
- vérvizkozitás-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

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. 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

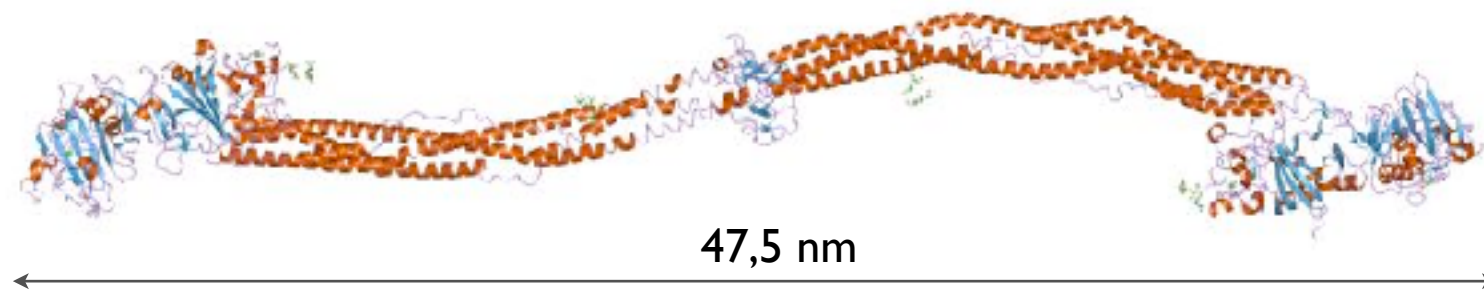
A vérviszkozitás meghatározói

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

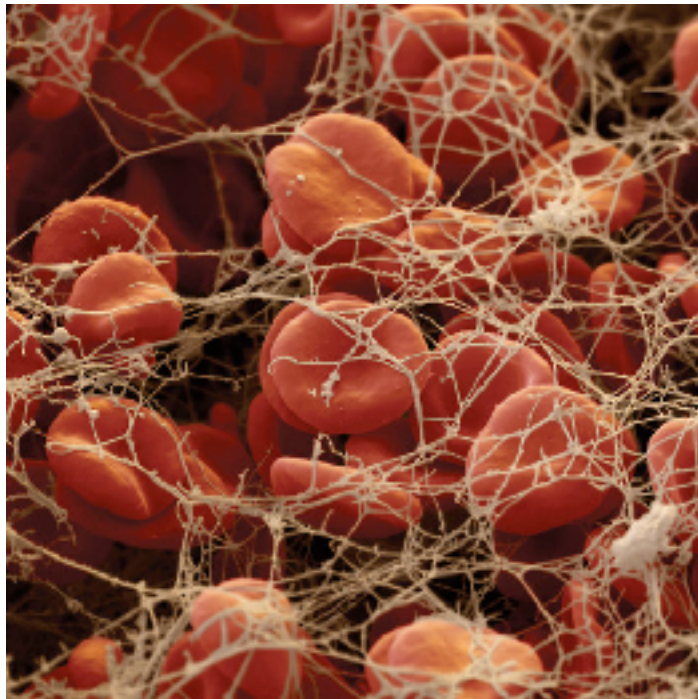


Fibrinogén:

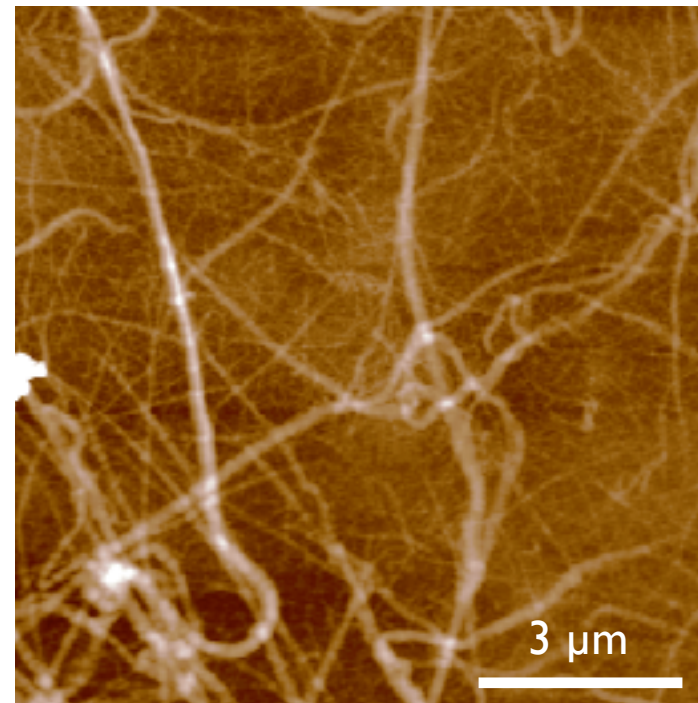
MW = 340.000 Da

Plazmában 2-4 g/l \approx 10 μ M

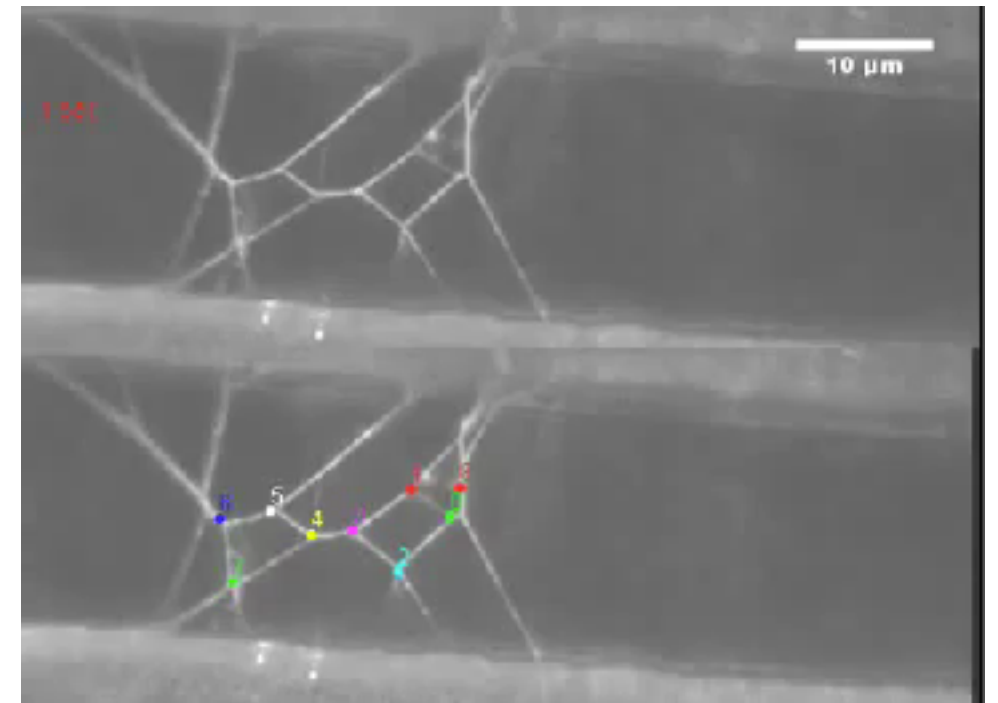
Átlagos távolság a fibrinogén-molekulák között: 55 nm!



Vörösvértestek
fibrinhálóban



In vitro polimerizált fibrin
(AFM)

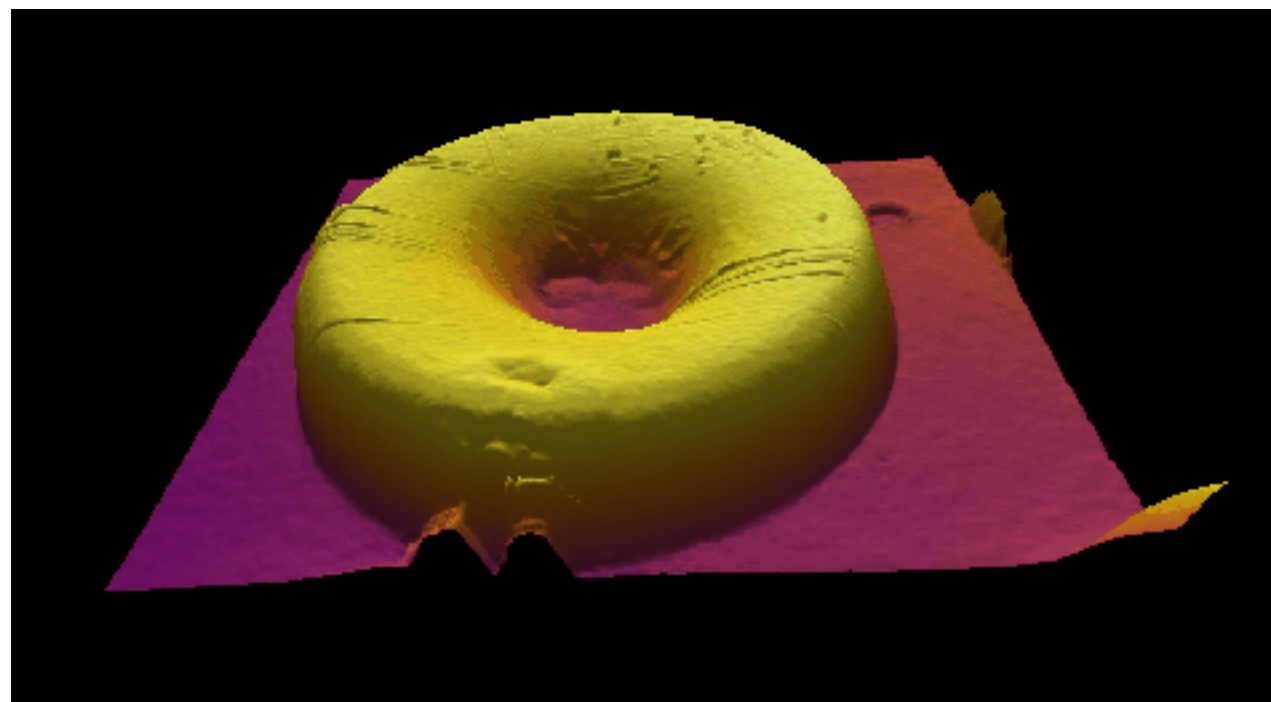


Fluoreszcensen jelölt fibrinszálak
rugalmassága, nyúlékonysága

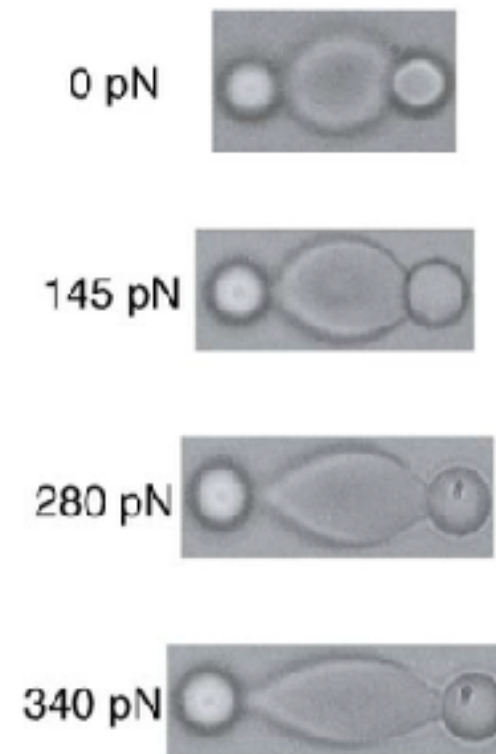
A vérviszkozitás meghatározói

3. Vörösvértestek deformálhatósága

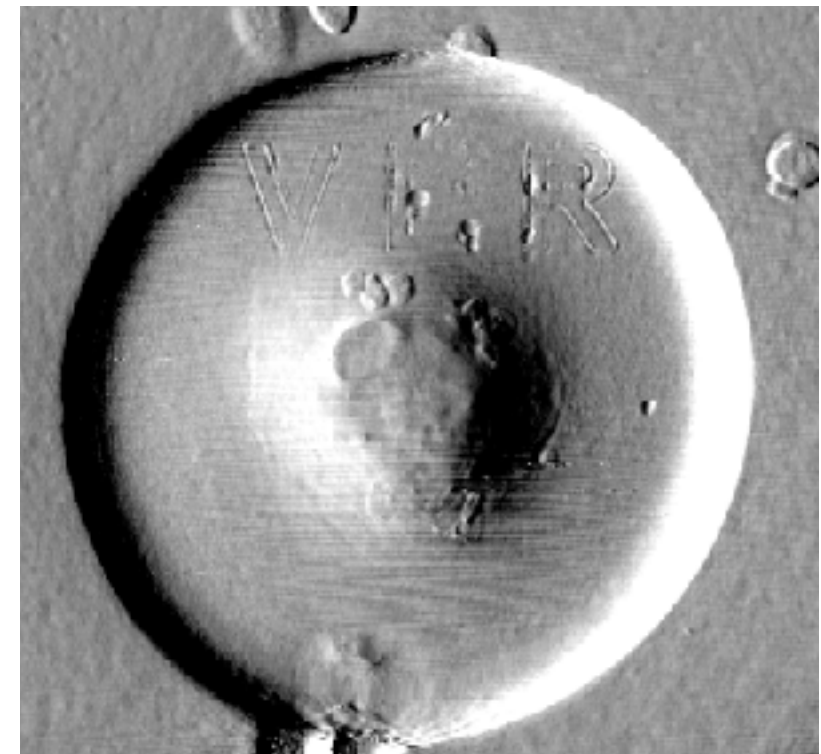
- Vvt-méretű szilárd részecskék 65%-os szuszpenziója téglakemény.
- 95%-os vvt-szuszpénzió viszkozitása csupán 20 mPas!
- Deformáció: csepp, ejtőernyő, nyílhegy alakú sejtek.



7-11 μm átmérőjű korong alakú sejt



VVT deformálás
lézercsipesszel

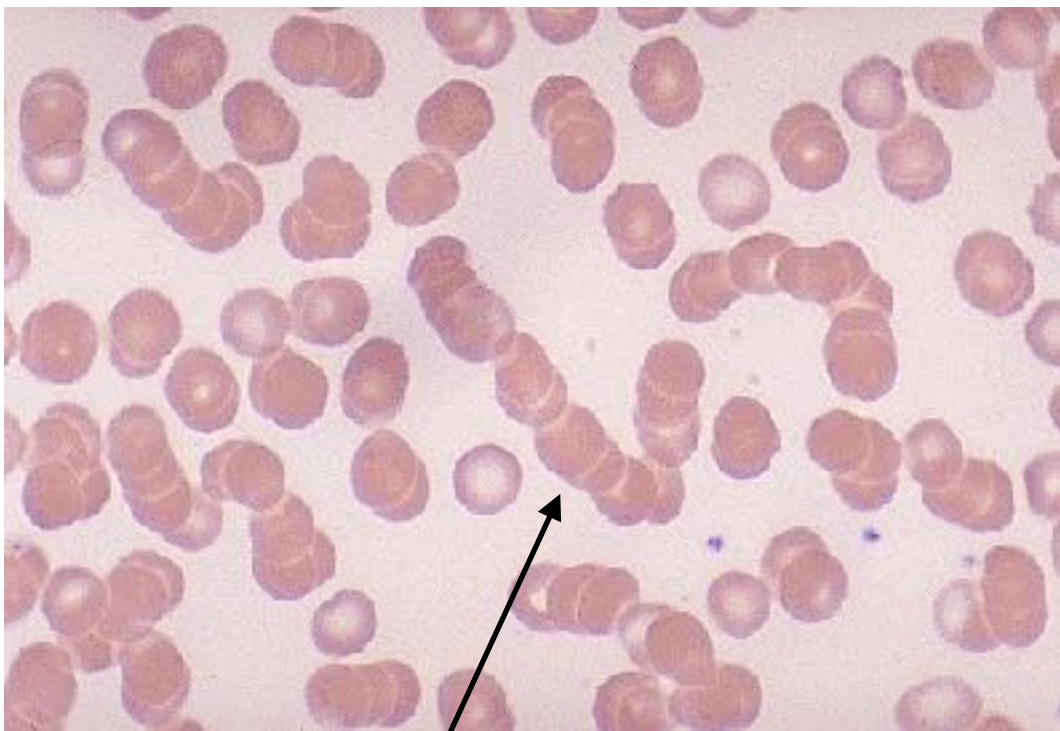


Fixált, benyomatot
tartó VVT (AFM)

A vérviszkozitás meghatározói

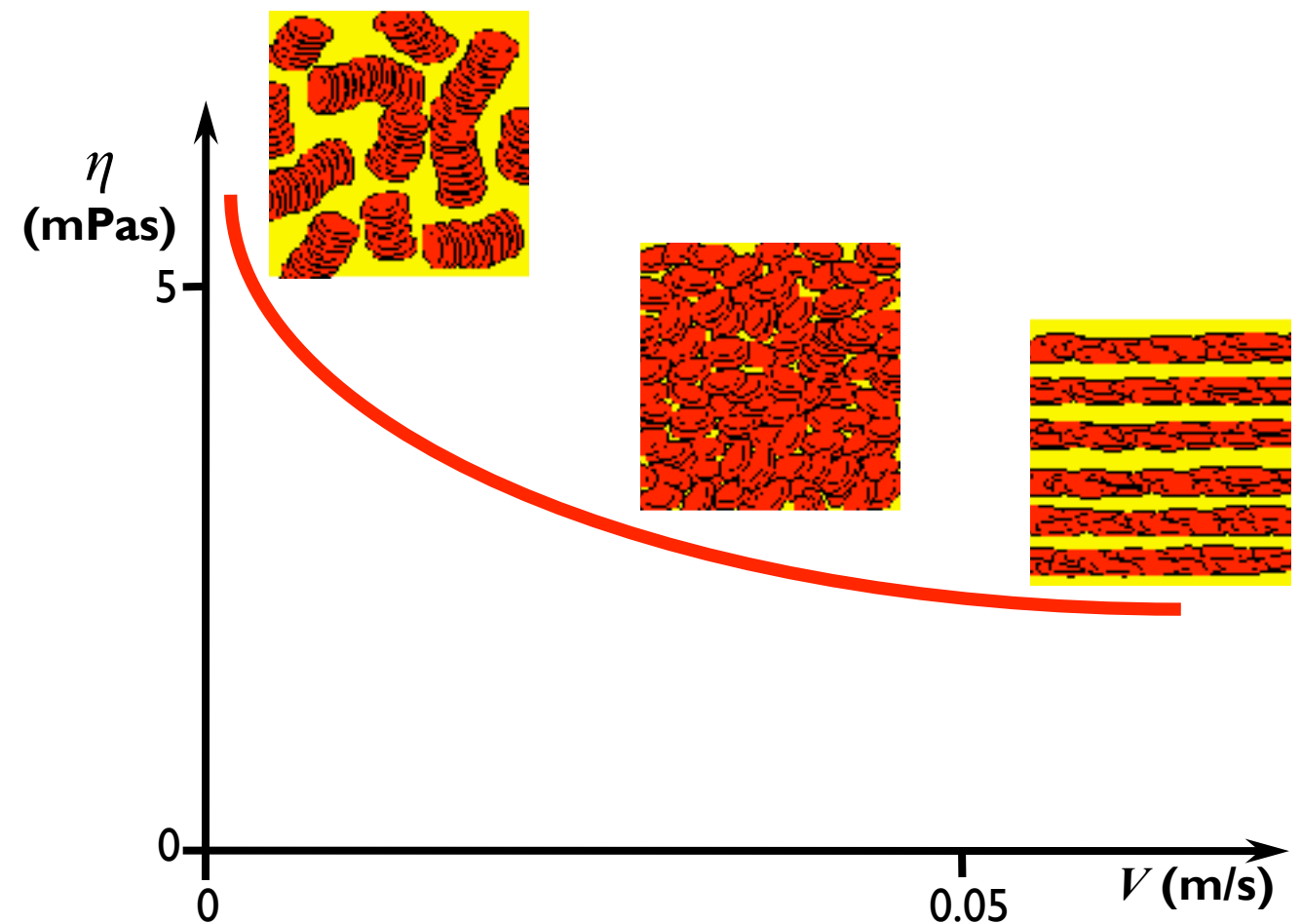
4. Vörösvértestek aggregációs készsége

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



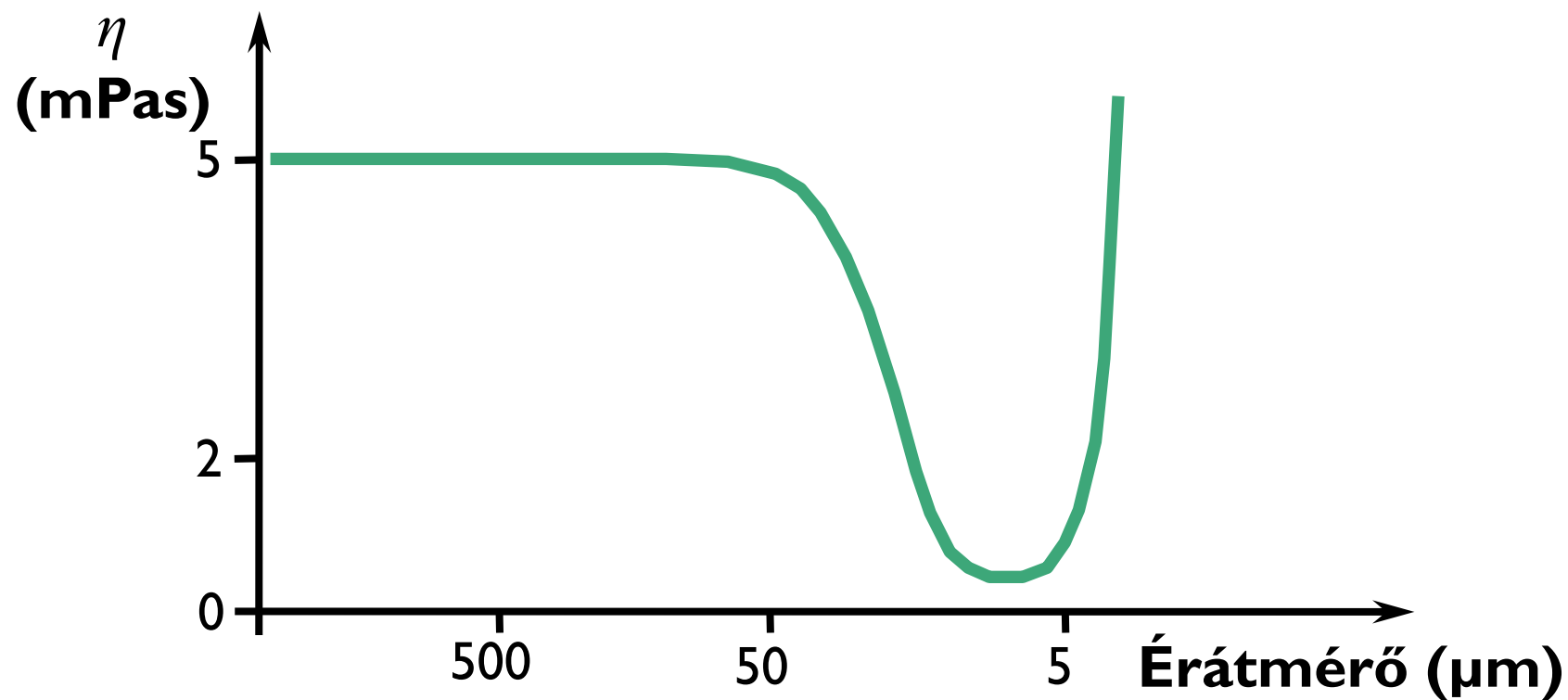
Pénztekercs

5. Áramlási sebesség, sebességgrádiens



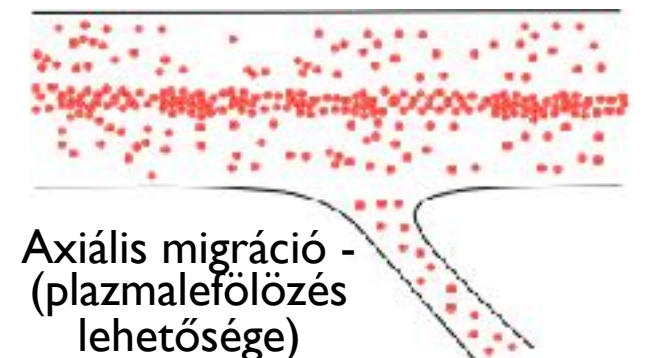
A vérviszkozitás meghatározói IV.

6. Érátmérő



N.B.:

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



Axiális migráció -
(plazmalefölözés
lehetősége)