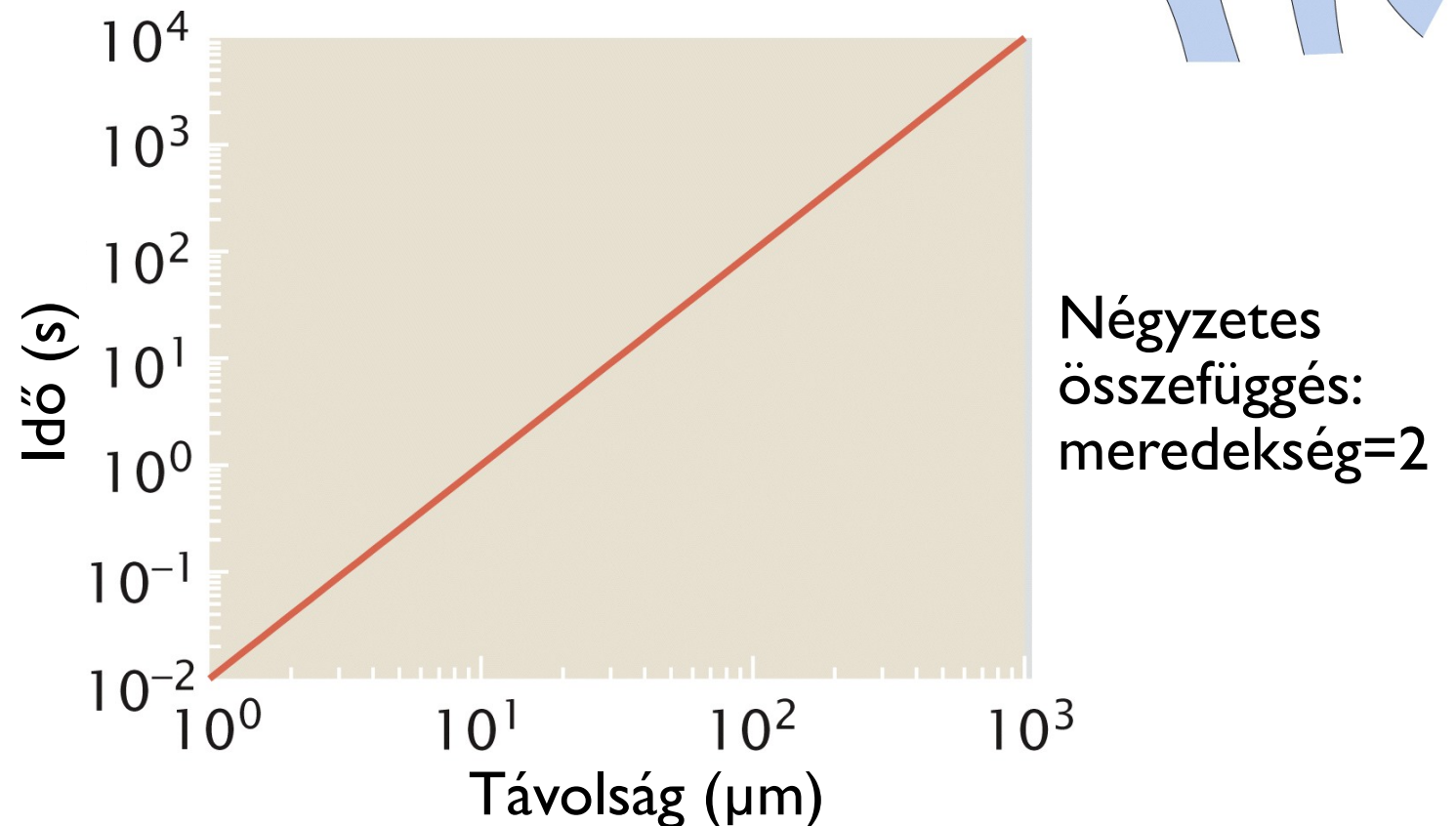
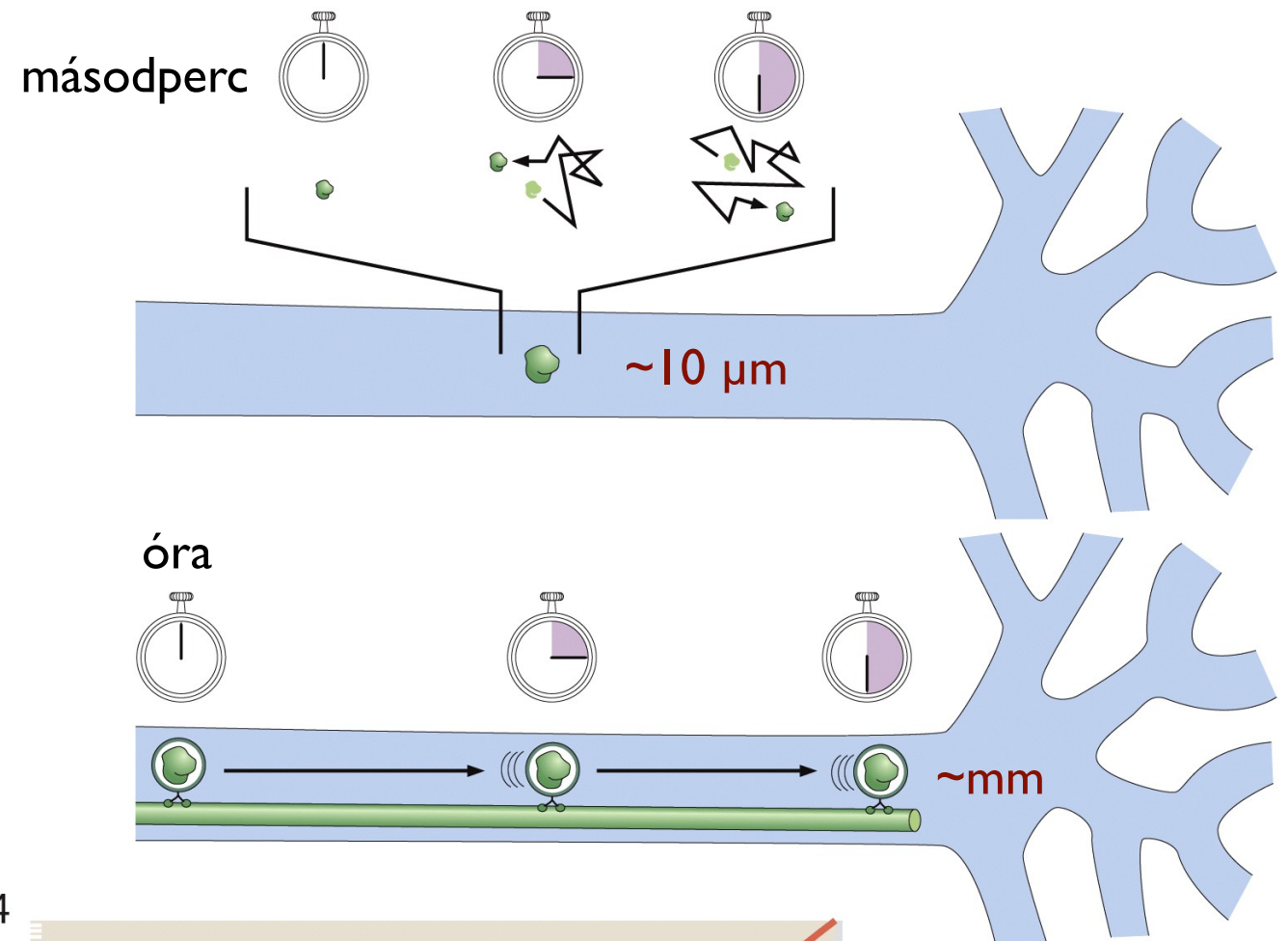
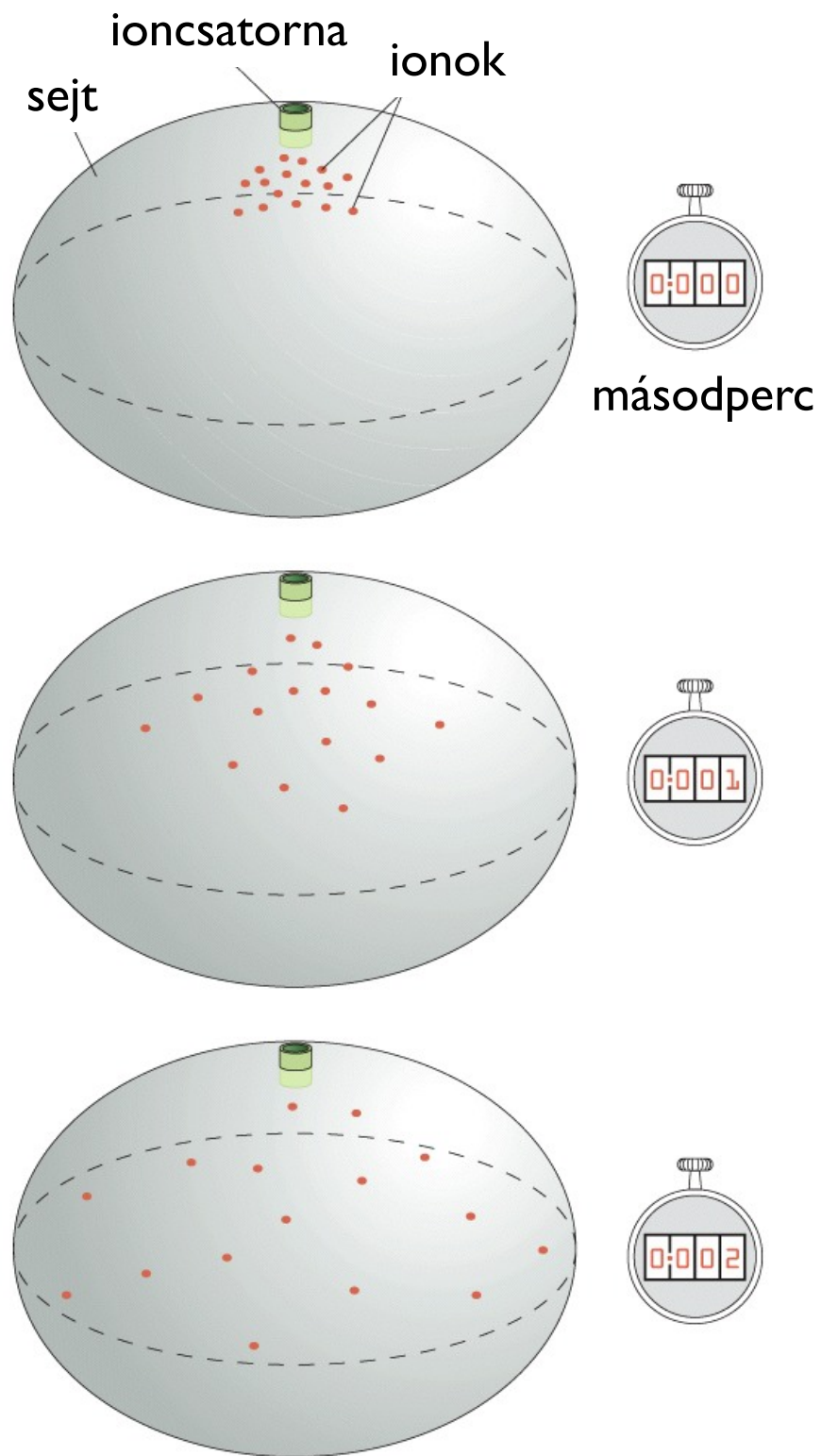


# FOLYADÉKOK ÉS GÁZOK ÁRAMLÁSA A VÉR MINT FOLYADÉK

KELLERMAYER MIKLÓS



# A diffúzió csak rövid méretsálán gyors

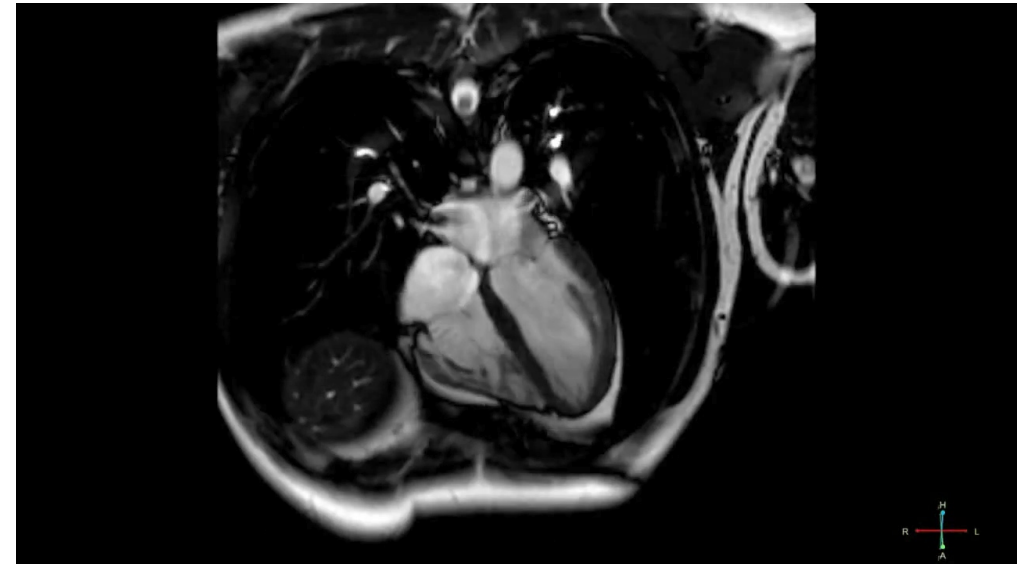


# Áramlások jelentősége

## I. Hemodinamika

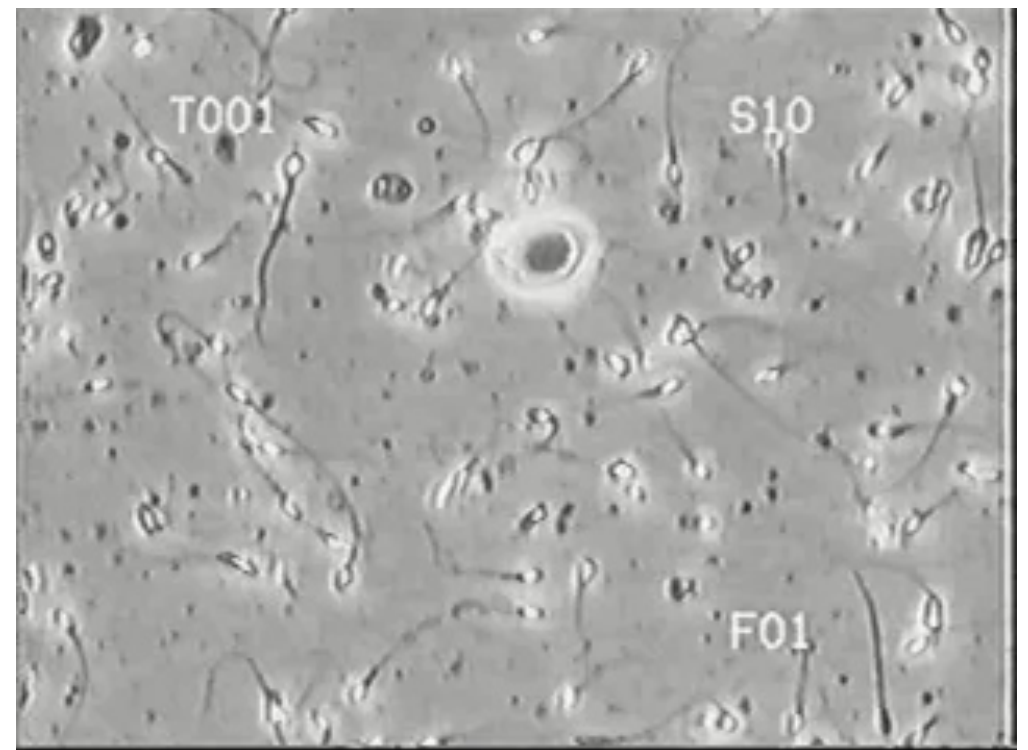
Pl.: Milyenek a véráramlási viszonyok az érrendszerben?

(ugyanígy: gázok áramlása a légutakban)



## II. Viskózus folyadéokban történő mozgások

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



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

# Folyadékok és gázok áramlása

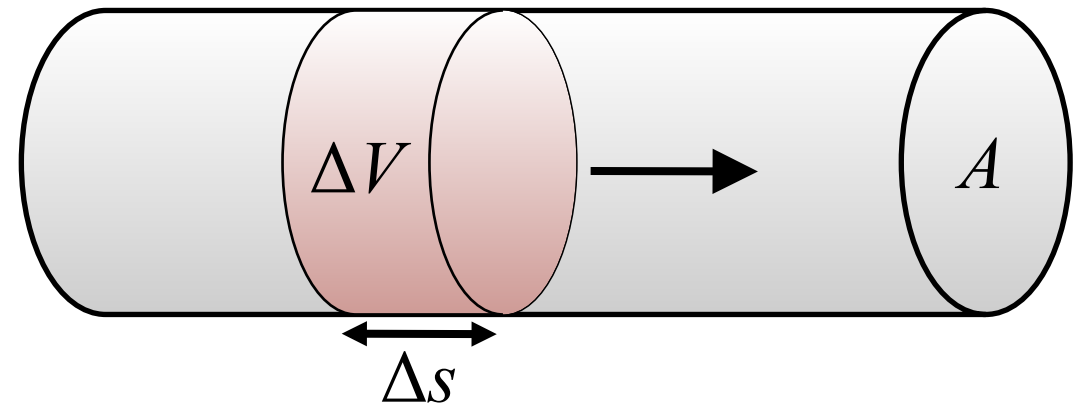
## A vér fizikai tulajdonságai

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

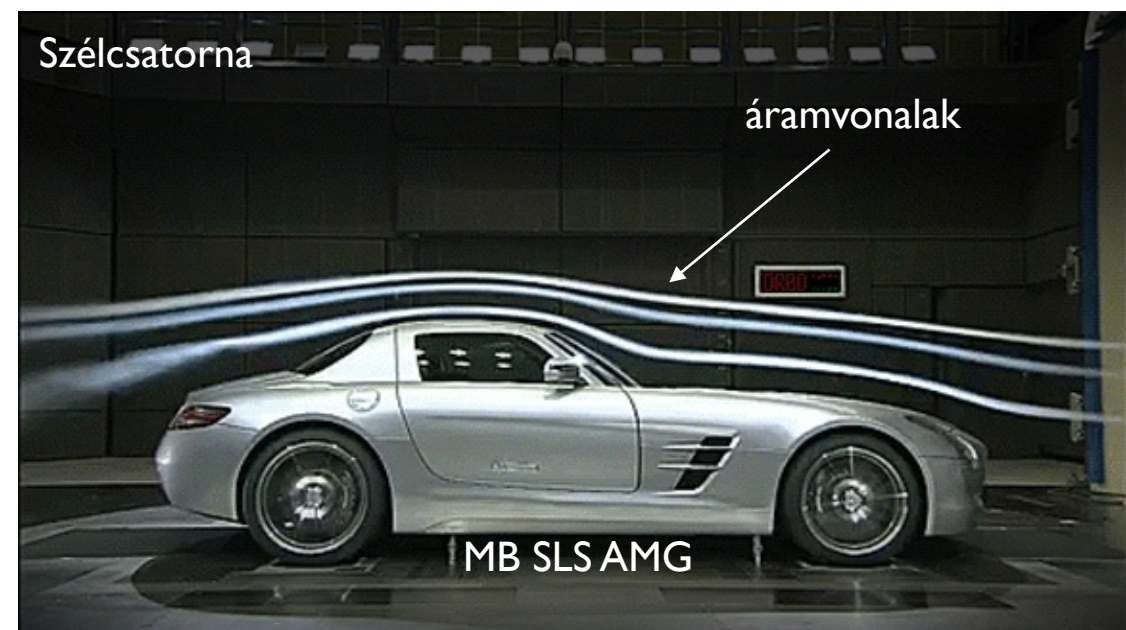
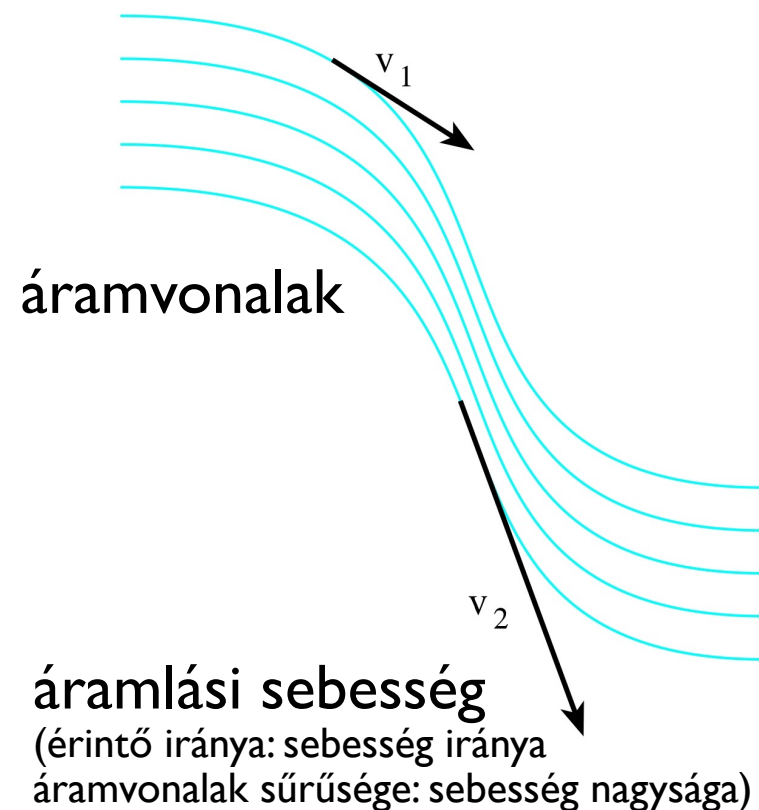
# Alapfogalmak I.

Térfogati áramerősség ( $I_V$ ):

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



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

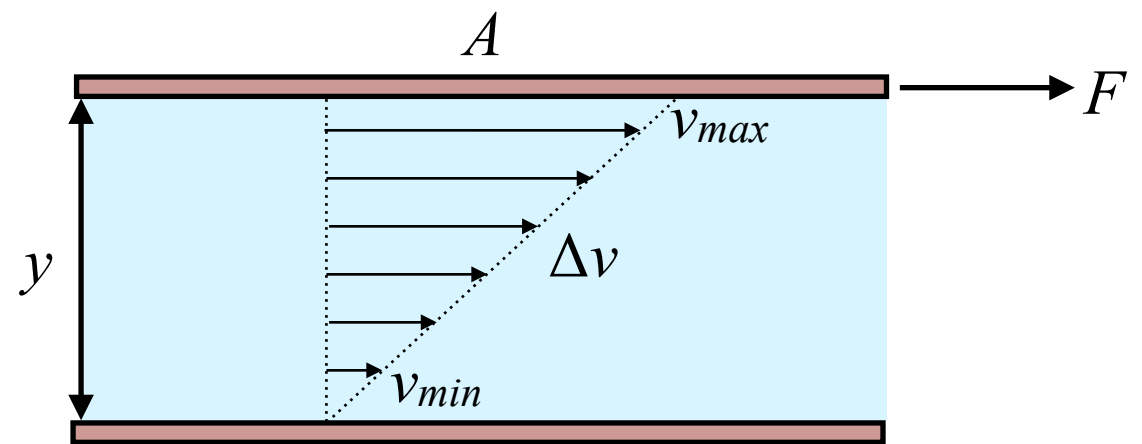
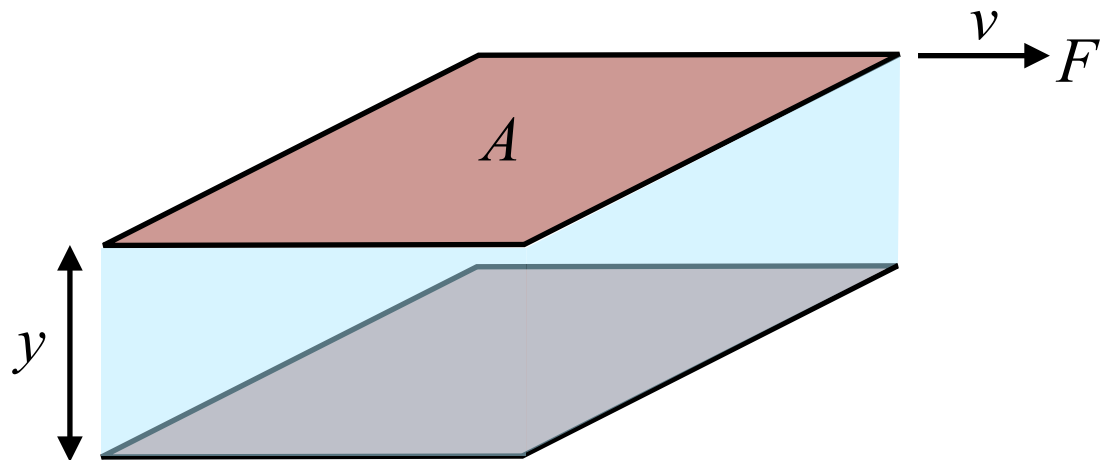


Az áramlás láthatóvá tehető



# Alapfogalmak II.

## Viszkozitás (belső súrlódás)



$F$	= nyíróerő
$A$	= folyadéklemez területe
$\eta$	= viszkozitás
$v$	= áramlási sebesség
$y$	= folyadéklemezek közötti távolság
$F/A$	= nyírófeszültség ( $\tau$ )
$\Delta v/\Delta y$	= 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):  $\sim 1 \text{ mPas}$  (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

Sebességgrádiens és nyírófeszültség összefüggése  
**reális** folyadékokban

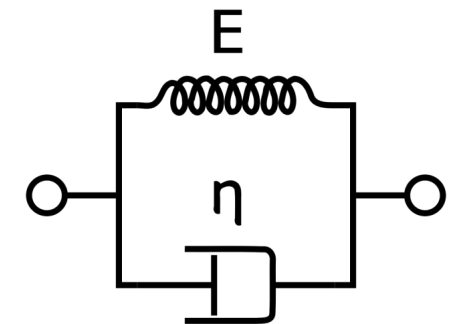
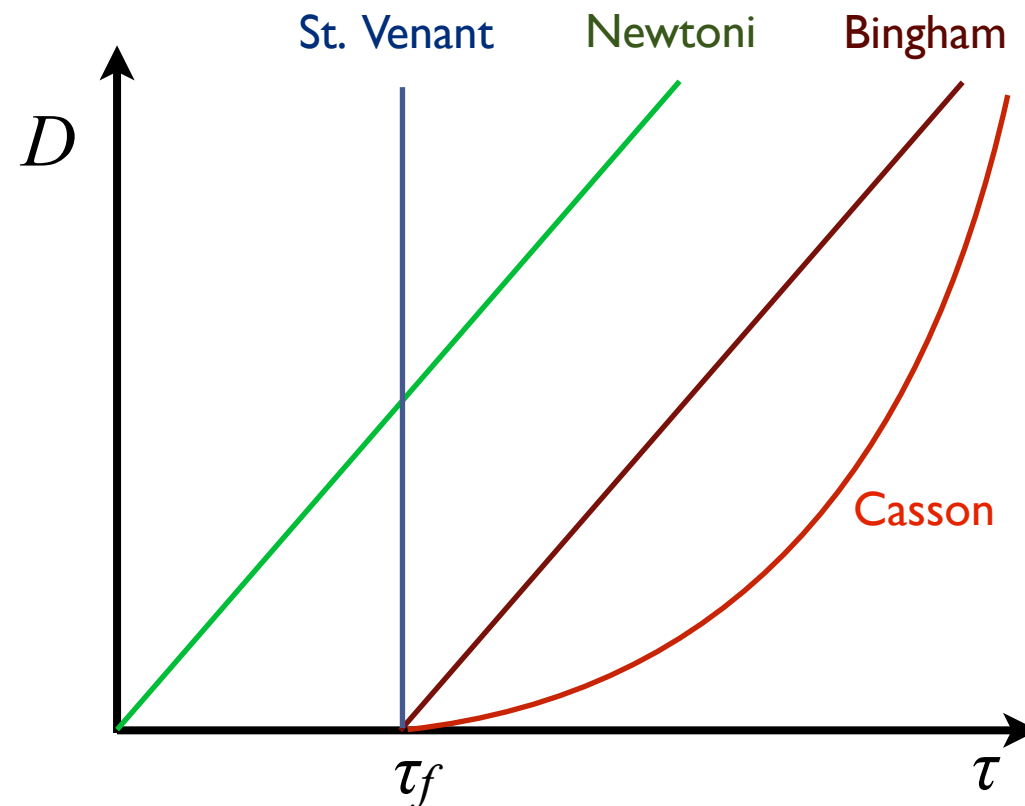
## 1. Ideális

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

## 2. Nem ideális (reális)

a. Newtoni (viszkózus)  
 $\eta$  független a  
nyírófeszültségtől

b. Nem-newtoni (anomális)  
 $\eta$  a nyírófeszültséggel  
változik



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

- $\tau_f$  = 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

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

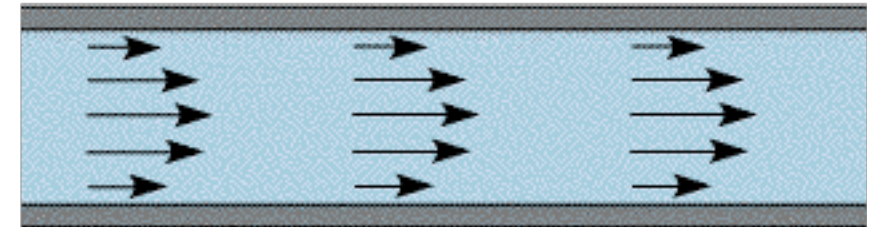
## 2. Lamináris

Folyadékrétegek nem keverednek

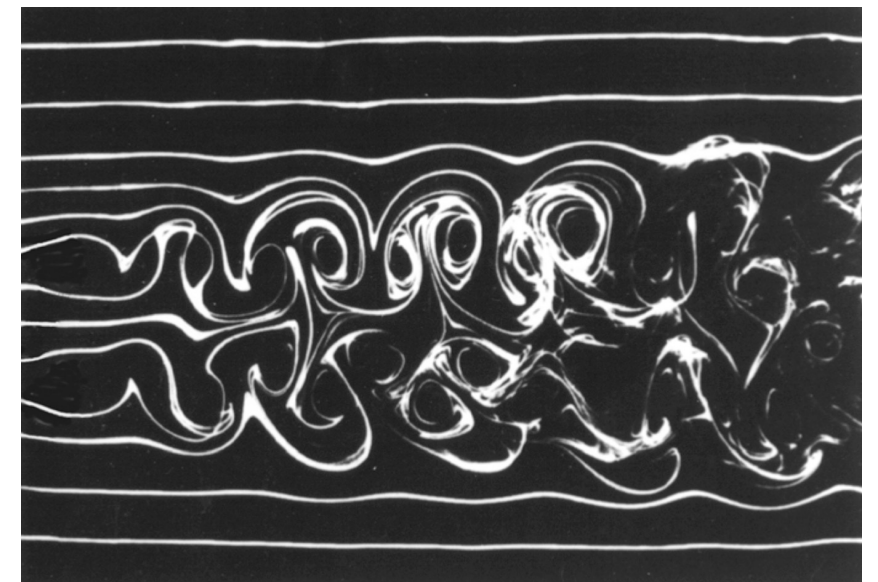
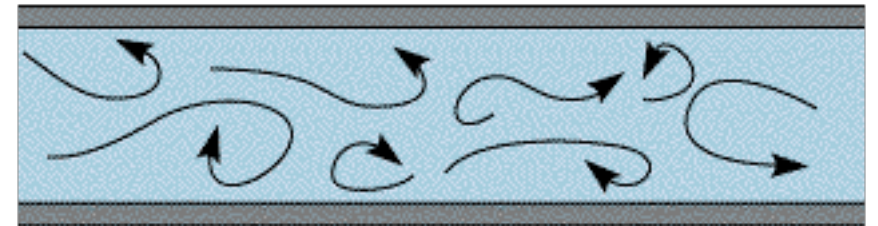
## 3. Turbulens

Folyadékrétegek keverednek

lamináris  
áramlás



turbulens  
áramlás



Reynolds-szám (Re):

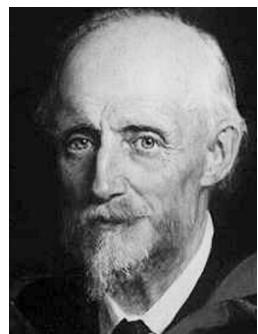
$$Re = \frac{vr\rho}{\eta}$$

$v$  = folyadékáramlási sebesség (m/s)

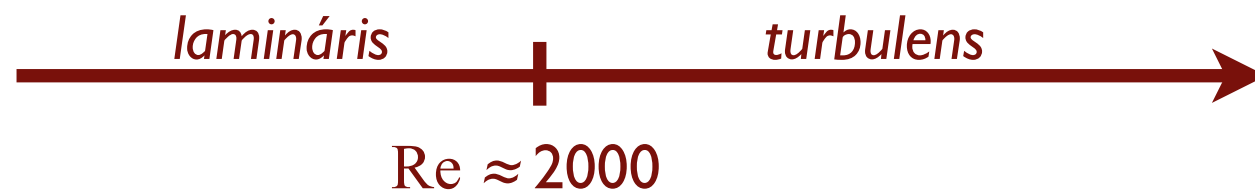
$r$  = cső sugara (m)

$\rho$  = folyadék sűrűsége (kg/m<sup>3</sup>)

$\eta$  = viszkozitás (Ns/m<sup>2</sup>)



Osborne Reynolds  
(1842-1912)

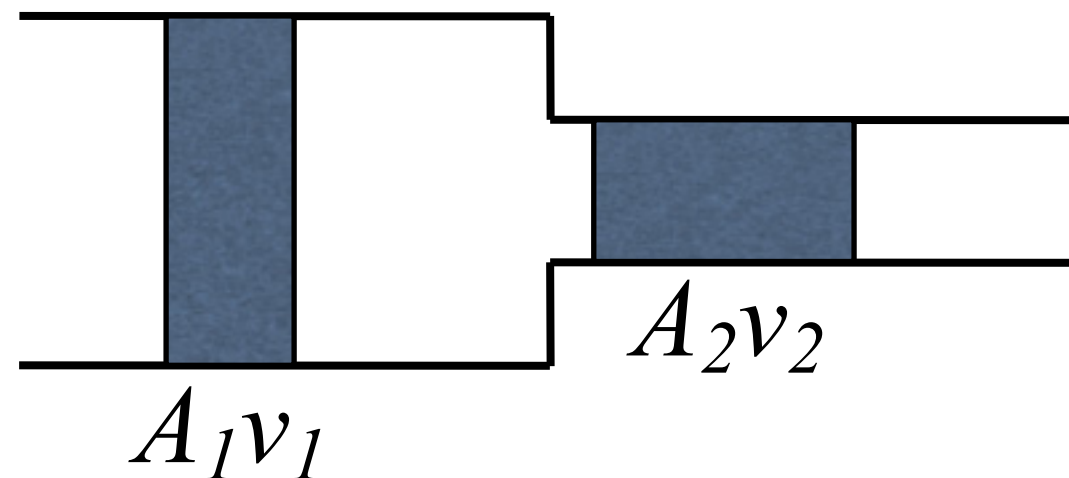


“Ha találkozom Istennel, két kérdésem lesz: Miért relativitás? Miért turbulencia?  
Szerintem az elsőre fog tudni válaszolni.” (Werner Heisenberg)



# Törvényszerűségek ideális folyadékokban I.

Kontinuitási egyenlet:  
térfogati áramerősség konstans



$$A_1v_1 = A_2v_2 = \textit{konst}$$

$A$ =keresztmetszet  
 $v$ =áramlási sebesség

# Törvényszerűségek ideális folyadékokban II.

## Bernoulli törvény - energiamegmaradás törvénye



Daniel Bernoulli  
(1700-1782)

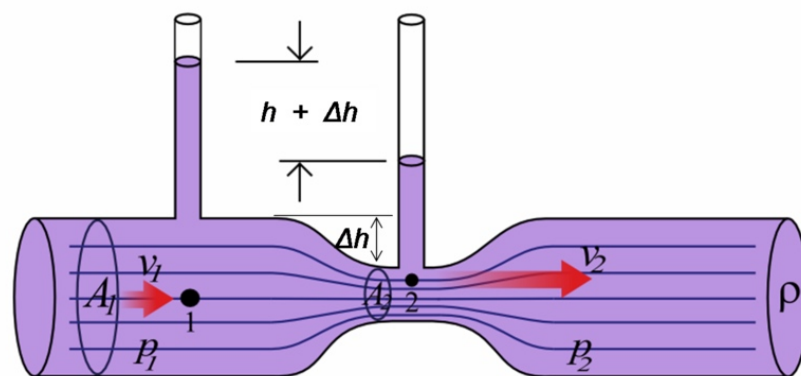
$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = konst$$

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

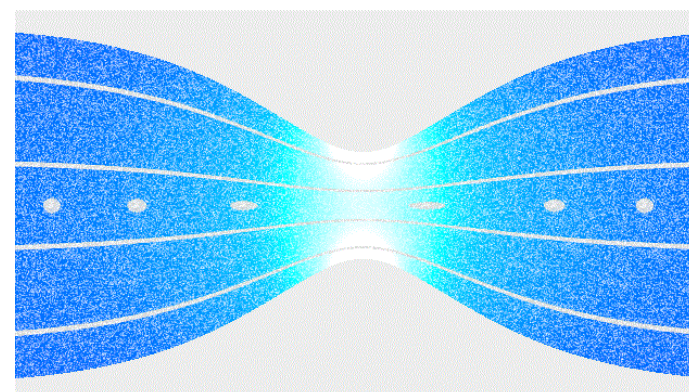
## Alkalmazás: Venturi-effektus



Giovanni Battista  
Venturi  
(1746-1822)



A sztatikus nyomás lecsökken  
a cső szűkületében



Venturi cső

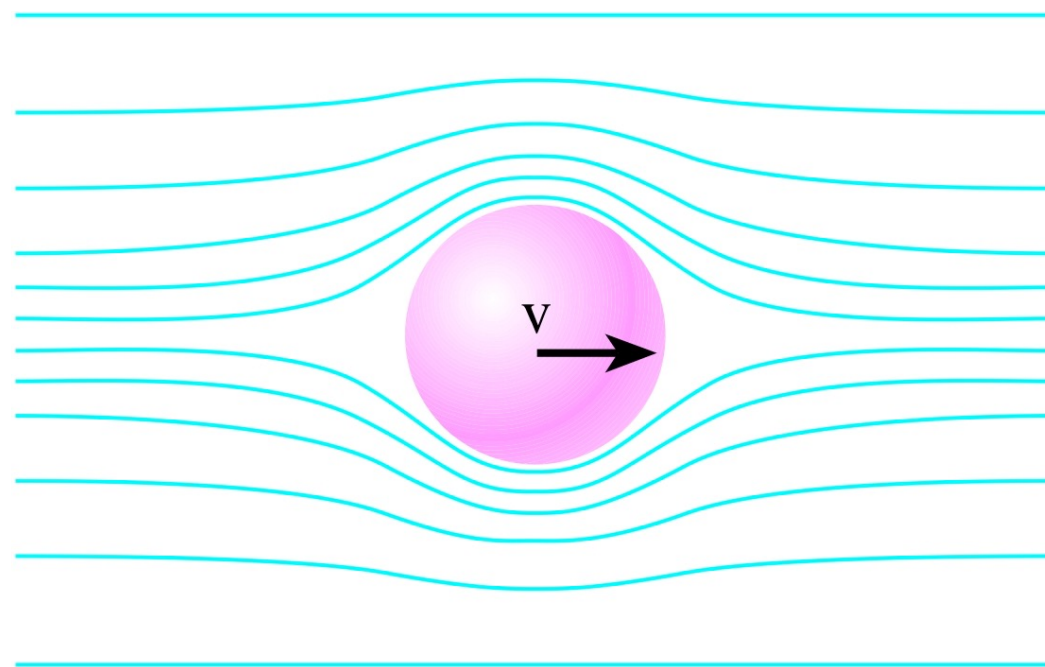
- Kettős pulzus (*pulsus bisferiens*) aorta insufficienciában
- Aspirátor (vákuum szivattyú)
- Inspirátor (Bunsen-égő)
- Mérőeszközök (térfogati áramerősség)
- Szódás szifon
- Porlasztó (atomizátor, spray, karburátor)
- Fúvós hangszerek fúvókái
- Diffúzor

# Törvényszerűségek viszkozus folyadékokban I.

## Stokes törvény



Georg Gabriel Stokes  
(1819-1903)



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

$F$  = erő

$\gamma$  = közegellenállási (súrlódási) együttható, alaki faktor

$v$  = folyadékáramlási sebesség

$r$  = gömb sugara

$\eta$  = viszkozitás

Következő dián jelenléti QR kód!

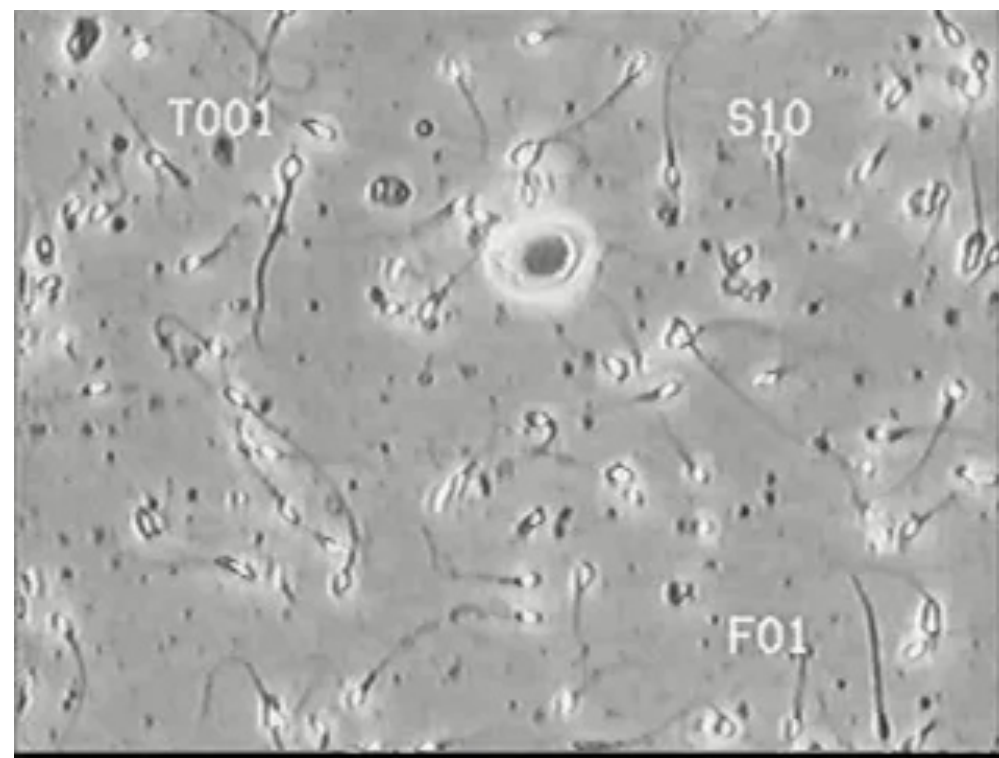


# Stokes erő

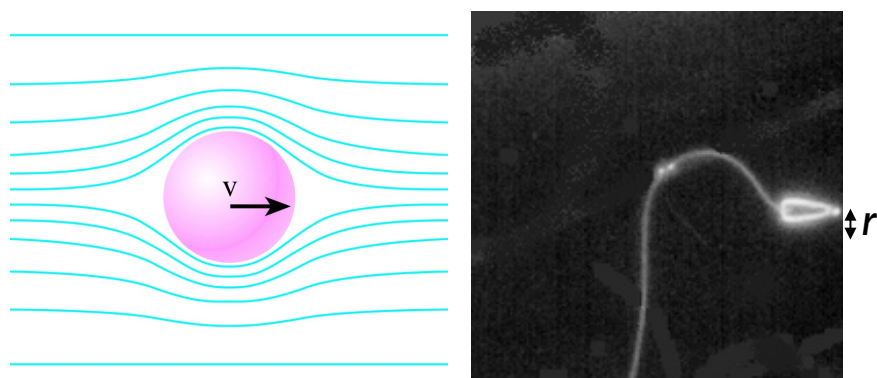
Hidrodinamikai húzóerő (Stokes erő):  $F = \gamma = 6r\pi\eta v$



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?

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

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

# Törvényszerűségek viszkozus folyadékokban II.

## Hagen-Poiseuille törvény



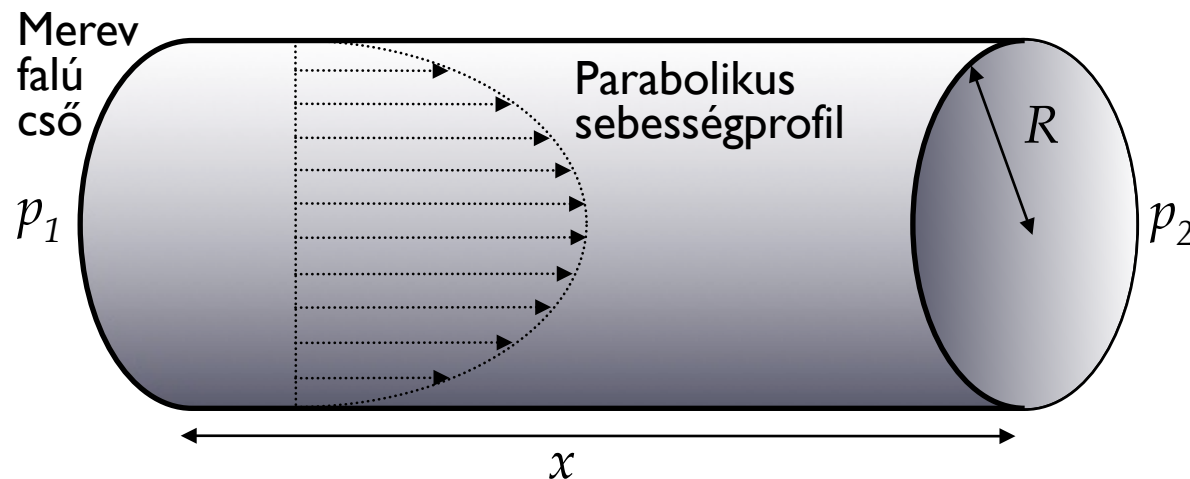
G.H.L. Hagen  
(1797-1884)



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:

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

$1/R_{cső}$  Ohm-törvény!

N.B. 3:

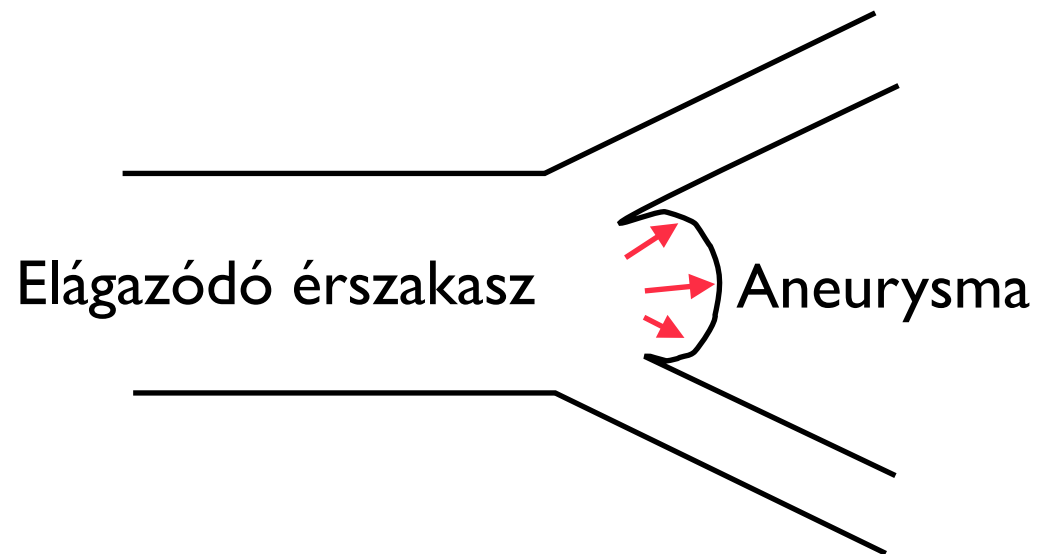
$$\frac{\Delta v}{\Delta r} \sim r \Rightarrow \left( \frac{\Delta v}{\Delta r} \right)_{\max} = R \Rightarrow \tau_{\max} = R$$

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

$V$	= térfogat	$V/t = I_V$	= térfogati áramerősség
$t$	= idő	$\Delta p / \Delta x$	= nyomásgrádiens, fenntartója $p_2 - p_1$ (negatív!)
$R$	= sugár	$A$	= csőkeresztmetszet
$\eta$	= 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)
- vérviszkozitás-változás (pl. láz, anaemia)
- pl.: érátmérő felére csökkenése a térfogati áramerősséget 1/16-ára csökkenti!



# A vér mint folyadék

<b>Testtömeg 55-60%-a víz</b> 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/cm<sup>3</sup>  
Összetétel: 40-45 % alakos elem, 55-60 % plazma

# A vérviszkozitás meghatározói

## I. Hematokrit ( $htc$ , $\phi$ ):

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

Normálérték: 0.4-0.5.

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

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

$\eta_s$  = szuszpenzió viszkozitása  
 $A, B$  = tapasztalati állandók

# A vérviszkozitás meghatározói

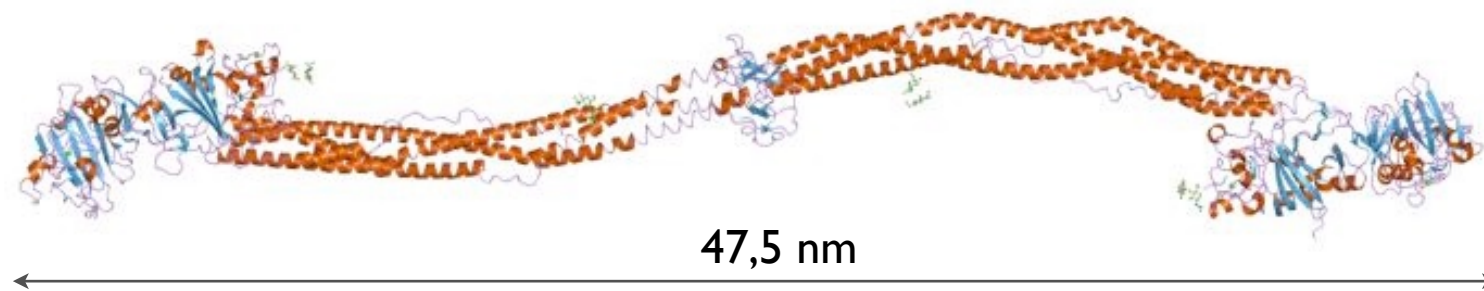
## 2. *Plazmaviszkozitás*

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

<b>Plazmafehérje</b>	<b>Normális koncentráció</b>	<b>%-os megoszlás</b>	<b>Feladat</b>
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

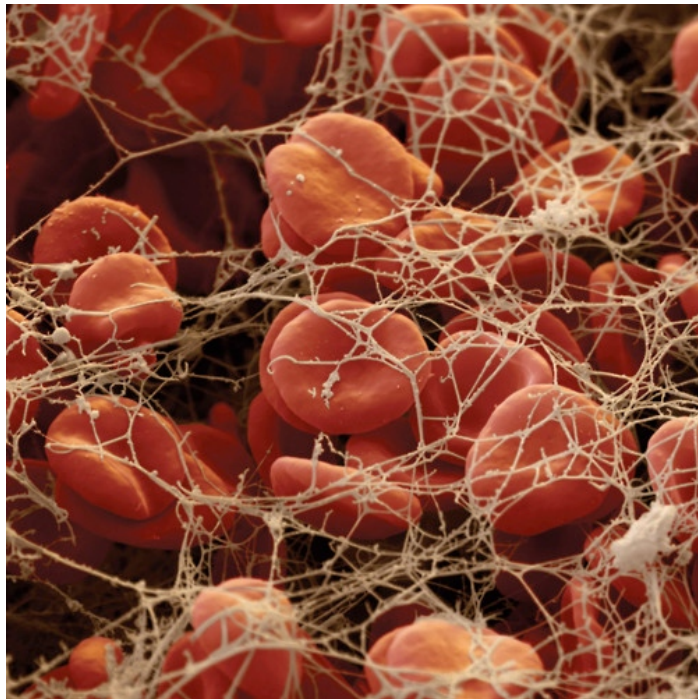


## **Fibrinogén:**

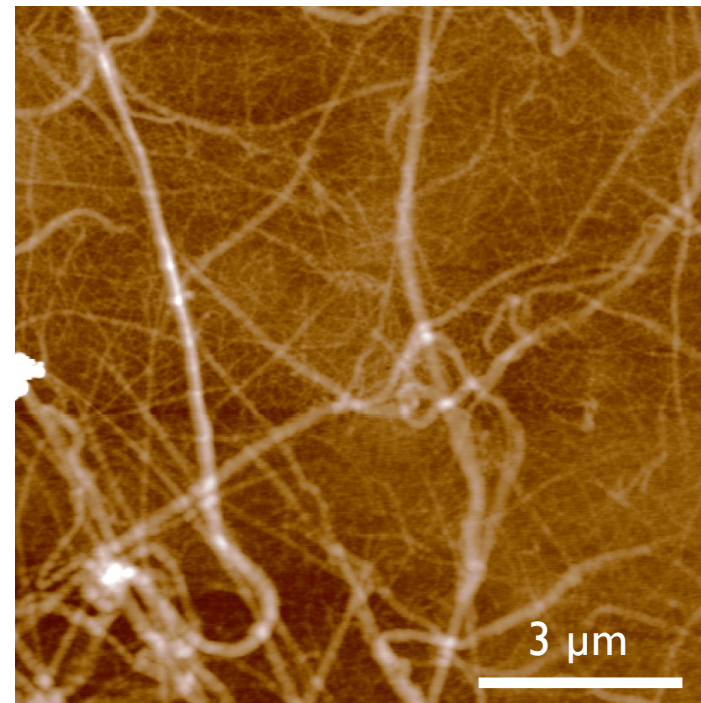
MW = 340.000 Da

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

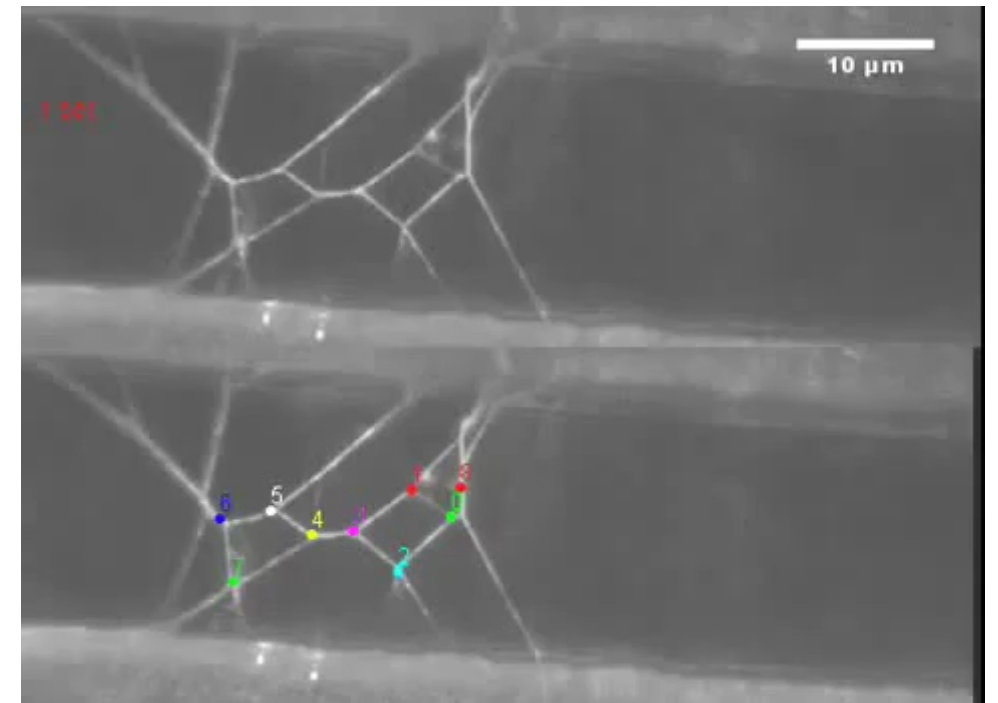
Átlagos távolság a fibrinogén-molekulák között: 55 nm!



Vörösvértestek  
fibrinhálóban



In vitro polimerizált fibrin  
(AFM)

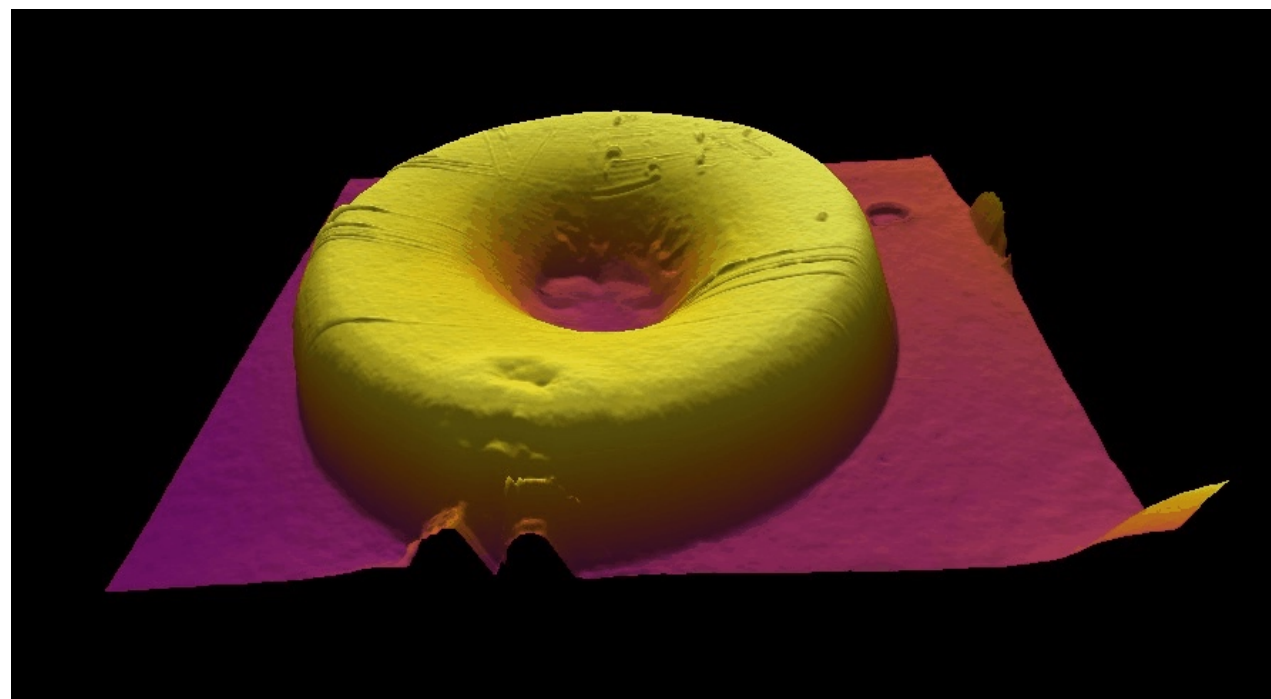


Fluoreszcensen jelölt fibrinszálak  
rugalmassága, nyúlékonysága

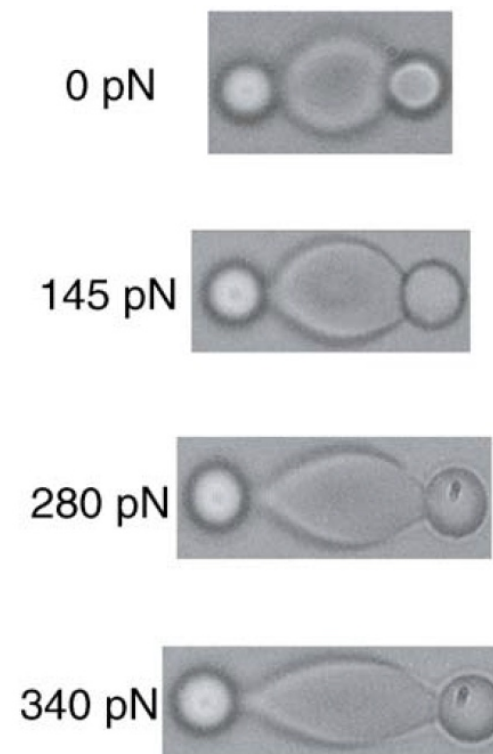
# A vérviszkozitás meghatározói

## 3. Vörösvértestek deformálhatósága

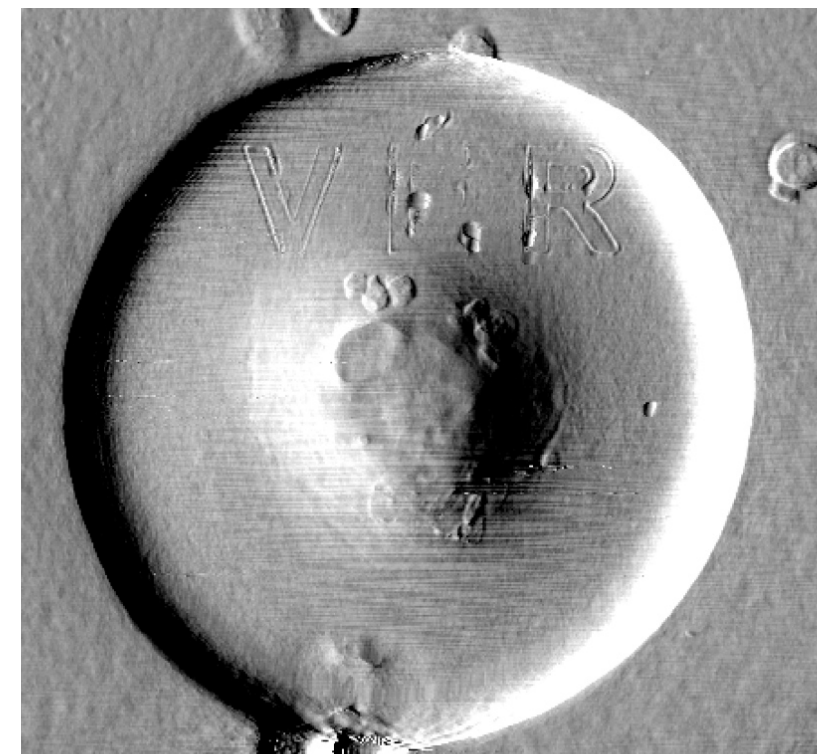
- Vvt-méretű szilárd részecskék 65%-os szuszpenziója téglakemény.
- 95%-os vvt-szuszpénzió viszkozitása csupán 20 mPas!
- Deformáció: csepp, ejtőernyő, nyílhegy alakú sejtek.



7-11  $\mu\text{m}$  átmérőjű korong alakú sejt



VVT deformálás  
lézercsipesszel



Fixált, benyomatot  
tartó VVT (AFM)



# A vérviszkózitás meghatározói

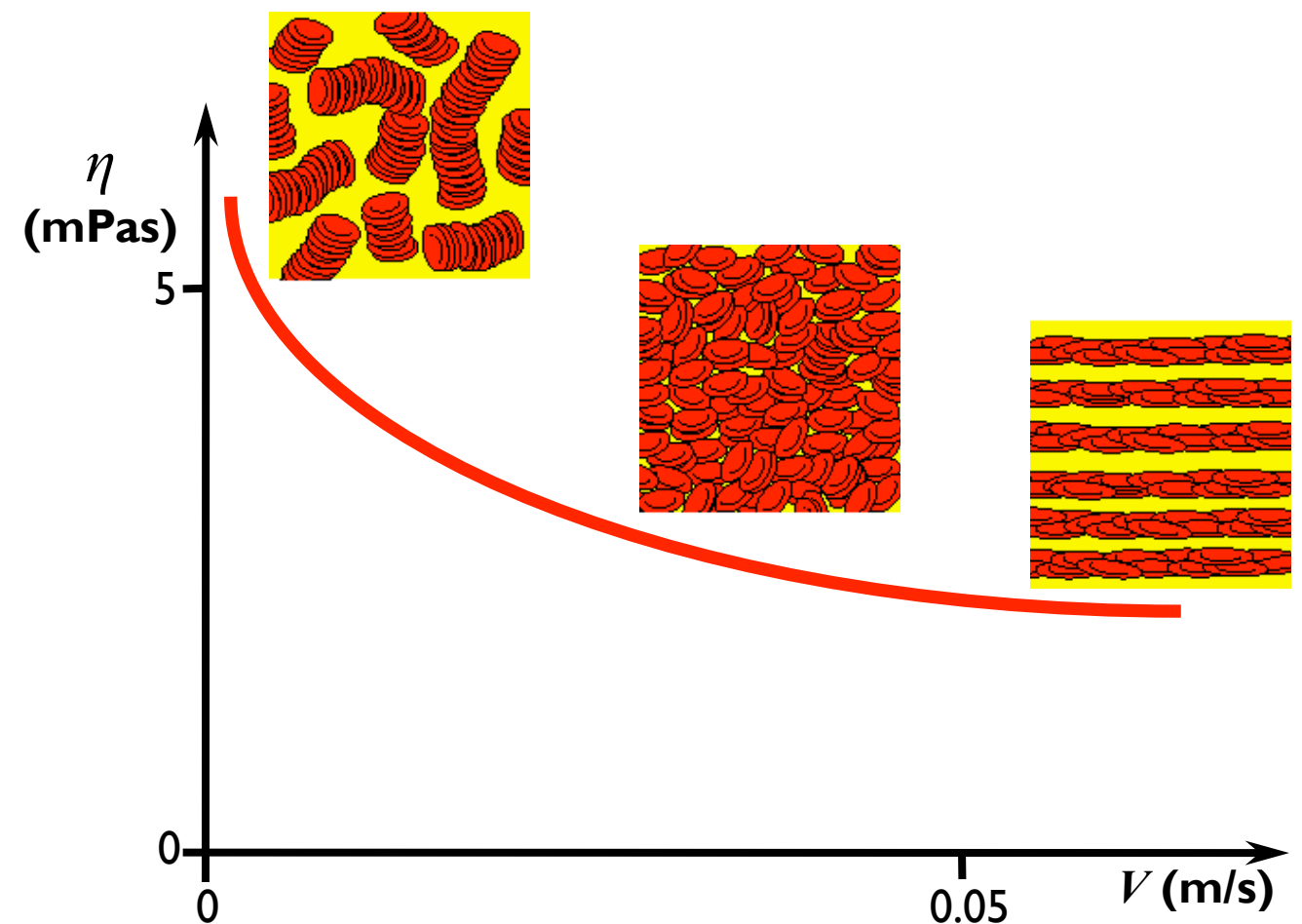
## 4. Vörösvértestek aggregációs készsége

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



Pénztekercs

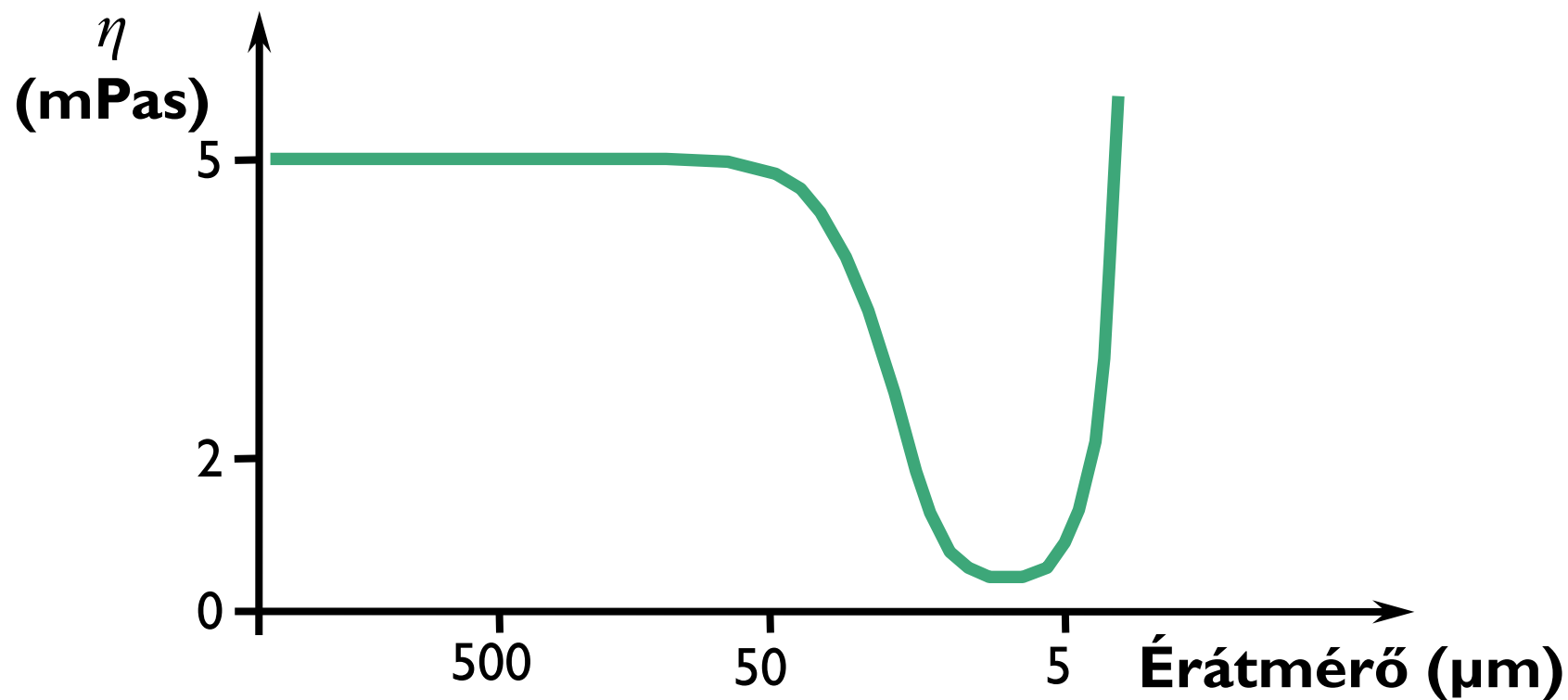
## 5. Áramlási sebesség, sebességgrádiens





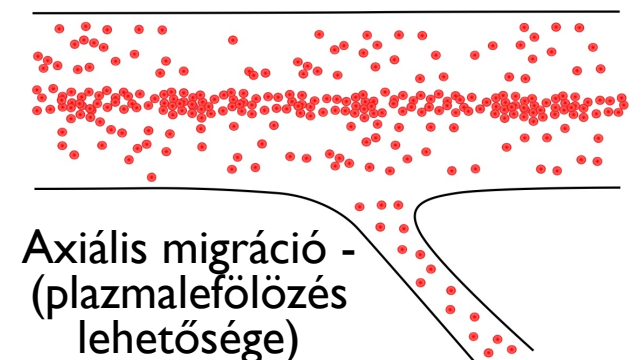
# A vérviszkozitás meghatározói IV.

## 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).



OMHV



<http://report.semmelweis.hu/linkreport.php?qr=WTQUDKM8TG9FRNWI>