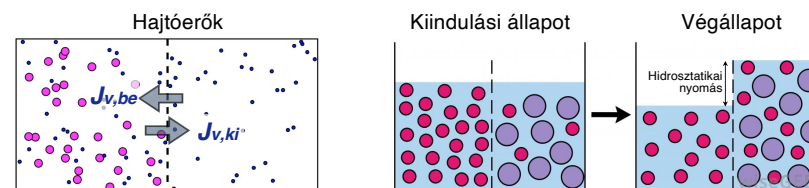


# TRANSPORT OZMÓZIS, ÁRAMLÁS

KELLERMAYER MIKLÓS

## A diffúzió speciális esete: ozmózis

Diffúzió útján történő egyirányú **oldószer** áramlás



$J_{v,be}$  hajtóereje: oldószer koncentrációkülönbség

$J_{v,ki}$  hajtóereje: nyomáskülönbség

Ozmotikus egyensúly:  $J_{v,be} = J_{v,ki}$

Ozmózis nyomás:  $p_{ozmózis} = cRT$

Ozmózis jelentősége: sejt-duzzadás, ödémák, hemodialízis, hashajtás.

**van't Hoff-törvény:**  
 $c$  = oldott anyag koncentrációja  
 $R$  = egyetemes gázállandó  
 $T$  = abszolút hőmérséklet

## Az ozmózis mechanizmusa

*van't Hoff's gáztörvény mechanizmus*

Egyetemes gáztörvény:  $pV = RT$

$$p = \frac{1}{V} RT$$

Ozmotikus nyomás:  $p_{osm} = \pi = cRT$

$p$  = nyomás  
 $V$  = térfogat  
 $R$  = gázállandó (8,3 J/mol.K)  
 $T$  = abszolút hőmérséklet  
 $c$  = moláris koncentráció

**Példa:**

Mekkora az ozmotikus nyomása egy 0.1 M (0.1 mol/dm<sup>3</sup>) cukor oldatnak?

$$\pi = 8.3 \text{ (J/mol.K)} \times 293 \text{ (K)} \times 0.1 \text{ (mol/dm}^3\text{)} = 243 \text{ kPa} \sim 2.4 \text{ atm.}$$

Megjegyzés: híg oldatokra érvényes

## Az ozmózis jelentősége

Féligáteresztő hártya jellemzője: **reflexiós együttható** ( $\sigma$ )

Tökéletes féligáteresztő hártyára:

$$\Delta P = \Delta \pi \quad \sigma = \frac{\Delta P}{\Delta \pi} = 1$$

$$\Delta P < \Delta \pi \quad \sigma = \frac{\Delta P}{\Delta \pi} < 1$$

$$0 < \sigma < 1$$

**Ozmotikus munka:**

$$-L = nRT \ln \frac{c_1}{c_2} = nRT \ln \frac{\pi_1}{\pi_2}$$

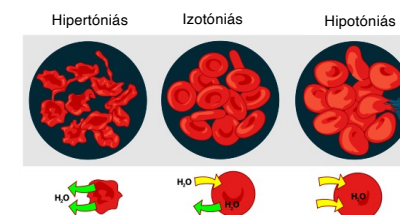
$R$  = gázállandó  
 $n$  = oldott anyag móljainak száma  
 $c_1$  = oldat kezdeti moláris koncentrációja  
 $c_2$  = végső moláris koncentráció (egyensúly)  
 $\pi_1$  = kezdeti ozmotikus nyomás  
 $\pi_2$  = végső ozmotikus nyomás (egyensúly)

**Ekvivalens ozmotikus nyomás** (ozmotikus koncentráció): heterogén oldatrendszerrel egyensúlyban levő nem-elektrolit oldat koncentrációja.

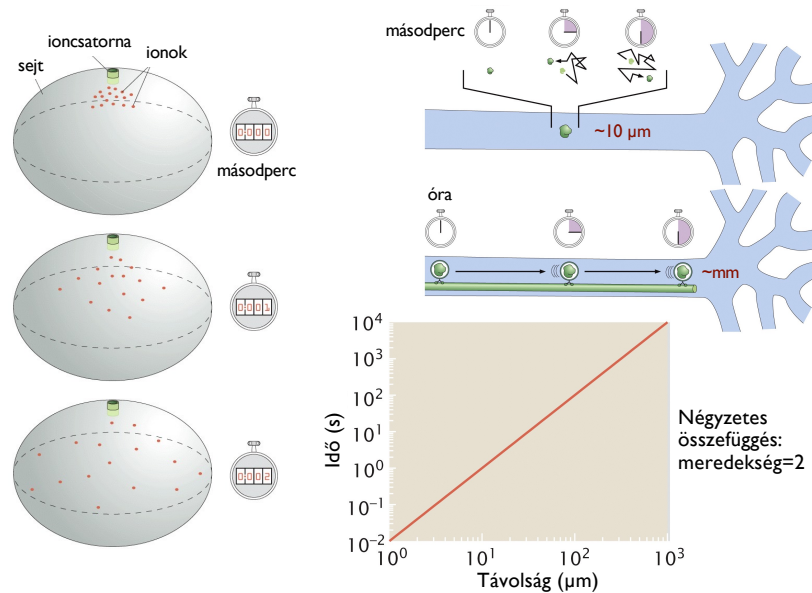
Mértékegység: mmol/kg = mOsmol/kg = mOsm

A vérplazma ozmotikus nyomása ~ 300 mOsm.

**Onkotikus nyomás:** kolloid ozmózis nyomás  
 Kolloid makromolekulák oldatának ozmotikus nyomása.



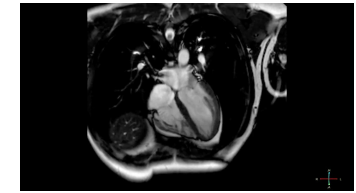
# A diffúzió csak rövid méretsálán gyors



# Áramlások jelentősége

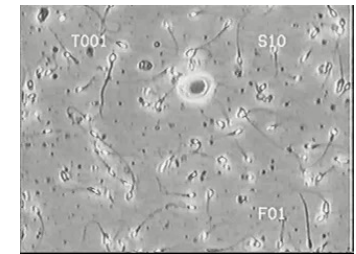
## I. Hemodinamika

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-/sűrűségváltozások elhanyagolható.

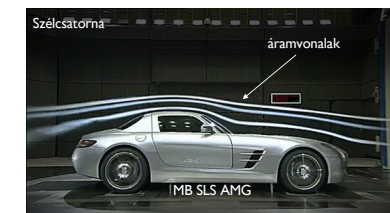
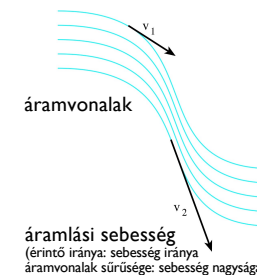
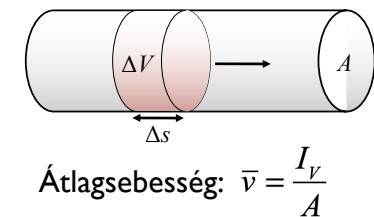
# Folyadékok és gázok áramlása A vér fizikai tulajdonságai

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

## Alapfogalmak I.

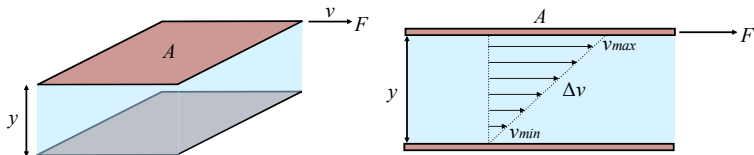
Térfogati áramerősség ( $I_V$ ):

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



Az áramlás láthatóvá tehető

# Alapfogalmak II. Viszkozitás (belső súrlódás)



$F$  = nyíróerő  
 $A$  = folyadéklemmez területe  
 $\eta$  = viszkozitás  
 $v$  = áramlási sebesség  
 $y$  = folyadéklemmek 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:  $1 \text{ Pas} = 1 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} = 10 \text{ P (poise)}$

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

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.

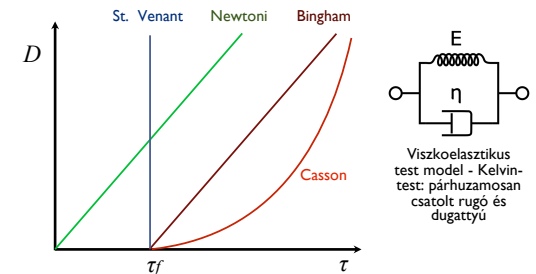
## Folyadékok fajtái

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

Sebességgrádiens és nyírófeszültség összefüggése **reális** folyadékokban



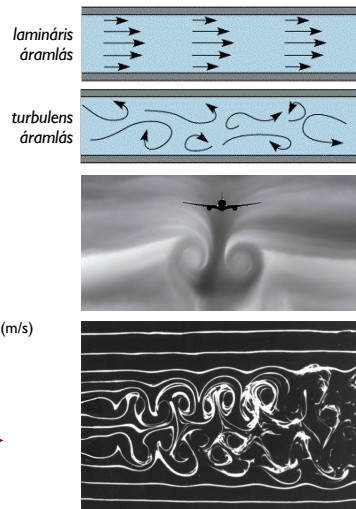
- $\tau_f$  = folyási határ (küszöbfeszültség)
- Viszkoelasztikus anyagok: elasztikus test + viszkózus folyadék (pl. polimer-, makromolekula-oldatok)
- Stressz-relaxáció: feszültség lecsengése idő függvényében hirtelen megnyújtott viszkoelasztikus testben.
- A vér nem-newtoni folyadék, viszkoelasztikus 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 ( $Re$ ):

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

$v$  = folyadékáramlási sebesség (m/s)  
 $r$  = cső sugara (m)  
 $\rho$  = folyadék sűrűsége (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\eta$  = viszkozitás (Ns/m<sup>2</sup>)

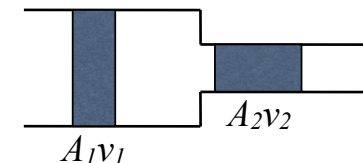


lamináris + turbulens  
 $Re \approx 2000$

"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



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

$A$  = keresztmetszet  
 $v$  = áramlási sebesség

# Törvényszerűségek ideális fc. II.

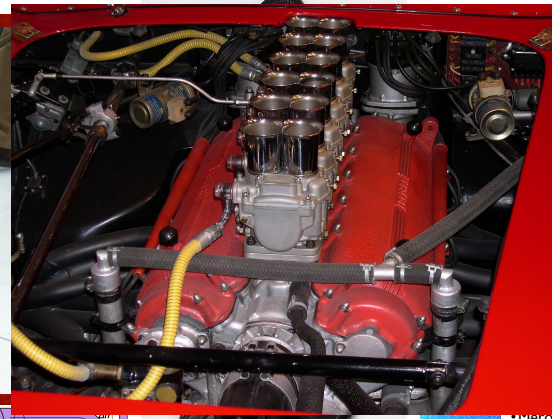
Bernoulli



Daniel Bernoulli  
(1700-1782)



Giovanni Battista  
Venturi  
(1746-1822)



énye

nás

más (torló nyomás)

nyomás

- szívs pulzus (pulsus)
- (ns) aorta
- cienciában
- tor (vákuum szivattyú)
- ator (Bunsen-égő)
- Mérőeszközök (térfogati áramerősség)
- Szódás szifon
- Porlasztó (atomizátor, spray, karburátor)
- Fűvös hangszerek fúvókái
- Diffúzor

A sztatikus nyomás lecsökken a cső szűkülésében

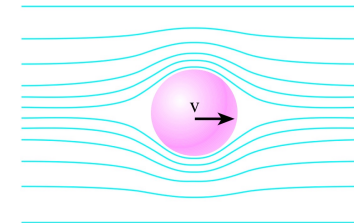
Venturi cső

# Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban I.

Stokes törvény



Georg Gabriel Stokes  
(1819-1903)



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

$F$  = erő

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

$v$  = folyadékáramlási sebesség

$r$  = gömb sugara

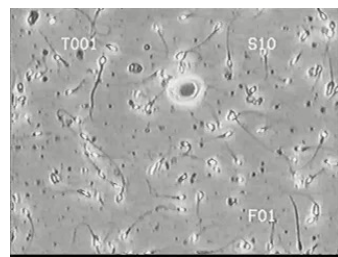
$\eta$  = viszkozitás

## Stokes erő

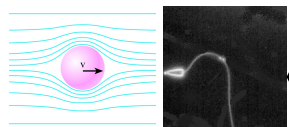
Hidrodinamikai húzóerő (Stokes erő):  $F = \gamma = 6\pi\eta v$



Hat folyadékban álló részecskékre  
(lézercsipeszben megragadott mikrogöngy)



Hat álló folyadékban mozgó részecskékre  
(mozgó spermatoцитák)



$$r = 1.6 \mu\text{m} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$v = 50 \mu\text{m/s} = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$\eta = 10^{-3} \text{ Pas}$$

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen  
spermatoцитának mozgása során?

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

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

# Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban II.

Hagen-Poiseuille törvény

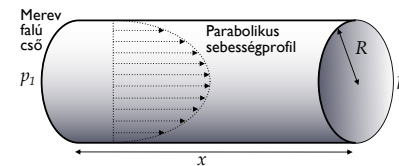


G.H.L. Hagen  
(1797-1884)

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

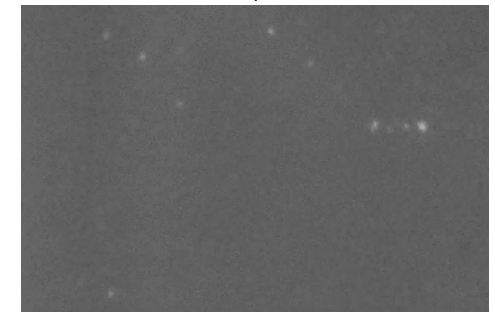
Termodinamikai áram	Áramot fenntartó intenzív mennyiség-különbség	Áramsűrűség	Törvény
Térfogati áram	Nyomás ( $p$ )	$J_v = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$	Hagen-Poiseuille

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



$V$  = térfogat  
 $t$  = idő  
 $R$  = sugár  
 $\eta$  = viszkozitás  
 $p$  = nyomás  
 $x$  = csőhossz

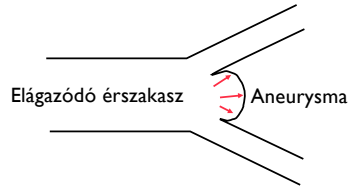
$V/t = I_v$  = térfogati áramerősség  
 $\Delta p/\Delta x$  = nyomásgradiens, fenntartója  $p_2 - p_1$  (negatív)  
 $A$  = csőkeresztmetszet  
 $I_v$  = térfogati áramerősség





# A folyadékáramlásban közvetlen orvosi jelentősége

Bernoulli törvény:



**Aneurysma, értágulat kialakulása:**

- Tágulás: érátérő 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.

Hagen-Poiseuille törvény:

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

Átáramló **vérmennyiség** - és vele **együtt a szállított oxigén mennyisége**

- **drasztikusan csökken** pathológias állapotokban:

- érszűkület (pl. diabetes, Búrgér-kór)
- vérviszkózitás-változás (pl. láz, anaemia)
- pl.: érátérő 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 intersticiium 9-10 kg

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

**Vér:**

# A vérviszkózitás meghatározói

**1. 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

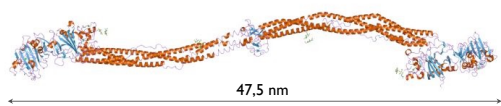
# A vérviszkózitás meghatározói

**2. Plazmaviszkózitás**

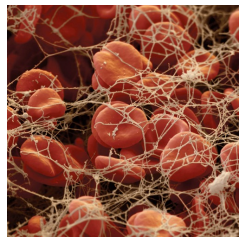
- Elsősorban a plazmafehérjéktől függ.
- *Paraproteinaemiákban* (myeloma multiplex v. plasmocytoma) az immunglobulinok mennyisége kórosan fokozódott, mely viszkozitásnövekedéshez vezet.

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

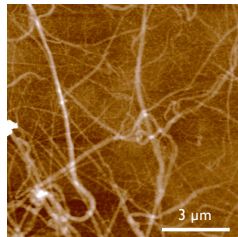
# Fibrinogén, fibrin



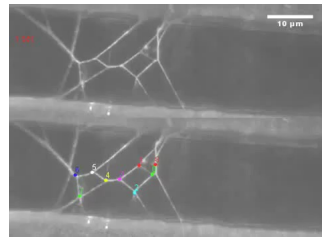
**Fibrinogén:**  
 MVV = 340.000 Da  
 Plazmában 2-4 g/l  $\approx$  **10  $\mu$ M**  
 Átlagos távolság a fibrinogén-  
 molekulák között: 55 nm!



Vörösvértestek  
fibrinhálóban



In vitro polimerizált fibrin  
(AFM)

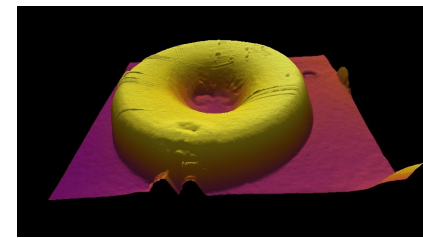


Fluoreszcensen jelölt fibrinszálak  
rugalmassága, nyúlékonysága

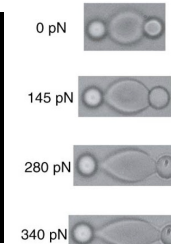
## A vérviszkozitás meghatározói

### 3. Vörösvértestek deformálhatósága

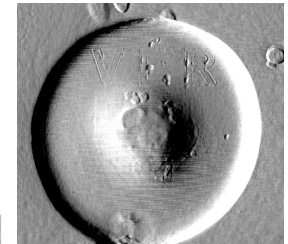
- Vvt-méretű szilárd részecskék 65%-os szuszpenziója téglakemény.
- 95%-os vvt-szuszpénzió viszkozitása csupán 20 mPas!
- Deformáció: csepp, ejtőernyő, nyílhegy alakú sejtek.



7-11  $\mu$ m átmérőjű korong alakú sejt



VVT deformálás  
lézercsípessel

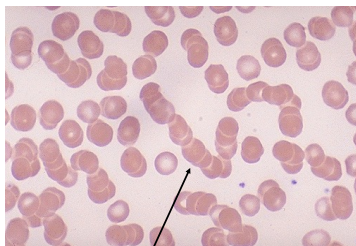


Fixált, benyomatot  
tartó VVT (AFM)

## A vérviszkozitás meghatározói

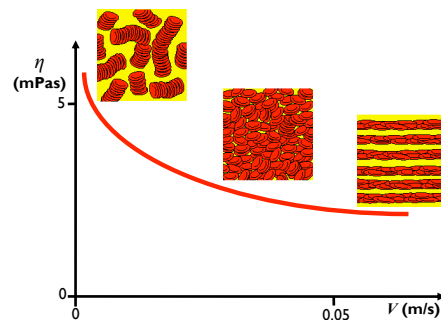
### 4. Vörösvértestek aggregációs készsége

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



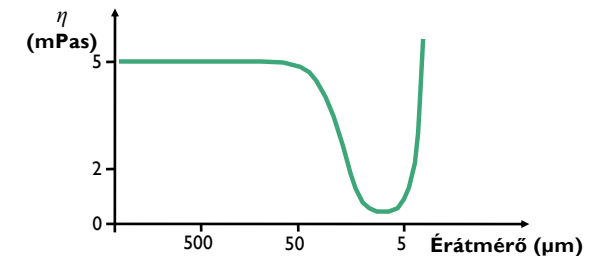
Pénztekercs

### 5. Áramlási sebesség, sebességgrádiens



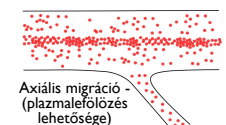
## A vérviszkozitás meghatározói IV.

### 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).



OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/pre-show-qr.php?type=feedback&qr=N5UZGXTRDPF5FDKX>