

Transzportfolyamatok-1

Áramlás csövekben

2023.03.13
Haluszka Dóra

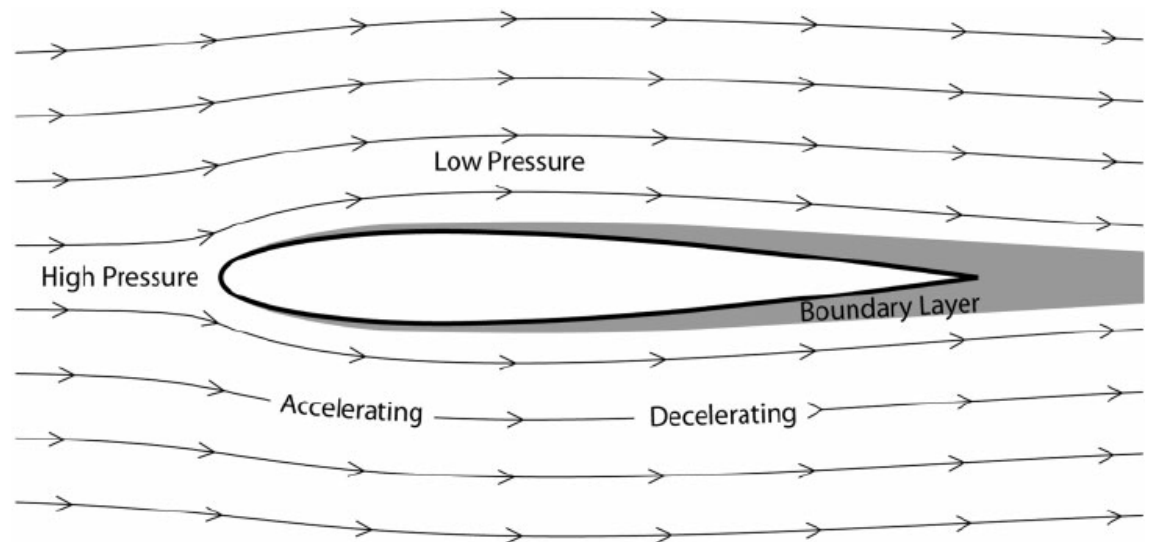
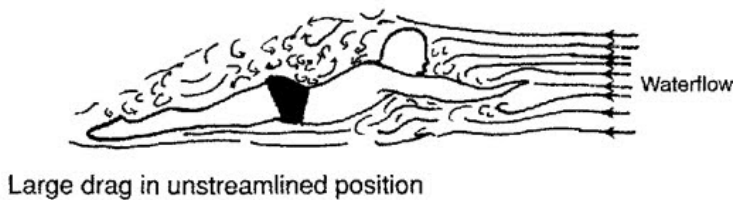
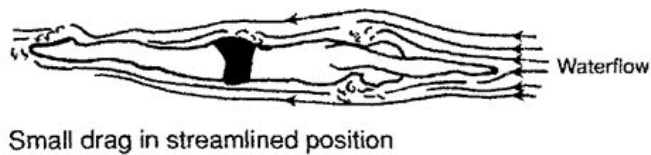
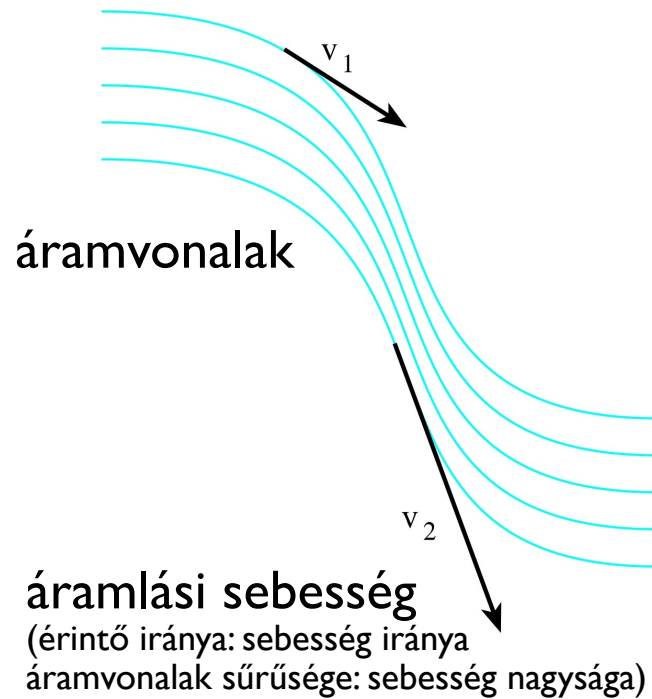
Transzport = szállítás

biológiai jelentősége: sejtek közötti és sejten belüli anyagáramlás
(légzés, vérkeringés, membrántranszport,
anyagcsere)

Transzport mechanizmusa:

- hordozó részecskék kollektív vándorlása –
makroszkopikusan megfigyelhető áramlás
- részecskék független mikroszkopikus mozgásai, diffúzió
- transzport a sejt(lipid)-membránon keresztül

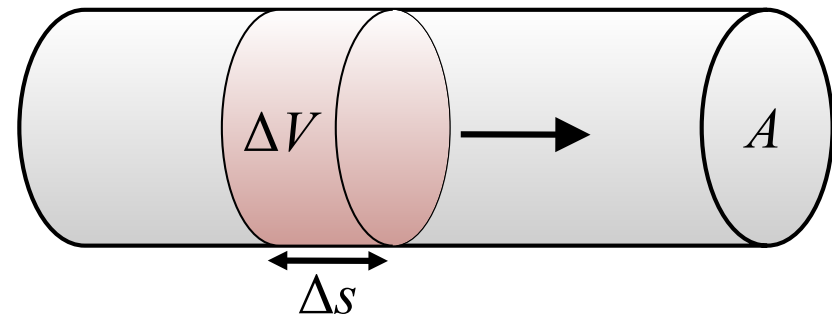
Makroszkopikusan megfigyelhető áramlás



Áramlás merev falú csövekben

Térfogati áramerősség (I_V):

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

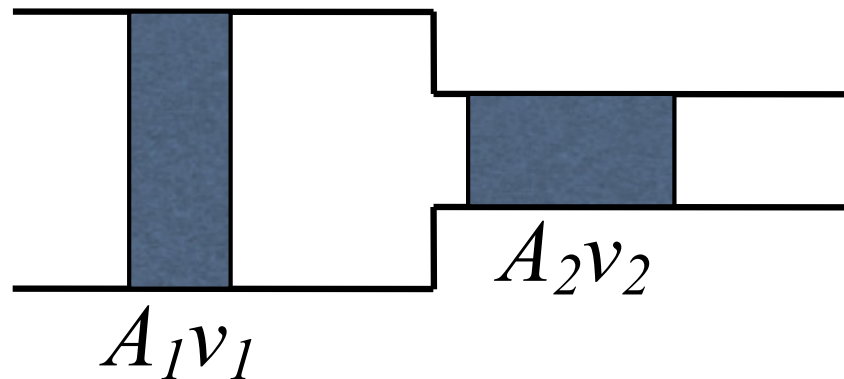


Átlagsebesség: $\bar{v} = \frac{I_V}{A}$

Stacionárius áramlás

az áramlás paraméterei időben állandóak

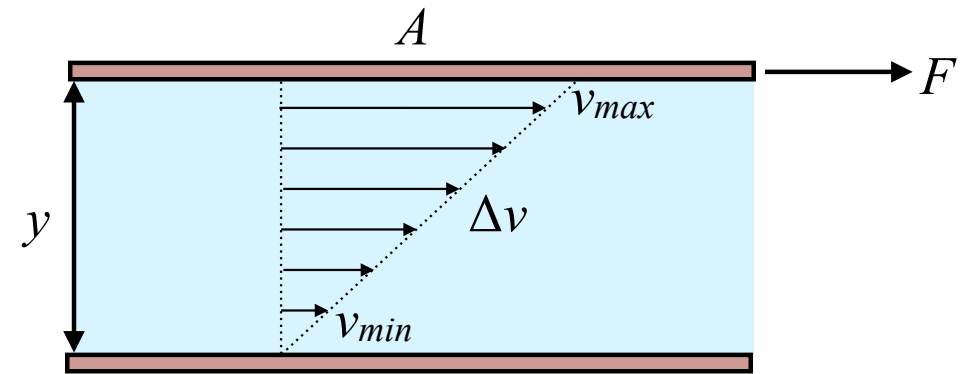
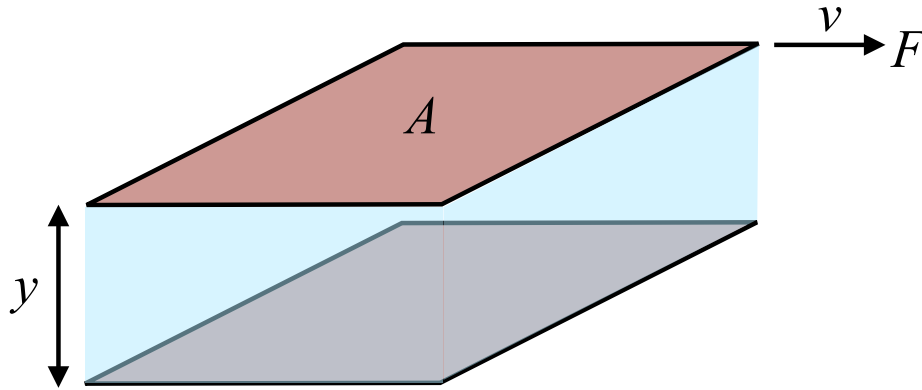
Kontinuitás elve: stacionárius áramlásban a térfogati áramerősség az áramlás bármely részén konstans
pl.: összenyomhatatlan folyadékok (gázok?)



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

A =keresztmetszet
 v =áramlási sebesség

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): $\sim 1 \text{ mPas}$ (1 centipoise)

Folyadékok fajtái viszkozitás szerint

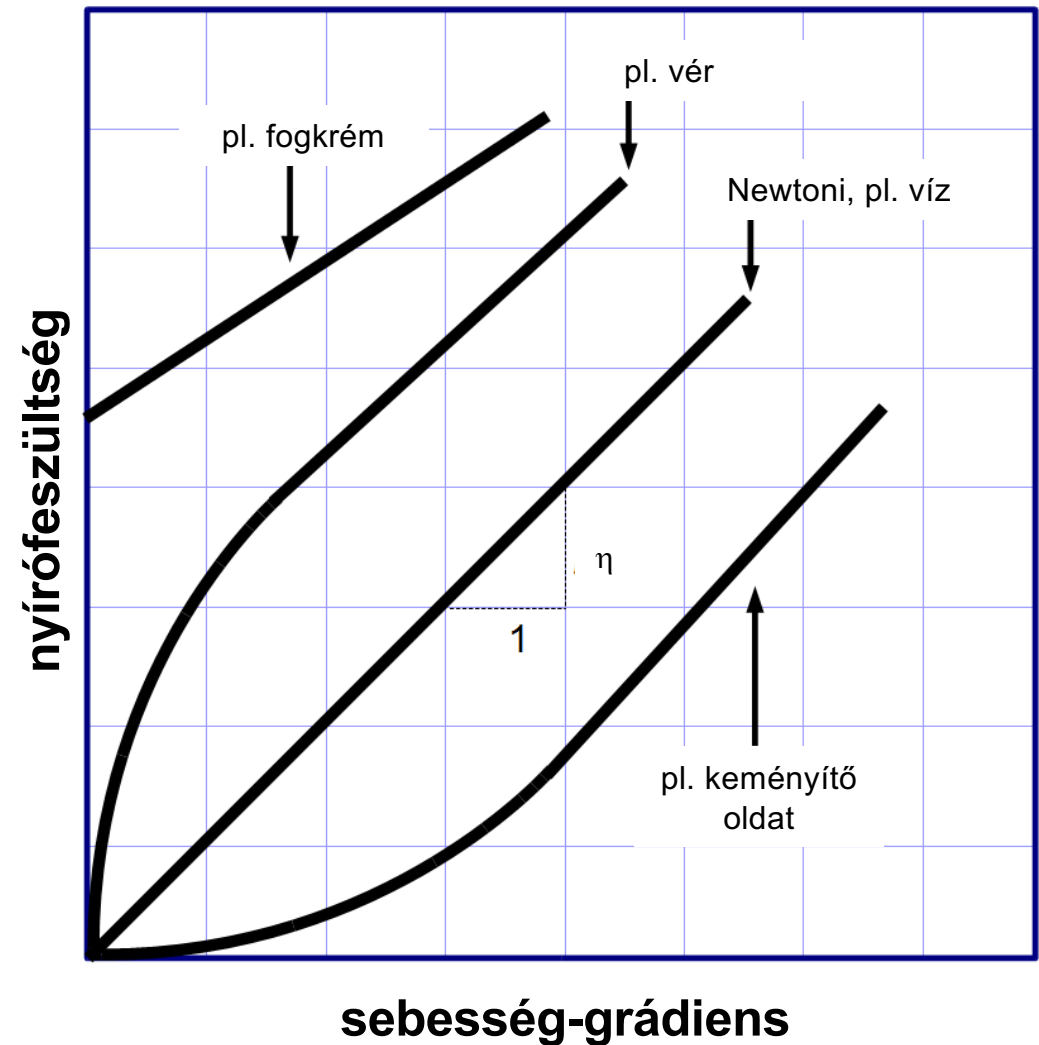
1. Ideális

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

2. Nem ideális (reális)

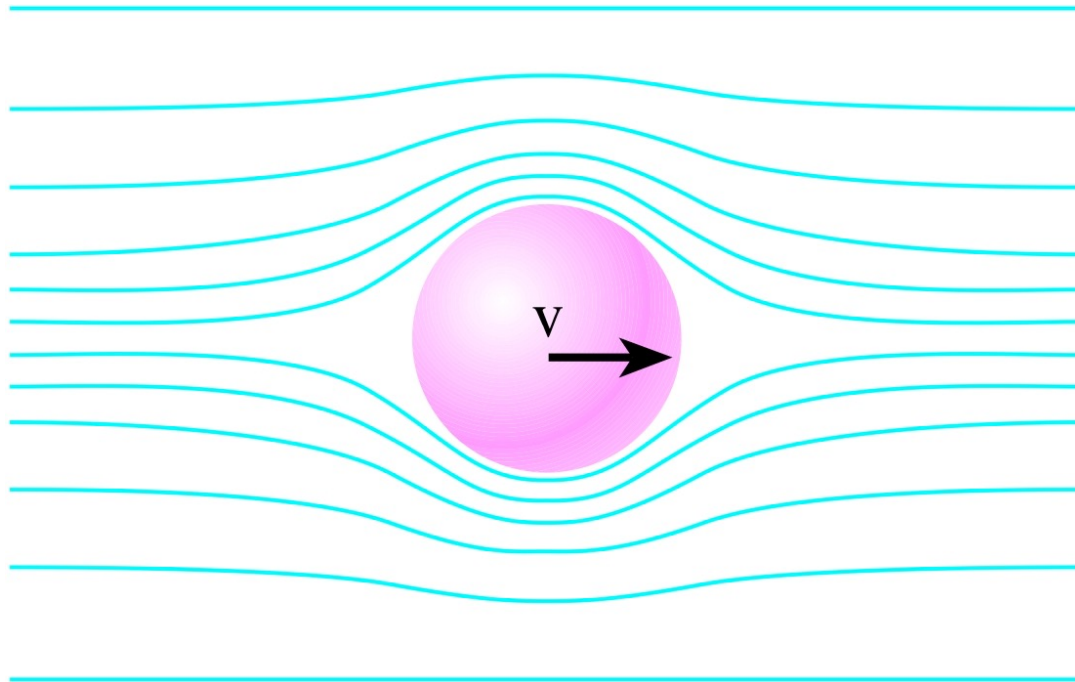
a. Newtoni (viszkózus)
 η független a
nyírófeszültségtől

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



$$\eta = \tau / D$$

Áramlási ellenállás – Stokes törvény



Georg Gabriel Stokes
(1819-1903)

F = erő

γ = közegellenállási (súrlódási) együttható

v = folyadékáramlási sebesség

r = gömb sugara

η = viszkozitás

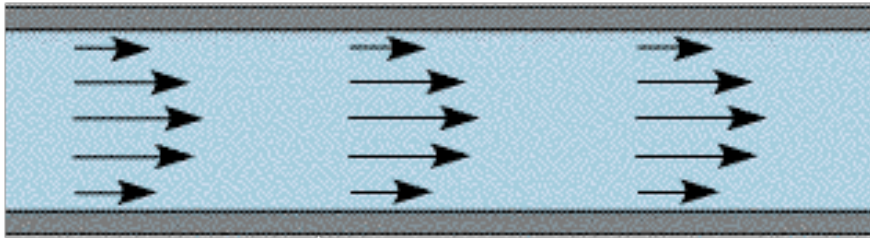
$$F = \gamma v = 6\pi\eta r v$$

Áramlások fajtái:

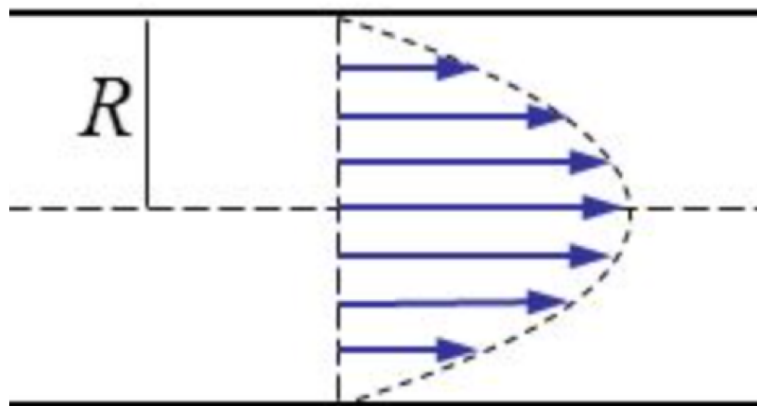
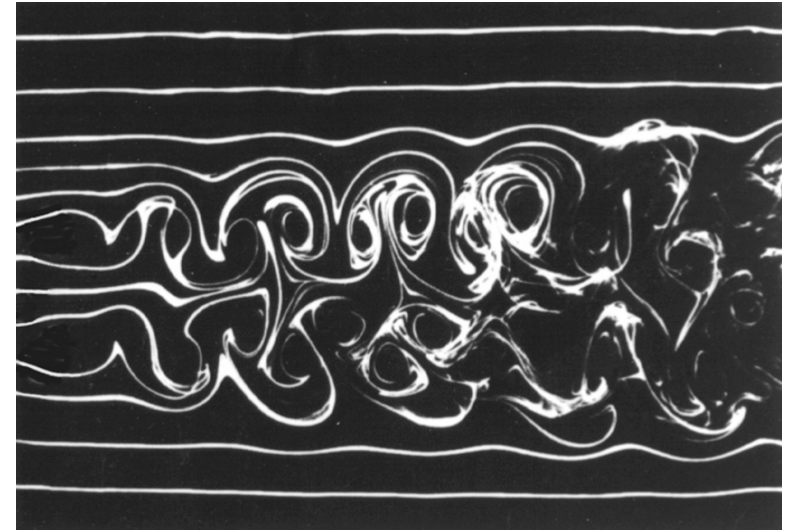
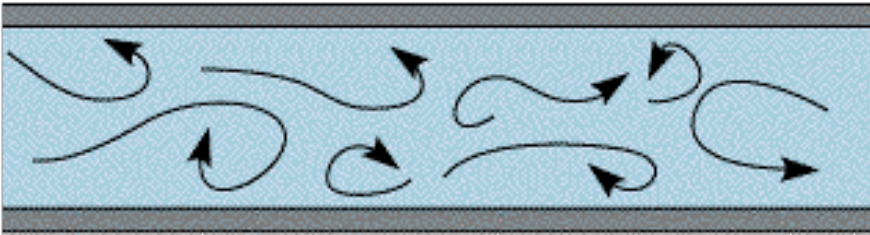
lamináris – folyadékrétegek nem keverednek

turbulens – folyadékrétegek keverednek

lamináris
áramlás



turbulens
áramlás



parabolikus sebességprofil



Osborne Reynolds
(1842-1912)

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)



$Re \approx 2000$

$Re > 1000$ – turbulencia megjelenik

Bernoulli törvény

energiamegmaradás törvénye ideális folyadékokban



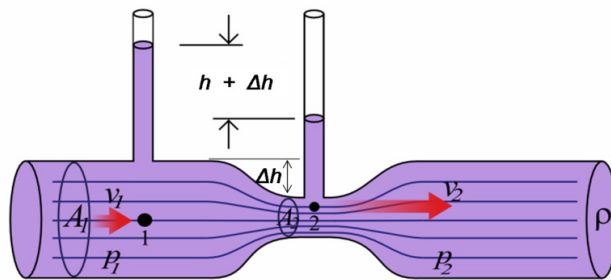
Daniel Bernoulli
(1700-1782)

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

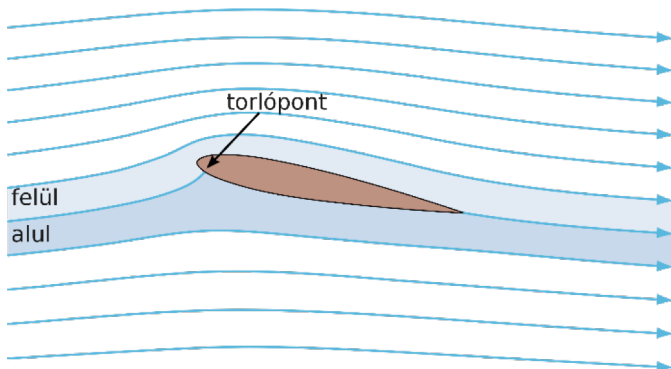
p = sztatikus nyomás
 $\frac{1}{2} \rho v^2$ = dinamikus nyomás (torló nyomás)
 ρgh = hidrosztatikai nyomás



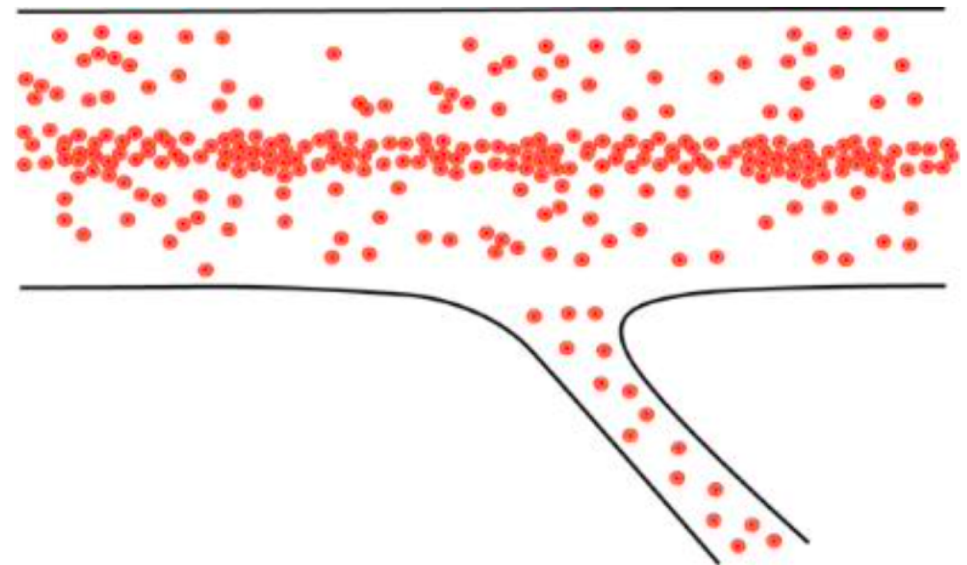
Giovanni Battista
Venturi
(1746-1822)



A sztatikus nyomás lecsökken
a cső szűkületében

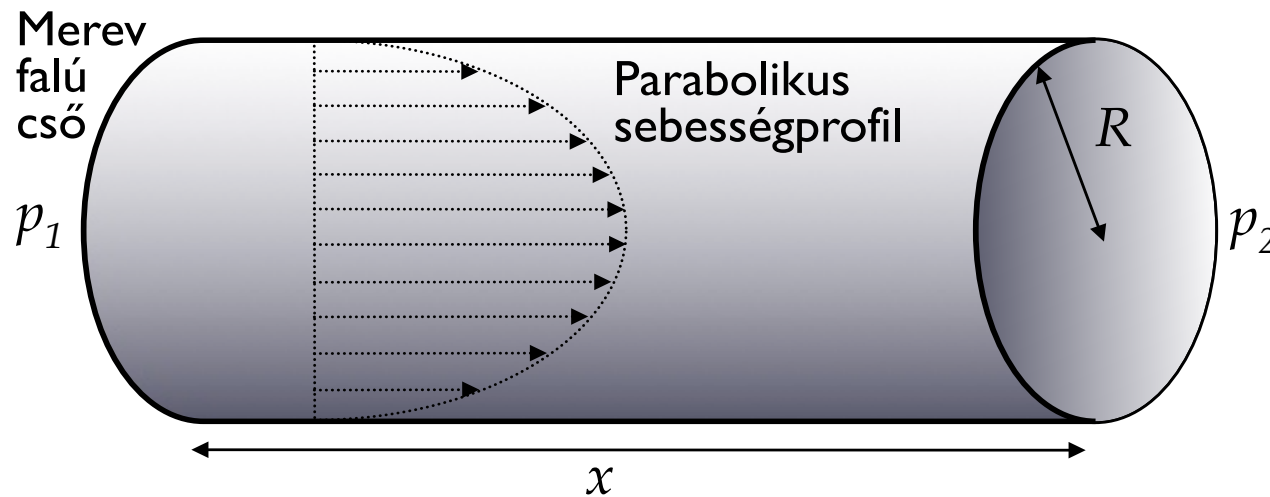


Plazmalefölözés



Hagen-Poiseuille törvény

Newtoni folyadékok és gázok stacionárius, lamináris áramlása merev falú csövekben



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



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

V = térfogat
 t = idő
 R = sugár
 η = viszkozitás
 p = nyomás
 x = csőhossz

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

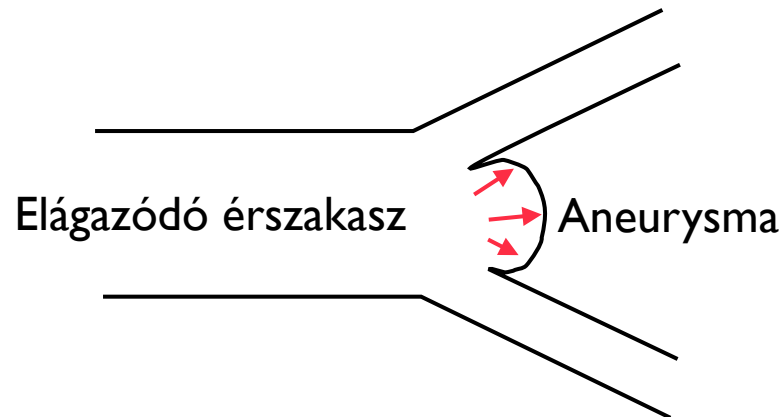
$$I_V = \frac{V}{t} = -\frac{R^4 \pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

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

$1/R_{cső}$ Ohm-törvény!

Folyadékáramlási törvények orvosi jelentősége

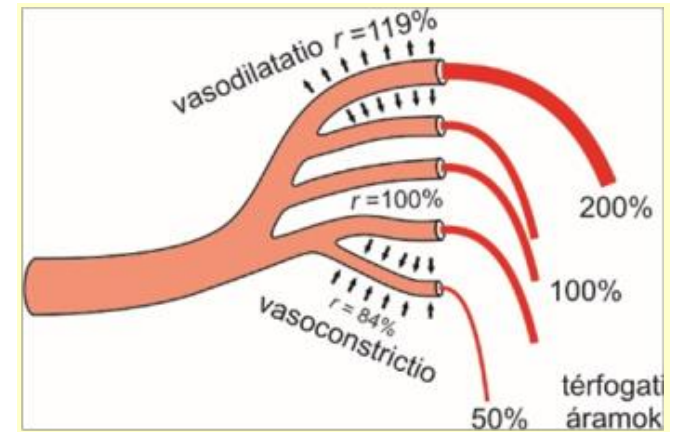
Bernoulli törvény:



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.

Hagen-Poiseuille törvény:

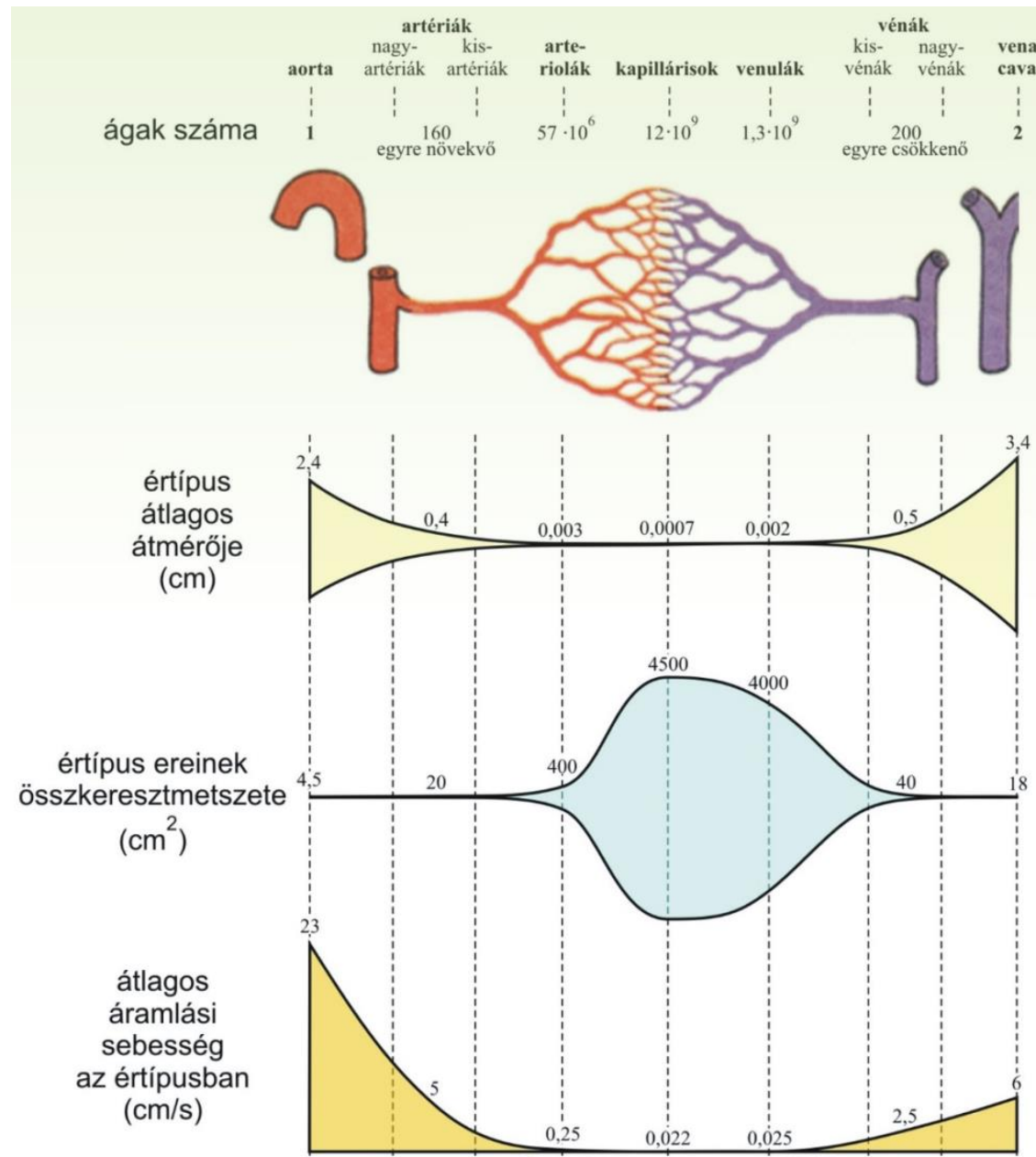


$$I_V = \frac{V}{t} = \frac{R^4 \pi \Delta p}{8\eta \Delta x}$$

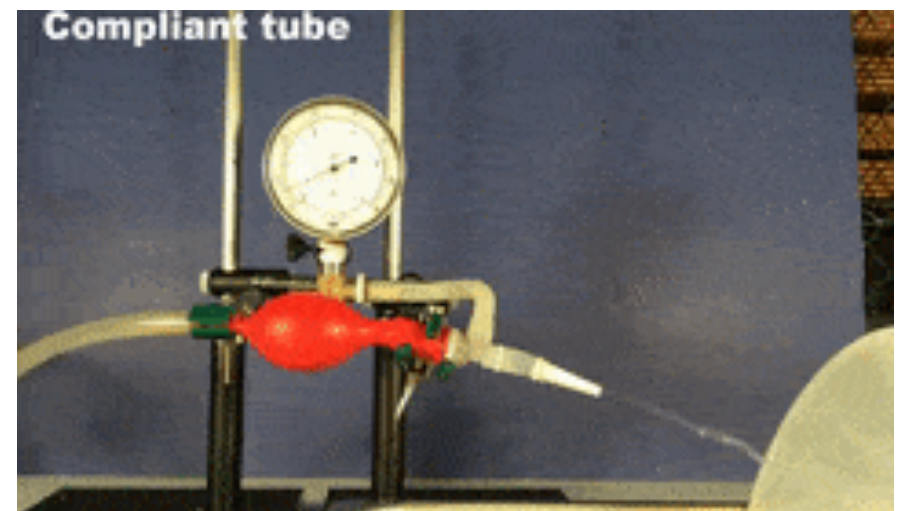
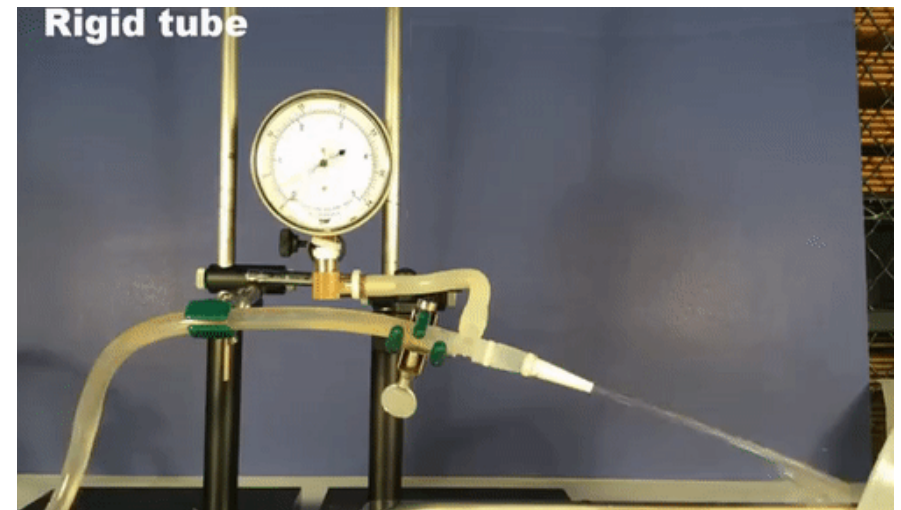
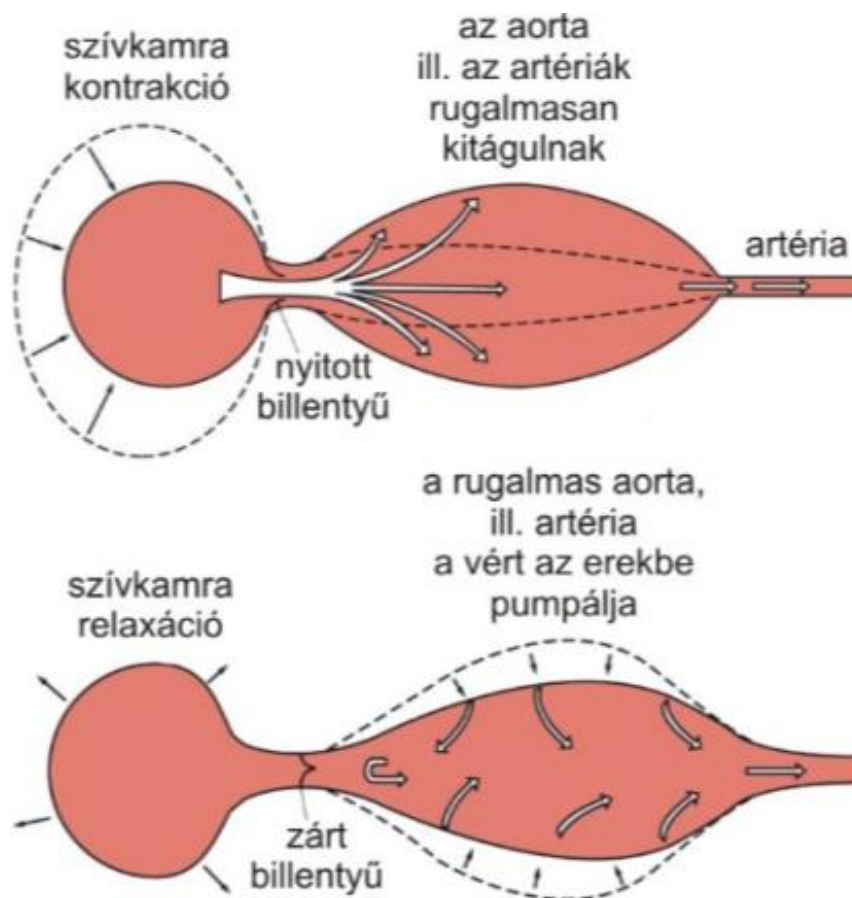
– szállított vérmennyiség szabályozása (érszűkület)

– viszkozitás szabályozása (láz, anémia)

Áramlási viszonyok az érrendszerben



Áramlási viszonyok az érrendszerben: pulzáló áramlás, rugalmas artériák



Folyadékterek az emberben

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 vér viszkozitása

I. Hematokrit (htc , ϕ):

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

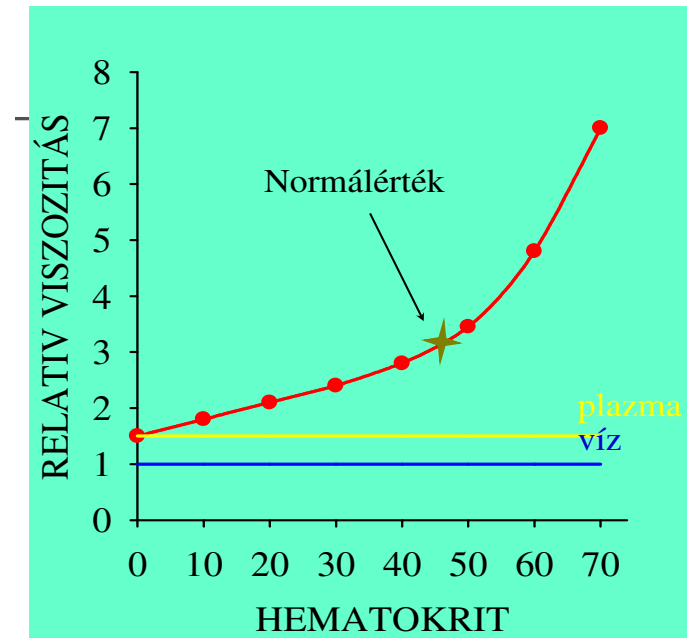
Normálérték: 0.4-0.5.

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 vér viszkozitásának hematokrit-függése



A vér viszkozitása

2. Plazmaviszkozitás

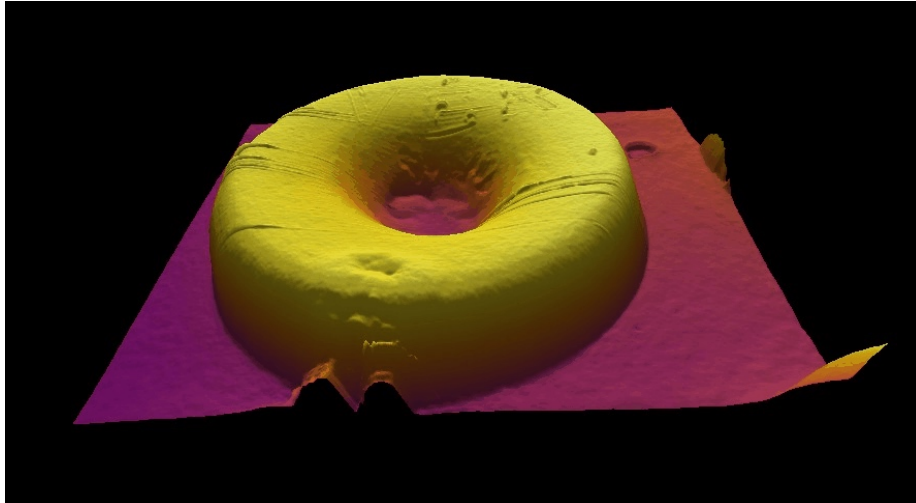
- Elsősorban a plazmafehérjéktől függ.
- *Paraproteinaemiákban* (myeloma multiplex v. plasmocytoma) az immunglobulinok mennyisége kórosan fokozódott, mely viszkozitásnövekedéshez vezet.

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

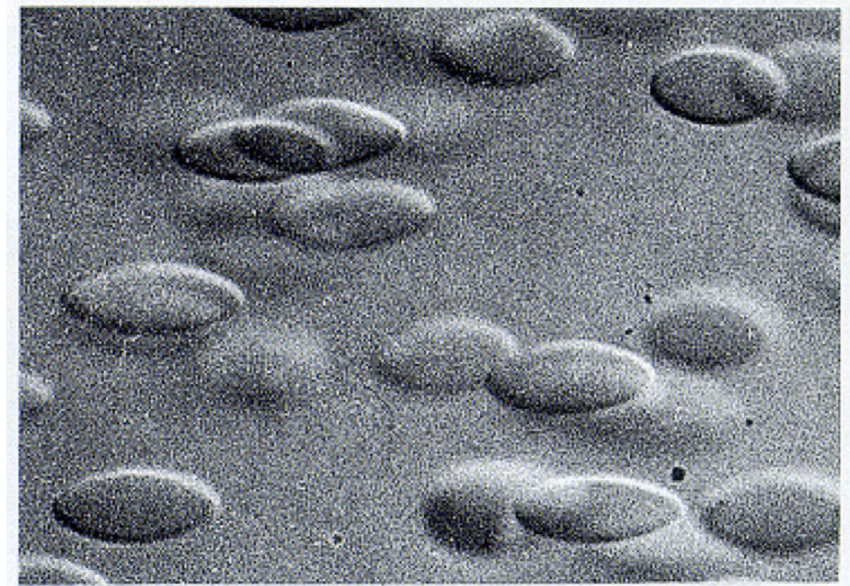
A vér viszkozitása

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.



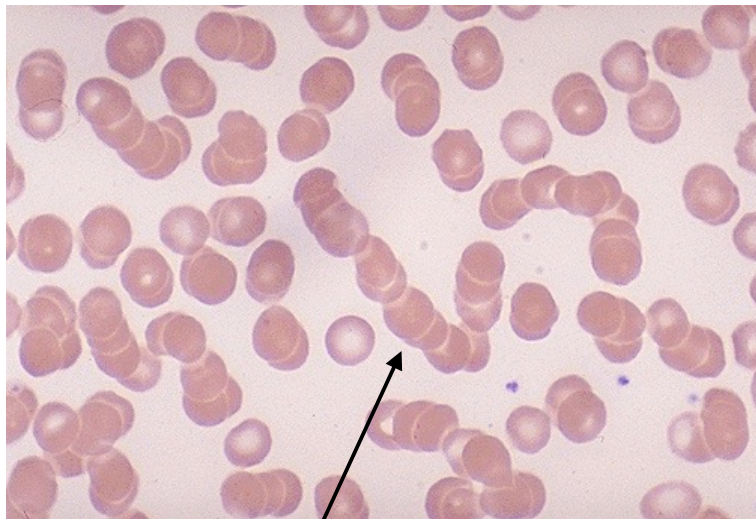
7-11 μm átmérőjű korong alakú sejt



A vér viszkozitása

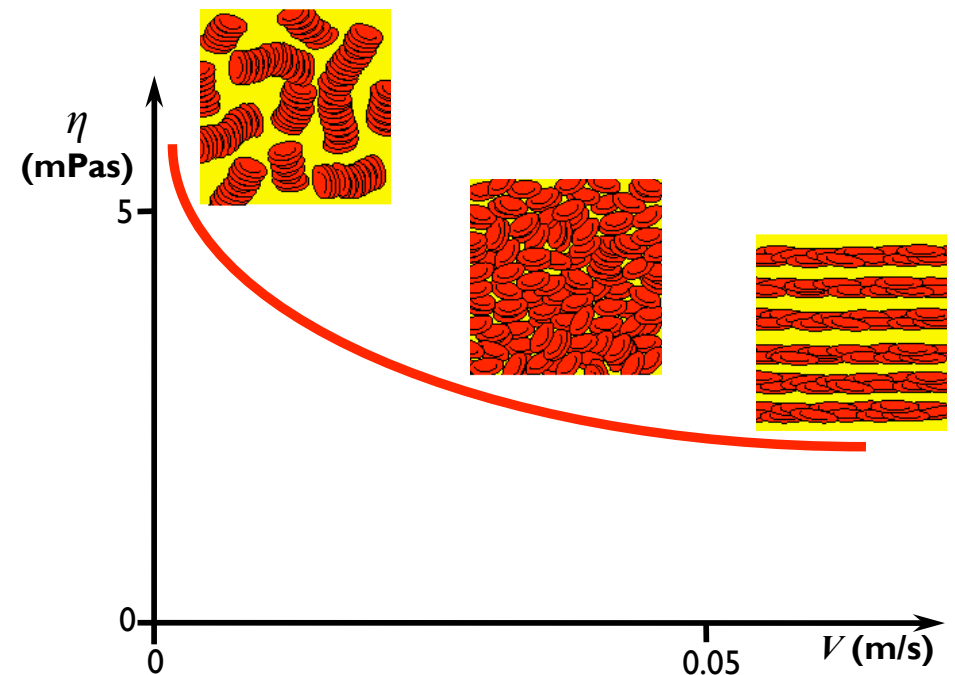
4. Vörösvértestek aggregációs készsége

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



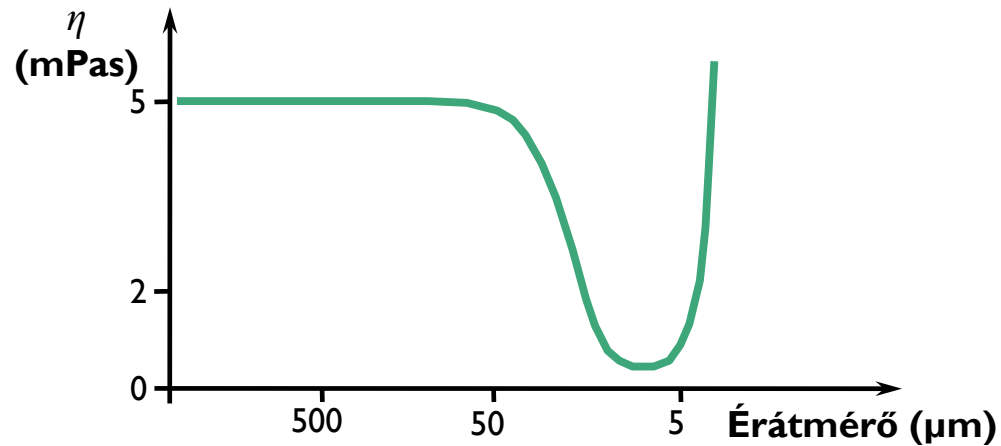
Pénztekercs

5. Áramlási sebesség, sebességgrádiens



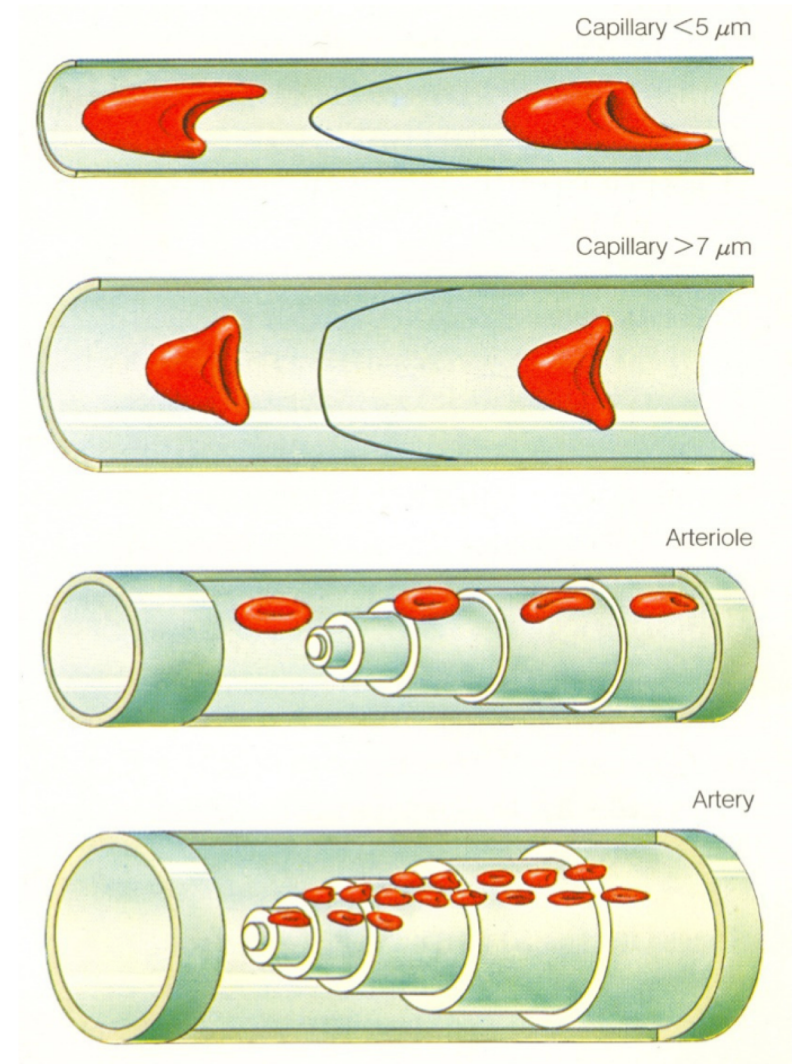
A vér viszkozitása

6. Érátmérő

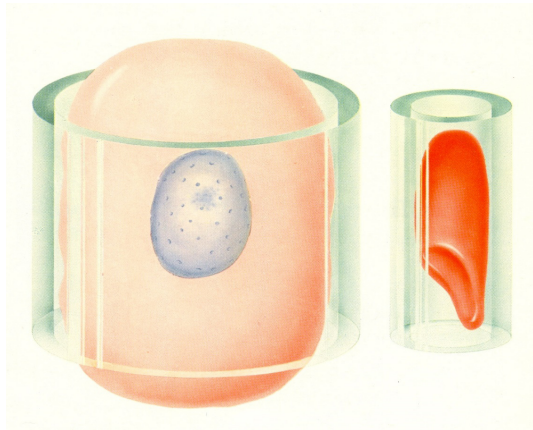


– érátmérő csökkenésével a vér anomális (nem-newtoni) folyadékkénti viselkedése dominál

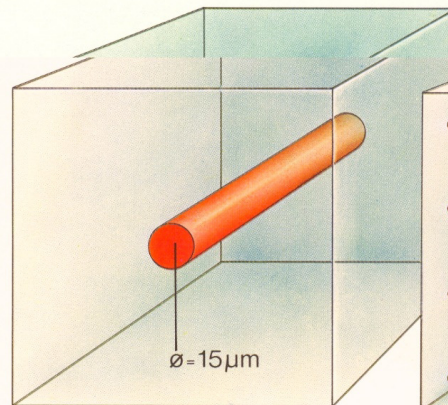
– **axiális migráció:** a vörösvértestek az ér tengelyébe, mintegy sejtoszlopba állnak be – az érfal közelében nő, a tengely közelében csökken a sebességgrádiens – csökken a látszólagos viszkozitás (Fåhræus-Lindquist effektus)



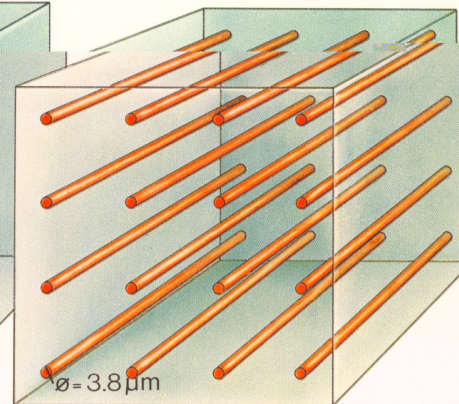
A vér viszkozitása



Schematic diagram of capillary formation in cold-blooded animals



Schematic diagram of capillary formation in mammals



Az emlősök ugyanakkora vértérfogatból ~16-szor több kapillárist képesek perfundálni, mint a béka, a diffúziós távolságok lerövidítése alapvetően lehetővé tette a nagy metabolikus aktivitású szövetek (agy) felépítését!

Kapcsolódó fejezetek:

Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika

III./1.

1.1

1.2

1.3

1.4

1.5

Gyakorlati jegyzet: Áramlás