SEMMELWEIS EGYETEM

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet,
Nanokémiai Kutatócsoport

Lágy Anyagok Laboratóriuma

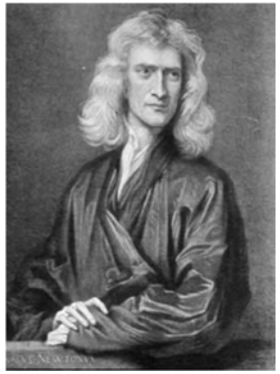
TRANSZPORTFOLYAMATOK II
biológiai rendszerekben

Zrínyi Miklós
egyetemi tanár, az MTA rendes tagja
mikloszrinyi@gmail.com

2015

A különböző anyagi rendszerek folyásával foglalkozó tudományt 1928-ban Bingham javaslatára nevezték el reológiának.

(Rheos logos = folyástan)



Sir Isac Newton (1642-1727)

Ha egy testre **erő** hat → **hely**változás / **alak**változás

DEFORMÁCIÓ

rugalmaS

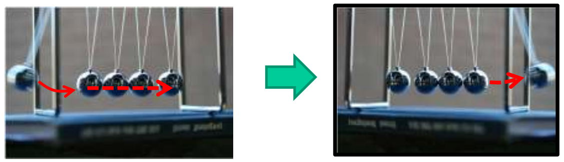
viszkózus

Fluidumok áramlása

Fluid fázis: a folyadék és a gáz halmazállapot összefoglaló neve, amely arra utal, hogy az anyagok mindkét állapotban viszonylag könnyen változtatják alakjukat, könnyen folynak.

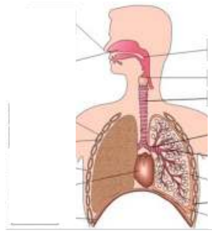
REOLÓGIA

(*konduktív impulzustranszport*)

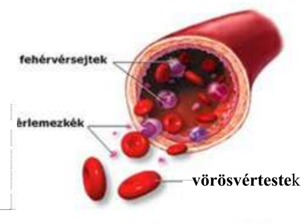


(Rheos logos = áramlástan)

Légzés



Vérkeringés



A térfogatáram hajtóereje: a nyomáskülönbség

$$1\ Hgmm = 133{,}32\ Pa$$

$$1\ atm = 735{,}55\ Hgmm$$

	P/Hgmm
arteriális (szisztolés)	100 -140
arteriális (diasztolés)	60 - 90
kapilláris az artéria végénél	30

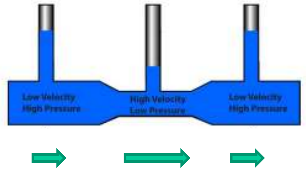
Alapfogalmak

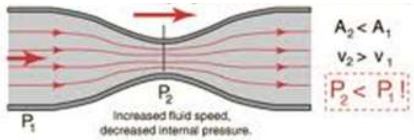
Folyás
- **lamináris**,
- turbulens,
- összenyomható,
- **összenyomhatatlan**,
- „száraz”,
- **viszkózus,**
- **állandó,**
- pulzáló,
- rotáló.

Daniell Bernoulli
1700-1782

Bernoulli egyenlet

$$p + \frac{1}{2}\rho v_x^2 + \rho g h = konst.$$





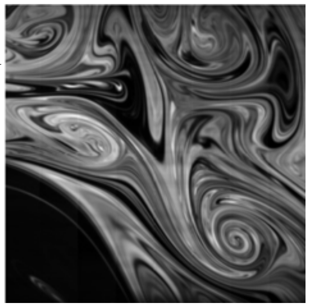
$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = konst.$$

Az áramlás típusai

turbulens

átmenet

lamináris



$$R_e = \left.\frac{tehetetlenségi}{viszkózus}\right\}\ \text{erők}$$

$$\boxed{R_e = \frac{v \cdot \rho \cdot d}{\eta}}$$

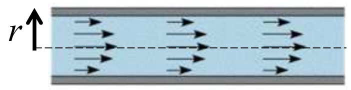
v: *átlagos áramlási sebesség*

ρ: *folyadék sűrűsége*

η: *viszkozitás*

d: *átmérő*

Osborne Reynolds
1842-1912

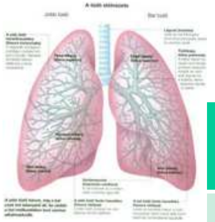


ha $R_e < 2100$

Lamináris áramlás

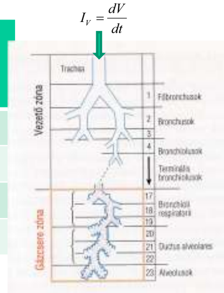
***Megjegyzés**: ha átmérő helyett sugarat használunk, akkor Re=1150*

Levegő áramlása a tüdőben



23 generáció a légcsövek átmérőjében

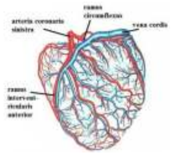
	Normál légzés 12/perc		Heves légzés 30/perc	
átmérő (cm)	v (cm/s)	Re	v (cm/s)	Re
1,8	197	2325	790	**9324**
0,56	250	921	1002	**3684**
0,35	161	369	643	1476
0,13	38	32	151	127



$$\frac{dV_{lev.}}{dt} = \sim 6 \;\; L/\min \quad \Rightarrow \quad O_2 \; \sim 2kg/nap$$

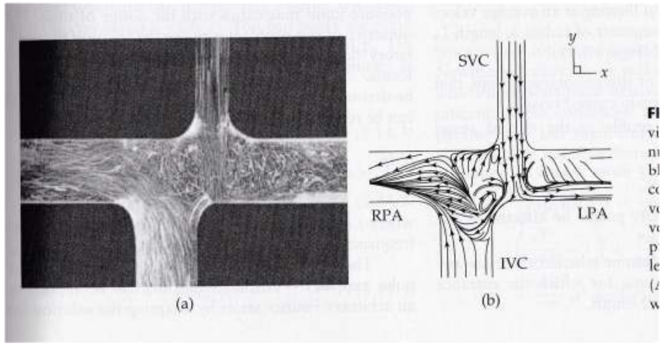
Csak heves légzésnél lép fel turbulencia a vastagabb légcsövekben.

Vér áramlása a szív- és érrendszerben



erek	átmérő cm	Max seb. cm/s	Re Max.	Átl. seb. cm/s	Re átlag
↑ aorta	1,5	120	**4500**	20	750
↓ aorta	1,3	105	**3400**	20	648
femorális artéria	0,4	100	1000	10	100
kapilláris	0,0006	7	0,001	0,02	10^{-6}

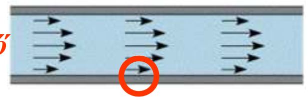
A keringési rendszer (cardiovascularis) többségében **az áramlás lamináris.** Kivétel a szívből az aortába kilökődő vér áramlása.



Elágazásoknál és szűkületeknél könnyen kialakulhat turbulencia!

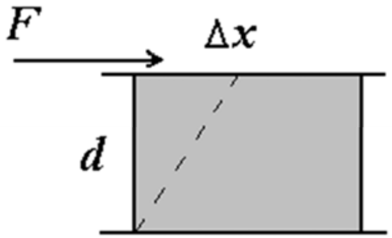
Alapfogalmak:

Nyomó erő

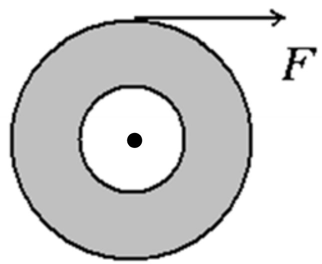


Nyíró erő

Nyírás: tangenciálisan ható (***nyíró***)erő (F) vált ki deformációt.



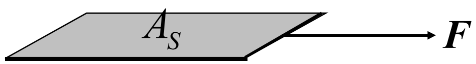
Tiszta nyírás



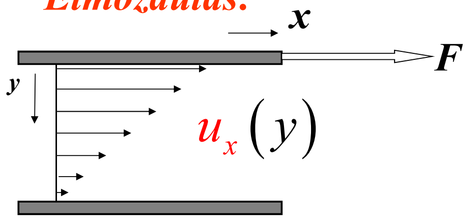
Rotációs nyírás

Alapfogalmak:

Nyírófeszültség: $\tau = \dfrac{F}{A_S}$

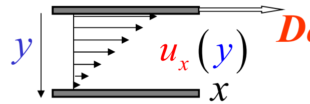


Elmozdulás:



Deformáció: $\gamma = \dfrac{du_x(y)}{dy}$

Alapfogalmak:



Deformáció: $\gamma = \dfrac{du_x}{dy}$

Deformáció sebesség: $\dfrac{d\gamma}{dt}$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{du_x}{dy}\right) = \frac{d}{dy}\left(\frac{du_x}{dt}\right) = \frac{dv_x}{dy}$$

*A **deformáció sebesség** megegyezik a **sebesség gradienssel**!*

Konduktív transzportfolyamatok egységes leírása

	diffúzió	hővezetés	reológia
ÁRAM:	komponens áram (*tömeg áram*)	energia áram	impulzus áram
HAJTÓERŐ:	∇c	∇T	∇v
ÁRAMSŰRŰSÉG:	$j_n = -D\nabla c$	$j_Q = -k\nabla T$	$j_i = -\eta\nabla v$
VÁLTOZÁS:	$\dfrac{\partial c}{\partial t} = D\nabla^2 c$	$\dfrac{\partial T}{\partial t} = \alpha\nabla^2 T$	
	Fick	**Fourier**	**Newton**

Laplace operátor: $\nabla^2 = \dfrac{\partial^2}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial z^2}$

Alapfogalmak:

$$j_i = -\eta \nabla v \xrightarrow{j_i = -\tau} \tau = \eta \nabla v$$

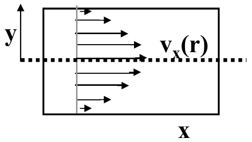
Kapcsolat a nyírófeszültség és a sebesség gradiens között:

$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy}$$

Newton egyenlet

viszkozitás

A reológia alapösszefüggése. Newton egyenlet



$$j_i = -\eta \frac{dv_x}{dy} \Rightarrow \boxed{\tau = \eta \frac{dv_x}{dy}}$$

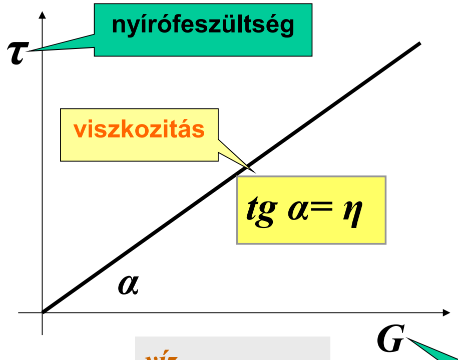
Kapcsolat a nyírófeszültség és a sebesség gradiens között:

Nyírófeszültség: $\tau = \frac{F}{A_S}$

Sebesség gradiens:

$$G = \frac{dv_x}{dy} = \frac{\Delta v_x}{r}$$

Newtoni folyadék folyásgörbéje



víz,
tej,
cukor oldat,
étolaj

sebesség gradiens
vagy
deformáció sebesség

$$\tau = \eta \cdot G$$

$[Pa]$ $[Pa \cdot s]$ $[s^{-1}]$

Dinamikai viszkozitás (általában ezt értjük viszkozitás alatt *pascal secundum (Pa·s)*

Régebben Jean Louis Marie Poiseuille (1797-1869) tiszteletére használták a

1 poise = 100 centipoise = 0.1 Pa·s.

Az orvosi gyakorlatban ma is gyakran a cP (centi-poise)-t használják

Fluiditás a viszkozitás reciproka (= $1/\eta$).

Kinematikai viszkozitás: a dinamikai viszkozitás és a sűrűség hányadosa (= η/ρ). *($m^2\ s^{-1}$) vagy stoke (St).*

anyag	T/ °C	viszkozitás $/mPa \cdot s$
víz	20	1,0
glicerin	20	1500
n-pentán	20	0,23

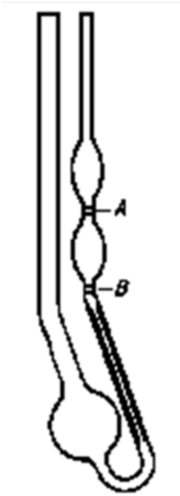
biofolyadék	T/ °C	viszkozitás $/mPa \cdot s$
vér	37	4 (nem Newtoni)
vér plazma	37	1,5
könny	37	0,73 – 0,97
levegő	18	0,018
liquor	20	1,02

Relatív viszkozitás (η_{rel}).

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_o} = \frac{t}{t_o}$$

oldat

oldószer



Specifikus viszkozitás (η_{sp})

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1$$

Ostwald-féle viszkoziméter

Redukált viszkozitás (η_{red})

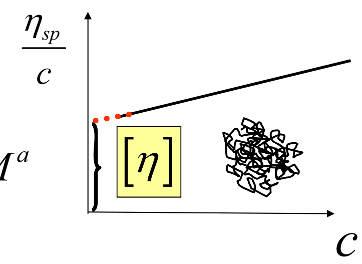
$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c}$$

Ubbelohde féle viszkoziméter

Jellemző viszkozitás ($[\eta]$)

$$[\eta] = \lim_{c \to 0} \eta_{red}$$

$$[\eta] = k \cdot M^a$$



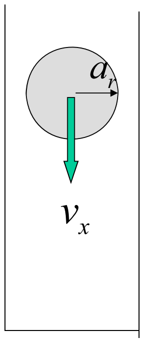
$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy}$$

$$f_S = 4 a_r^2 \pi \cdot \tau \qquad \frac{dv_x}{dy} = \frac{v}{a_r}$$

$$f_S = 4 a_r^2 \pi \cdot \eta \cdot \frac{v}{a_r}$$

$$f_S = 4 \pi \eta a_r v_x$$

George Stokes
1819-1903

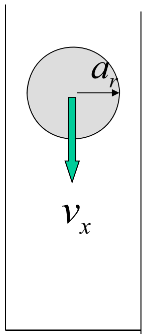


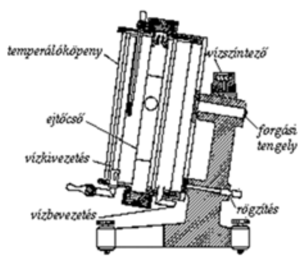
Stokes törvény:

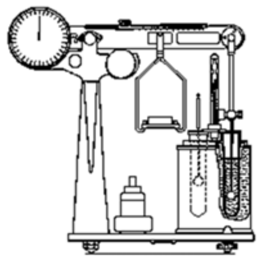
$$f_\eta = 6 \pi \eta a_r v_x$$

$$f_g = f_\eta \Rightarrow v_x = \frac{2}{9} \frac{a_r^2 \Delta \rho g}{\eta}$$

$$f_\eta = 6 \pi \eta a_r v_x$$

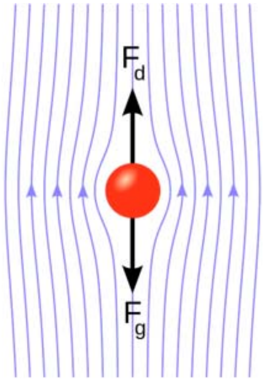


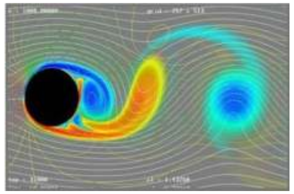




Höppler féle viszkoziméter

Kármán örvénysor





Kármán Tódor
1881-1963

lamináris

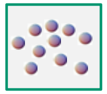
turbulens

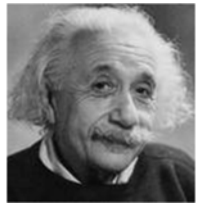
Híg szuszpenziók viszkozitása

Általában *newtoni* viselkedés

Einstein-egyenlet

$$[\eta] = 2.5\Phi$$





Albert Einstein
1879-1955

$$\eta = \eta_o\left(1 + 2.5\Phi\right)$$

Térfogati tört

Einstein-egyenlet általánosítása:

$$[\eta] = \nu_a\Phi$$

$$\eta = \eta_o\left(1 + \nu_a\Phi\right)$$

Aszimmetria faktor

$$\nu_a = \frac{(a/b)^2}{15\left[\ln\left(\frac{2a}{b}\right) - \frac{3}{2}\right]} + \frac{(a/b)^2}{5\left[\ln\left(\frac{2a}{b}\right) - \frac{1}{2}\right]} + \frac{14}{5}$$

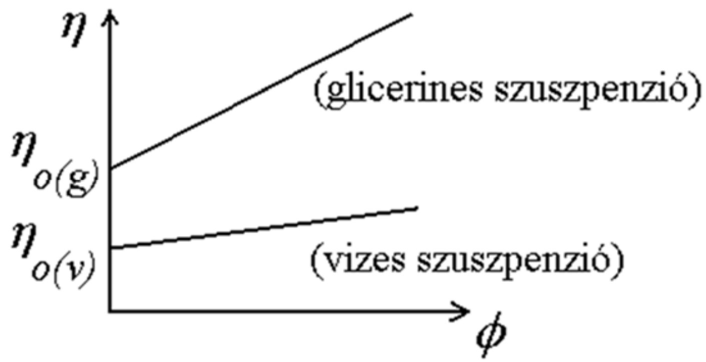
Prolát elipszoid

$$\nu_a = \frac{16(a/b)}{15\tan^{-1}(a/b)}$$

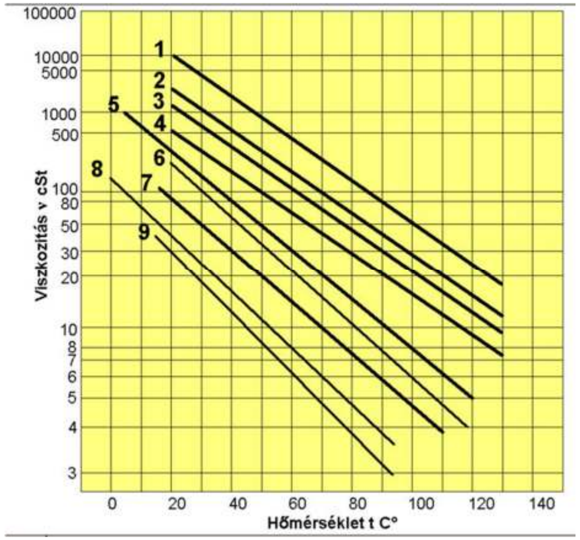
Oblát elipszoid

DNS-re: $a/b = 27{,}8 \quad \nu_a = 65{,}2$

$$\eta = \eta_o\left(1 + 2.5\Phi\right)$$



A viszkozitása függése a hőmérséklettől:



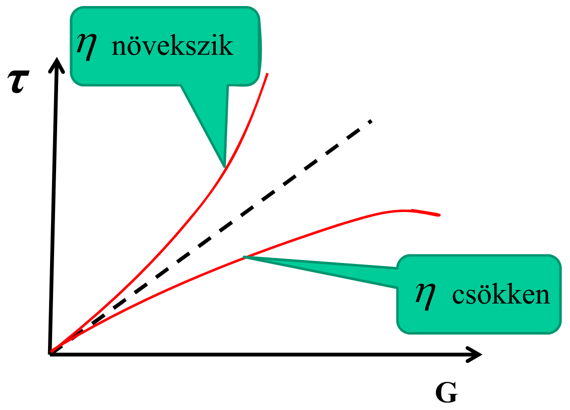
$$\eta(T) = \eta_o \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

Stokes-Einstein törvény:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta a_r}$$

Nem newtoni folyadékok

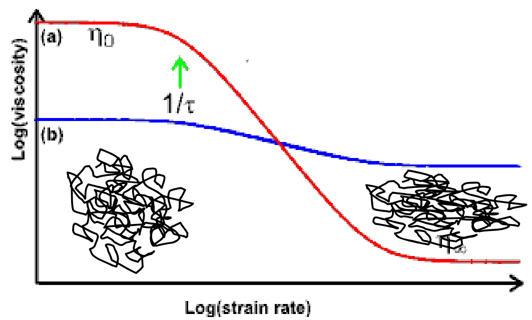
- viszkozitás nagysága az anyagi minőségen kívül a deformációs hatás mértékétől és idejétől is függ.



•szerkezeti viszkozitás

.

Viszkozitás csökken nyírás hatására



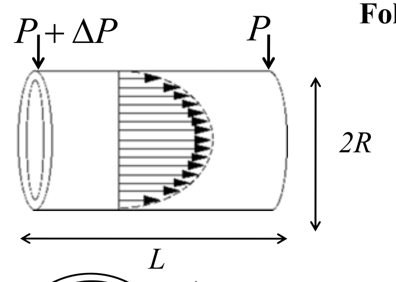
polimer oldat

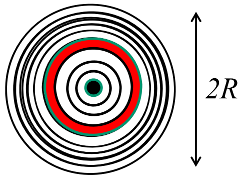
festék

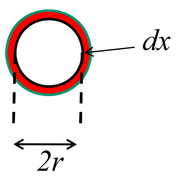
ketchup

Folyadék áramlása kapillárisban

áramlási profil







$$\boxed{\tau = -\eta \cdot \frac{dv_x}{dr}}$$

$$\tau = \frac{r^2\pi \cdot dP}{2r\pi \cdot dx} = \frac{r}{2}\frac{dP}{dx} = \frac{r}{2}\frac{\Delta P}{L}$$

$$dv_x = -\frac{\Delta P}{4L\eta}\cdot 2 \cdot r \cdot dr = -\frac{\Delta P}{4L\eta}\cdot d\left(r^2\right)$$

$$v_x(r=R) = 0$$

$$v_x(r) = -\frac{\Delta P}{4L\eta}\cdot r^2 + konst.$$

$$\boxed{v_x(r) = \frac{\Delta P}{4L\eta}\cdot\left(R^2 - r^2\right) = \frac{\Delta P R^2}{4L\eta}\cdot\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right)}$$

Folyadék áramlása kapillárisban

térfogatáram

$$v_x(r) = \frac{\Delta P R^2}{4L\eta}\cdot\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right)$$

$$\boxed{v_{max} = \frac{R^2}{4\eta}\cdot\frac{\Delta P}{L}} \qquad v_x(r) = v_{max}\cdot\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right)$$

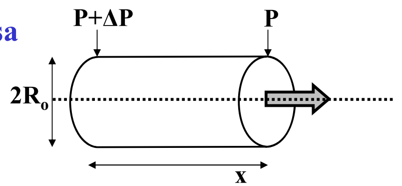
$$I_V = 2\pi\cdot\int_0^R r\cdot v_x(r)\cdot dr \qquad I_V = 2\pi\cdot\int_0^{R_0} r\cdot v_{max}\cdot\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right)\cdot dr$$

$$I_V = \frac{\pi\cdot R_o^4}{8\eta}\cdot\frac{\Delta P}{L}$$

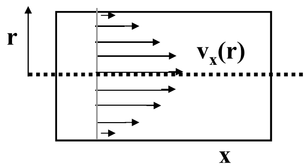
$$\boxed{\overline{v_x} = \frac{I_V}{R_o^2\pi} = \frac{R_0^2}{8\eta}\cdot\frac{\Delta P}{L} = \frac{1}{2}v_{max}}$$

Newtoni folyadék lamináris áramlása

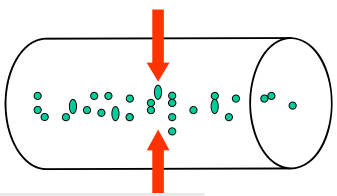
(összefoglalás)



Parabolikus sebesség profil



$$v_z(r) = \frac{\Delta P R_0^2}{4L\eta}\cdot\left(1-\frac{r^2}{R_0^2}\right)$$

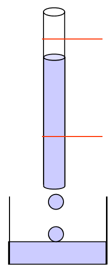


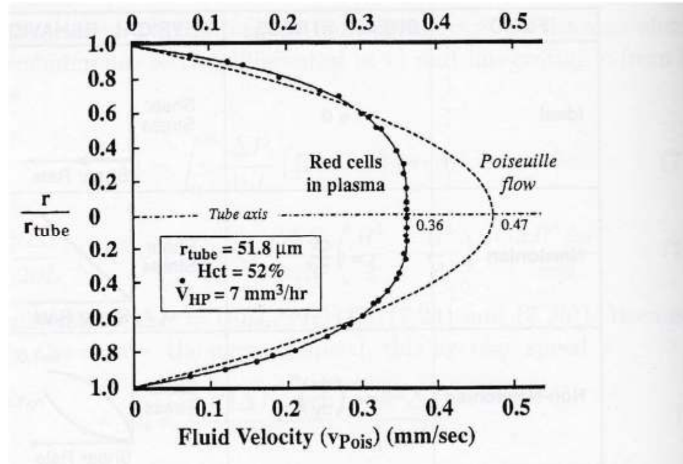
$$p + \frac{1}{2}\rho v_x^2 + \rho g h = const$$ Bernoulli törvény

Hagen-Poiseuille törvény

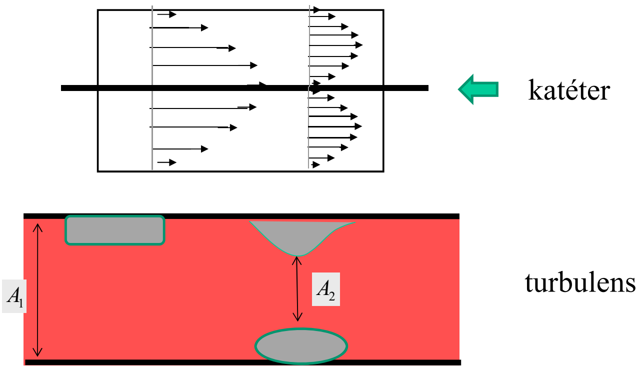
$$I_V = \frac{\pi\cdot R_o^4}{8\eta}\cdot\frac{\Delta P}{L}$$

Térfogatáram





Parabolikus sebesség profil módosulása



Vér áramlása elágazó erekben

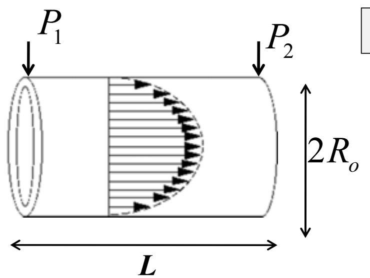
$$I_V = \frac{\pi \cdot R_o^{\,4}}{8\eta L} \cdot \Delta P = \frac{1}{R_{res}} \cdot \Delta P$$

$$R_{res}\left(soros\right) = \sum_i R_{res,i}$$

$$R_{res}\left(párhuzamos\right) = \sum_i \frac{1}{R_{res,i}}$$

érszakasz	átmérő cm	hossz cm	elágazások száma	áramlási seb. cm/s
aorta	2,4	40	1	23
artériák	0,4	15	160	5
kapillárisok	0,0007	0,07	$1,2 \cdot 10^{10}$	0,022
vénák	0,5	15	200	2,5

Gázok áramlása kapillárisban



$$\tau = -\eta \cdot \frac{dv_x}{dr}$$

$$\tau = \frac{r^2\pi \cdot dP}{2r\pi \cdot dx} = \frac{r}{2} \cdot \frac{dP}{dx} \neq \frac{r}{2} \frac{\Delta P}{L}$$

$$I_V = \frac{dV}{dt} = \frac{RT}{P}\frac{dn}{dt} = \frac{RT}{P} I_n$$

$$I_n = \frac{R_o^4 \pi}{8\eta} \frac{P}{RT} \frac{dp}{dx}$$

$$I_n dx = \frac{R_o^4 \pi}{16\eta RT} d\left(p^2\right)$$

$$I_n = \frac{R_o^4 \pi}{16 L \eta RT}\left(P_1^2 - P_2^2\right)$$

A gáz áramlási sebessége nem a nyomások, hanem a nyomásnégyzetek különbségével arányos!

Nature Uses Microfluidics!