

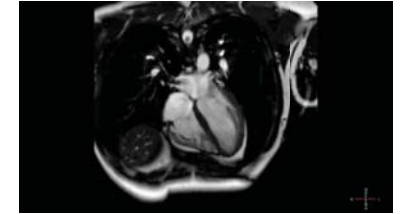
FOLYADÉKÁRAMLÁS VÉRKERINGÉS

KELLERMAYER MIKLÓS

Folyadékok fizikájának jelentősége

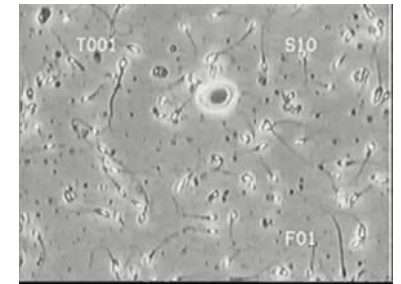
I. Hemodinamika

Pl.: Milyenek a véráramlási viszonyok az érrendszerben?



II. Viszkózus folyadékban történő mozgások

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

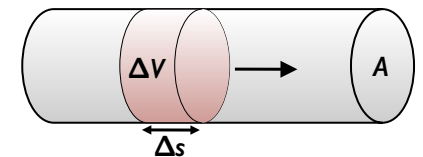


A folyadékáramlás és vérkeringés biofizikája

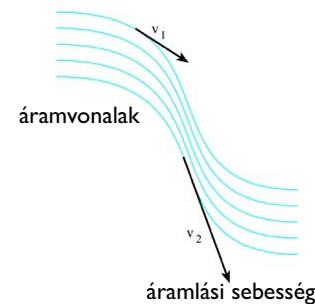
- Alapfogalmak
- Folyadékok fajtái
- Áramlások fajtái
- Törvények, összefüggések
- Vér mint folyadék; a vérvizkozitás meghatározói
- Az érrendszer; erek mint rugalmas falú csövek
- A vérkeringés segéderői

Alapfogalmak I.

Térfogati áramerősség (Q):

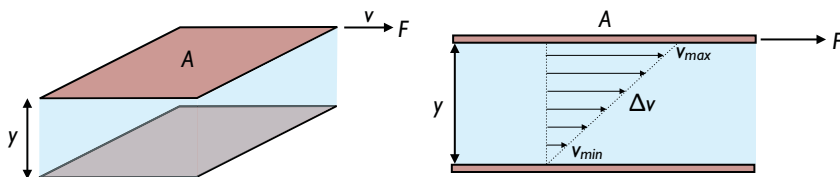


$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = A \frac{\Delta s}{\Delta t} = A \bar{v}$$



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

Alapfogalmak II. Viszkozitás (belső súrlódás)



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

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

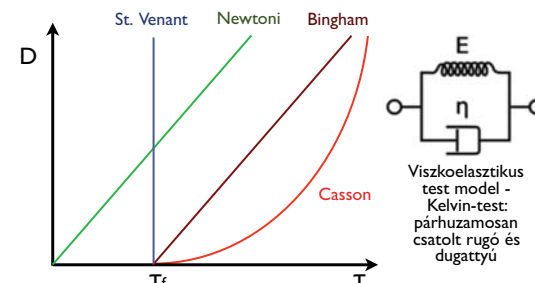
Folyadékok fajtái

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

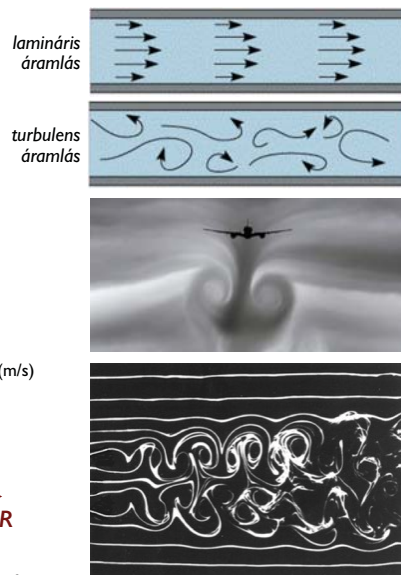
Sebességgrádiens és nyírófeszültség összefüggése
reális folyadékokban



- τ_f = folyási határ (küszöbfeszültség)
- Viszkoelasztikus anyagok: elasztikus test + viszkózus folyadék (pl. polimer-, makromolekuloldatok)
- Stressz-relaxáció: feszültség lecsengése idő függvényében hirtelen megnyújtott viszkoelasztikus testben.
- A vér nem-newtoni folyadék, viszkoelasztikus tulajdonságokkal rendelkezik!

Áramlások fajtái

- Stacionárius**
Csőkeresztmetszeten időegység alatt átáramló folyadékmennyiség konstans (az áramlás jellemző mennyiségek nem változnak)
- Lamináris**
Folyadékrétegek nem keverednek
- Turbulens**
Folyadékrétegek keverednek



Osborne Reynolds
(1842-1912)

Reynolds-szám (R):

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

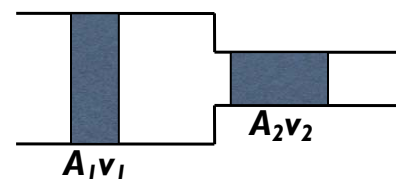
v = folyadékáramlási sebesség (m/s)
 r = cső sugara (m)
 ρ = folyadék sűrűsége (kg/m³)
 η = viszkozitás (Ns/m²)



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

Törvényszerűségek ideális folyadékokban I.

Kontinuitási egyenlet



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

A = keresztmetszet
 v = áramlási sebesség

Törvényszerűségek ideális folyadékokban II.

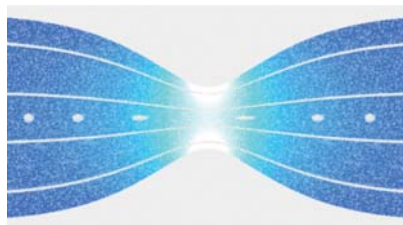
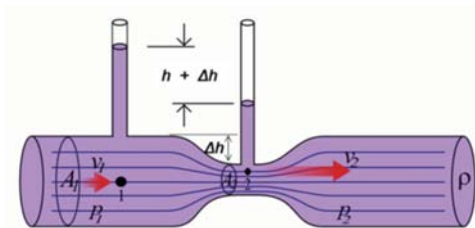
Bernoulli törvény - energiamegmaradás törvénye



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



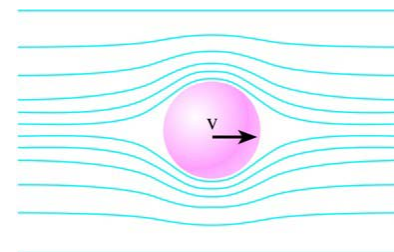
Venturi effektus

Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban I.

Stokes törvény



Georg Gabriel Stokes
(1819-1903)



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

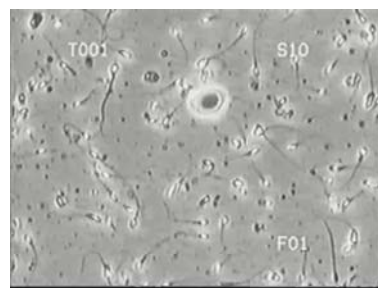
F = erő
 γ = közegellenállási (súrlódási) együttható, alaki faktor
 v = folyadékáramlási sebesség
 r = gömb sugara
 η = viszkozitás

Stokes erő

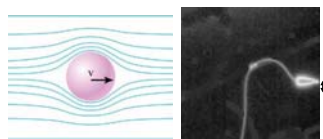
Hidrodinamikai húzóerő (Stokes erő): $F = \gamma = 6r\pi\eta v$



Hat folyadékban álló részecskékre
(lézercsipeszben megragadott mikrogyöngy)



Hat álló folyadékban mozgó részecskékre
(mozgó spermaticiták)



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

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen
spermaticitának mozgása során?

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

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

Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban II.

Hagen-Poiseuille törvény

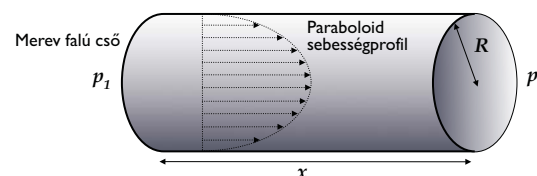


G.H.L. Hagen
(1797-1884)



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 |



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

$$A = R^2 \pi$$

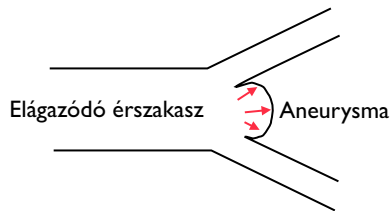
$$\frac{V}{t} = \frac{R^4 \pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

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

$V/t = Q$ = térfogati áramerősség
 $\Delta p/\Delta x$ = nyomásgradiens, fenntartója p_1-p_2
 A = csőkeresztmetszet
 J_v = térfogati áramerősség

A folyadékáramlástan 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:

- érűkület (pl. diabetes, Bürger-kór)
- vérviszkózitás-változás (pl. láz, anaemia)
- 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 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 vérviszkózitás meghatározói

1. 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

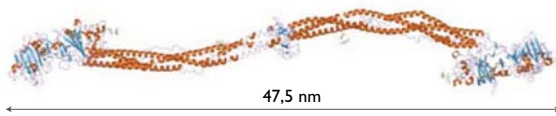
A vérviszkózitás meghatározói

2. Plazmaviszkózitás

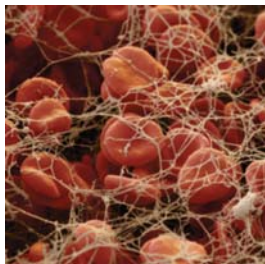
- Elsősorban a plazmafehérjéktől függ.
- *Paraproteinaemiákban* (myeloma multiplex v. plasmocytoma) az immunglobulinok mennyisége kórosan fokozódott, mely viszkozitásnövekedéshez vezet.

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

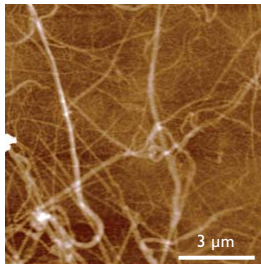
Fibrinogén, fibrin



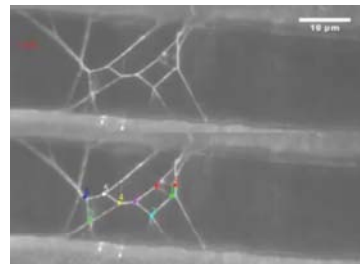
Fibrinogén:
 MW = 340.000 Da
 Plazmában 2-4 g/l \approx 10 μ M
 Átlagos távolság a fibrinogén-
 molekulák között: 55 nm!



Vörösvértestek
fibrinhálóban



In vitro polimerizált fibrin
(AFM)

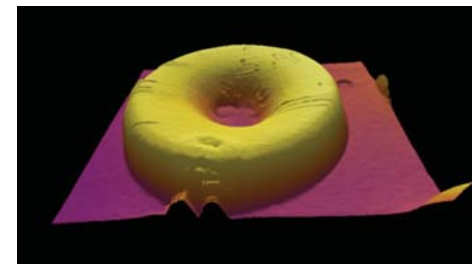


Fluoreszcensen jelölt fibrinszálak
rugalmassága, nyúlékonysága

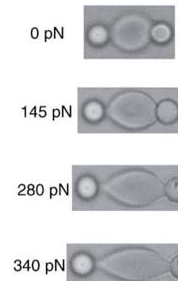
A vérviszkozitás meghatározói

3. Vörösvértestek deformálhatósága

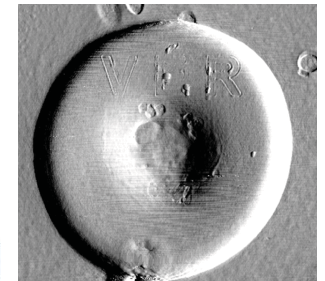
- Vvt-méretű szilárd részecskék 65%-os szuszpenziója téglakemény.
- 95%-os vvt-szuszpenzió viszkozitása csupán 20 mPas!
- Deformáció: csepp, ejtőernyő, nyílhegy alakú sejtek.



7-11 μ m átmérőjű korong alakú sejt



VVT deformálás
lézercsipesszel



Fixált, benyomatot
tartó VVT (AFM)

A vérviszkozitás meghatározói

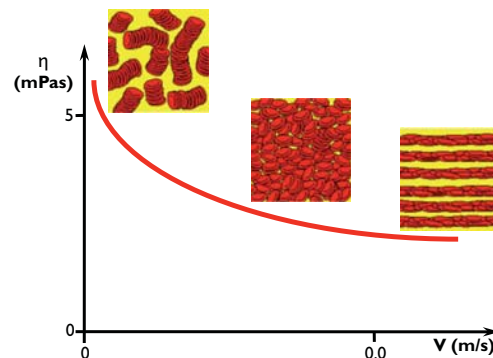
4. Vörösvértestek aggregációs készsége

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



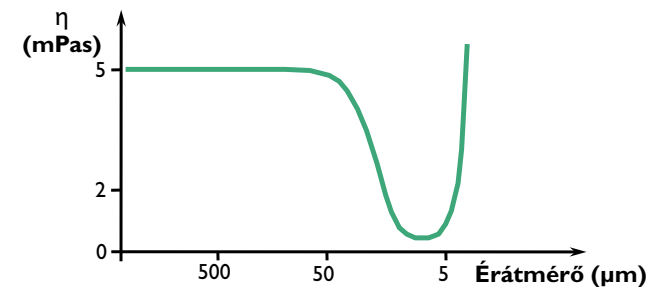
Pénztekercs

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: tengely közelében csökken, az érfal közelében nő a sebességgrádiens (csökken a látszólagos viszkozitás, Fåhræus-Lindquist effektus).

Az érrendszer: zárt, önmagába visszatérő csőrendszer

A. Feladata:

Sejtek környezeti állandóságának biztosítása ("steady state")

Transzport:

Gázok

Metabolitok

Hormonok, jelátvivő anyagok

Immunglobulinok

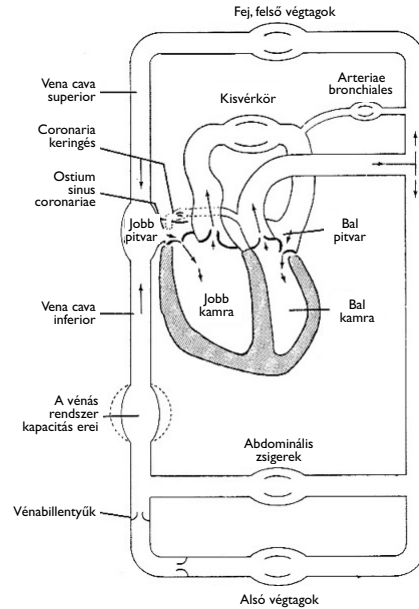
Hő

B. Áramlástan igények:

Lassú (diffúzióvezérelt folyamatok "kiszolgálása")

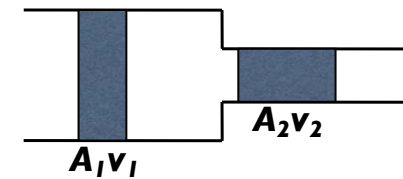
Egyenletes (nincs fluktuáció)

Egyirányú



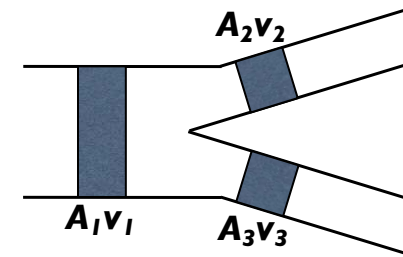
Folyadékáramlás elágazódó csőrendszerben

Kontinuitási egyenlet



$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = konst$$

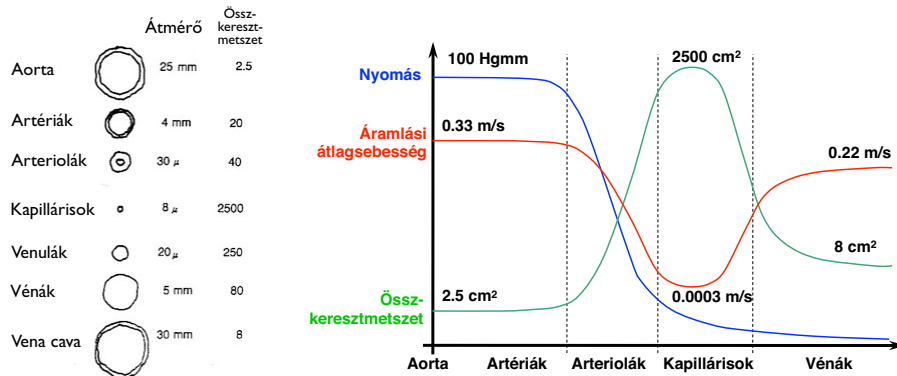
A = keresztmetszet
v = áramlási sebesség



$$A_1 v_1 = A_2 (v)_{\text{átlag}} = konst$$

A_2 = összkétszmetzet

Az érrendszer felépítése és fizikai paramétere



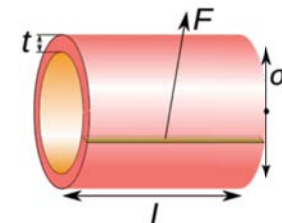
- Nyomás:** érfalra nehezedő nyomás, "vényomás". A véráramlást a nyomásesés tartja fenn.
- Nyomáscsökkenés oka:** energia zöme hővé alakul.
- Sebesség és összkétszmetzet** fordított arányban változik, a kontinuitási egyenlet alapján ($Av = \text{állandó}$).
- Sebesség** általában nem haladja meg a kritikus sebességet (l. Reynolds szám), és az áramlás lamináris marad. (Kivételek: aortabillentyű mögötti szakasz, érszűkületek, viszkozitáscsökkenéssel járó állapotok, Korotkov hang).
- Arteriálák:** (vegetatív beidegzés alatt álló, simaizommal ellátott erek) vényomást szabályozzák, "rezisztencia erek".
- Vértérőfat** jelentős része a vénás rendszerben: "kapacitás erek".

Az erek rugalmas falú csövek

Az érfal-feszülés (σ_θ) függ a vényomástól:
Young-Laplace - egyenlet

$$\sigma_\theta = \frac{P \cdot r}{t}$$

P = vényomás
r = sugár
t = falvastagság

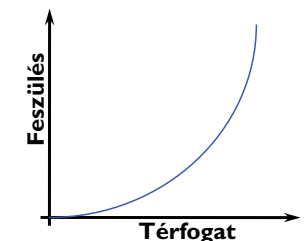


$$\sigma_\theta = \frac{F}{t \cdot l}$$

F = erő
l = csőhossz

Az érfal-feszülés vagy kerületi feszülés a kör keresztmetszetű henger alakú cső kerületén ható átlagos erő.

Az érfal nem-lineáris rugalmas tulajdonsággal rendelkezik



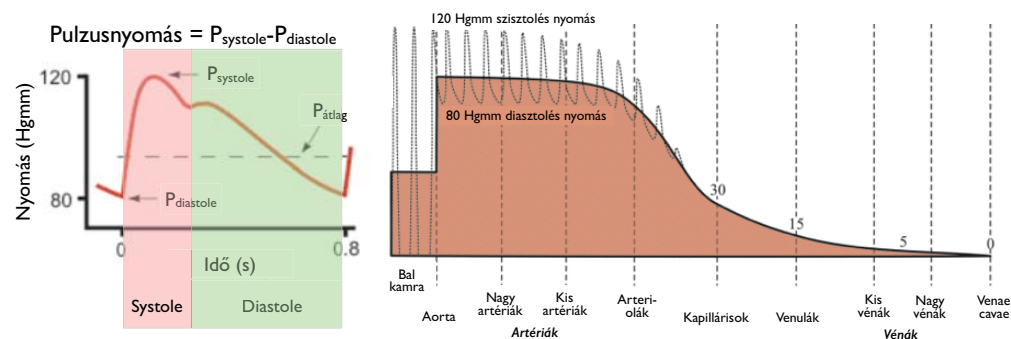
Érfali rugalmasság meghatározói:

Elastikus rostok
Kollagén
Simaizom

Érfali rugalmasság hatása:

Elastikus energia tárolás
Pulzáló nyomás elsimul
Állandó áramlási sebesség

Dinamikus nyomásváltozások az artériás rendszerben

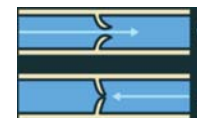


Az érfali rugalmasság miatt a hirtelen nyomás-ingadozások elsimulnak.

A vérkeringés segéderői

Áramlás folytonosságát fenntartó tényezők

1. Artériafalak **rugalmassága**
rugalmas rostok → potenciális, elasztikus energiátárolás
2. **Vénabillentyűk (Harvey-féle kísérlet).**
"On the Circulation of the Blood" (1628)



3. **Izommunka**
4. **Negatív mellúri nyomás**
5. **Atrioventricularis sík fel-le mozgása**
kamrasystolével szinkron átmeneti "negatív" nyomás a jobb pitvarban

Harvey-féle kísérlet (1628)

