

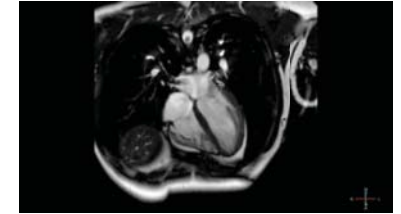
# FOLYADÉKÁRAMLÁS VÉRKERINGÉS

KELLERMAYER MIKLÓS

## Folyadékok fizikájának jelentősége

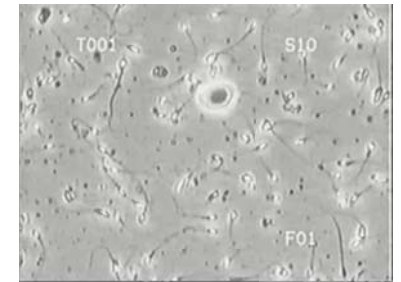
### I. Hemodinamika

PI.: Milyenek a véráramlási viszonyok az érrendszerben?



### II. Viszkózus folyadékban történő mozgások

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

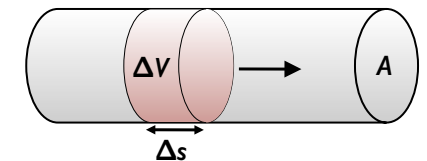


## A folyadékáramlás és vérkeringés biofizikája

- 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.

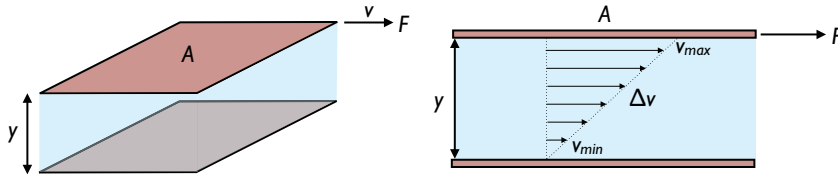
Térfogati áramerősség ( $Q$ ):



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

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

# Alapfogalmak II. Viszkozitás (belső súrlódás)



- F = nyíróerő
- A = folyadéklemez területe
- $\eta$  = viszkozitás
- v = áramlási sebesség
- y = folyadéklemezek közötti távolság
- F/A = nyírófeszültség ( $\tau$ )
- $\Delta v/\Delta y$  = sebesség grádiens (D)

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

$$\eta = \frac{\tau}{D}$$

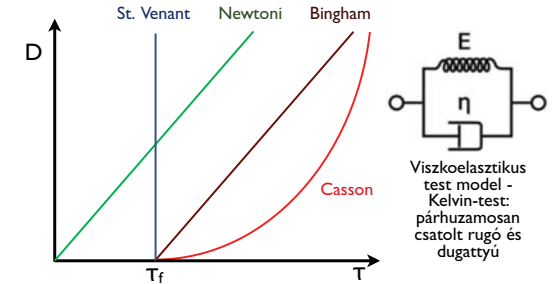
A viszkozitás mértékegységei:  $1 \text{ Pas} = 1 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} = 10 \text{ P (poise)}$

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

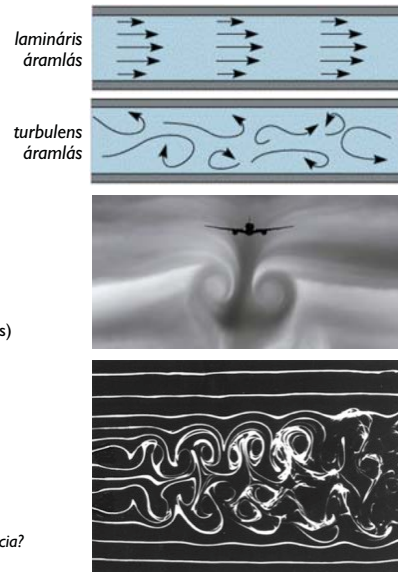
Sebességgrádiens és nyírófeszültség összefüggése **reális** folyadékokban



- $\tau_f$  = folyási határ (küszöbfeszültség)
- Viszkoelasztikus anyagok: elasztikus test + viszkózus folyadék (pl. polimer-, makromolekuláldatok)
- 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
2. **Lamináris**  
Folyadékrétegek nem keverednek
3. **Turbulens**  
Folyadékrétegek keverednek



**Reynoldsszám:**  $R = \frac{vr\rho}{\eta}$

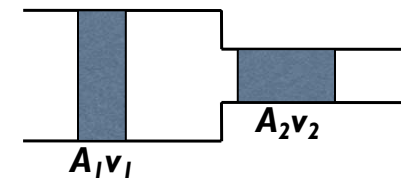
- v = folyadékáramlási sebesség (m/s)
- r = cső sugara (m)
- $\rho$  = folyadék sűrűsége (kg/m<sup>3</sup>)
- $\eta$  = viszkozitás (Ns/m<sup>2</sup>)



"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.

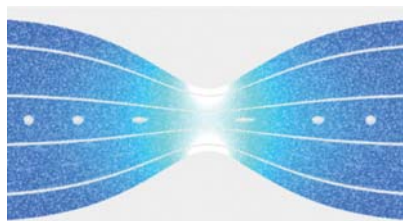
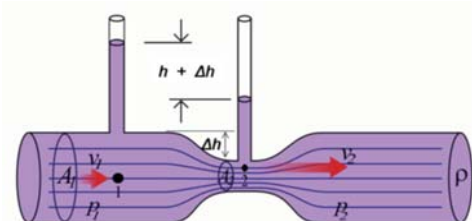
Bernoulli törvény - energiamegmaradás törvénye

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

$p$  = sztatikus nyomás

$\frac{1}{2} \rho v^2$  = dinamikus nyomás

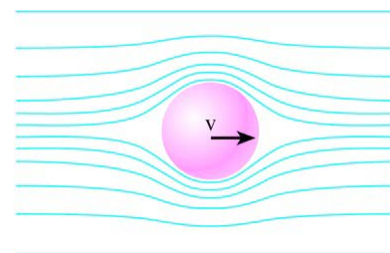
$\rho gh$  = hidrosztatikai nyomás



Venturi effektus

# Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban I.

Stokes törvény



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

$F$  = erő

$\gamma$  = közegellenállási (súrlódási) együttható, alakifaktor

$v$  = folyadékáramlási sebesség

$r$  = gömb sugara

$\eta$  = viszkozitás

# Stokes erő

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



Hat folyadékban álló részecskékre (lézercsipeszben megragadott mikrogöngy)

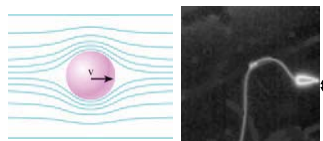


Hat álló folyadékban mozgó részecskékre (mozgó spermaticiták)

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen spermaticitának mozgása során?

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

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

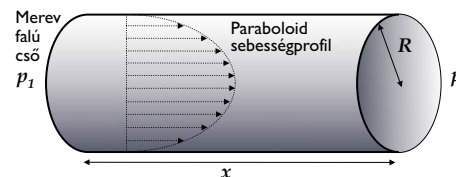


$r = 1.6 \mu\text{m} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ m}$   
 $v = 50 \mu\text{m/s} = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$   
 $\eta = 10^{-3} \text{ Pas}$

# Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban II.

Hagen-Poiseuille törvény

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



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

$$A = R^2 \pi$$

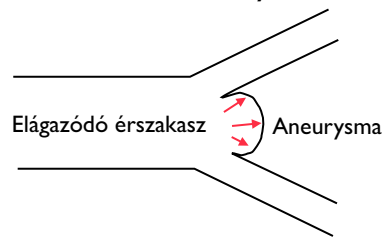
$$\frac{V}{t} = \frac{R^4 \pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

$V$  = térfogat  
 $t$  = idő  
 $R$  = sugár  
 $\eta$  = 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 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)
- érátmérő felére csökkenése a térfogati áramerősséget 1/16-ára csökkenti!

# A vér mint folyadék

|   |                              |                             |
|---|------------------------------|-----------------------------|
| <b>Testtömeg 55-60%-a víz</b><br>42 kg (70 kg testsúly) |                              |                             |
| 2/3 intracelluláris<br>28 kg                            | 1/3 extracelluláris<br>14 kg |                             |
|   | 1/3 vérplazma<br>4-5 kg      | 2/3 interstícium<br>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

**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):

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

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

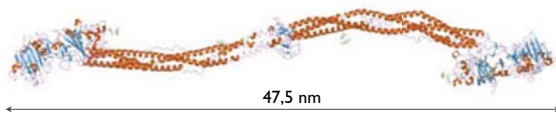
# A vérviszkozitás meghatározói

**2. Plazmaviszkozitás**

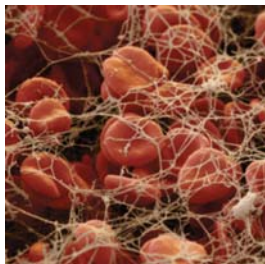
- Elsősorban a plazmafehérjéktől függ.
- *Paraproteinaemiákban* (myeloma multiplex v. plasmocytoma) az immunglobulinok mennyisége kórosan fokozódott, mely viszkozitásnövekedéshez vezet.

| 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                                       |

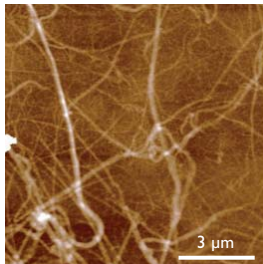
# Fibrinogén, fibrin



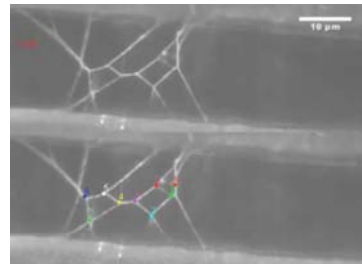
**Fibrinogén:**  
 MW = 340.000 Da  
 Plazmában 2-4 g/l  $\approx$  10  $\mu$ M  
 Átlagos távolság a fibrinogén-  
 molekulák között: 55 nm!



Vörösvértestek  
fibrinhálóban



In vitro polimerizált fibrin  
(AFM)

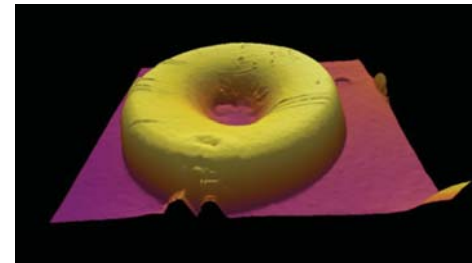


Fluoreszcensen jelölt fibrinszálak  
rugalmassága, nyúlékonysága

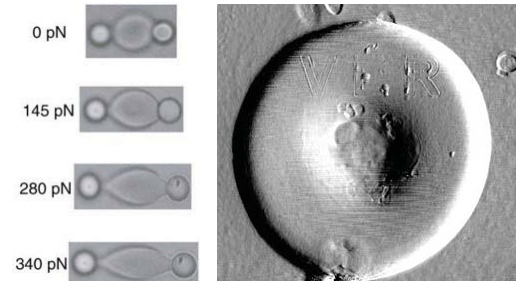
# A vérviszkozitás meghatározói

## 3. Vörösvértestek deformálhatósága

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



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



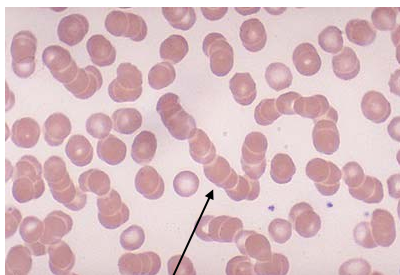
VVT deformálás  
lézercsípessel

Fixált, benyomatot  
tartó VVT (AFM)

# A vérviszkozitás meghatározói

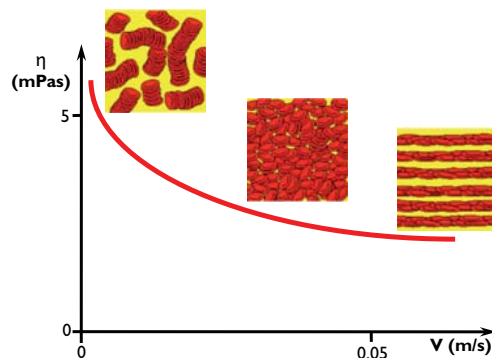
## 4. Vörösvértestek aggregációs készsége

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



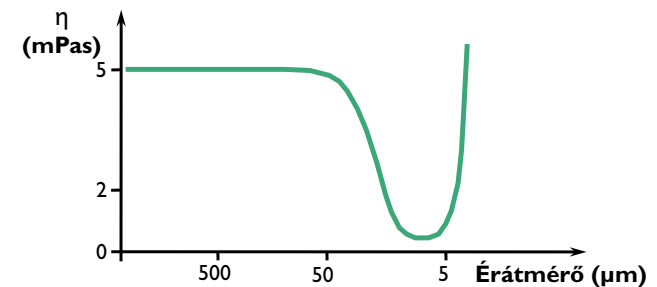
Pénztekercs

## 5. Áramlási sebesség, sebességgrádiens



# A vérviszkozitás meghatározói IV.

## 6. Érátmérő



### N.B.:

- Érátmérő csökkenésével a vér anomális (nem-newtoni) viselkedése kerül előtérbe.
- Axiális migráció: a vvt-k az ér tengelyébe, sejtszlopba 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")

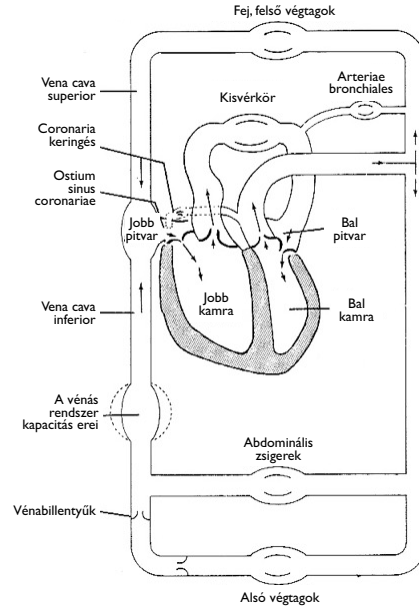
Transzport:

- Gázok
- Metabolitok
- Hormonok, jelátvivő anyagok
- Immunglobulinok
- Hő

## B. Áramlási igények:

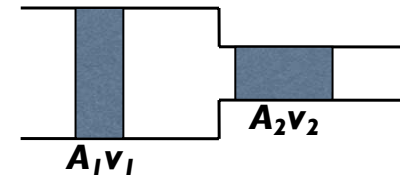
Lassú (diffúzióvezérelt folyamatok "kiszolgálása")

Egyenletes (nincs fluktuáció)  
Egyirányú



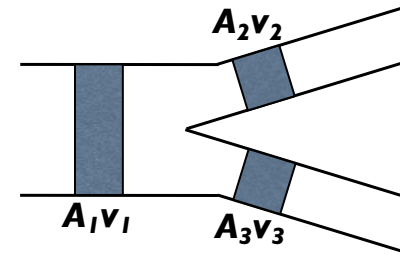
# Folyadékáramlás elágazódó csőrendszerben

## Kontinuitási egyenlet



$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = konst$$

$A$  = keresztmetszet  
 $v$  = áramlási sebesség

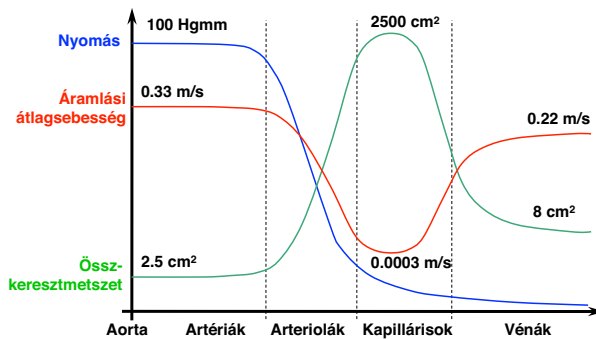


$$A_1 v_1 = A_{\Sigma}(v)_{\text{átlag}} = konst$$

$A_{\Sigma}$  = összkétszmetzet

# Az érrendszer felépítése és fizikai paramétere

|              | Átmérő   | Össz-keresztmetszet |
|--------------|----------|---------------------|
| Aorta        | 25 mm    | 2.5                 |
| Artériák     | 4 mm     | 20                  |
| Arteriólák   | 30 $\mu$ | 40                  |
| Kapillárisok | 8 $\mu$  | 2500                |
| Venulák      | 20 $\mu$ | 250                 |
| Vénák        | 5 mm     | 80                  |
| Vena cava    | 30 mm    | 8                   |



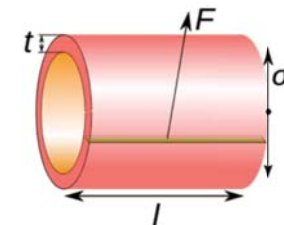
- Nomás:** érfalra nehezedő nyomás, "véryomás". A véráramlást a nyomásesés tartja fenn.
- Nomáscsökkenés oka:** energia zöme hővé alakul.
- Sebesség és összkétszmetzet** fordított arányban változik, a kontinuitási egyenlet alapján ( $Av$ =állandó).
- Sebesség** általában nem haladja meg a kritikus sebességet (l. Reynolds szám), és az áramlás lamináris marad. (Kivételek: aortabillentyű mögötti szakasz, érszűkületek, viszkózitáscsökkenéssel járó állapotok, Korotkov hang).
- Arteriólák:** (vegetatív beidegzés alatt álló, simaizommal ellátott erek) véryomást szabályozzák, "rezisztencia erek".
- Vértérfogat** jelentős része a vénás rendszerben: "kapacitás erek".

# Az erek rugalmas falú csövek

Az érfal-feszülés ( $\sigma_{\theta}$ ) függ a véryomástól:  
Young-Laplace - egyenlet

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

$P$  = véryomás  
 $r$  = sugár  
 $t$  = falvastagság

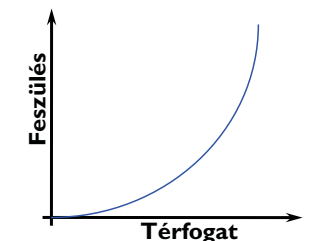


$$\sigma_{\theta} = \frac{F}{t \cdot l}$$

$F$  = 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



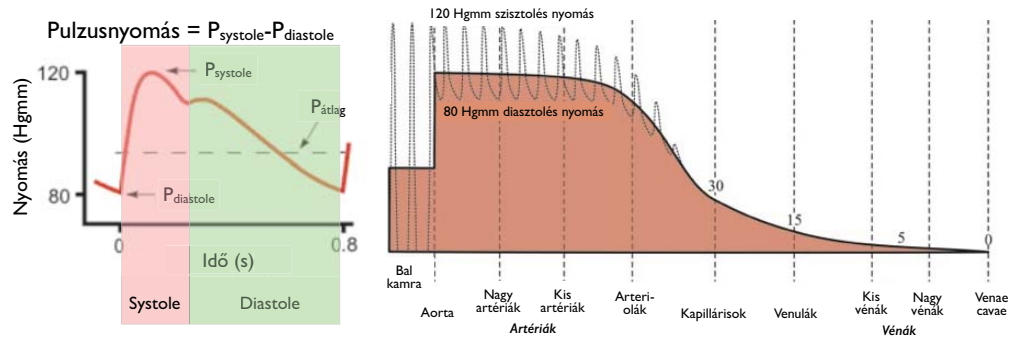
Érfali rugalmasság meghatározói:

- 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 energiatárolás
2. **Vénabillentyűk (Harvey-féle kísérlet).**  
"On the Circulation of the Blood" (1628)



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

Harvey-féle kísérlet (1628)

