

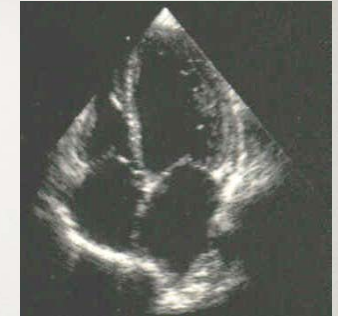
A VÉRKERINGÉS ÉS SZÍVMŰKÖDÉS BIOFIZIKÁJA

KELLERMAYER MIKLÓS

Folyadékok fizikájának jelentősége

I. Hemodinamika

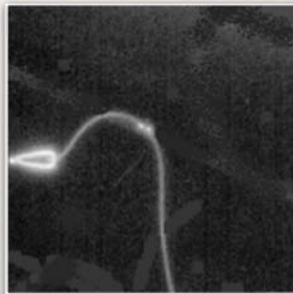
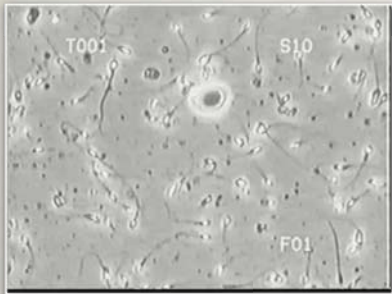
Milyenek a véráramlási
viszonyok az
érrendszerben?



Folyadékok fizikájának jelentősége

II. Folyadékban történő mozgások

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen spermaticitának mozgása során?

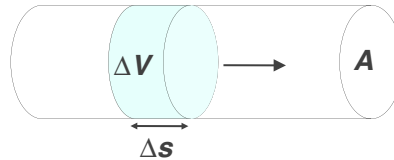


A FOLYADÉKÁRAMLÁS BIOFIZIKÁJA

- Alapfogalmak
- Folyadékok fajtái
- Áramlások fajtái
- Törvények, összefüggések
- Orvosi, biológiai jelentőség

Alapfogalmak I.

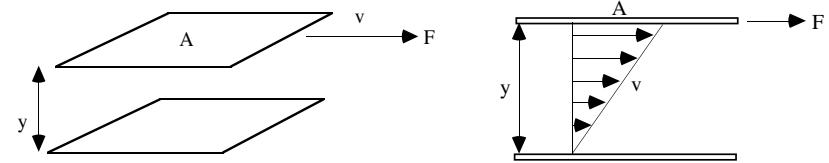
Térfogati áramerősség (Q):



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

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

Alapfogalmak II. Viszkozitás (belső súrlódás)



F = nyíróerő
A = folyadéklemez területe
 η = viszkozitás
v = áramlási sebesség
y = folyadéklemezek közötti távolság

F/A = nyírófeszültség (τ)
 $\Delta v / \Delta y$ = sebesség grádiens (D)

A viszkozitás mértékegységei:

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

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

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

Folyadékok fajtái I.

1. Ideális

súrlódásmentes, nem összenyomható
 ρ = konstans, $\eta = 0$

2. Nem ideális (reális)

a. Newtoni (viszkózus)

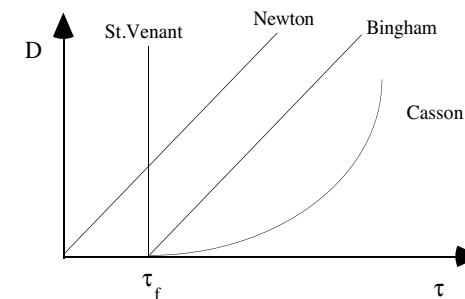
η független a nyírófeszültségtől

b. Nem-newtoni (anomális)

η a nyírófeszültséggel változik

Folyadékok fajtái II.

Sebességgrádiens és nyírófeszültség összefüggése reális folyadékokban



τ_f = folyási határ (küszöbfeszültség)

Viszkoelasztikus anyagok: elasztikus test + viszkózus folyadék (pl. polimer-, makromolekula-oldatok)
Stressz-relaxáció: feszültség lecsengése idő függvényében hirtelen megnyújtott viszkoelasztikus testben.

NB: A vér nem-newtoni folyadék!

Áramlások fajtái

1. Stacionárius

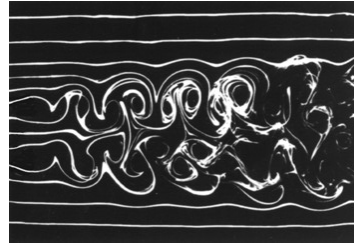
Csőkeresztmetszeten időegység alatt átfolyó folyadékmennyiség konstans

2. Lamináris

Folyadékrétegek nem keverednek

3. Turbulens

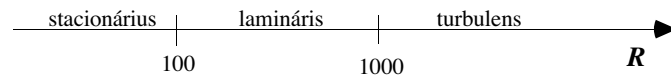
Folyadékrétegek keverednek



Reynolds szám:

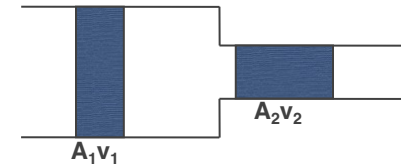
$$R = \frac{vr\rho}{\eta}$$

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



Törvényszerűségek ideális folyadékokban I.

Kontinuitási egyenlet



$$A_1v_1 = A_2v_2 = konst$$

A =keresztmetszet
 v =áramlási sebesség

Törvényszerűségek ideális folyadékokban II.

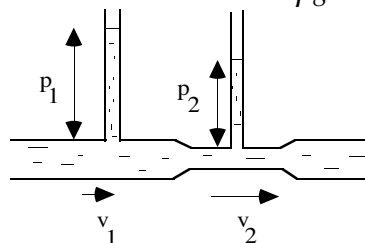
Bernoulli törvény

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

p =sztatikus nyomás

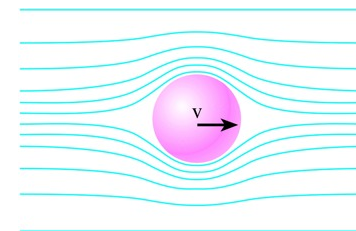
$\frac{1}{2}\rho v^2$ =dinamikus nyomás

ρgh =hidrosztatikai nyomás



Törvényszerűségek viszkózus folyadékokban I.

Stokes törvény



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

F = erő

γ = közegellenállási (súrlódási) együttható, alakifaktor

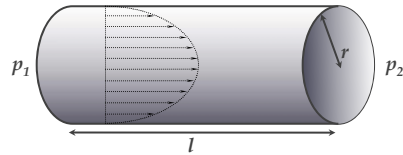
v = folyadékáramlási sebesség

r = gömb sugara

η = viszkozitás

Törvényszerűségek viszkozus folyadékokban II.

Hagen-Poiseuille törvény

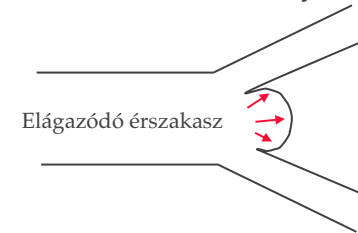


$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dl}$$

V=térfogat
t=idő
($V/t=Q$ = térfogati áramerősség)
r=cső sugara
 η =viszkozitás
p=nyomás
l=cső hossza
(dp/dl =nyomásgrádiens, fenntartója p_1-p_2)

Orvosi, biológiai jelentőség

Bernoulli törvény:



aneurysma, értágulat:

- ➔ áramlás csökken (kontinuitási egyenlet alapján)
- ➔ nyomás nő
- ➔ tágulat fokozódik

Hagen-Poiseuille törvény:

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dl}$$

Átáramló **vérmennyiség drasztikusan csökken** pathológiás állapotokban:

érszűkület (pl. diabetes, Bürger-kór)

vérviszkozitás-változás (pl. láz, anaemia)

A VÉRKERINGÉS BIOFIZIKÁJA

1. Vér mint folyadék
2. A vérviszkozitás meghatározói
3. Az érrendszer
4. Erek mint rugalmas falú csövek
5. A vérkeringés segéderői

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 interstícium 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 VÉRVISZKOZITÁS MEGHATÁROZÓI I.

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 VÉRVISZKOZITÁS MEGHATÁROZÓI II.

2. Plazmaviszkozitás

Elsősorban a plazmafehérjétől függ.

Paraproteinaemiákban (Myeloma multiplex v. plasmocytoma)
az immunglobulinok mennyisége kórosan fokozódott,
mely viszkozitásnövekedéshez vezet.

3. Vörösvértestek deformálhatósága

Vvt-méretű szilárd részecskék 65%-os szuszpenziója téglakemény.

95%-os vvt-szuszpensió viszkozitása csupán 20 mPas!

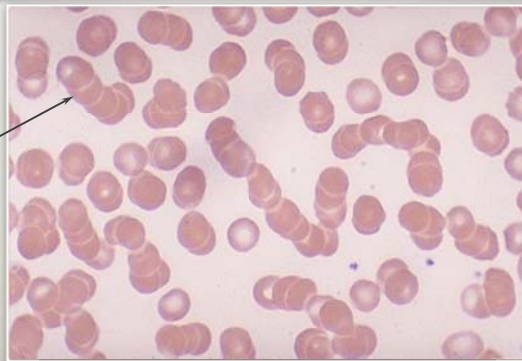
Deformáció: csepp, ejtőernyő, nyílhegy alakú sejtek.

A VÉRVISZKOZITÁS MEGHATÁROZÓI III.

4. Vörösvértestek aggregációs készsége

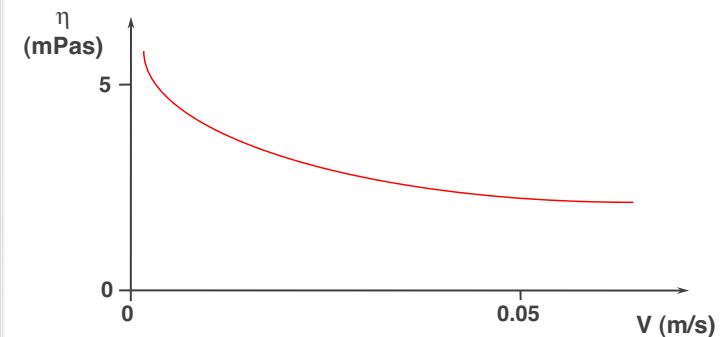
Pénztekercsképződés (Rouleaux).
Alacsony áramlási sebességnél fokozott hajlam.

Pénztekercs



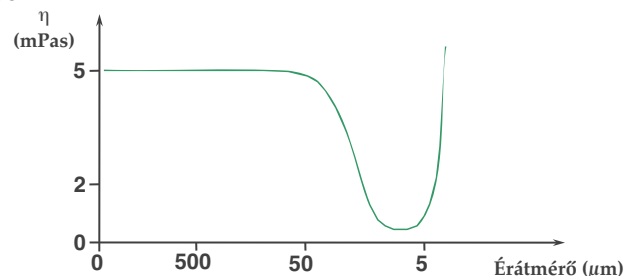
A VÉRVISZKOZITÁS MEGHATÁROZÓI IV.

5. Áramlási sebesség, sebességgrádiens



A vérviszkozitás meghatározói V.

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

A. Feladata:

Sejtek környezeti állandóságának biztosítása

Transzport:

Gázok

Metabolitok

Hormonok, jelátvivő anyagok

Immunglobulinok

Hő

B. Áramlástan igények:

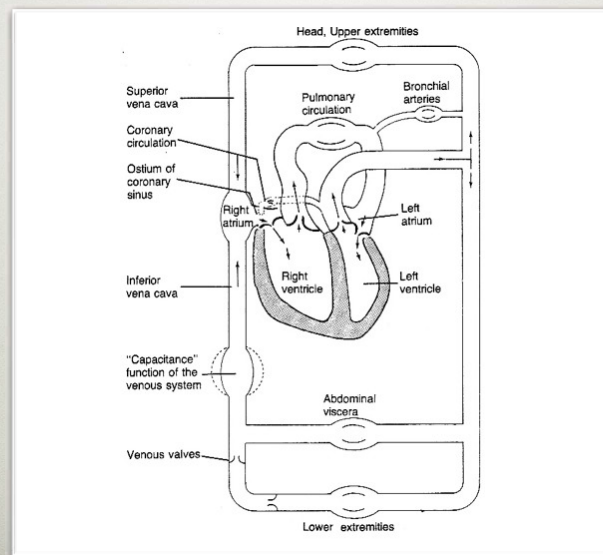
Lassú

Egyenletes

Egyirányú

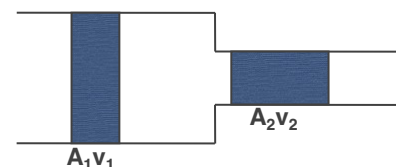
C. Az érrendszer zárt, önmagába visszatérő csőrendszer

Az érrendszer zárt, önmagába visszatérő csőrendszer



Folyadékáramlás csőrendszerben

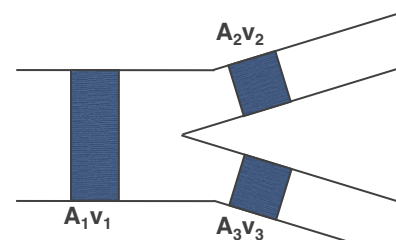
Kontinuitási egyenlet – emlékeztető



$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = konst$$

A=keresztmetszet

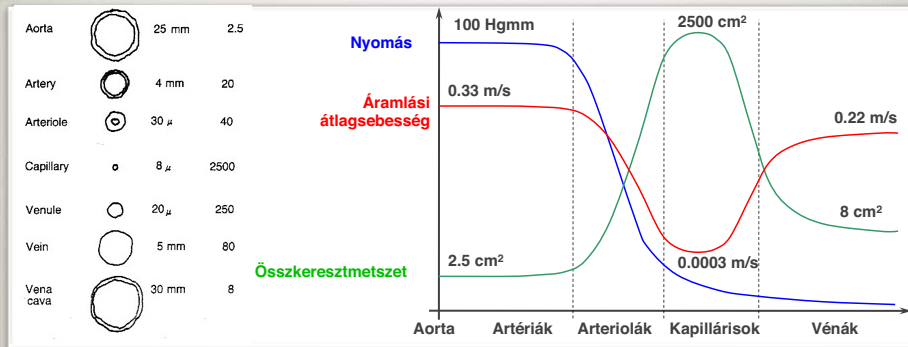
v=áramlási sebesség



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

A_{Σ} =összes keresztmetszet

Az érrendszer felépítése és fizikai paraméterei



Nyomás: áramlást fenntartó nyomás, "vényomás".

Nyomáscsökkenés oka: energia zöme hővé alakul.

Sebesség és összkétszám fordított arányban változik, a kontinuitási egyenlet alapján ($A_v = \text{állandó}$).

Sebesség általában nem haladja meg a kritikus sebességet (I. Reynolds szám), és az áramlás lamináris marad. (De: aortabillentyű mögötti szakasz, érszűkületek, viszkozitáscsökkenéssel járó állapotok, Korotkov hang).

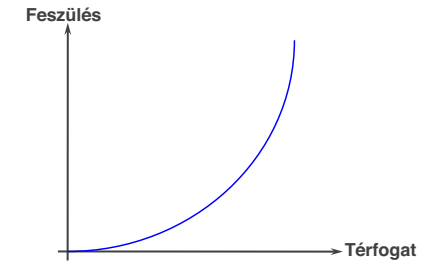
Arteriolák: (vegetatív beidegzés alatt álló, simaizommal ellátott erek) mint vényomásszabályozók: "rezisztencia erek".

Vértérfog jelentős része a vénás rendszerben: "kapacitás erek".

Az erek rugalmas falú csövek

Nem-lineáris elaszticitás

Megnyúlás nem arányos a feszüléssel.



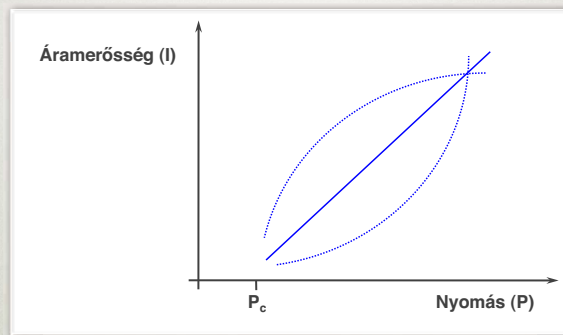
Érfali rugalmasság meghatározói:

Elastikus rostok
Kollagén
Simaizom

Érfali rugalmasság hatása:

Potenciális (elasztikus) energia tárolódás
Pulzáló nyomás elsimul
Állandó áramlási sebesség

Az áramerősség és nyomás összefüggése

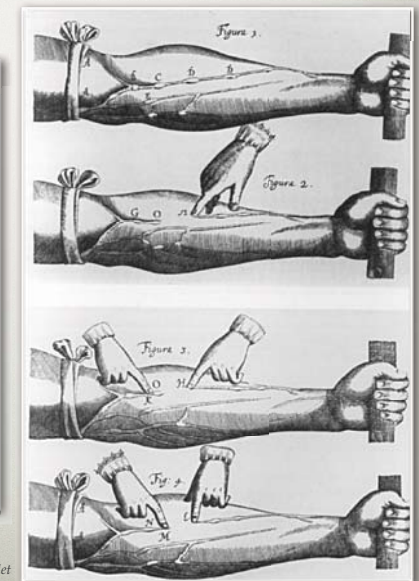


N.B.:

-A görbék nem 0-nál metszik a Nyomás tengelyt: kritikus záródási nyomás (P_c).

A vérkeringés segéderői

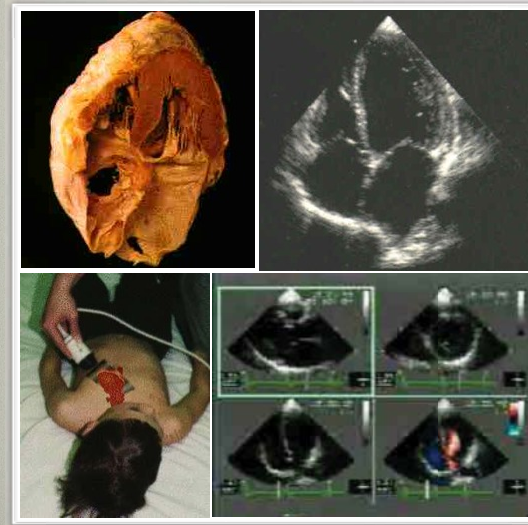
1. Artériafalak rugalmassága (elasztikus rostok \rightarrow potenciális, elasztikus energiatárolás)
2. Vénabillentyűk (Harvey-féle kísérlet). "On the Circulation of the Blood" (1628).
3. Izommunka
4. Negatív mellűri nyomás
5. Atrioventricularis sík fel-le mozgása (kamrasystolával szinkron átmeneti negatív nyomás a jobb pitvarban)



Harvey-féle kísérlet

A SZÍVMŰKÖDÉS BIOFIZIKÁJA

Szív: A keringési rendszer pumpája

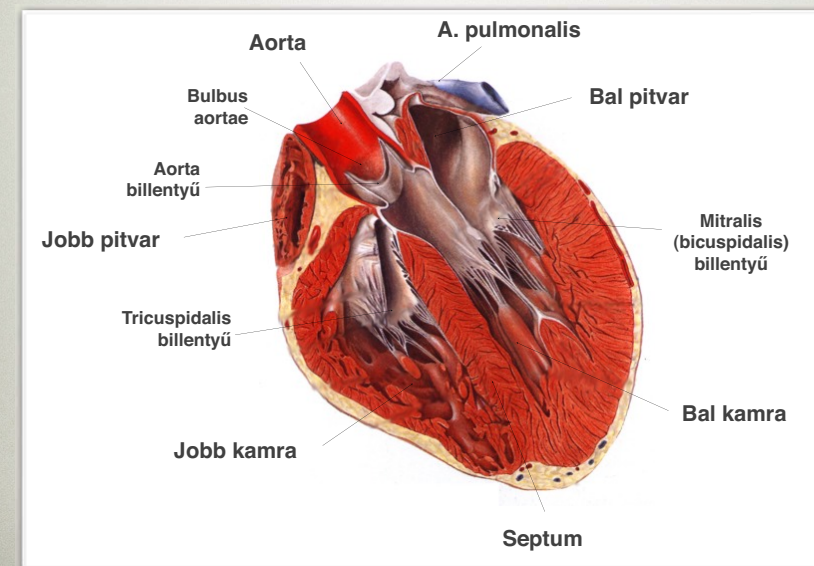


	Összehúzódnások száma	Továbbított vértérfogat
1 perc	~70	~6 l
1 nap	~100.000	~8600 l
Élet (70 év)	~2.5 x 10 ⁹	~220 x 10 ⁶ l

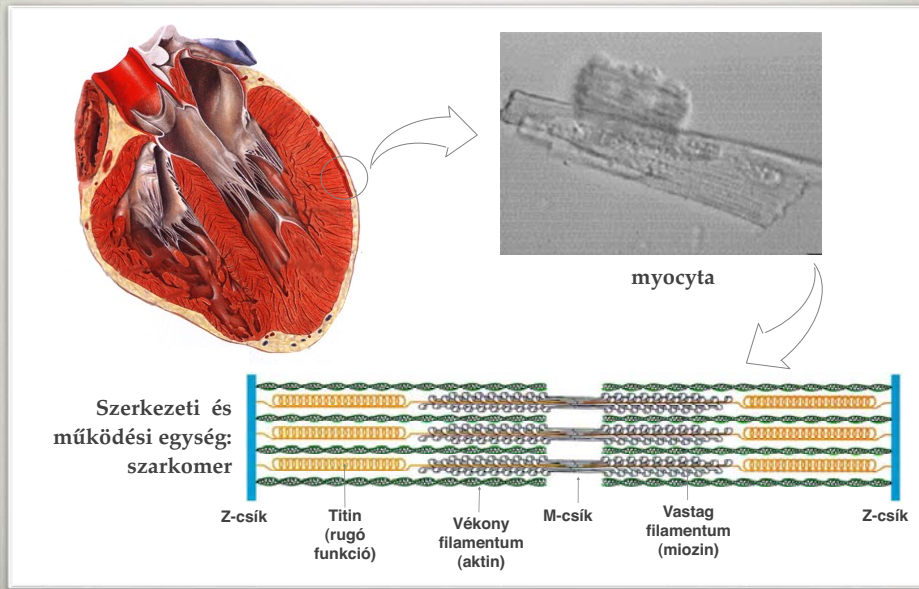
Szívműködés biofizikája

1. A szív vázlatos felépítése
2. Koordinált összehúzódnás
3. A szívciklus
4. A szív munkája

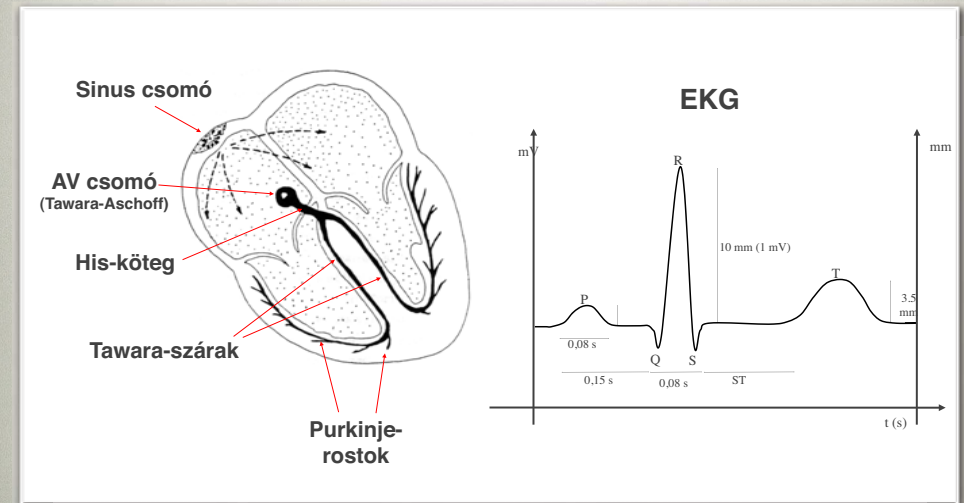
A szív vázlatos felépítése



A szívizom funkcionális szerkezete



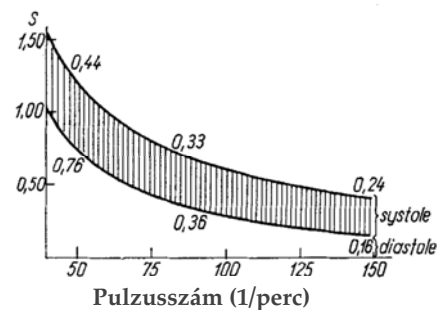
Koordinált mechanikai működés aktiválása



A szívciklus

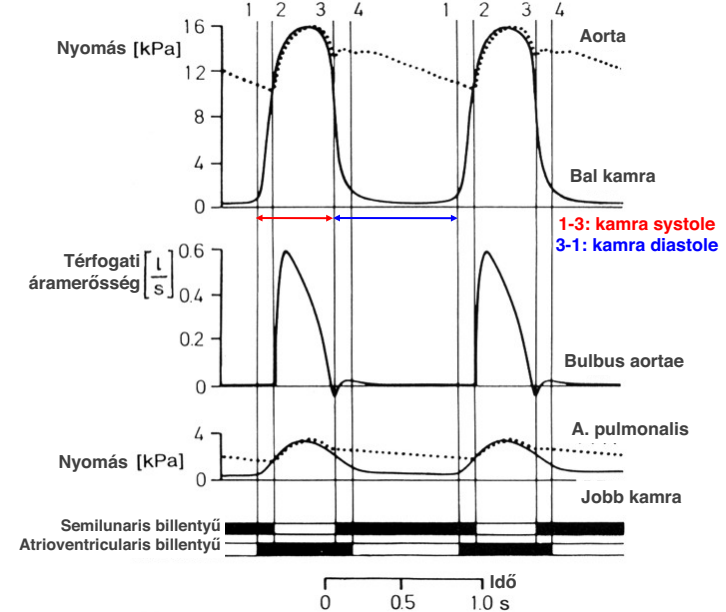
A szív kontrakciós (systole) relaxációs (diastole) ciklusa

	systole	diastole
pitvar	0,1 s	0,7 s
kamra	0,3 s	0,5 s

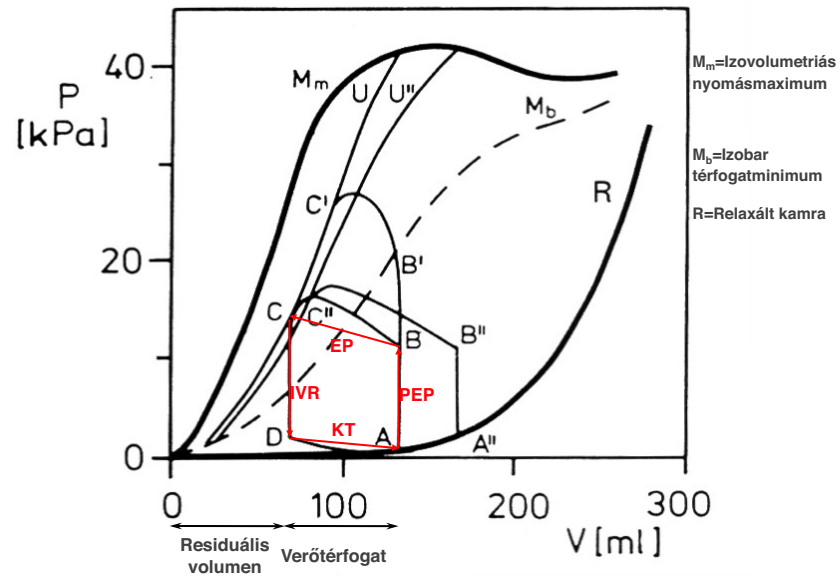


A szívciklus eseményei

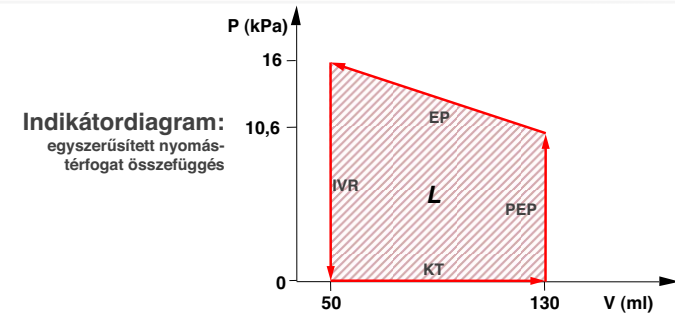
1-2: pre-ejekciós periódus (PEP) 2-3: ejekciós periódus (EP) 3-4: izovolumetriás relaxáció (IVR) 4-1: kamratelődés (KT)



A bal kamra nyomás-térfogat diagramja



A szív munkája (bal kamra munkája)



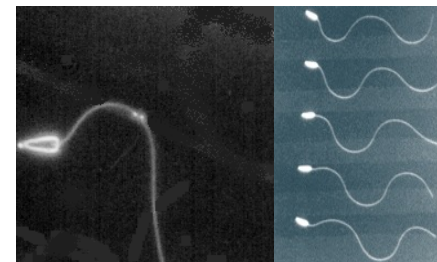
$$L = p\Delta V + \frac{1}{2}mv^2$$

$p\Delta V$ =térfogati munka (statikus komponens)
 $\frac{1}{2}mv^2$ =sebességi munka (dinamikus komponens)
 p =nyomás
 ΔV =verőtér fogat (pulzustér fogat)

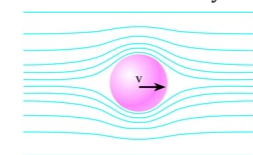
$$13,3 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2 \times 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 + \frac{1}{2} 0,08 \text{ kg} \times (1 \text{ m/s})^2 = 1,06 \text{ Nm} + 0,04 \text{ Nm} = 1,1 \text{ J}$$

Spermaticita motilitás

Mekkora erőt kell legyőznie egyetlen spermaticitának mozgása során?



Stokes törvény:



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

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

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

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

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

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

Kapilláris keringés, folyadékcsere

1. Kapillárisok:

Hossz: 400-700 μm

Átmérő: 0.5 μm

2. Nyitott állapot funkciófüggő

Nyitott kapillárisok száma izomban

Nyugalomban 5/mm²

Aktivitás során 200/mm²

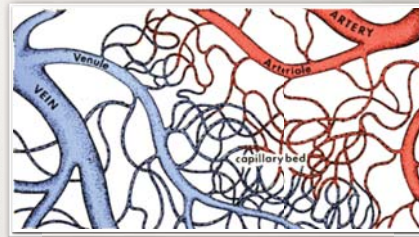
3. Kapilláris folyadékcsere

plazma és interstícium közötti folyadékvándorlás

hajtóerő: vérnyomás és kolloid ozmotikus nyomás közötti különbség

Kolloid ozmotikus (onkotikus) nyomás:

kolloidális fehérjék által létrehozott ozmotikus nyomás (2.6 kPa)



	Arteriolák	Kapillárisok	Venulák
Vérnyomás	4.0 kPa	2.6 kPa	1.3 kPa
Kolloid ozmotikus nyomás	2.6 kPa	2.6 kPa	2.6 kPa

Pulzustérfogat meghatározása Fick-elv

- Egy légvétel alatt a tüdőn át bejuttatott O_2 mennyisége egyenlő az ugyanennyi idő alatt a tüdőn átáramló vér O_2 -dúsításra használt O_2 mennyiségével.
- Belégzett levegőben 21% O_2 . Kilégzett levegőben 16% O_2 . Különbség 5%.
- Mivel egy légvétel térfogata (átl.) 500 ml, 25 ml abszorbeálódott az átáramló vérben.
- Artériás vér O_2 tartalma 20%, a vénásé 12%, a különbség 8%.
Azaz, az egy légvétel alatt a tüdőn átáramló vértérfogat (x) 8%-a 25 ml, azaz $x=312$ ml.
- Mivel egy légvételre átl. 4 szívciklus esik, a pulzustérfogat ~80 ml.

A pulzustérfogat szabályozása Frank-Starling mechanizmus

