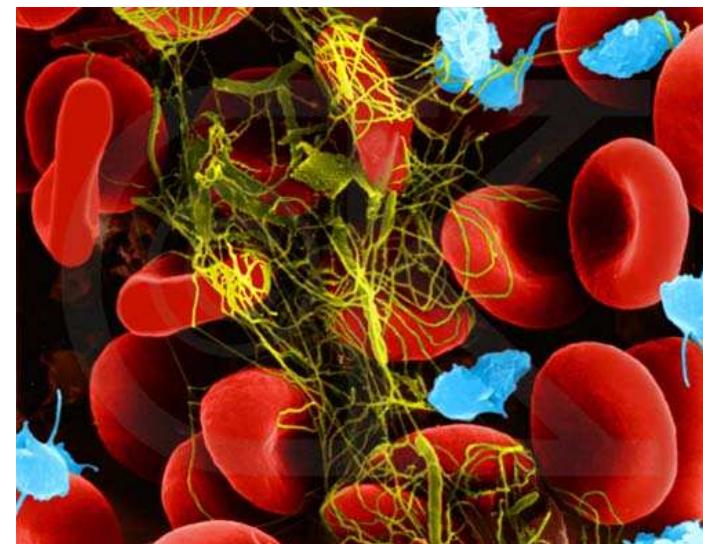
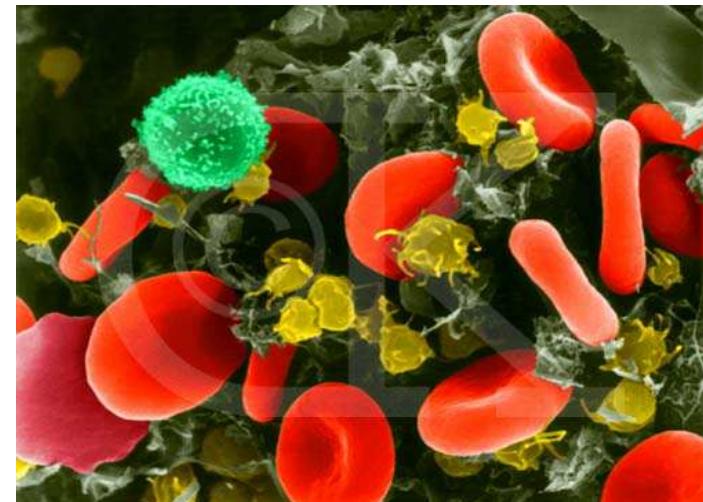
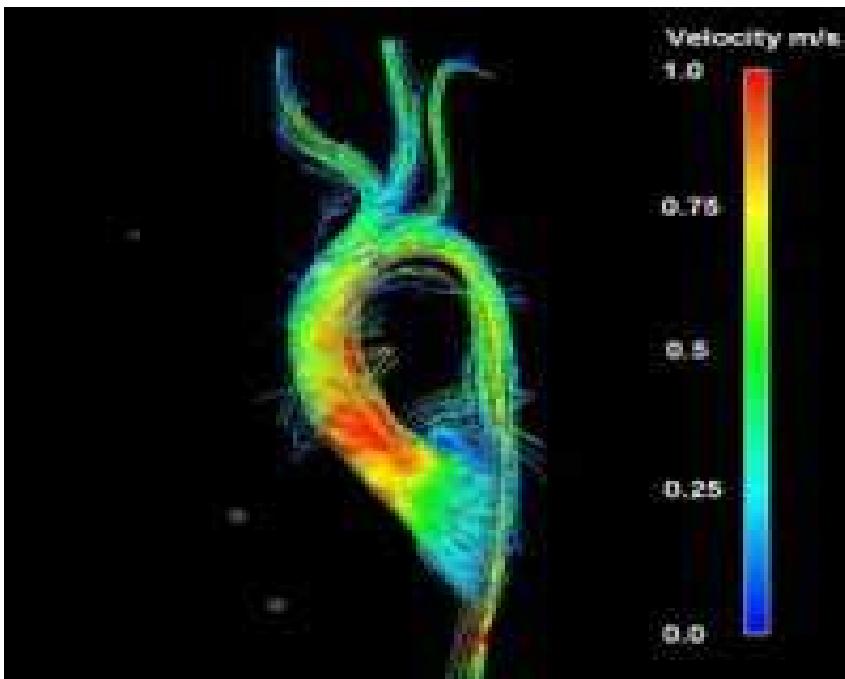


BIOMEHANIKA KARDIOVASKULARNOG SISTEMA

- 1. IDEALNE TEČNOSTI**
- 2. REALNE TEČNOSTI**
- 3. KVS**
- 4. POVRŠINSKI EFEKTI**



IDEALNE TEČNOSTI

Idealna tečnost predstavlja fizički model koji uvažava slijedeće pretpostavke:

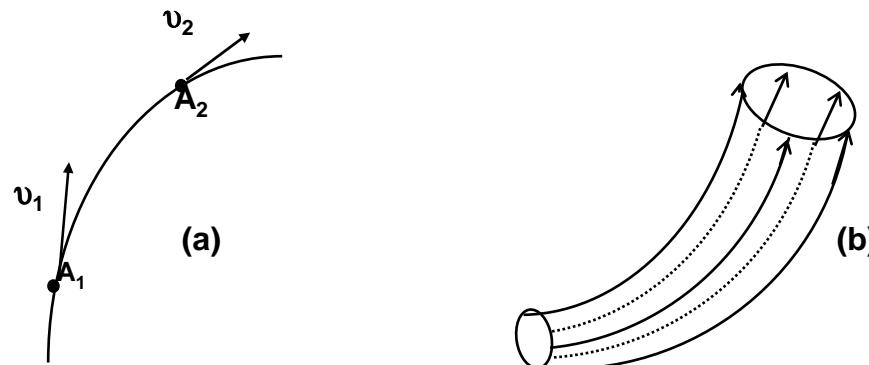
- *tečnosti su nestišljive*
- *ne postoji unutrašnje trenje*

Hidrostatika

Tečnost se nalazi u **mirovanju** ako sve spoljne sile djeluju normalno na njenu površinu.

- **Paskalov zakon ($Pa = N/m^2$)**
- **Hidrostaticki pritisak ($1 \text{ mmHg} = 133 \text{ Pa}$)**

Hidrodinamika



Strujna linija (a) i strujna cijev (b).

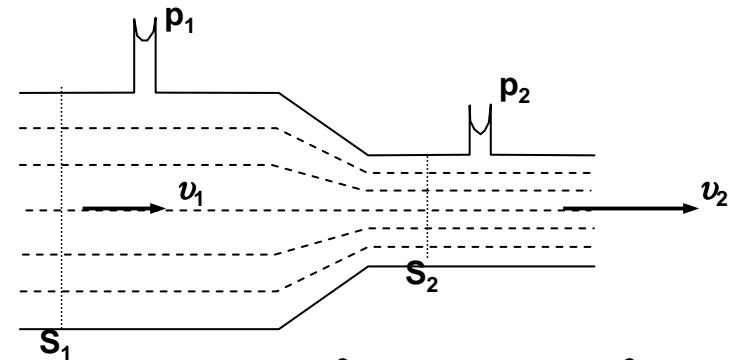
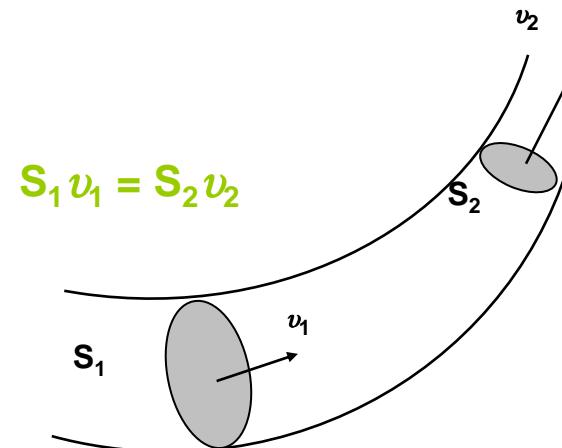
Jednačina kontinuiteta i Bernulijeva jednačina

JEDNAČINA KONTINUITETA. Na osnovu **zakona o održanju mase ($m = \text{const.}$)** kroz bilo koji poprečni presjek S strujne cijevi mora da prođe ista količina tečnosti u jedinici vremena (*protok Q*)

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = S \cdot \frac{\Delta l}{\Delta t} = S \cdot v = \text{const.}$$

BERNULIJEVA JEDNAČINA. Osnov za dobijanje *Bernulijeve jednačine* je **zakon o održanju energije**, po kome ukupna mehanička energija, odnosno zbir potencijalne i kinetičke energije određene količine tečnosti, tokom njenog kretanja kroz strujnu cijev, ostaje nepromenjena.

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h = \text{const.}$$



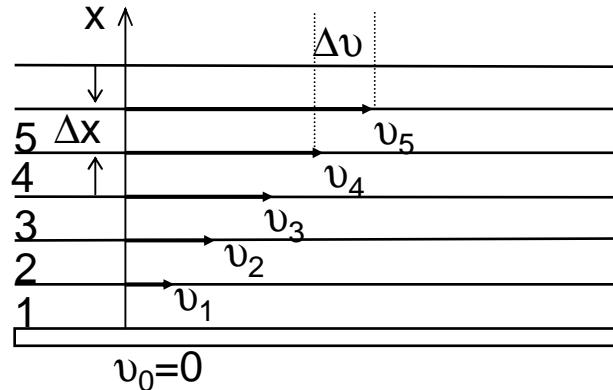
$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2},$$

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2).$$

REALNE TEČNOSTI

Kod realnih tečnosti u kretanju javlja se **unutrašnje trenje - viskoznost**, koje dovodi do **slojevitog - laminarnog** toka. Ako brzine nisu velike, slojevi klize jedni preko drugih.

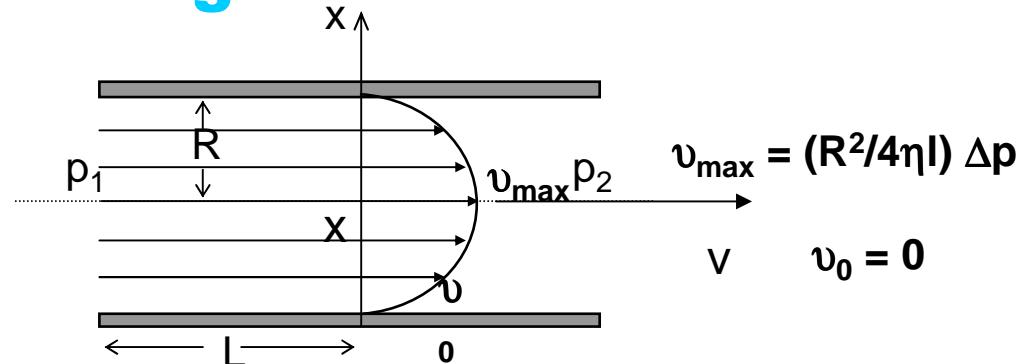
Viskoznost homogenih tečnosti



Karakteristike laminarnog kretanja tečnosti preko ravne podloge.

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x}$$

$$v(r) \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R^2 - r^2)$$



Kretanje viskoznog fluida kroz uzanu cijev.

$$v = \frac{v_0 + v_{\max}}{2} = \frac{R^2}{8\eta L} \cdot \Delta p$$

$$Q = S \cdot v = R^2 \pi \cdot \frac{R^2}{8\eta L} \cdot \Delta p = \frac{\pi R^4}{8\eta L} \cdot \Delta p = \frac{\Delta p}{R_H}$$

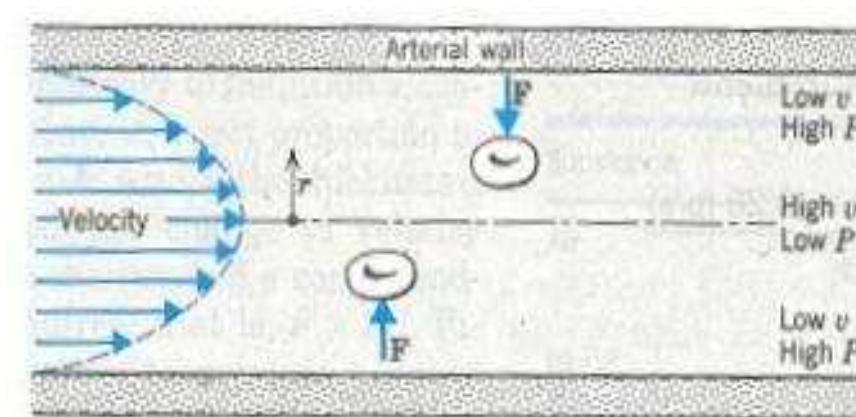
$$R_H = \frac{8\eta L}{\pi R^4}$$

Brzina toka krvi u arteriji

- Radi privlačnih molekularnih sila između krvi i unutrašnjeg zida arterije, nema toka one krvi koja je u dodiru sa zidom. Tako je to i kod toka bilo kojeg fluida kroz cijev.
- Prema tome, brzina toka sloja krvi uz zid arterije je nula i povećava se kako se ide prema centru arterije.
- Moguće je izračunati izraz za brzinu toka fluida u funkciji udaljenosti x od centra cijevi.

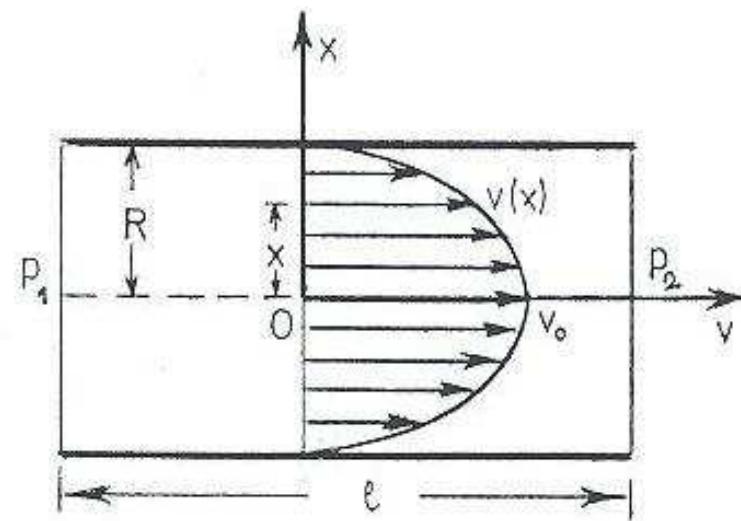
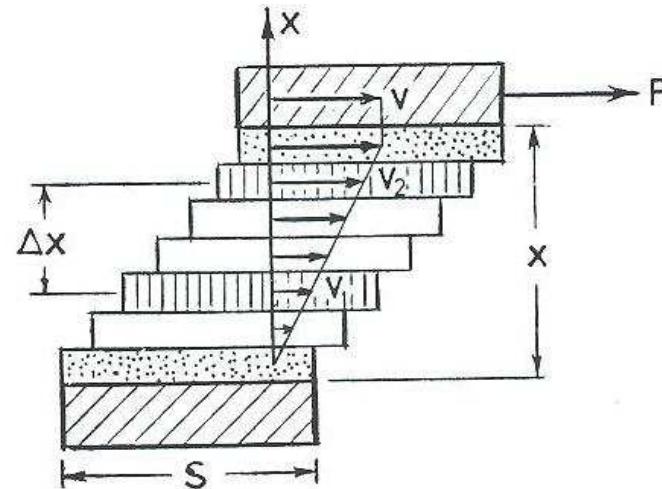
Brzina toka krvi u arteriji

- Pošto se brzina toka mijenja radijalno u krvnom sudu, to prema Bernulijevoj jednačini izlazi da će postojati i promjena pritiska u cijevi. Mala brzina krvi uz zid arterije znači da je pritisak u ovom regionu relativno visok. U centru arterije gdje je brzina najveća, pritisak je najmanji, to znači da pritisak radijalno raste prema periferiji arterije. Ova razlika pritiska stvara silu koja nastoji da gura ćelije krvi prema centru cijevi

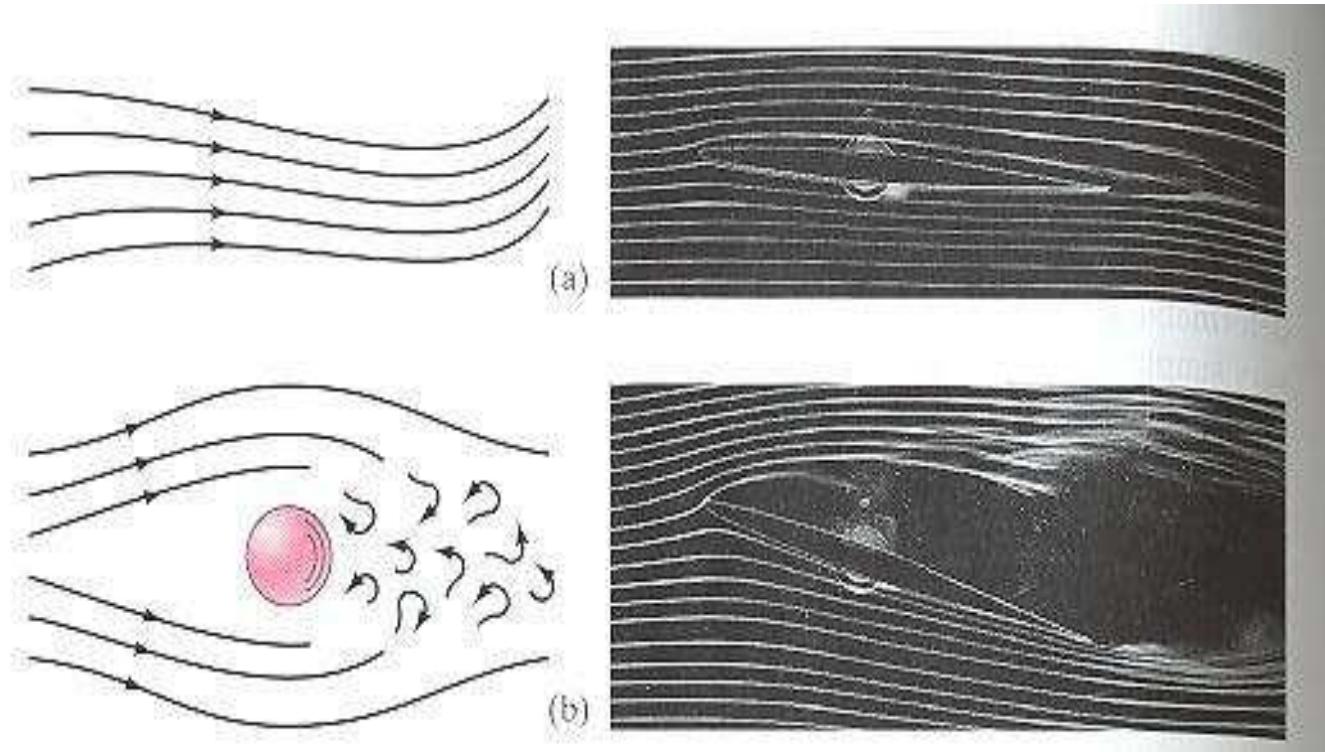


Viskoznost

- Laminarni tok tečnosti
- Brzina je najveća u središtu cijevi
- Njutnov zakon viskoznosti:
- $F = \eta S \Delta v / \Delta x$
- η – koeficijent viskoznosti
- $\Delta v / \Delta x$ – gradijent brzine
- Može se pokazati da je:
- $v(x) = v(0) (1 - x^2 / R^2)$,
- gdje je :
- $v(0) = v_0 = R^2(p_1 - p_2) / 4\eta l$, a to je brzina na osi cijevi
- Za $x=0$, $v=v_0$, a za $x=R$, $v=0$



Laminarni i turbulentni tok



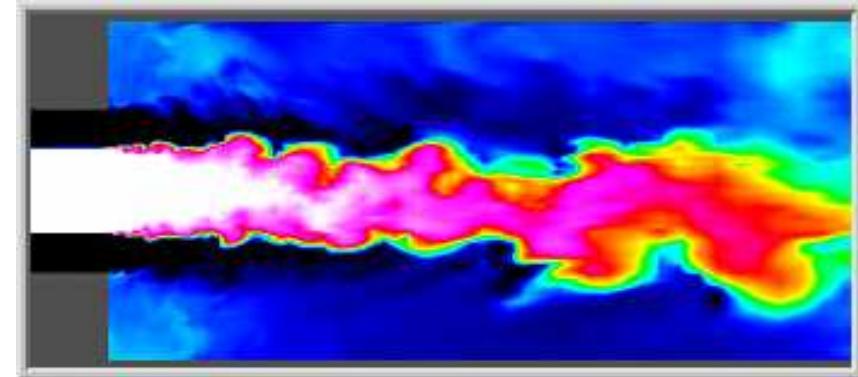
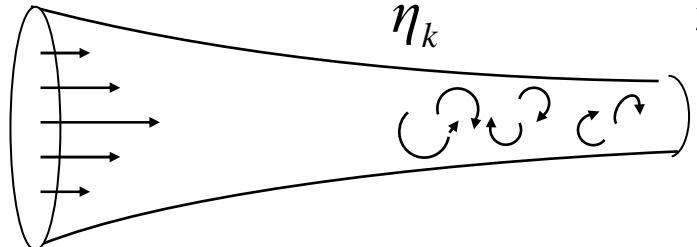
Rejnoldsov broj

Kombinacija nekoliko veličina kao što su gustina tečnosti, njen koeficijent viskoznosti, srednja brzina toka, dimenzije cijevi daju jednu veličinu pomoću čije vrijednosti se može odrediti granica između laminarnog i turbulentnog kretanja tečnosti.

- Taj broj se zove Rejnoldsov broj i definira se kao:
 - $\mathcal{R} = 2\rho rv/\eta$
 - Protok fluida kroz cijev će biti laminaran ako je \mathcal{R} manji od 2000. Ako je \mathcal{R} veći od 3000 tok je turbulentan. Režim gdje je \mathcal{R} između 2000 i 3000 je nestabilan i mijenja se između laminarnog i turbulentnog toka.

Laminarno i turbulentno kretanje. Rejnoldsov broj

$$R_e = \frac{2Rv}{\eta_k} \quad R_e = \frac{2QR}{\eta_k S}$$

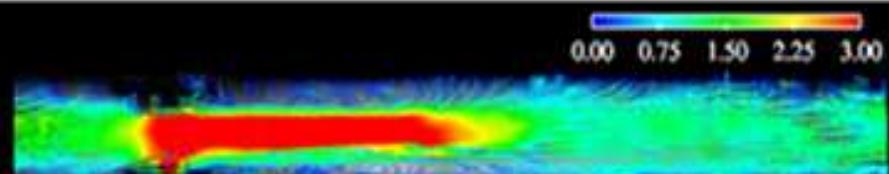


Prelaz laminarnog u turbulentni tok.

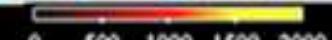
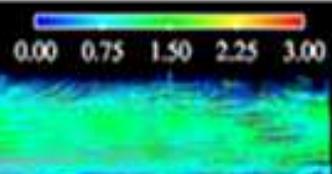
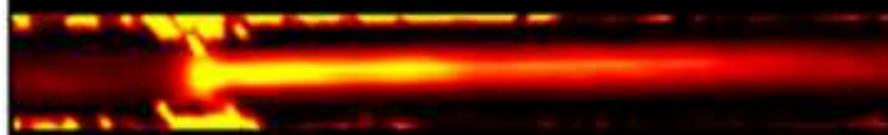
Reynolds number 500



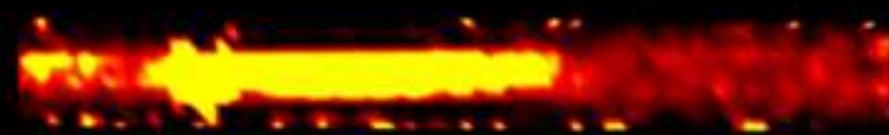
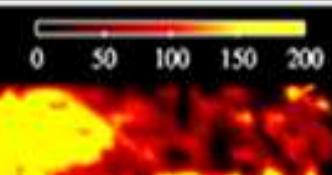
Reynolds number 1000



b) Kinetic energy of the mean velocity field [J/m³]



c) Kinetic energy of the fluctuating velocity field [J/m³]

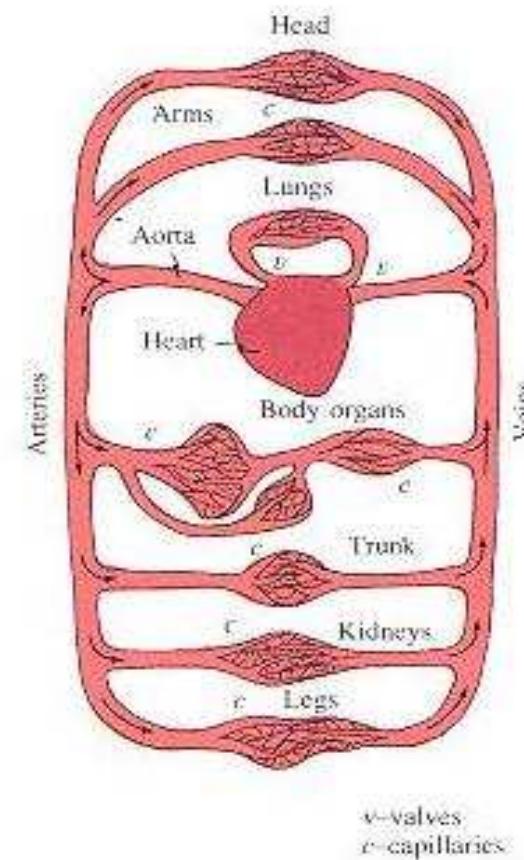


Protok krvi u cirkulatornom sistemu

- Protok Q se može izraziti kao proizvod poprečnog presjeka cijevi i srednje brzine toka:
- $Q = S \cdot v_{sr}$
- pa je odavde $v_{sr} = Q / \pi r^2$
- Za aortu je $r = 0,01$ m, a $Q = 8 \times 10^{-5}$ m³/s,
- Pa je $v_{sr} = 0,25$ m/s
- Onda je Rejnoldsov broj u ovom slučaju $\mathcal{R} = 1300$, što znači da je u aorti tok krvi laminaran u njenom neaktivnom statusu.

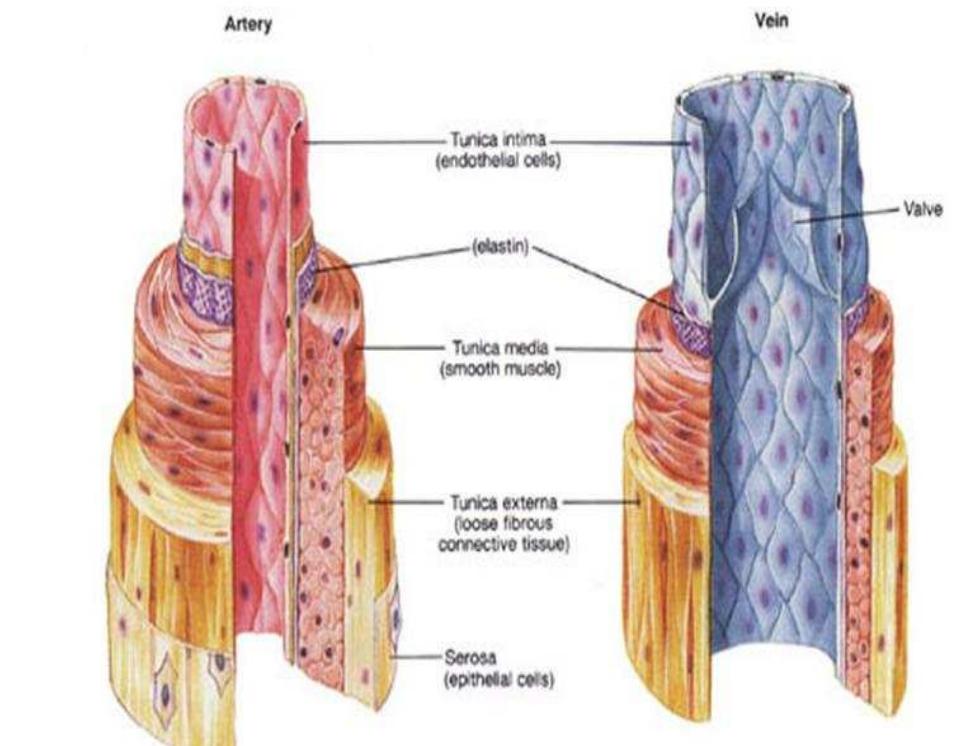
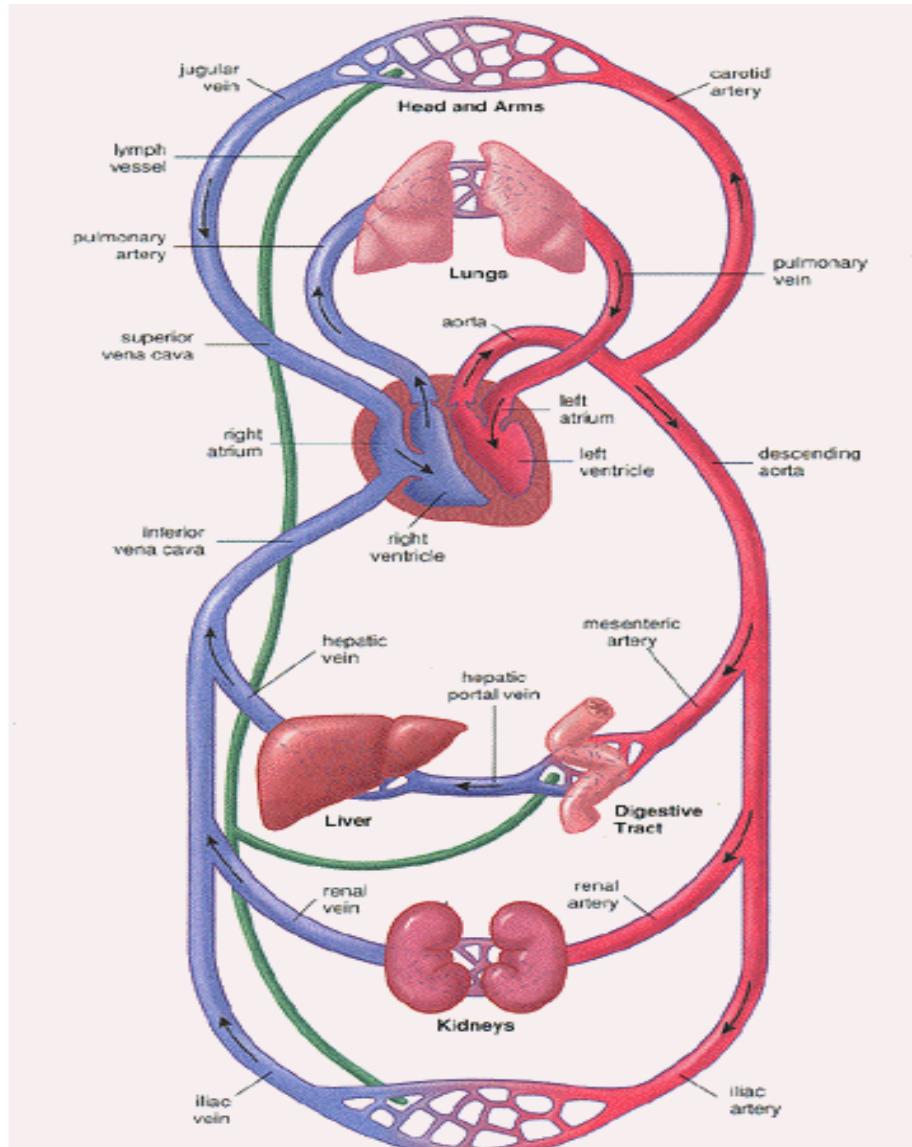
Krvotok – laminarni tok krvi

- Krv je viskozni fluid koji se pumpa kroz komplikovani sistem arterija i vena putem muskularne akcije srca.
- Brzina toka krvi kroz tijelo je dovoljno mala da se tok može uzeti kao općenito laminaran, a ne turbulentan tok.
- Tok krvi kroz arteriju dakle možemo tretirati kao što tretiramo laminarni tok fluida kroz glatku cijev.

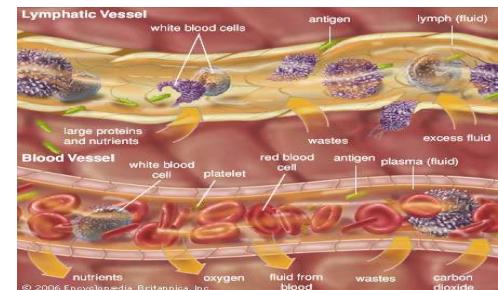
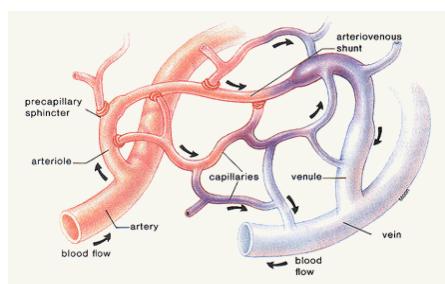


KRVNI SUDOVI

Krvni sudovi: arterije, arteriole, kapilare, venule, vene. Ako bi nastavili sve krvne sudove jedne na druge, mogli bi smo okružiti **Zemlju 2,5 puta.**



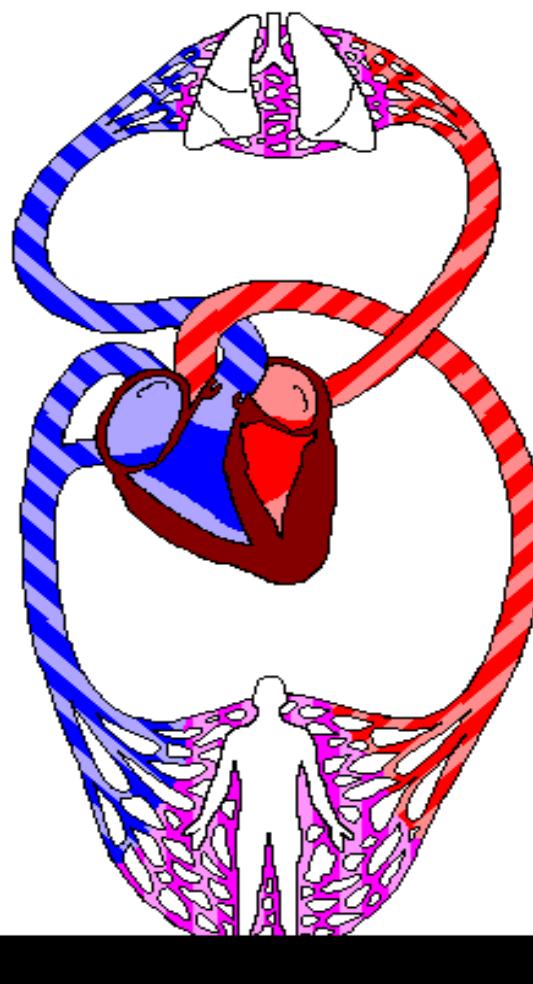
Source: Fox, Stuart I. Human physiology 4th edition, Brown Publishers



SRCE I KRVOTOK

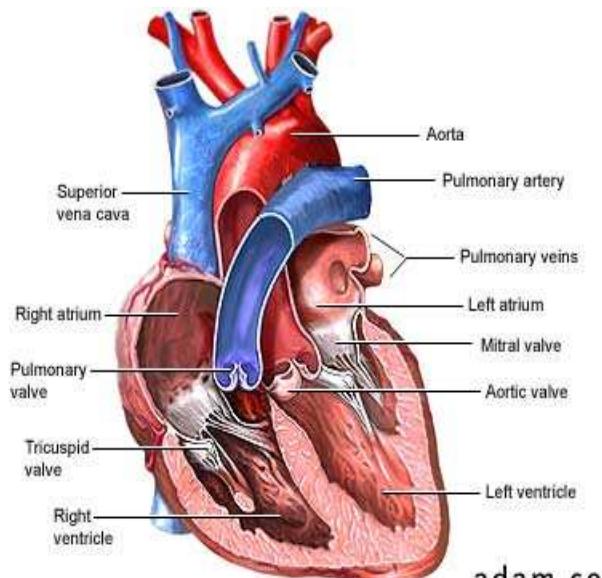
Srce je dvostruka pumpa, koja pumpa krv kroz dva cirkulatorna sistema: **pulmonalni** (mali) (~20%) i **sistemski** (veliki) krvotok (~80%).

Naše srce se kontrahuje (kuca) oko **70** puta u minutu i oko **30 miliona** puta tokom jedne godine!

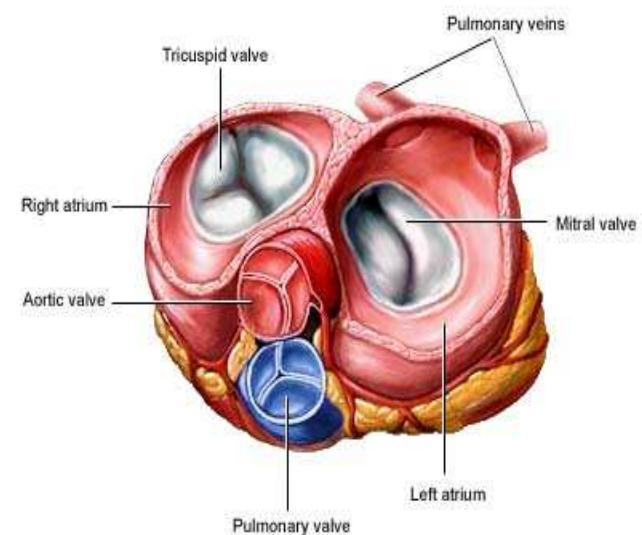


Energija potrebna za istiskivanje krvi u krvotok dobija se kontrakcijom mišića atrijuma, odnosno ventrikula.

Smjer kretanja krvi obezbjeđuju srčani zalisci (valvule), od kojih se jedan par nalazi između atrijuma i ventrikula (mitralna i triskupidna valvula), a drugi je između ventrikula i aorte, odnosno pulmonalne arterije.



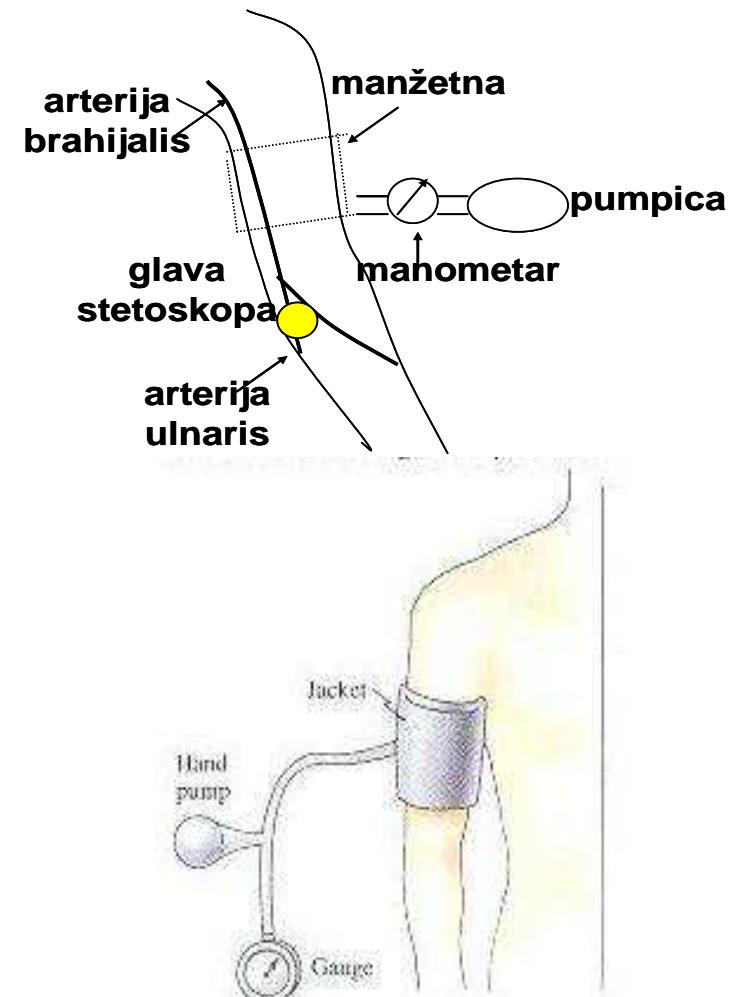
adam.com



adam.com

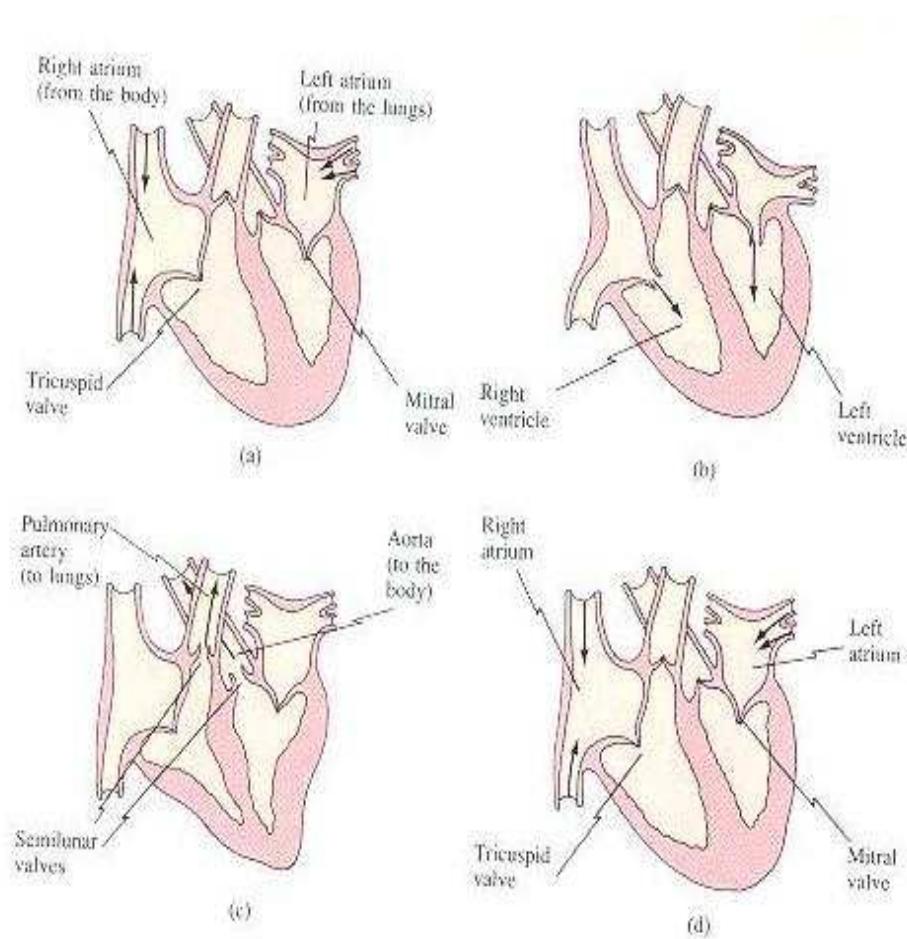
Mjerenje krvnog pritiska auskultacijskom metodom

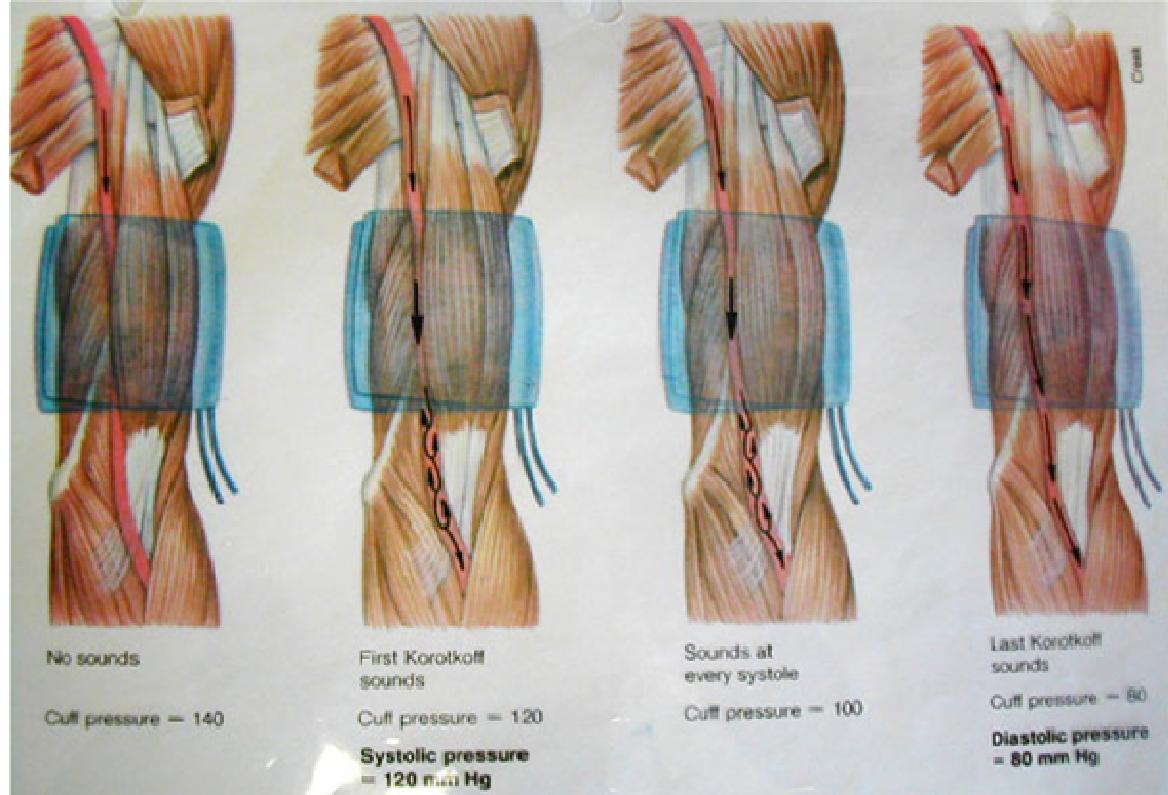
- U izrazima za **Q** i **v** vidimo da oba zavise od razlike pritisaka između krajeva dijela cijevi koji se posmatra. Kako se može mjeriti pritisak krvi u arterijama?
- Smatramo da je strujanje krvi kroz tijelo **laminarno**. Laminarno strujanje je "tih" proces, dok je turbulentno strujanje "šuman" proces.
- Ako krv u nekoj arteriji poteče turbulentno, karakterističan zvuk koji se tada javlja se može registrovati stetoskopom koji se pritisne na arteriju. Ovo se najčešće koristi kod mjerenja pritiska.
- Mjere se dva pritiska: **maksimalni ili sistolni**, nastaje kada se srčani mišić skupi i potisne krv iz lijeve komore u aortu, a odatle u arterije.



Srce kao pumpa

- Između kontrakcija pritisak pada na svoju **minimalnu ili dijastoličnu vrijednost**.
- Kod tehnika koje koriste registrovanje zvuka za mjerjenje pritiska, pretpostavlja se da će svako vještačko nasilno pritiskanje arterije dati turbulentni tok.
- Obično se bira glavna arterija u nadlaktici oko koje se obmota gumeni traka u koju se zatim upumpa vazduh do dovoljno visokog pritiska tako da se zaustavi tok krvi.



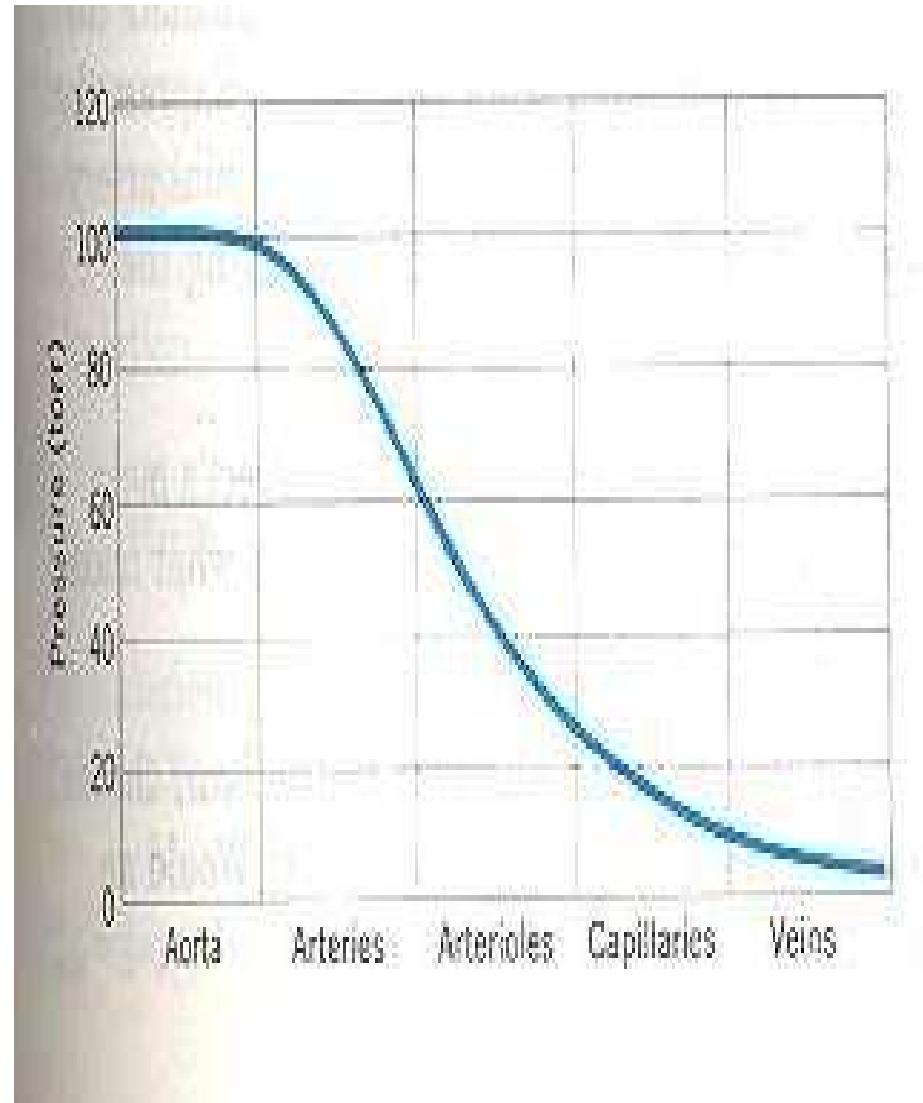


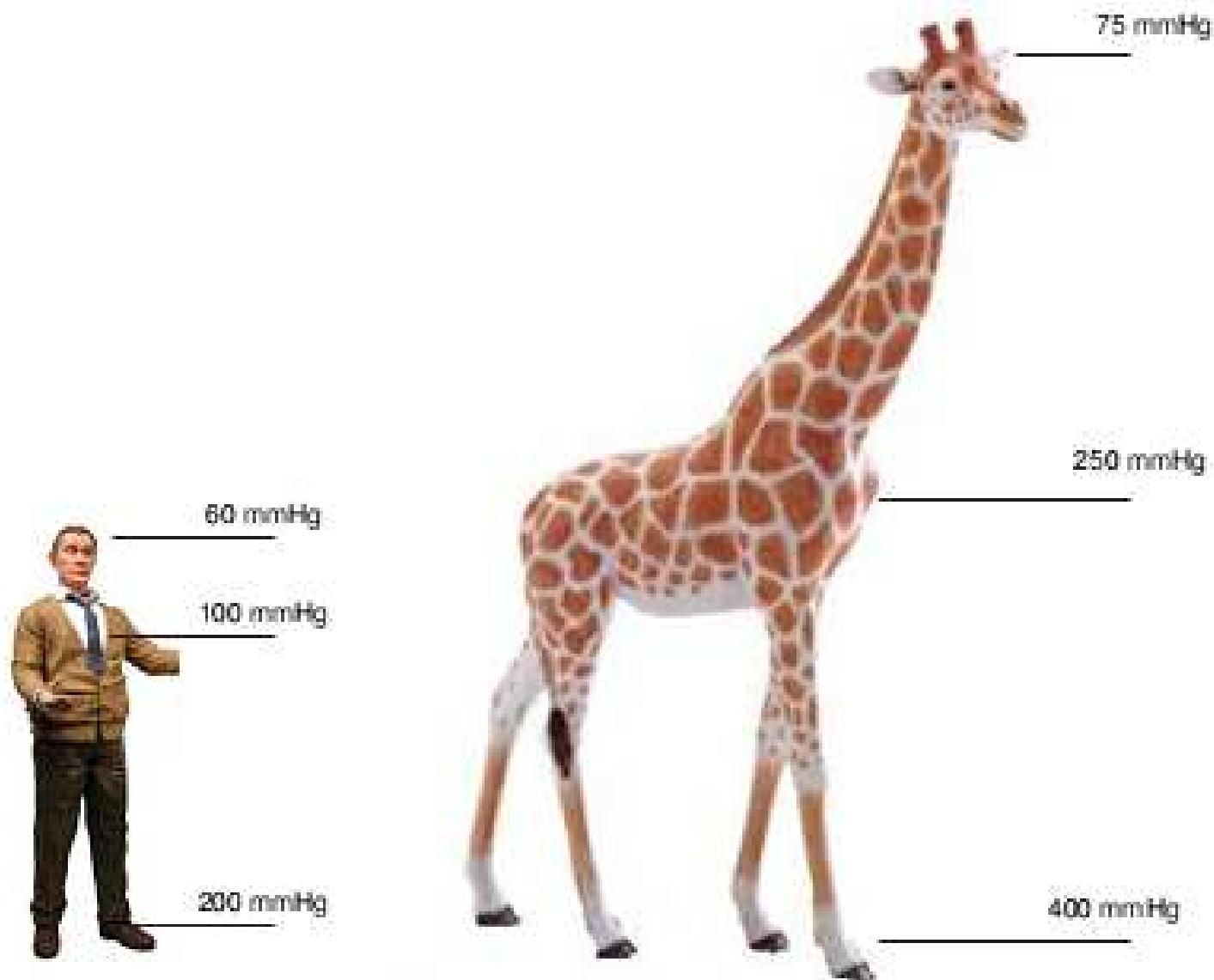
- Onda se otvori ventil na traci i postepeno se iz trake ispušta vazduh, tj smanjuje pritisak. Mjerač pritiska sluša na stetoskopu čiji je vrh pritisnut na arteriju niže trake (obično na unutrašnjem dijelu podlaktice niže laka). Nikakav zvuk se ne čuje dok ne krene krv kroz opstruiranu arteriju, a krv će krenuti kada pritisak u gumenoj traci spadne ispod sistolnog pritiska. Zato se pritisak u traci pri prvom zvuku uzima kao sistolni pritisak.
- Kako se pritisak u traci i dalje smanjuje tok je i dalje turbulentan dok se ne smanji dovoljno da prestane da opstruira protok u arteriji. Pritisak u traci, kada prestane karakteristični zvuk, se smatra dijastolnim pritiskom.

- Kod odrasle zdrave osobe sistolni pritisak je oko 120 tora, a dijastolni oko 80 tora. Prema tome, prosječan pritisak krvi kad napušta srce (a to znači kad ulazi u luk aorte koja je direktno vezana za srce) je oko 100 tora.
- Radi gubitka energije uslijed trenja pritisak krvi opada duž komplikovanog sistema arterija, kapilara i vena. Koliki je pad pritiska u aorti? Ukupni protok krvi u ljudskom tijelu (koje nije aktivno) je oko $80 \text{ cm}^3/\text{s}$ ili $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Radujmo se da je radijus aorte 1cm pa iz Poazove jednačine dobijemo da je :
- $(p_1 - p_2)/l = 8\eta Q / \pi r^4 = 80 \text{ Pa/m} = 0,6 \text{ tora/m}$
- Ovo je pad pritiska na svaki metar dužine cijevi. Zato je u aorti, prije nego se ona počne račvati u velike arterije (na udaljenosti oko $0,4\text{m}$) pad pritiska zanemarljiv u poređenju sa srednjim pritiskom krvi koja napušta srce.

Pad pritiska u krvotoku

- Dalje duž sistema krvotoka pad pritiska je evidentan. Nakon što prođe kroz velike arterije, pritisak je oko 90 tora, a nakon prolaska kroz male arterije, tzv. arteriole, pritisak je samo 25 tora. Kad konačno stigne do vena, krv ima pritisak od svega 10 tora ili manje.
- Slika prikazuje vrijednosti srednjeg pritiska obzirom da postoje neke varijacije koje su posljedica otkucaja srca. Ovi otkucali, tj. kontrakcije uzrokuju da pritisak u aorti i velikim arterijama oscilira između 120 i 80 tora. U manjim krvnim sudovima ove varijacije se smanjuju dok ih u kapilarima uopšte i nema – tok krvi je ravnomjeran.

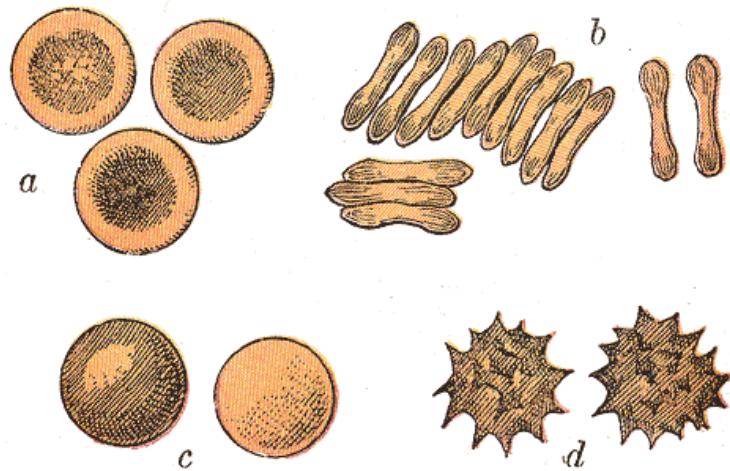




Neke tipične vrijednosti koeficijenta viskoznosti

Fluid (temperature in $^{\circ}\text{C}$)	Coefficient of Viscosity, η ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) [†]
Water (0°)	1.8×10^{-3}
(20°)	1.0×10^{-3}
(100°)	0.3×10^{-3}
Whole blood (37°)	$\approx 4 \times 10^{-3}$
Blood plasma (37°)	$\approx 1.5 \times 10^{-3}$
Ethyl alcohol (20°)	1.2×10^{-3}
Engine oil (30°) (SAE 10)	200×10^{-3}
Glycerine (20°)	1500×10^{-3}
Air (20°)	0.018×10^{-3}
Hydrogen (0°)	0.009×10^{-3}
Water vapor (100°)	0.013×10^{-3}

[†] $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$



Crvena krvna zrnca kod čovjeka

- a. Kad se gledaju površinski
- b. Kad se gledaju iz profila.
- c. Sferno zaobljeni u vodi.
- d. Nagriženi u slanom rastvoru.

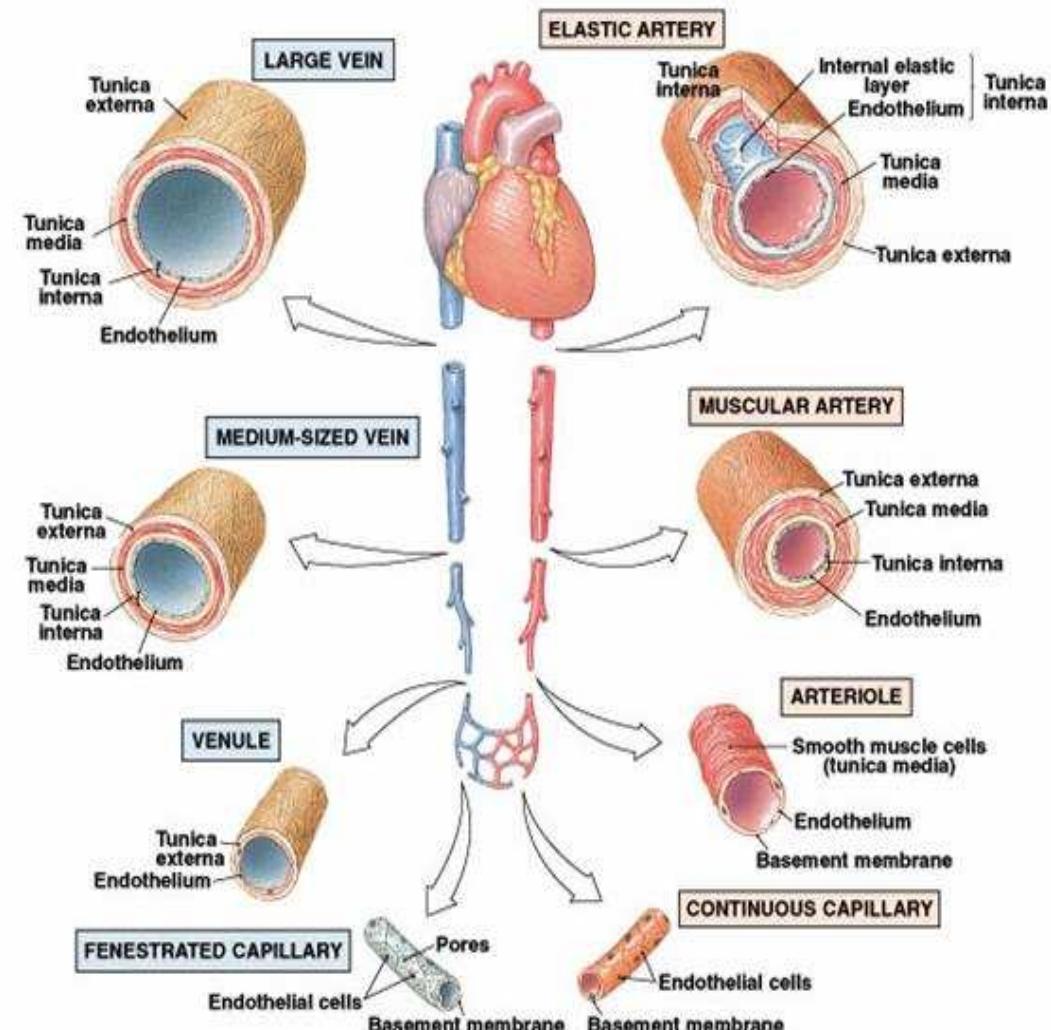
KARDIOVASKULARNI SISTEM (KVS)

Funkcija i osnovni dijelovi KVS

KVS ima funkciju transportnog sistema u organizmu. Njime se doprema "gorivo" iz hrane i kiseonik iz vazduha u ćelije, gde dolazi do sagorevanja i oslobođanja energije, potrebne za funkcionisanje organizma. Istovremeno, krv odnosi produkte sagorijevanja iz ćelije (CO_2 i H_2O).

Kardiovaskularni sistem čine:

- 1. KRV**
- 2. KRVNI SUDOVI**
- 3. SRCE**



Source: M. Jouan, MSc. Thesis, 2005.

KRV

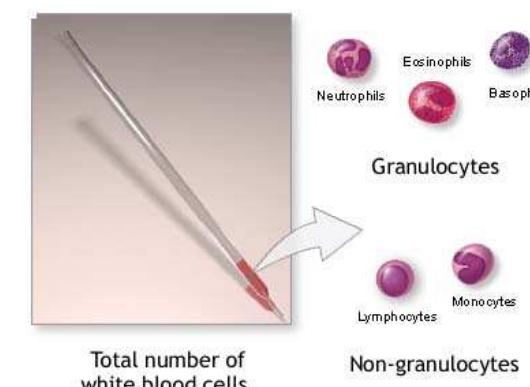
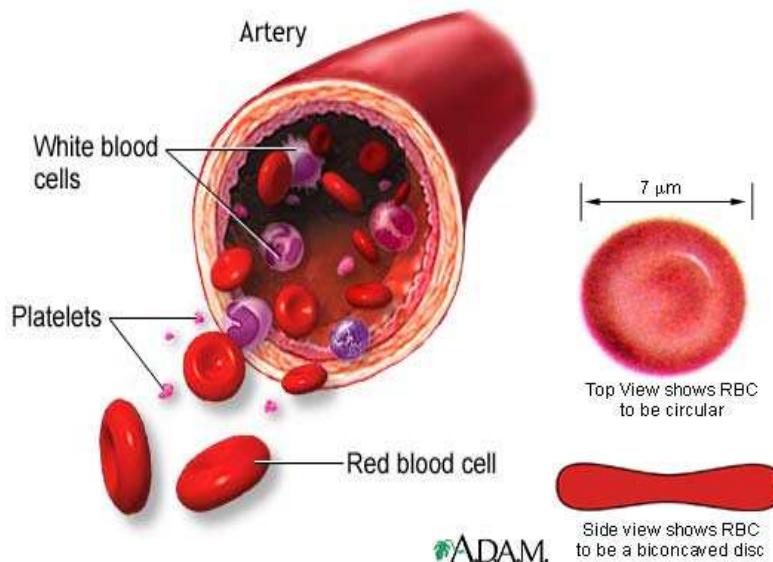
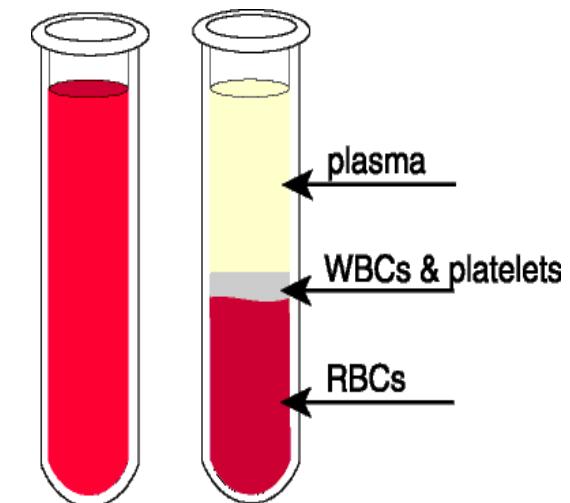
Krv predstavlja suspenziju krvnih tijela u plazmi. Masa krvi iznosi oko 7% ukupne mase organizma. Sastoji se od nekoliko komponenti:

Plazma - prozirna tečnost zapremine oko 55%

Eritrociti - bikonkavni diskovi dijametra oko 8 mm, zapremine 40 - 50% (**M** - oko $5,2 \times 10^6$ eritrocita/mm³, **F** - oko $4,7 \times 10^6$ eritrocita/mm³)

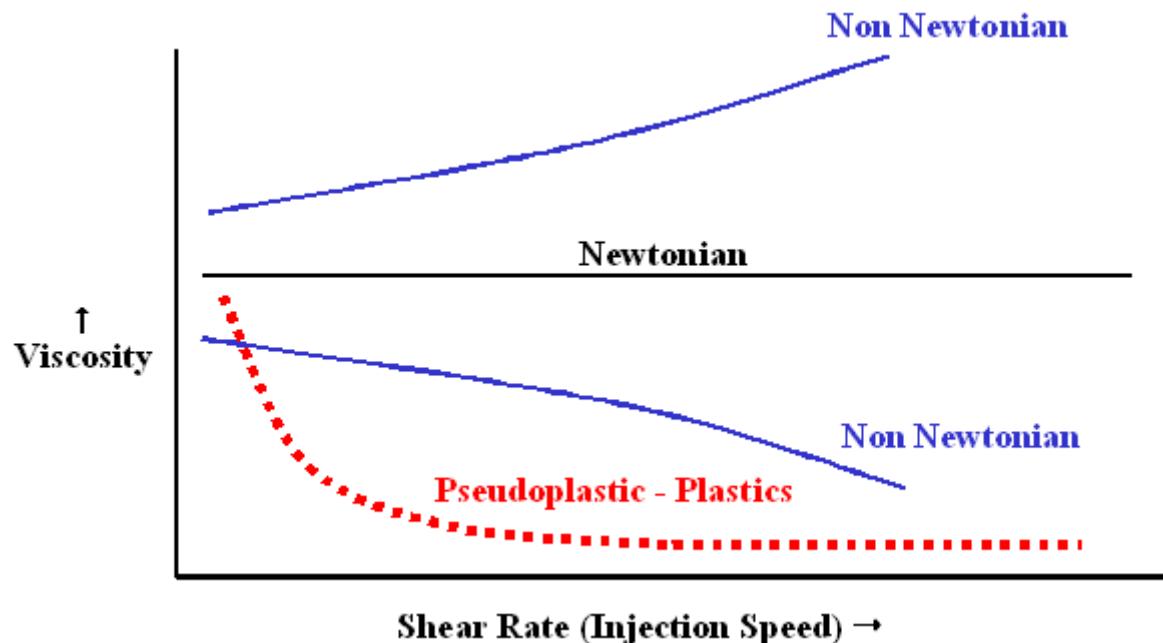
Leukociti – oblika amebe dimenzija od 9 - 15 mm, zapremina ispod 1% (oko 8000 leukocita/mm³ krvi)

Krvne pločice - dijametar od 1 - 4 mm, zapremina oko 0,13% (3×10^5 pločica/mm³)



KRV

- Viskoznost čistih homogenih tekućina ne ovisi o režimu proticanja-njutnovski fluidi. To su jednofazni sistemi
- Suspenzije ili disperzivni sistemi su dvofazni: jedna faza je tekućina, a druga je čvrsta susptanca koja je raspršena u obliku sitnih čestica u tečnoj fazi. Ta faza se zove disperzna faza, a tekućina disperzna sredina.



KRV

- Podjela prema veličini čestica disperzne faze:
- *Grubozraste suspenzije* ($d \geq 1$ nm)
- *Koloidne suspenzije* ($0,1 \leq d \leq 1$ nm)
- *Rastvori* ($d < 0,1$ nm)
- Krv je grubodisperzivni sistem i nenjutnovska tekućina
- Disperzna faza krvi je hematokrit (krvna tijela od kojih većinu čine eritrociti), a disperzna sredina je krvna plazma. Dijametar eritrocita je oko $5 \mu\text{m}$.

SRCE I KRVOTOK

Proticanje krvi ima uvijek isti smjer.

Jedan ciklus:

1. Lijevi atrijum (LA)

p oko 1 kPa (7,5 mm Hg)

2. Lijevi ventrikul (LV)

p oko 16 kPa (120 mmHg)

3. Protok krvi kroz veliki krvotok

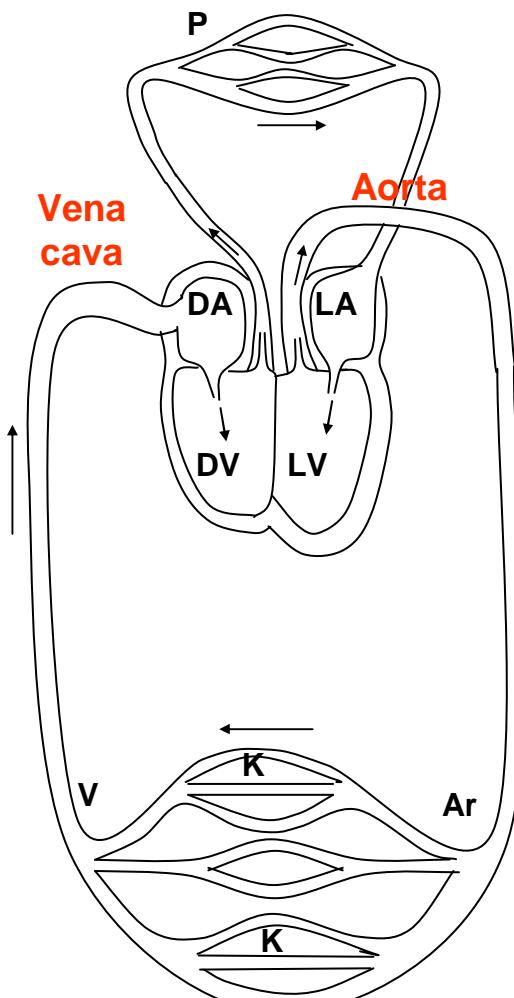
4. Desni atrijum (DA)

p oko 0,8 kPa (6 mmHg)

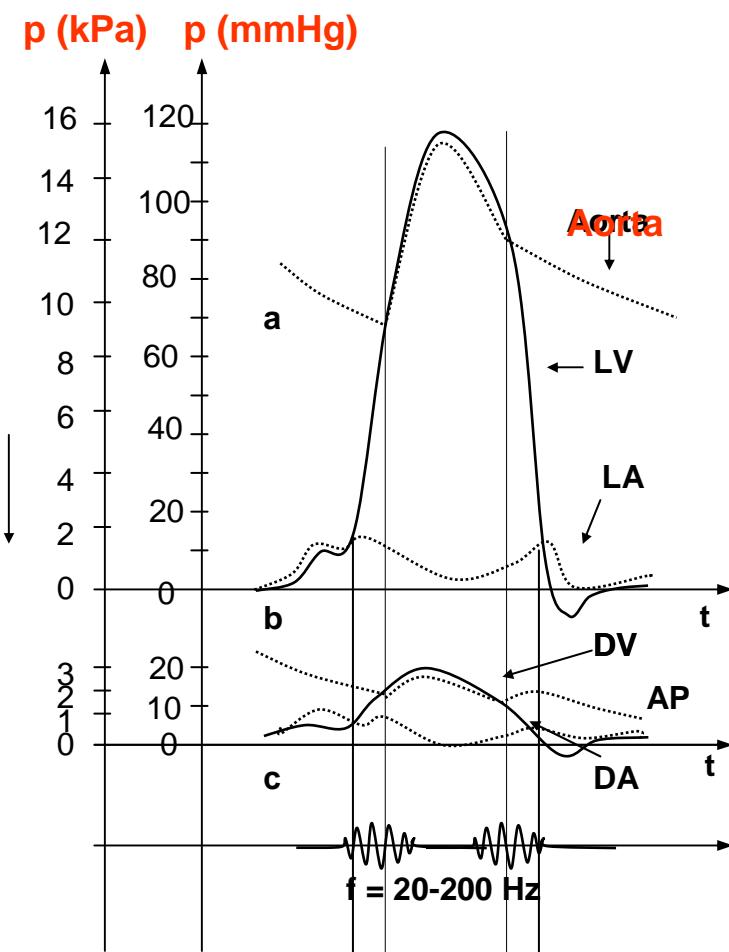
5. Desni ventrikul (DV)

p oko 3 kPa (20 mmHg)

6. Protok krvi kroz mali krvotok

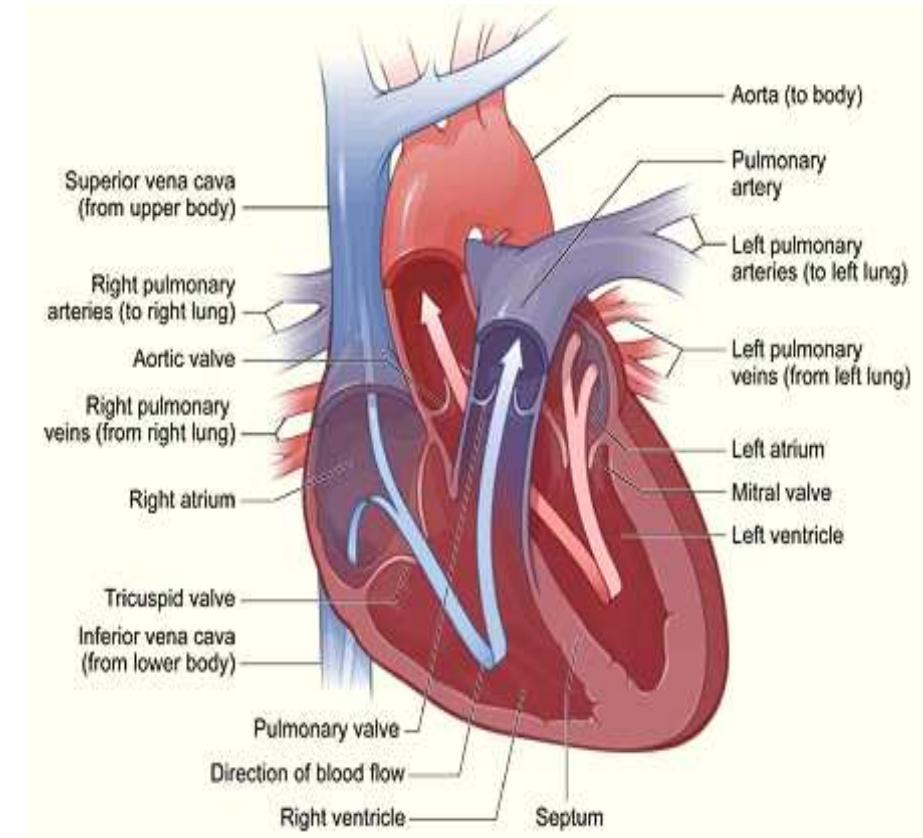
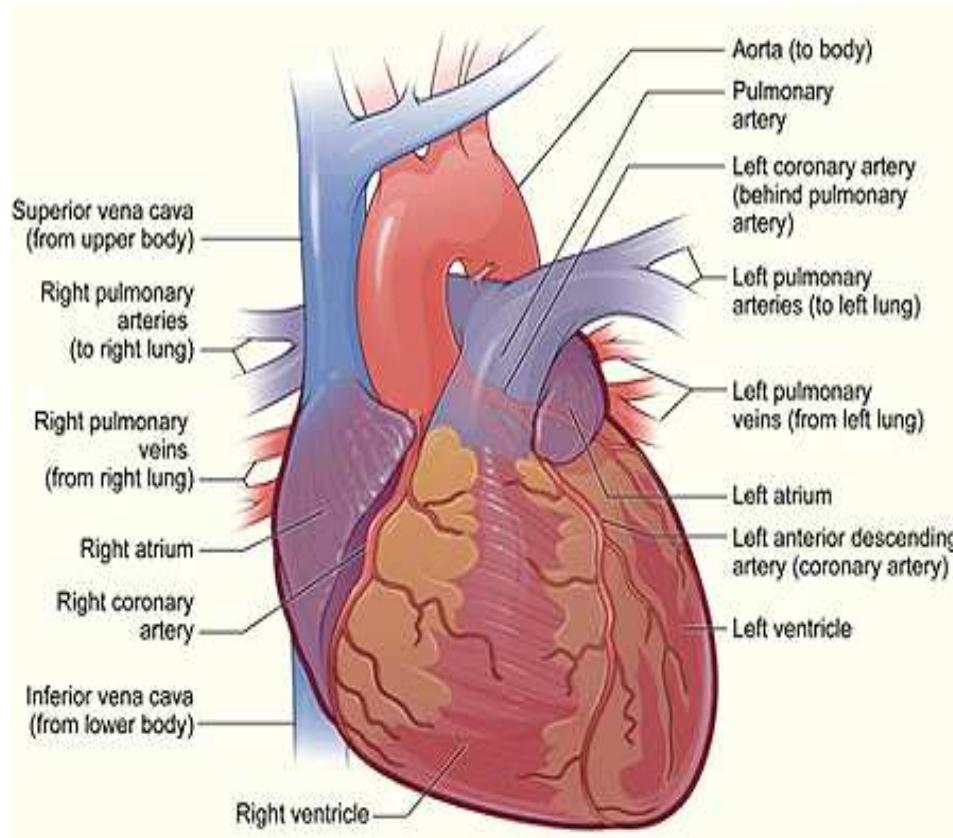


Elementi KVS – srce, sistemski i plućni krvotok.

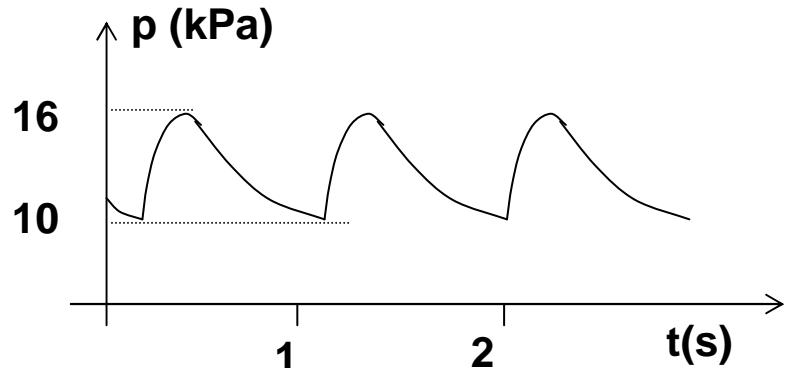


Promjena pritiska u aorti, lijevom atriju i ventrikulu (a) i plućnoj arteriji, desnom atriju i ventrikulu (b) u toku jednog srčanog ciklusa; c je fonogram.

SPOLJAŠNJA I UNUTRAŠNJA STRUKTURA SRCA



Pulsni talasi i elastičnost krvnih sudova



Pulsni oblik kretanja krvi.

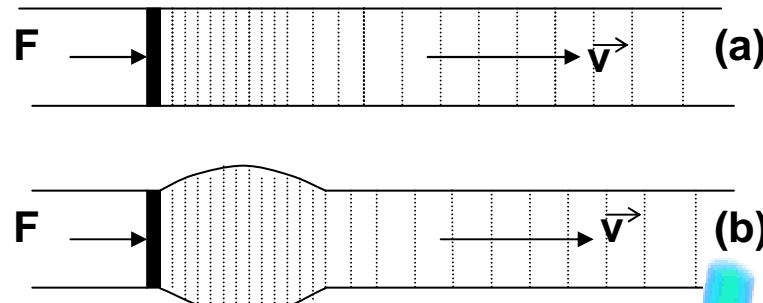
Dužina arterijskog stabla iznosi najviše 1,4 m pa pulsni talas stiže do kraja arterijskog stabla u vremenu $t = s/u = 1,4 \text{ m} / 5 \text{ ms}^{-1} = 0,28 \text{ s}$, koje odgovara trajanju sistole. Dakle, dok traje kontrakcija ventrikula pulsni talas prođe kroz cijelo arterijsko stablo i svi krvni sudovi su rastegnuti.

Elastičnost krvnih sudova pomaže proticanju krvi kroz krvne sudove.

Foot vein supporting column of blood 1.5 m (150 cm) in height

Fig. 10-31, p. 367

Foot vein supporting column of blood 34 cm in height



Kretanje tečnosti kroz cijevi ne-elasticnih (a) i elastičnih zidova (b).

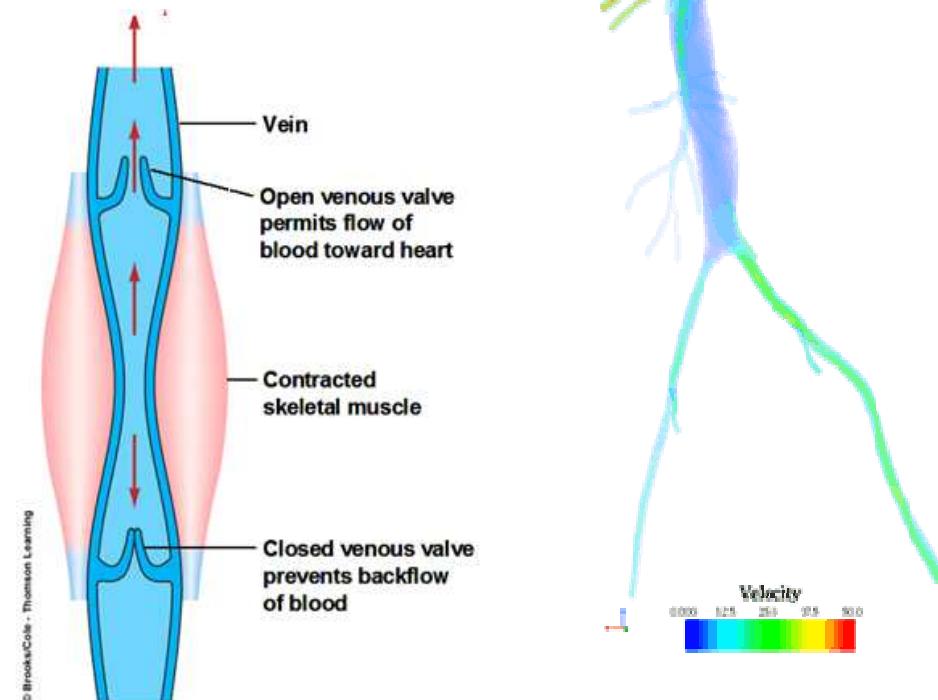
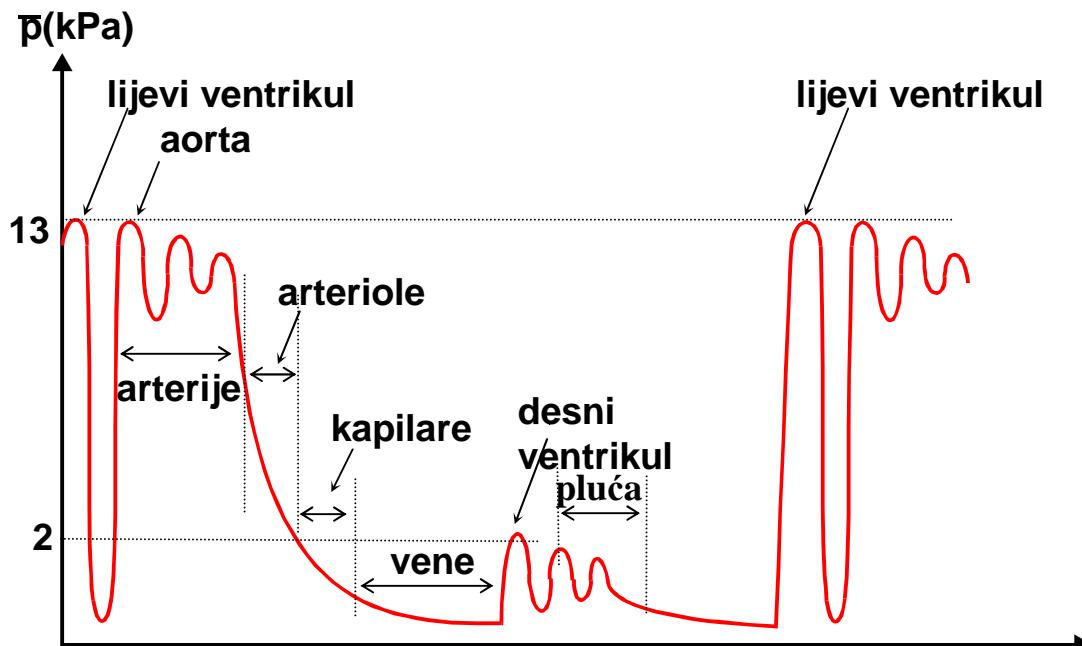


Fig. 10-32, p. 368

Mehanički rad srca

Udarni volumen srca iznosi $V = 70 - 80 \text{ ml}$ i prolazi kroz oba krvotoka istovremeno.



Promjena pritiska krvi duž krvnog stabla.

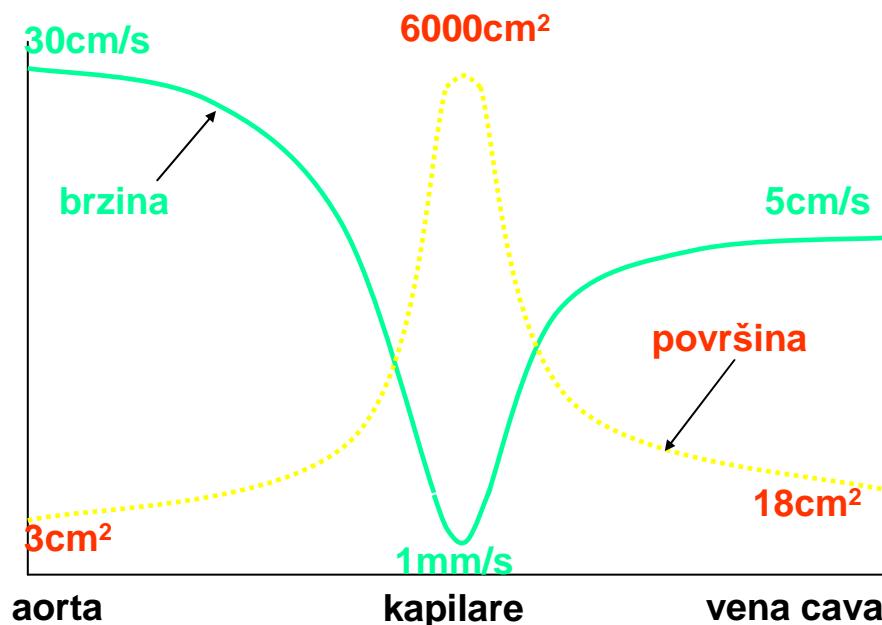
$$A = p_L \cdot V + \frac{p_L \cdot V}{7} + \left(\frac{\rho V v^2}{2} \right)_L + \left(\frac{\rho V v^2}{2} \right)_D = 1,05 \text{ J}$$

$$P = \frac{A}{T} = \frac{1,05 \text{ J}}{(6/7) \text{ s}} = 1,2 \text{ W}$$

Rad i snaga srca. Srce svojim mehaničkim kontrakcijama mora da generiše energiju koja se troši na nekoliko načina:

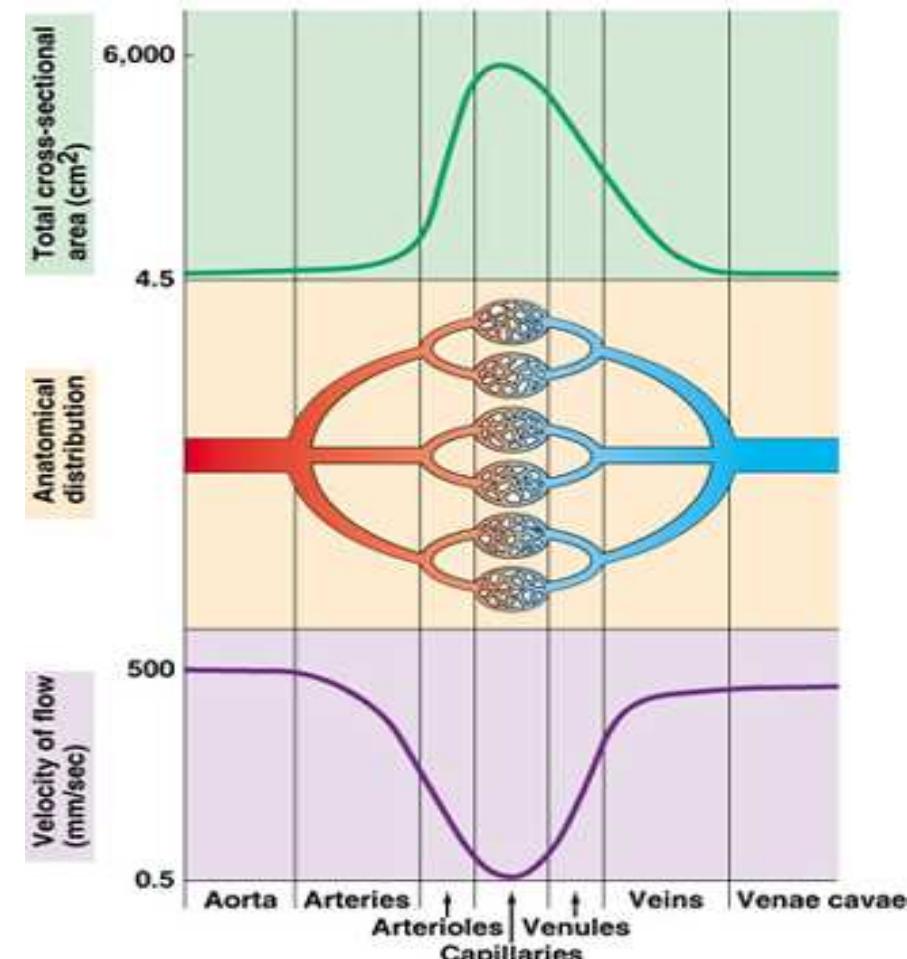
1. Rad na prebacivanju 70 ml krvi od lijevog ventrikula do desnog atrijuma kroz sistemski krvotok i od desnog ventrikula do lijevog atrijuma kroz pulmonalni krvotok
2. Rad na prebacivanju krvi iz atrijuma u ventrikule (ta energija je mala pa se može zanemariti)
3. Kinetička energija toka krvi; ova energija je približno ista u oba krvotoka.

Brzina proticanja krvi kroz krvne sudove

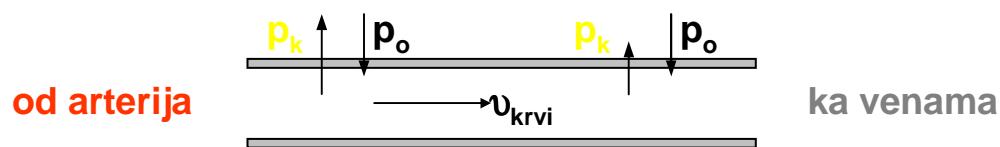
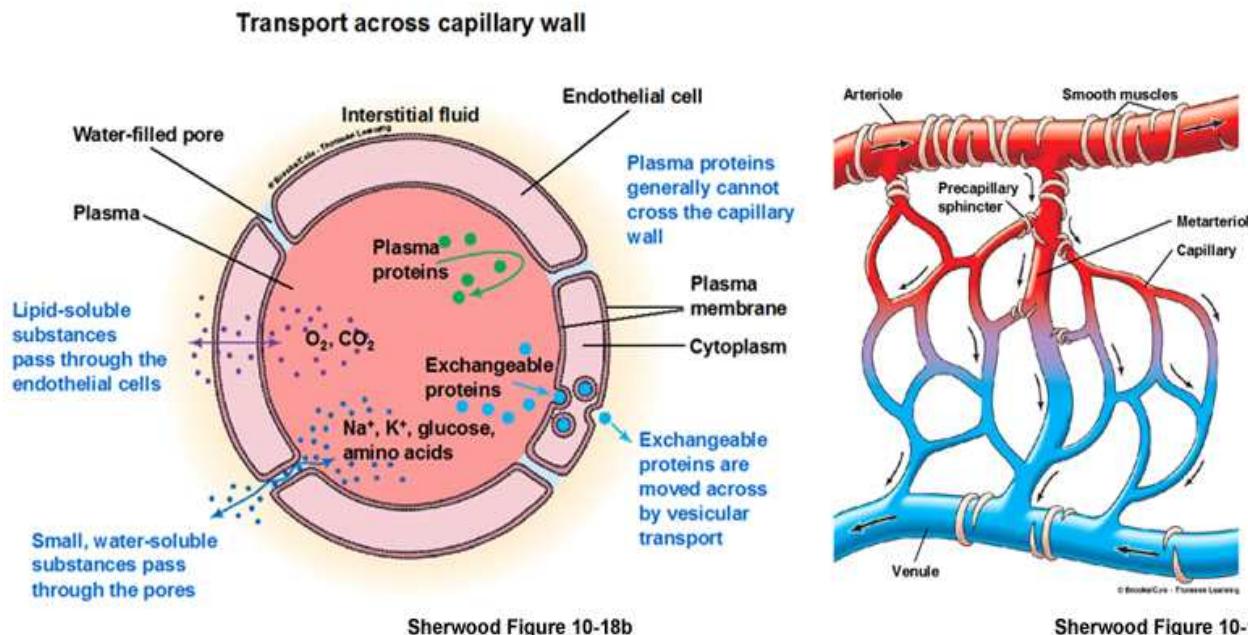


Promjena brzine krvi duž krvnog stabla

Za brzinu su date srednje vrijednosti. S obzirom na pulsni karakter krvotoka, brzina u aorti, na primjer, varira u toku jednog srčanog ciklusa od $0 - 0,5 \text{ ms}^{-1}$. Kritična brzina krvi u aorti iznosi $0,4 \text{ ms}^{-1}$, što znači da će u toku trajanja sistole u jednom dijelu kretanje krvi u aorti biti turbulentno.



Karakteristike protoka krvi kroz kapilare



Simultano dejstvo krvnog i osmotskog pritiska duž kapilare.

Osmotski pritisak p_o je oko 3 kPa (20 mmHg), p_k vrijednost mijenja od 3,3 kPa (25 mmHg) na arterijskom kraju, do 1,3 kPa (10 mmHg) na venskom kraju.

Najmanji krvni sudovi su kapilare (dijametar ~ 20 μm).

Njihov ukupni poprečni presjek je ogroman - oko 6000 cm^2 jer ih ima više miliona.

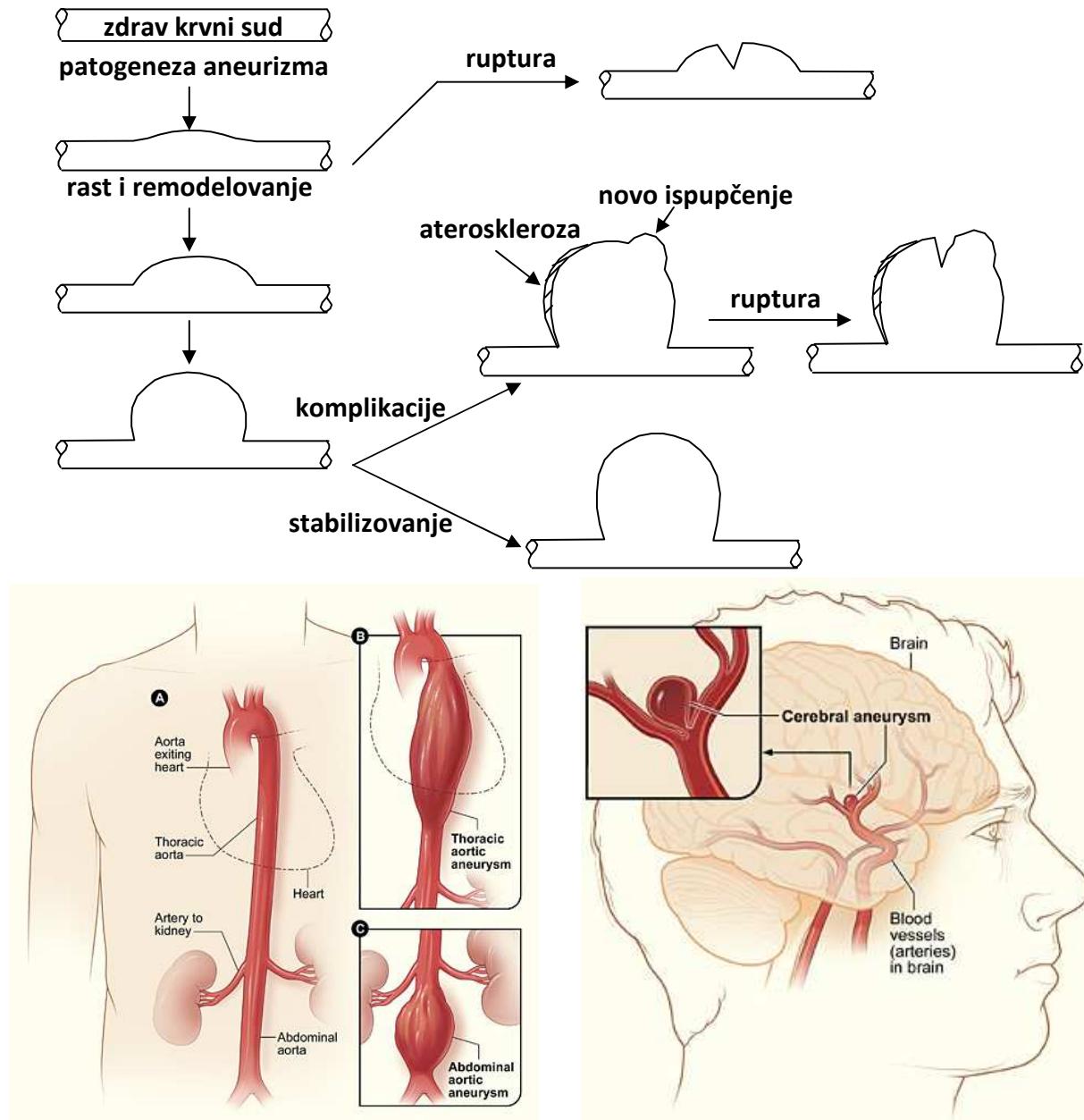
Na presjeku aktivnog mišića kapilara je oko $190/\text{mm}^2$.

U 1 kg mišićne mase ukupna dužina kapilara iznosi oko 190 km, a površina zidova, kroz koje se odvija razmjena materije, oko 12 m^2 .

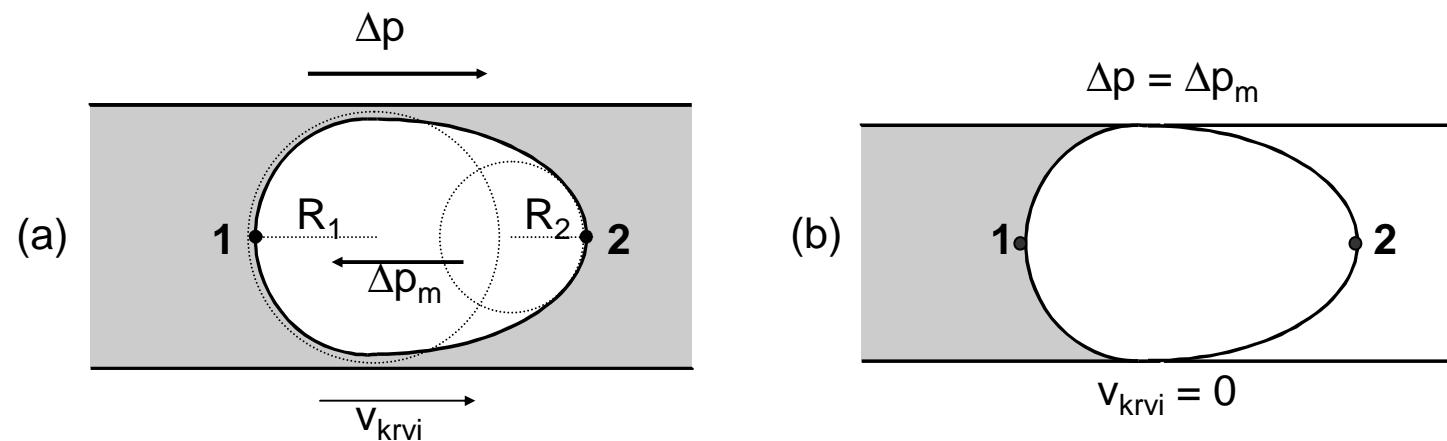
Na taj način su ćelije mišića u dobrom kontaktu sa kapila-rama. U srčanom mišiću je skoro svaka ćelija u kontaktu sa kapilarom.

Primjer 3. Formiranje aneurizma

Mada se aneurizmi mogu javiti duž čitavog vaskularnog stabla, najveći broj se javlja na cerebralnim arterijama i abdominalnoj aorti.



Primjer 4. Gasna embolija



Oblik mjeđura vazduha u krvnom sudu kroz koji protiče krv (a); u uzanom krvnom sudu dolazi do začepljenja (b).

$$\Delta p_m = \frac{2\tau}{R_1} - \frac{2\tau}{R_2}$$