

Reologie krevního oběhu

1. Základní fyzikální zákony tekutin

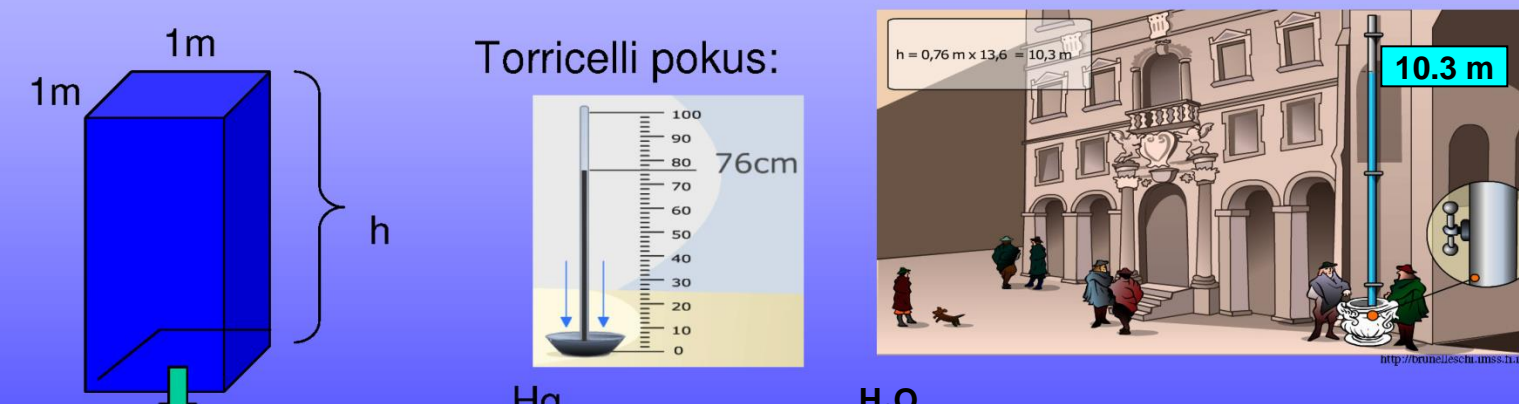
Paskalův zákon

Tlak v tekutinách vzrůstá s hloubkou pod volným povrchem a má ve všech bodech téže horizontální roviny stejnou velikost.



$p = h \cdot \rho \cdot g$

h = výška
 ρ = hustota
 g = gravitační zrychlení



Torricelli pokus:

$h = 0,76 \text{ m} \times 13,6 = 10,3 \text{ m}$

1m
1m
1m
h

Hg

H₂O

10.3 m

Pa

mm Hg

mm H₂O

133,322 Pa = 1 mm Hg

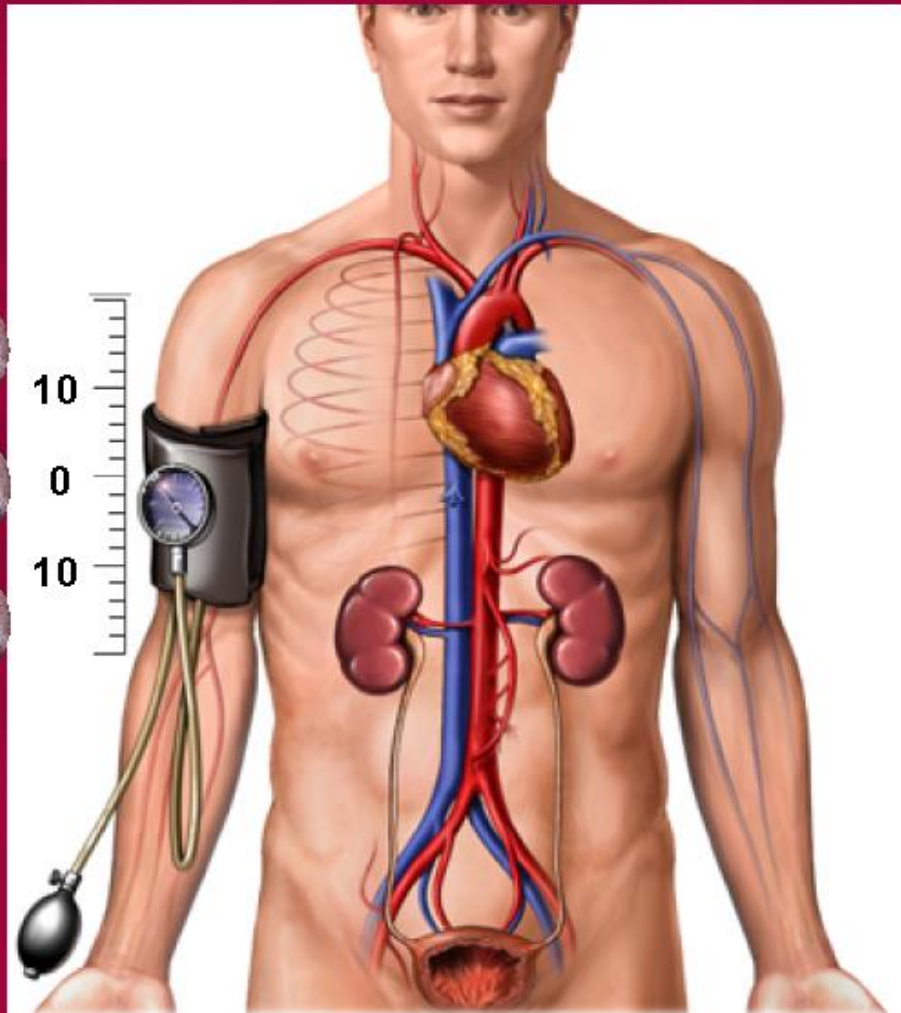
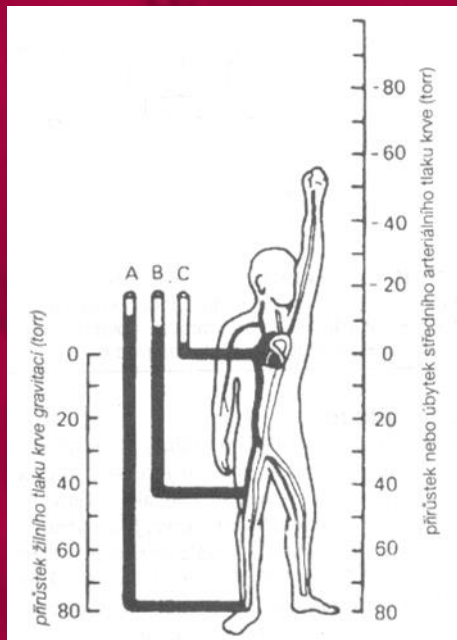
760 mmHg = 1 atm = 10.3 m H₂O

Vliv gravitace na arteriální a venózní tlak

- vliv hydrostatického tlaku krve

na každých 10 cm

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho_{\text{krve}} \cdot g = 0,1 \cdot 1\,065 \cdot 9,81 \\ = 1\,045 \text{ Pa} = 7,8 \text{ mm Hg}$$



Laplaceův zákon

Vztah mezi tlakem (P) uvnitř dutého tělesa a napětím T ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$) v jeho stěně:

$$T = \frac{P}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}$$

R_1 and R_2 jsou největší a nejmenší poloměr křivosti

Céva:

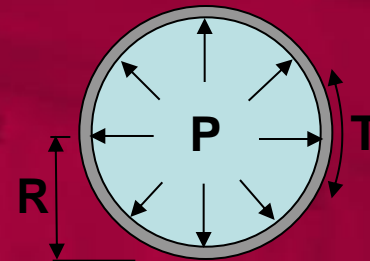
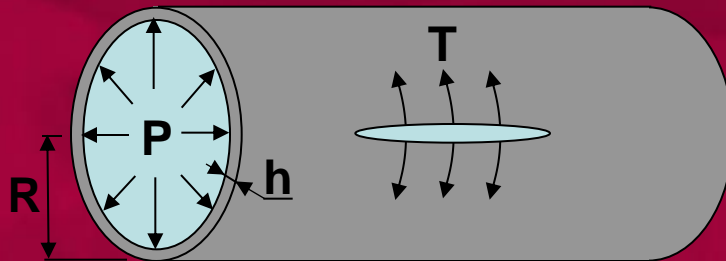
$$R_2 = \infty \Rightarrow$$

$$T = P \cdot R$$

Koule:

$$R_1 = R_2 \Rightarrow$$

$$T = P \cdot R/2$$



Pro cévu s tloušťkou stěny h [m]):
 $T = P \cdot R / h$ [N/m^2]

Charakteristika cév

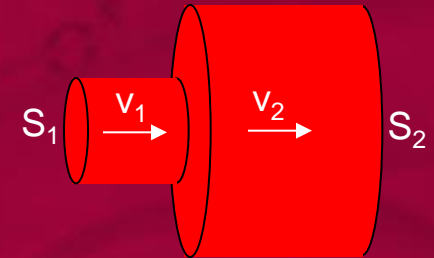
	P	R	P.R	h	P.R/h
Céva	Tlak (kPa)	Poloměr	Tečné napětí (N/m)	Tloušťka stěny	Tečné napětí (N/m ²)
aorta a velké artérie	13,3	13 mm nebo méně	170	2 mm	85000
malé artérie	12	5 mm	60	1 mm	60000
arterioly	8	150–62 μm	1,2–0,5	20 μm	40000
kapiláry	4	4 μm	$1,6 \cdot 10^{-2}$	1 μm	16000
žilky	2,6	10 μm	$2,6 \cdot 10^{-2}$	2 μm	13000
žíly	2	200 μm a více	0,4	0,5 mm	800
vena cava	1,33	16 mm	21	1,5 mm	14000

Rovnice kontinuity

Součin plochy průřezu a rychlosti průtoku krve tímto průřezem je ve všech místech cévy konstantní.

$$Q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \text{konstanta}$$

v – rychlost S – plocha



Průměrná rychlost krve v cévách

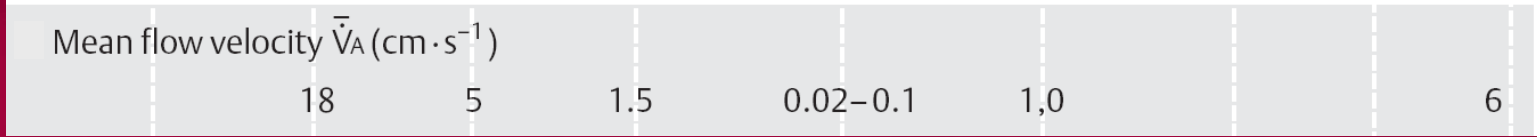
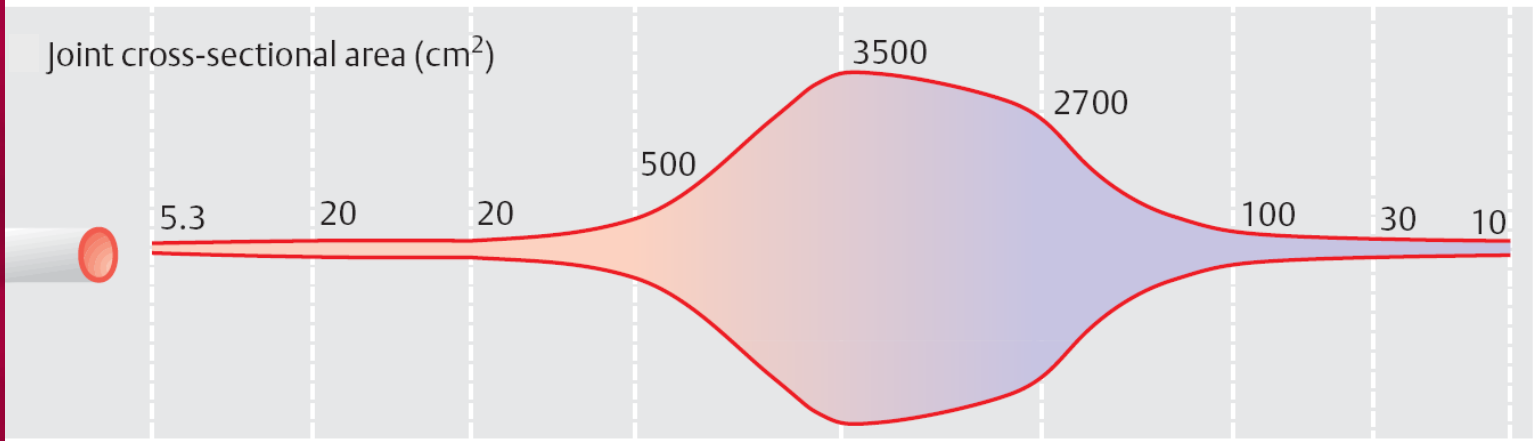
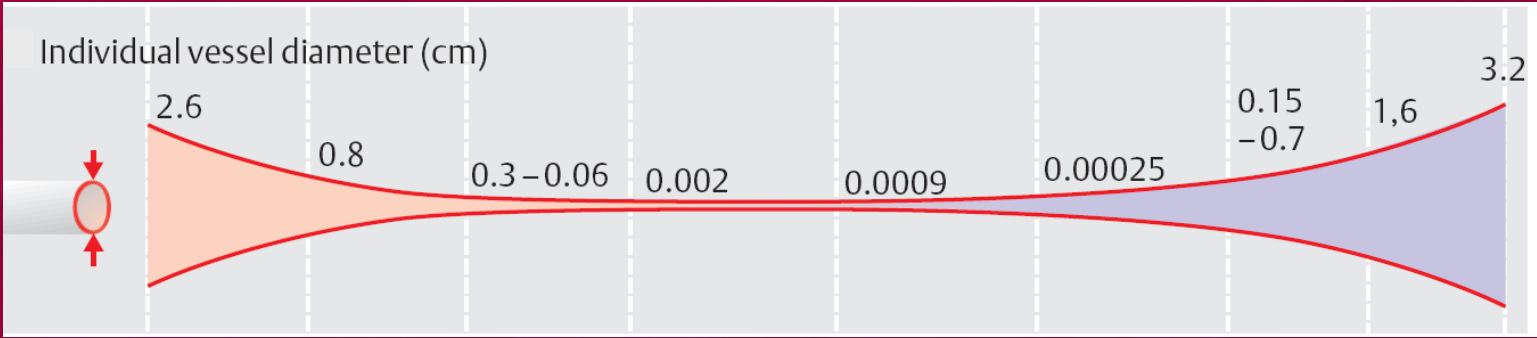
$$v = \frac{Q}{S}$$

$$Q_{rest} \approx 5.6 \text{ l/min}$$

céva	průměr	počet	celková plocha	rychlost
aorta	~ 2.6 cm	1	~ 5.3 cm ²	~ 18 cm/s
arterioly	20-50 μm	~ 5×10 ⁶	~ 60 cm ²	~ 1.5 cm/s
kapiláry	4-9 μm	~ 5×10 ⁹	~ 2000 cm ²	~ 0.04 cm/s
venuly	~ 20 μm	~ 32×10 ⁶	~ 100 cm ²	~ 1 cm/s
vena cava	~ 3 cm	2	~ 14 cm ²	~ 7 cm/s

Vztah mezi průměrem cév a rychlostí krevního průtoku

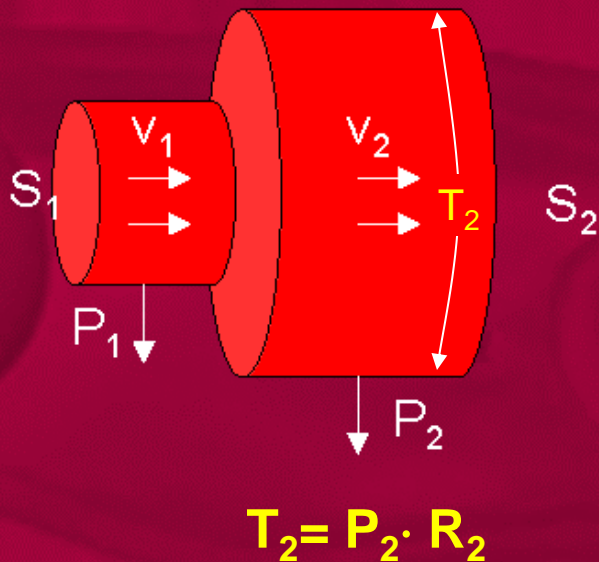
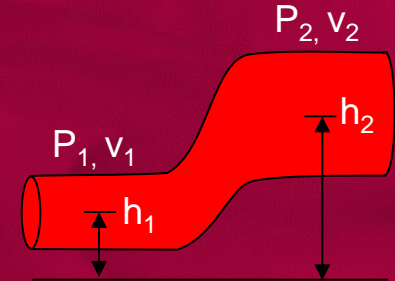
aorta	artérie	arterioly	kapiláry	venuly	vény	v. cava
--------------	----------------	------------------	-----------------	---------------	-------------	----------------



Bernoulliho rovnice

- zákon zachování energie pro nestlačitelnou kapalinu:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + h \cdot \rho \cdot g + P = \text{konstanta}$$



Důsledek při aneurysmatu aorty

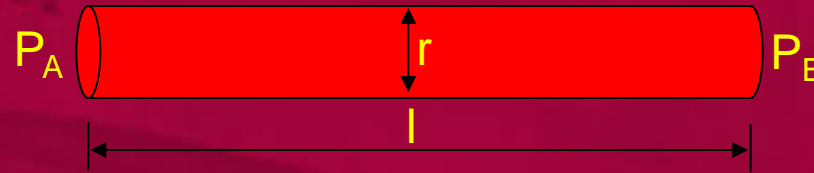
$S_1 v_1 = S_2 v_2$ a je-li $S_1 < S_2$, musí platit: $v_1 > v_2$

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \cancel{h \cdot \rho \cdot g} + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \cancel{h \cdot \rho \cdot g} + P_2$$

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + P_2$$

Pro $v_2 < v_1 \Rightarrow P_2 > P_1$

Poiseuillův - Hagenův zákon



$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot r^4}{8 \cdot l \cdot \eta}$$

Objemový průtok (Q) v rigidní trubici je přímo úměrný tlakovému rozdílu na začátku a konci trubice ($\Delta P = P_A - P_B$) čtvrté mocnině jejího poloměru (r) a nepřímo úměrný délce trubice (l) a viskozitě proudící kapaliny (η).

Platnost.

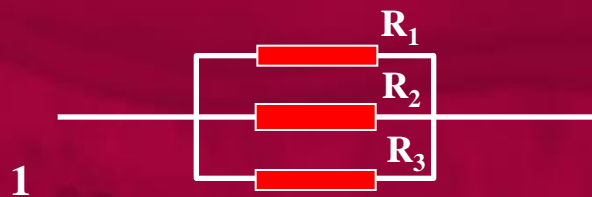
- pro stacionární proudění newtonovských tekutin, u kterých je viskozita konstantní a nezávislá na rychlosti proudění.

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot r^4}{8 \cdot l \cdot \eta} \iff Q = \frac{\Delta P}{R_c}$$

Cévní rezistence (R_c) vzniká následkem vnitřního tření mezi kapalinou a stěnou cévy.

$$R_c = \frac{\Delta P}{Q} = \frac{8 \cdot l \cdot \eta}{\pi \cdot r^4}$$

Paralelní zapojení odporů



$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

pro $R_1=R_2=R_3=R_n$

$$R_c = R/n$$

Sériové zapojení odporů

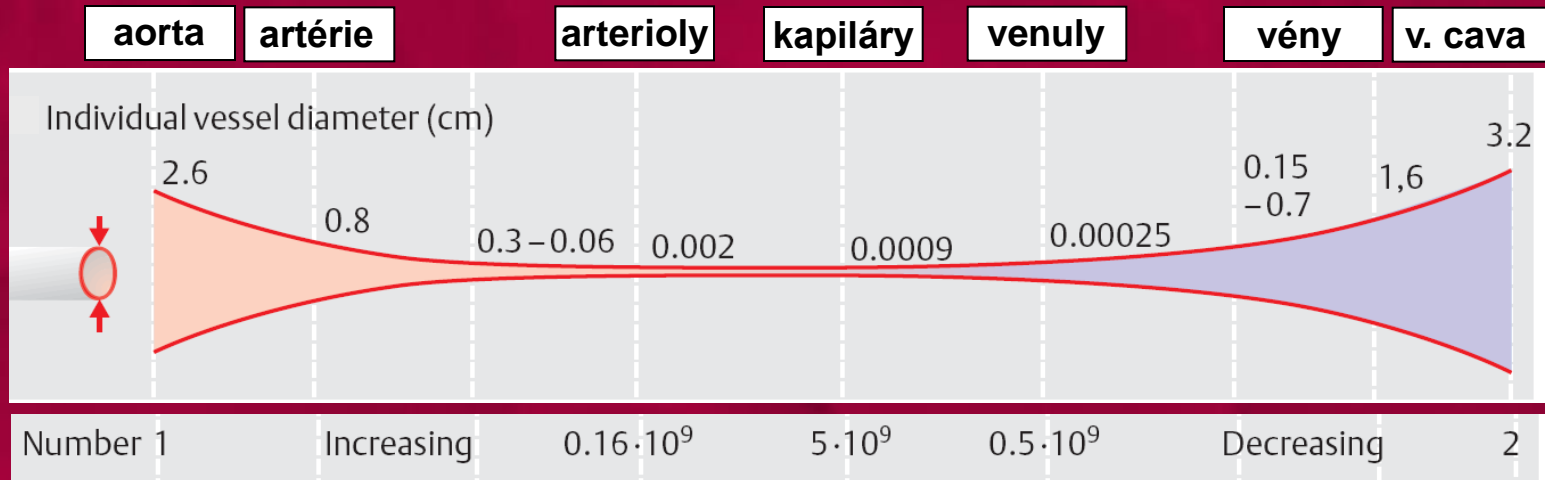


$$R_c = R_1 + R_2 + \dots$$

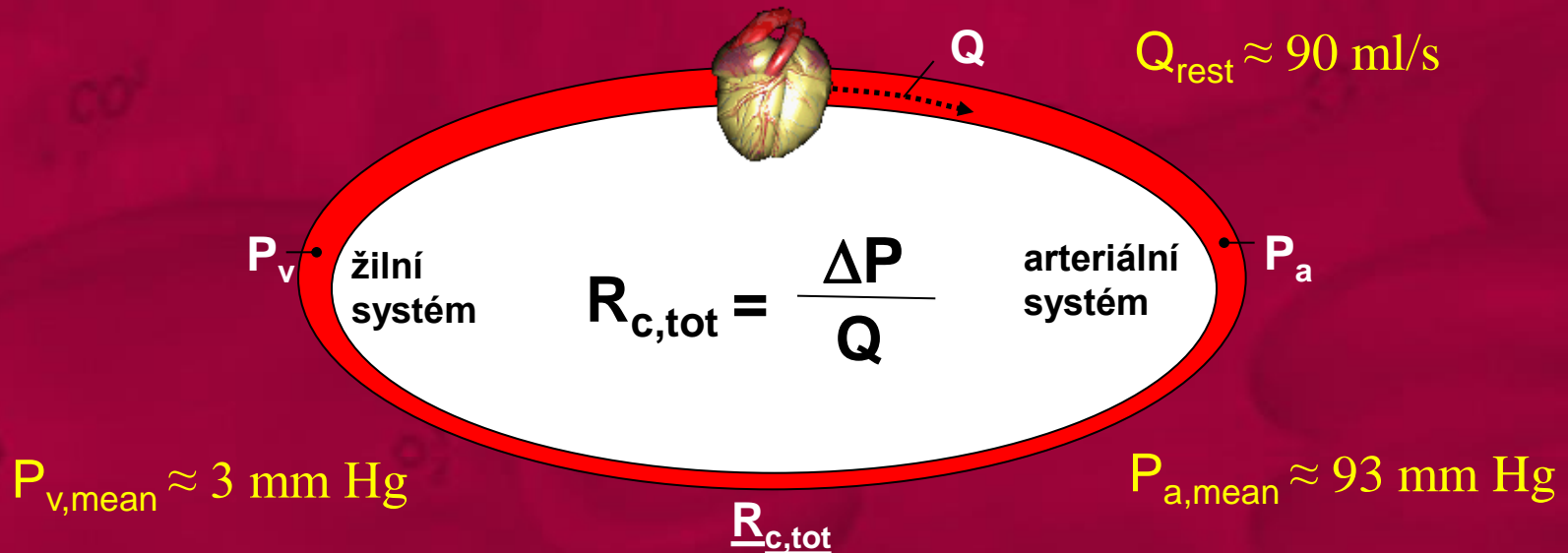
pro $R_1=R_2=R_3=R_n$

$$R_c = R \cdot n$$

Vztah mezi průměrem cév a cévní rezistencí



Celková cévní rezistence ($R_{c,tot}$)



$$R_{c,tot} = \frac{\Delta P}{Q} = \frac{P_a - P_v}{Q} \approx \frac{P_a}{Q} = \frac{93}{90} \approx 1 \frac{\text{mmHg s}}{\text{ml}}$$

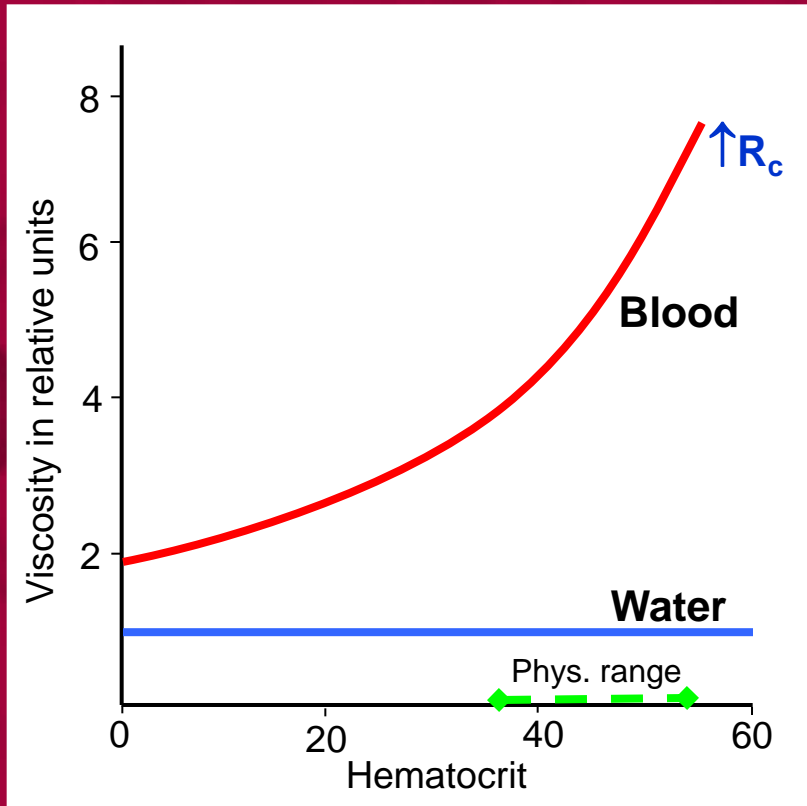
Pro konstantní Q : $\uparrow R_{c,tot} \Rightarrow \uparrow P_a \Rightarrow \text{hypertenze, ...}$

2. Reologické vlastnosti krve a cév

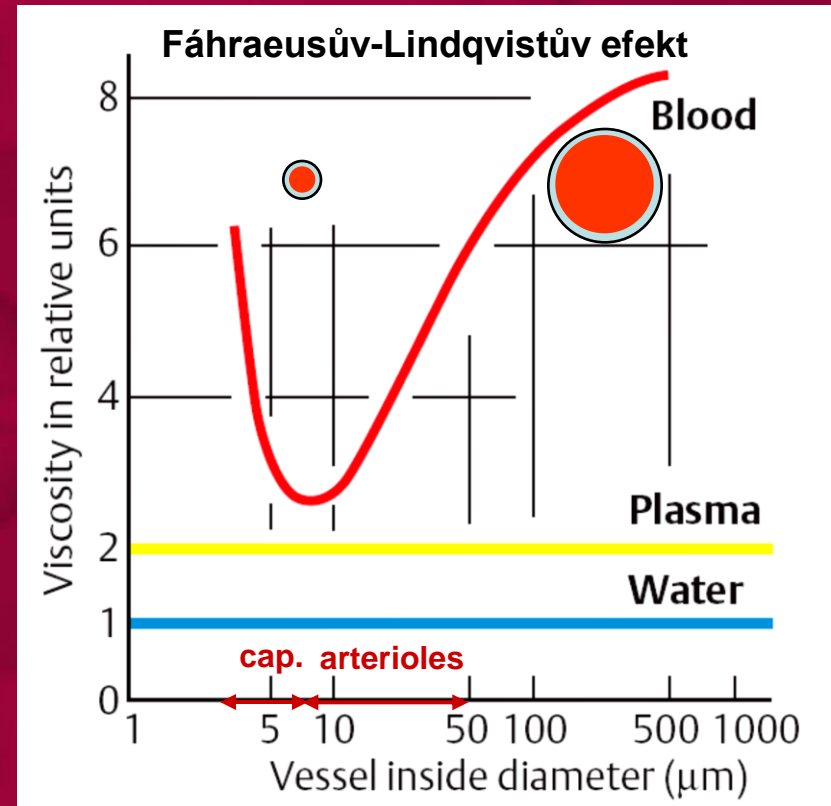
Viskozita krve

$$R_c = 8 \cdot l \cdot \eta / (\pi \cdot r^4)$$

Vliv hematokritu



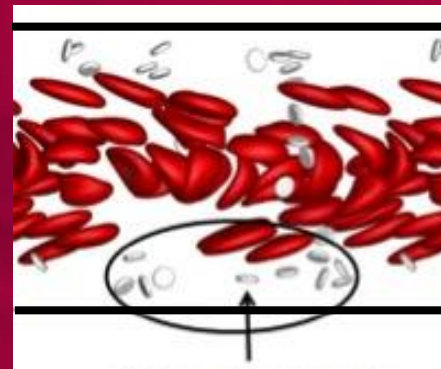
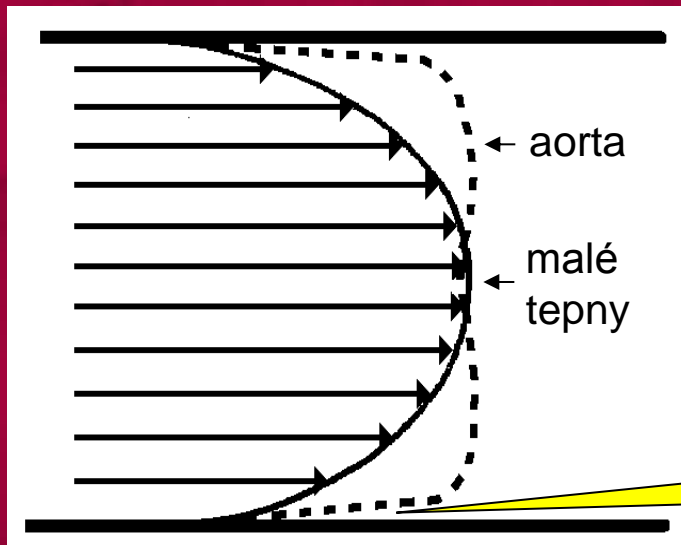
Vliv poloměru cév



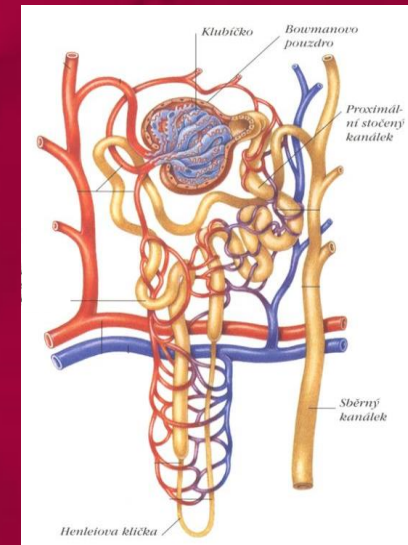
Další faktory zvyšující viskozitu krve:

- pokles rychlosti proudění
- zmnožení plazmatických bílkovin

Rychlostní profil toku krve v cévách



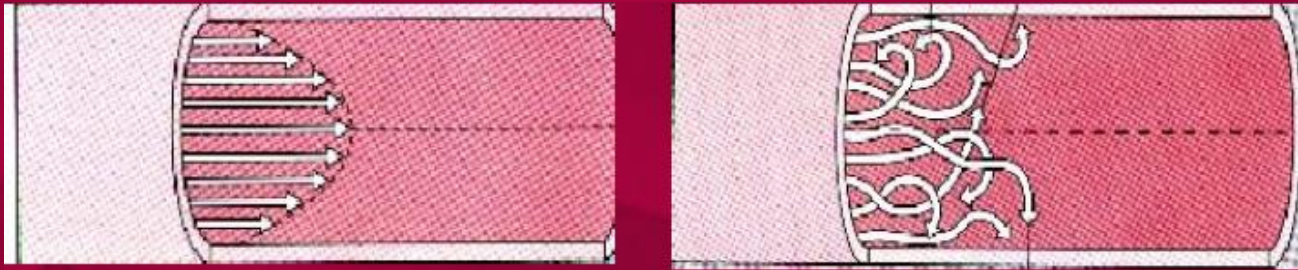
plasma-skimming



- V malých tepnách má rychlostní profil parabolický tvar, ve velkých pak pístový tvar.
- Prostor kolem stěn cév obsahuje méně erytrocytů.

Laminární a turbulentní proudění

Rychlostní profil při laminárním a turbulentním proudění



Charakter proudění určuje Reynoldsovo číslo

laminární proudění

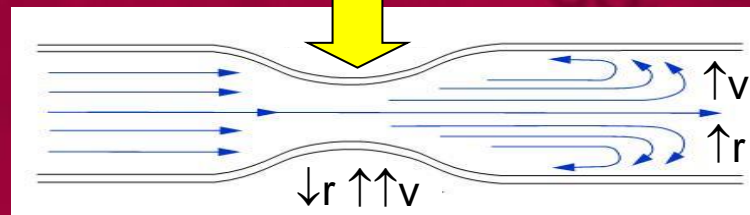
$Re < 2000$

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot r}{\eta}$$

turbulentní proudění

$Re > 3000$

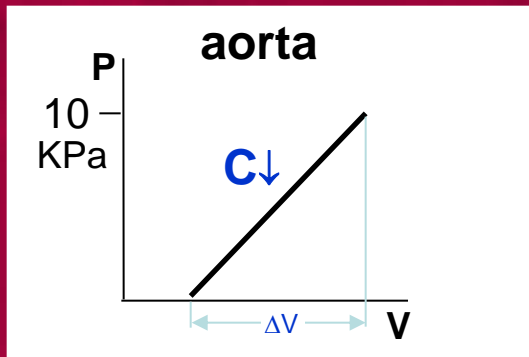
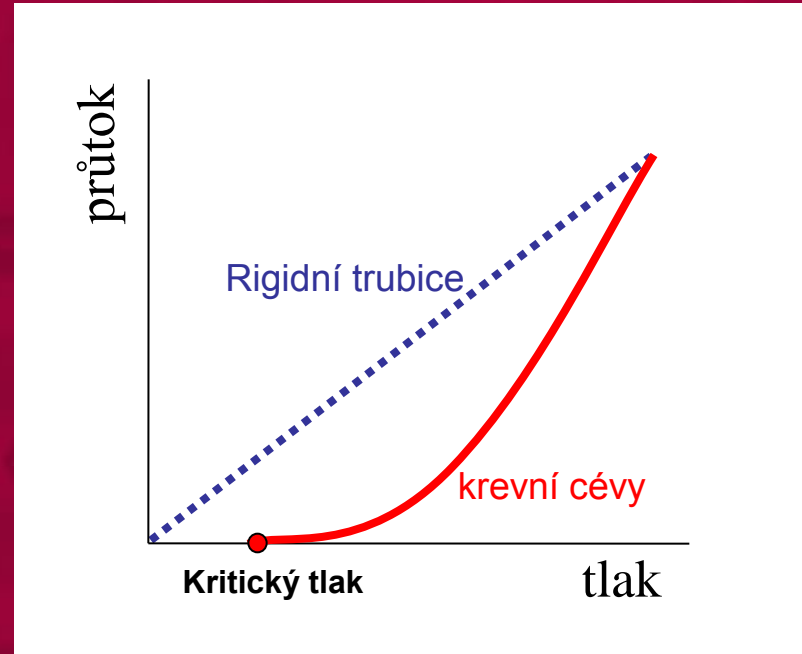
Náhlá změna průřezu cévy



$\uparrow Re \Rightarrow \uparrow R_c$

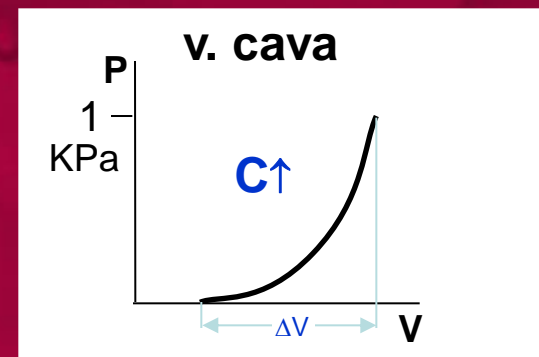
Patologické stavy způsobující turbulentní proudění: stenóza, ateroskleróza, aneurisma, rozdělení cév.

Elasticita cév

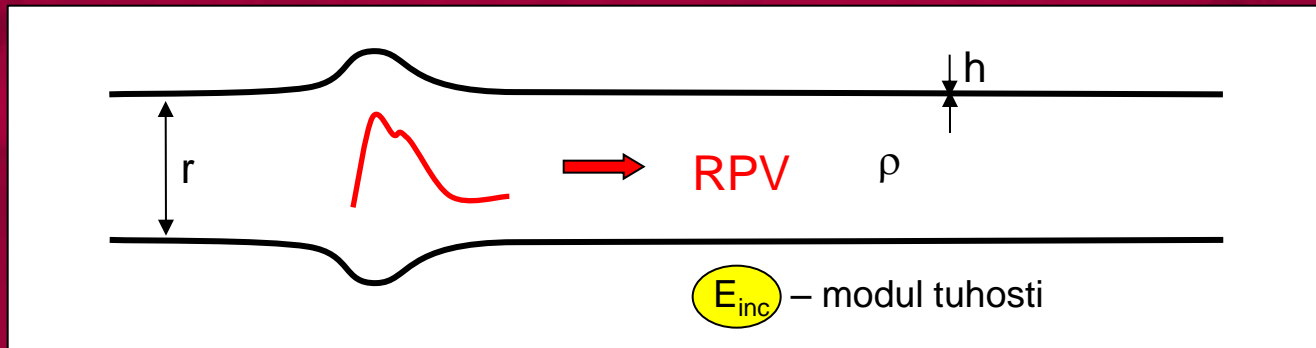


poddajnost

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$



Rychlost pulzní vlny

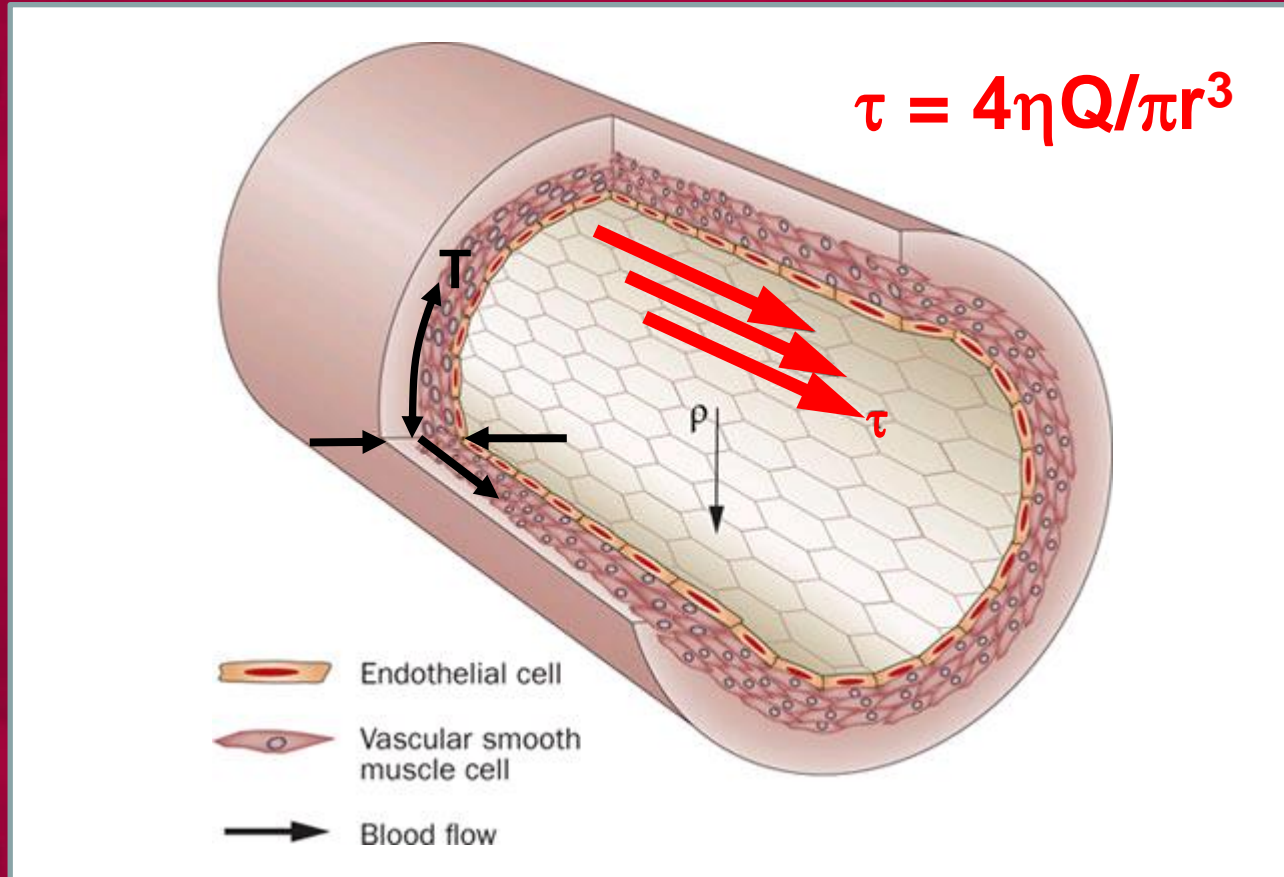


Moens-Korteweg (1878)

$$RPV = \sqrt{\frac{E_{inc} \cdot h}{2 \cdot r \cdot \rho}}$$

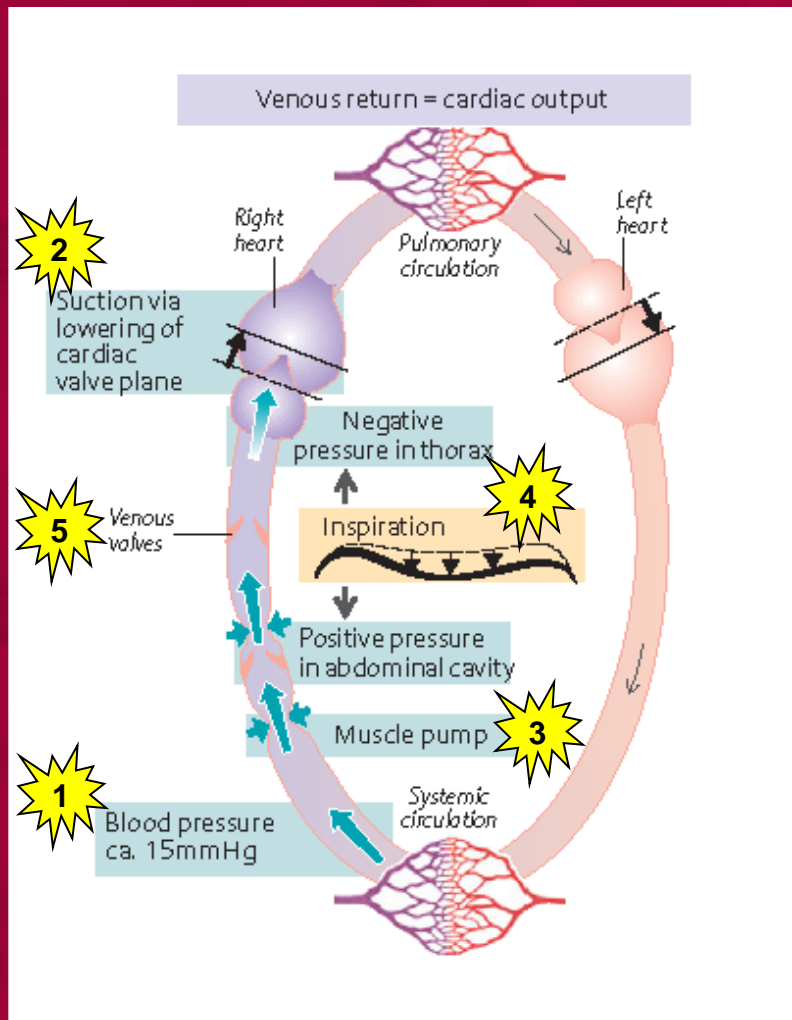
V aortě $RPV = 4 - 6 \text{ m/s}$

Střihové napětí ve stěně cévy



- Střihové napětí může vést k trhlinám v endoteliální vrstvě a k rozštěpení aortální stěny (arteriální disekci).

Mechanizmy venózního návratu



1. Tlakový gradient mezi venózním systémem a pravou síní

2. Sací účinek systoly

3. Kontrakce kosterních svalů

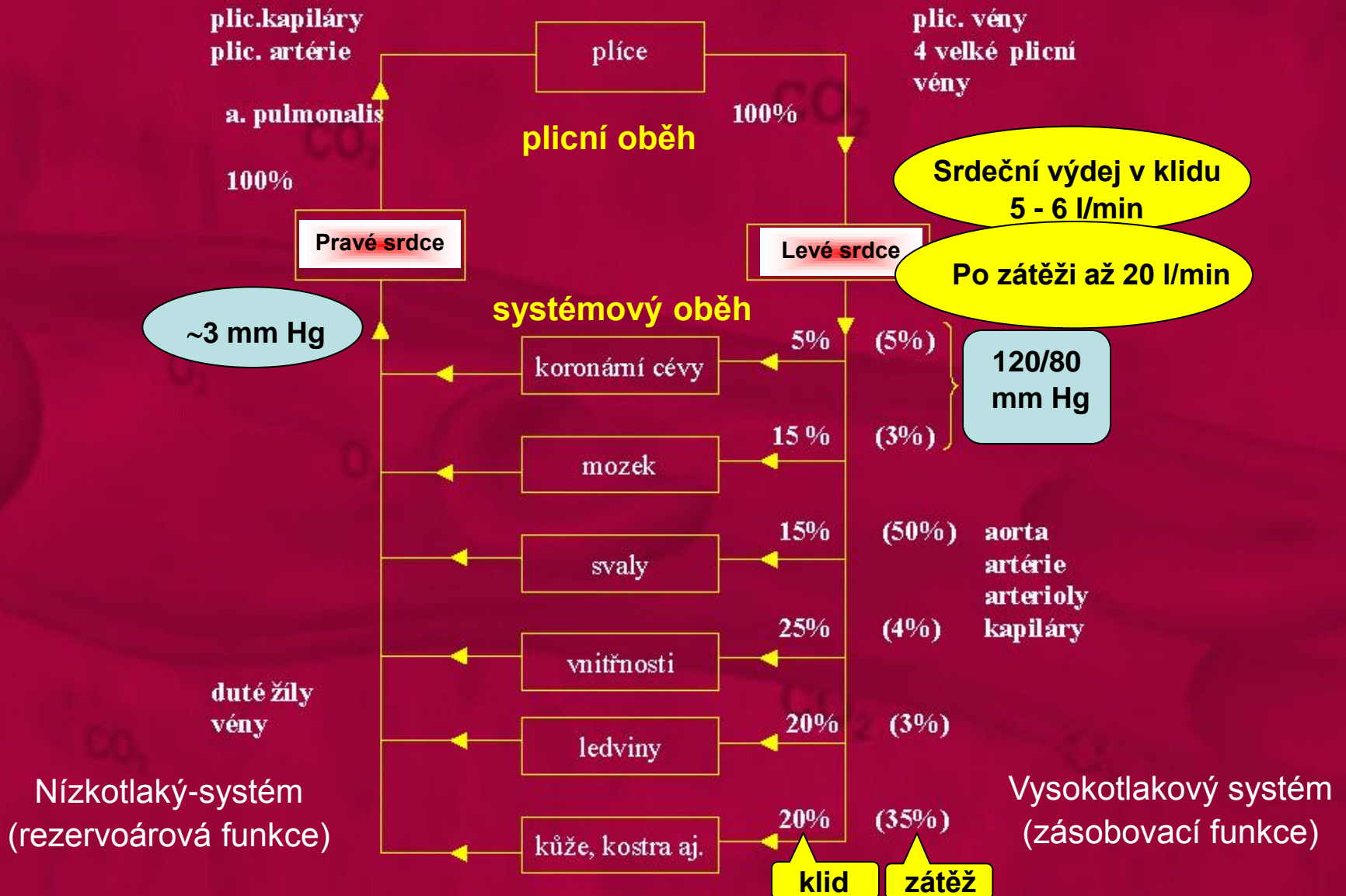
4. Přetlak v břišní dutině a podtlak v hrudní dutině během nádechu

5. Žilní chlopně

The background features a faint, light-colored diagram of a blood vessel. The vessel is shown in cross-section, with a central lumen and a surrounding wall. Several labels are scattered around the vessel: 'CO2' appears in the upper and lower regions, while 'O2' is located in the middle-right area. The overall color scheme is a dark, muted red.

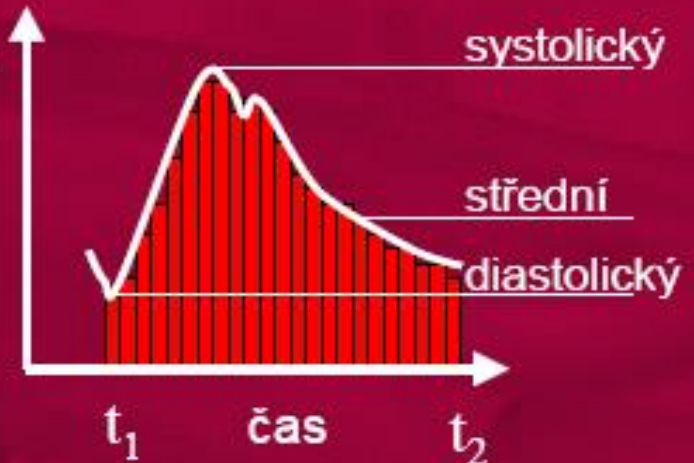
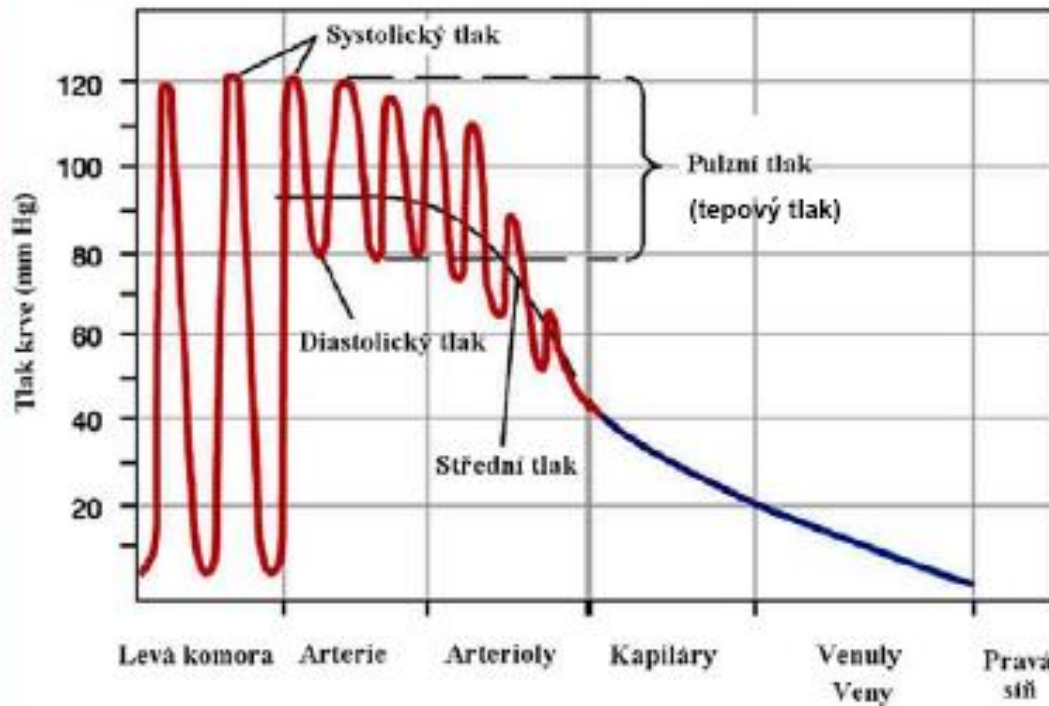
3. Krevní oběh a tlak

Krevní oběh



Krevní tlak

- tlak krve působící na stěnu cévy- nejvyšších hodnot dosahuje ve vypuzovací fázi srdeční akce (systolický tlak), nejnižších ve fázi plnění srdečních komor (diastolický tlak).



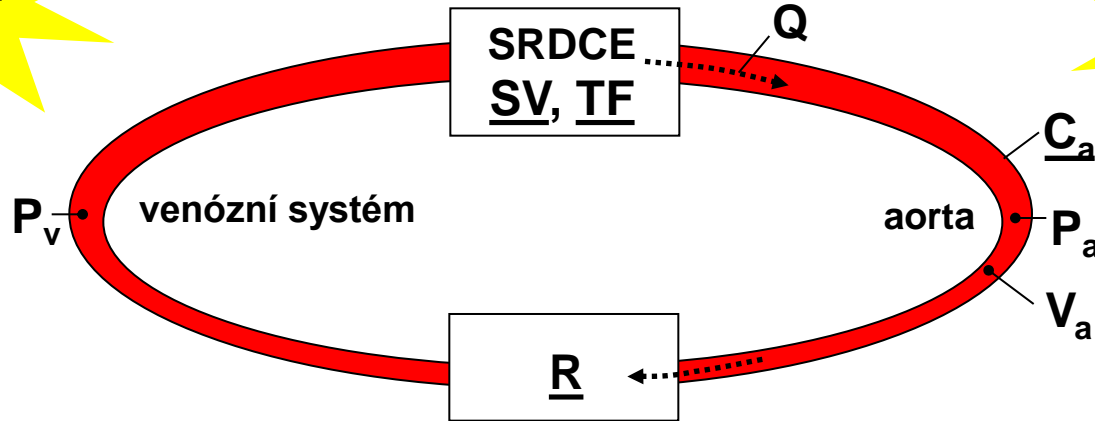
$$P_{stredni} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{P dt}{t_2 - t_1}$$

$$P_{stredni} \cong Pd + \frac{1}{3}(Ps - Pd)$$

Krevní tlak při změnách parametrů cévního systému a srdečního výdeje

$$Q = \frac{\Delta P}{R}$$

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

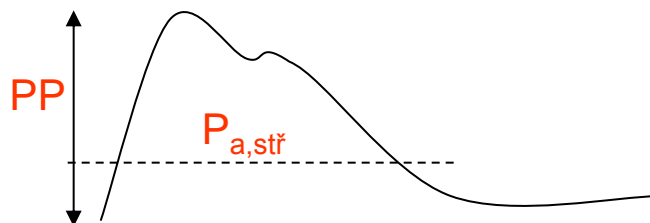


$$P_{a, \text{stř}} - P_{v, \text{stř}} = Q \cdot R$$

$$\Delta V \cong SV$$

$$P_{a, \text{stř}} = SV \cdot TF \cdot R + P_{v, \text{stř}}$$

$$P_{a, \text{stř}} \cong SV \cdot TF \cdot R$$

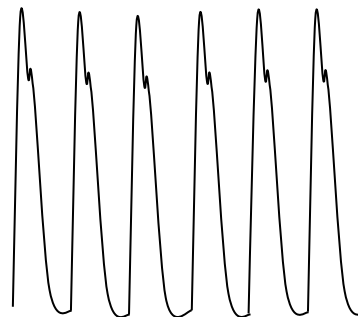


$$PP \cong \frac{SV}{C}$$

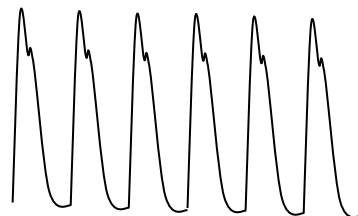
klidový stav

aktivita

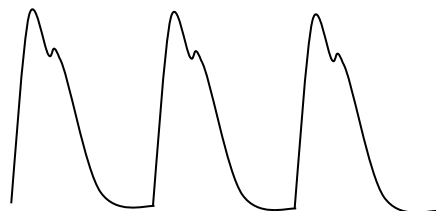
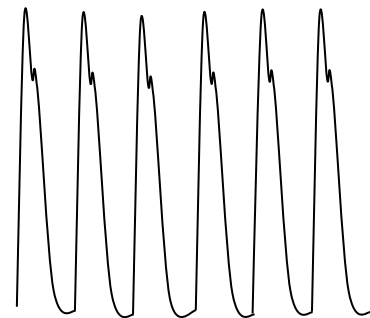
+SV↑



TF↑



+R↓



$$P_{a, \text{str}} \cong SV \cdot TF \cdot R$$

$$PP \cong \frac{SV}{C}$$

Model aortálního pružníku

Výpočet P_a

