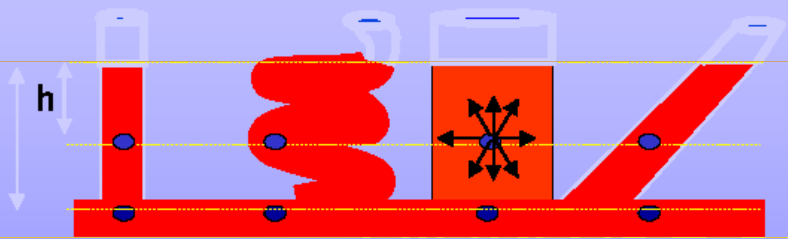


Reologie krevního oběhu

1. Základní fyzikální zákony tekutin

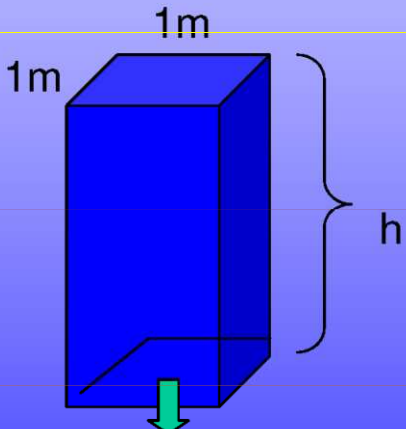
Paskalův zákon

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:



Hg



H₂O

10.3 m

Pa

mm Hg

mm H₂O

133,322 Pa = 1 mm Hg

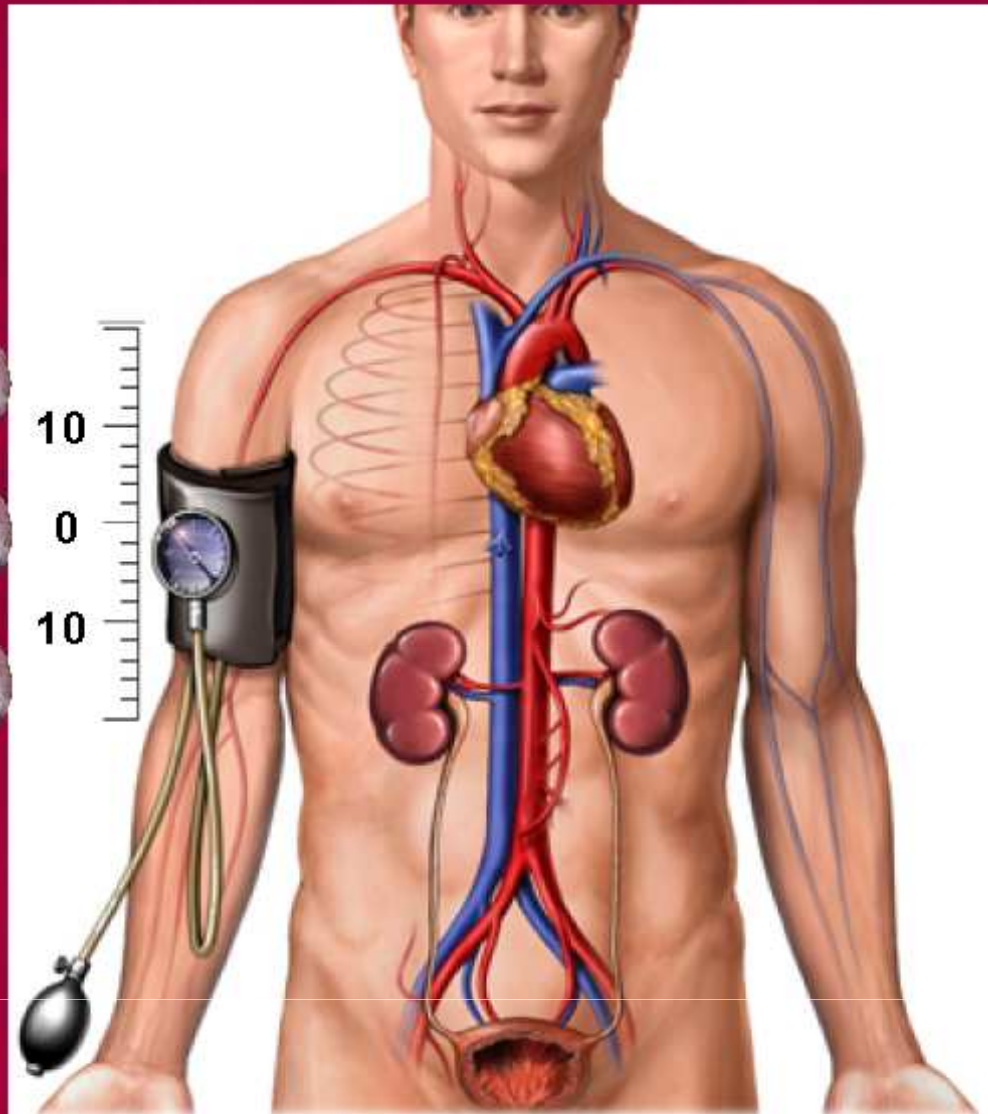
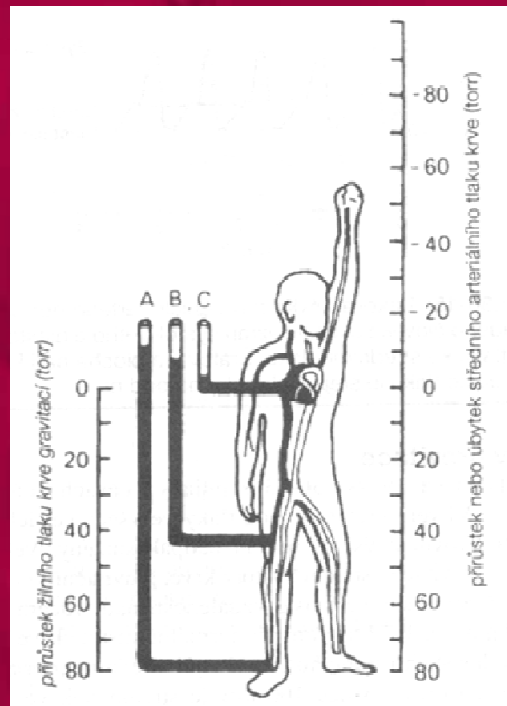
760 mmHg = 1 atm = 10.3 m H₂O

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:

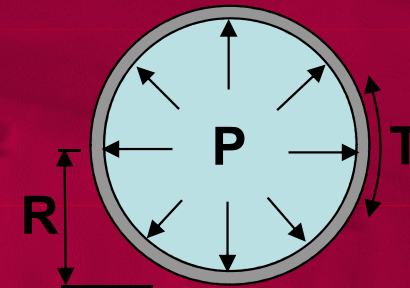
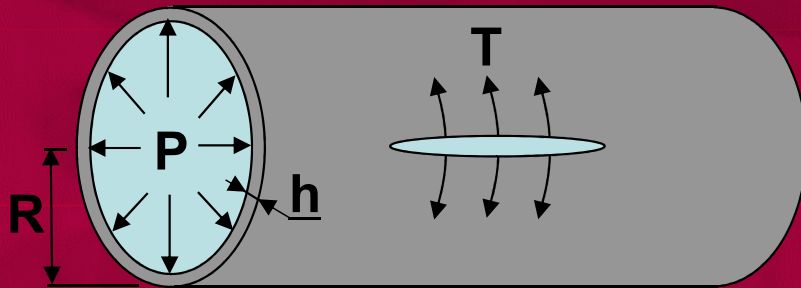
$$R_2 = \infty \Rightarrow$$

$$T = P \cdot R$$

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

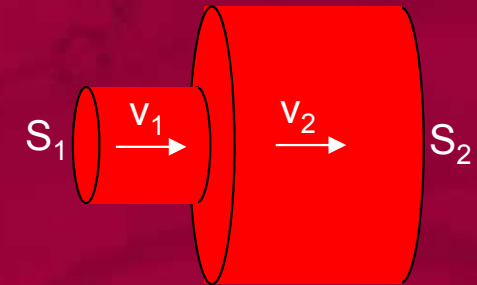
	P	R	P.R	h	P.R/h
Céva	Tlak (kPa)	Poloměr	Tečné napětí (N/m)	Tloušťka stěny	Tečné napětí (N/m ²)
aorta a velké artérie	13,3	13 mm nebo méně	170	2 mm	85000
malé artérie	12	5 mm	60	1 mm	60000
arterioly	8	150–62 μm	1,2–0,5	20 μm	40000
kapiláry	4	4 μm	$1,6 \cdot 10^{-2}$	1 μm	16000
žilky	2,6	10 μm	$2,6 \cdot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



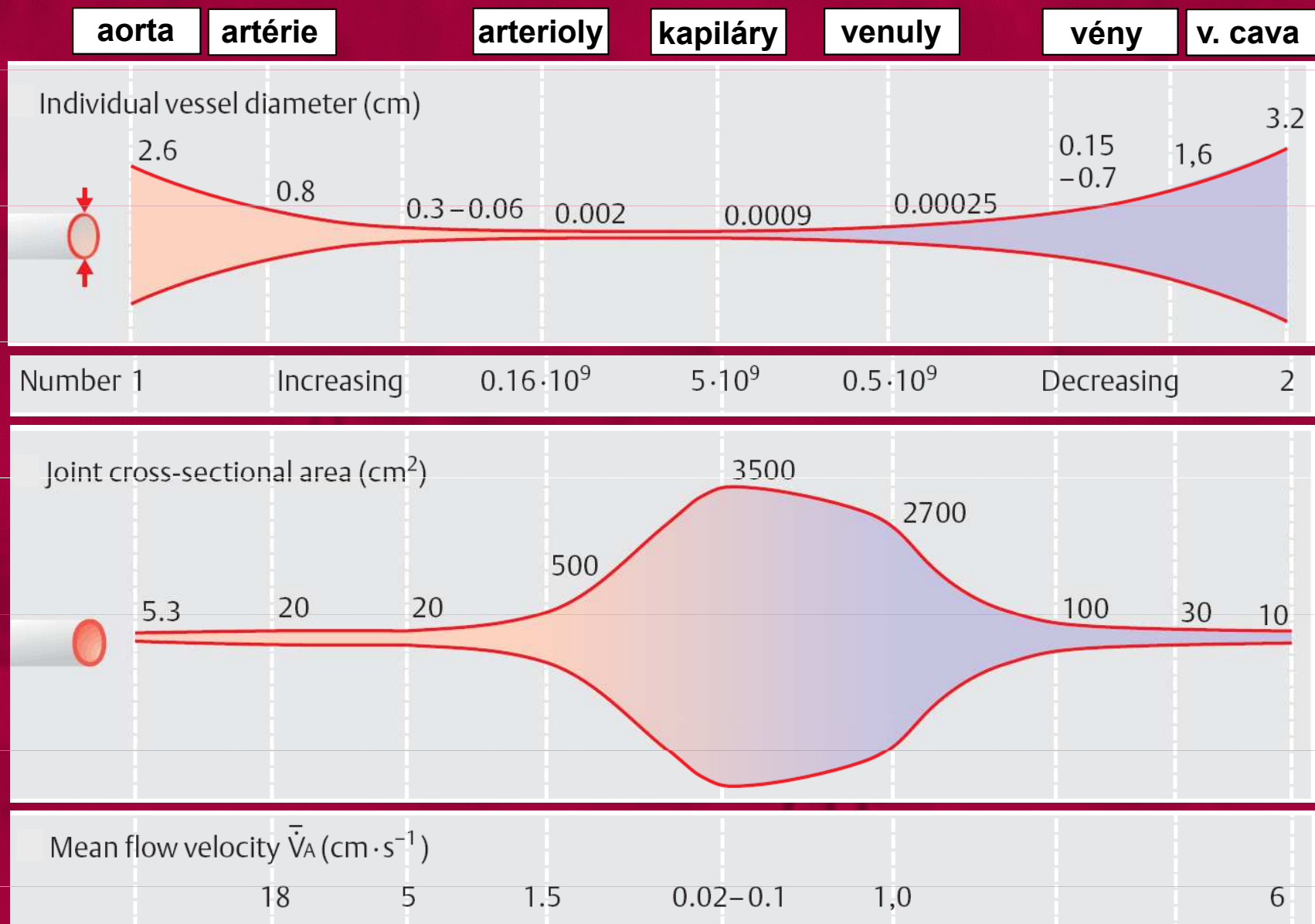
Průměrná rychlost krve v cévách

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

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

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

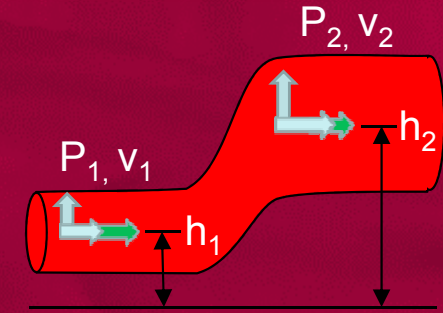
Vztah mezi průměrem cév a rychlostí krevního průtoku



Bernoulliho rovnice

- zákon zachování energie pro nestlačitelnou kapalinu:

$$E_k + E_p + E_{tl} = \text{konst.} \Rightarrow \frac{1}{2} \rho v^2 + h \cdot \rho \cdot g + P = \text{konstanta}$$



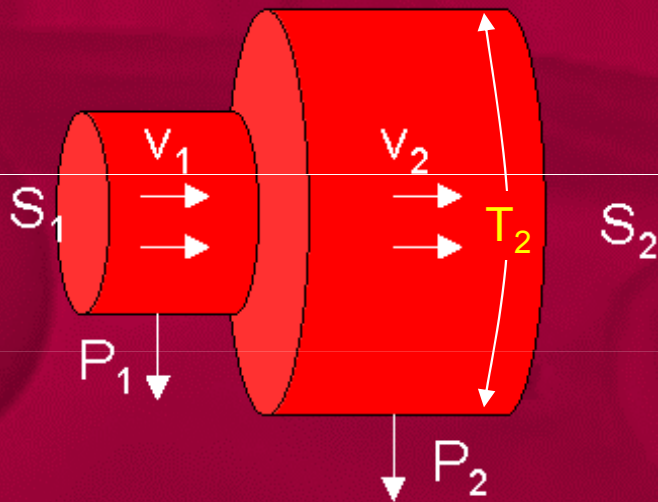
dynamický tlak

+

statický tlak

=

celkový tlak



$$T_2 = P_2 \cdot R_2$$

Důsledek při aneurysmatu aorty

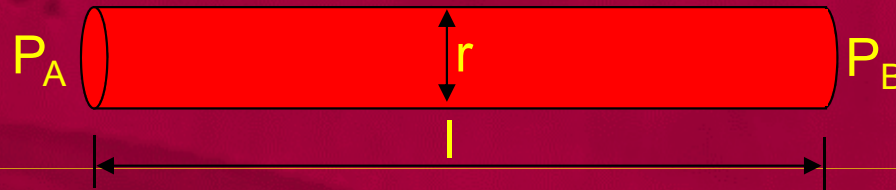
$S_1 v_1 = S_2 v_2$ a je-li $S_1 < S_2$, musí platit: $v_1 > v_2$

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

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

$$\text{Pro } v_2 < v_1 \Rightarrow P_2 > P_1$$

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 mezi začátkem a koncem 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.

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

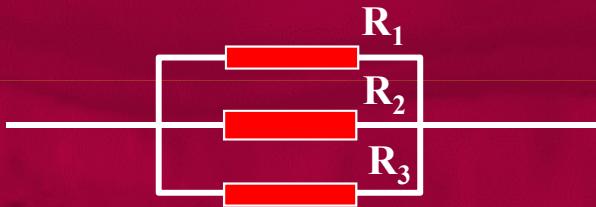


$$Q = \frac{\Delta P}{R_c}$$

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

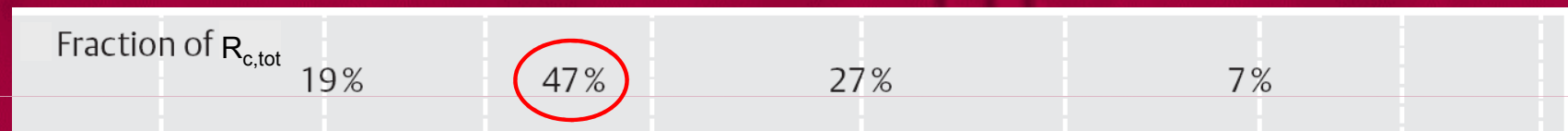
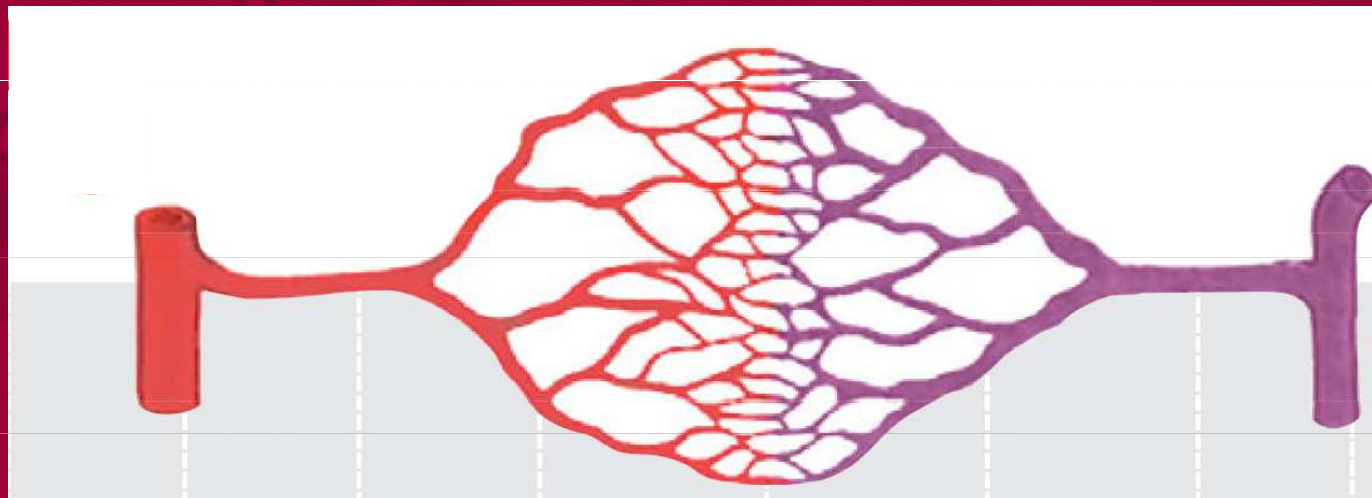
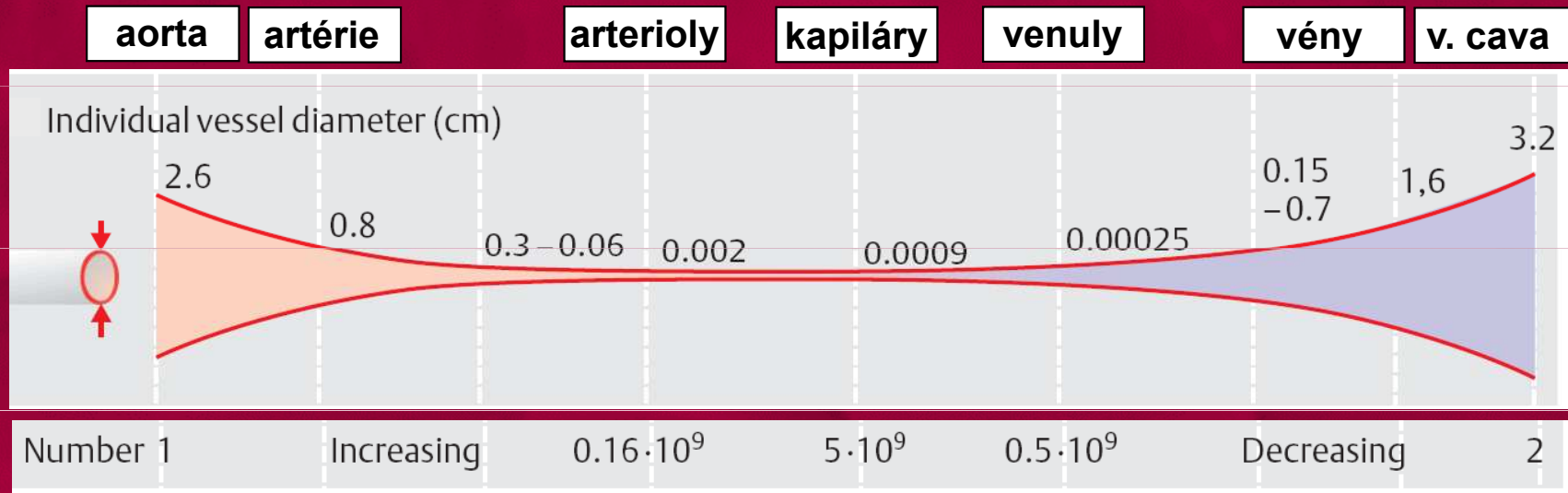


$$R_c = R_1 + R_2 + \dots$$

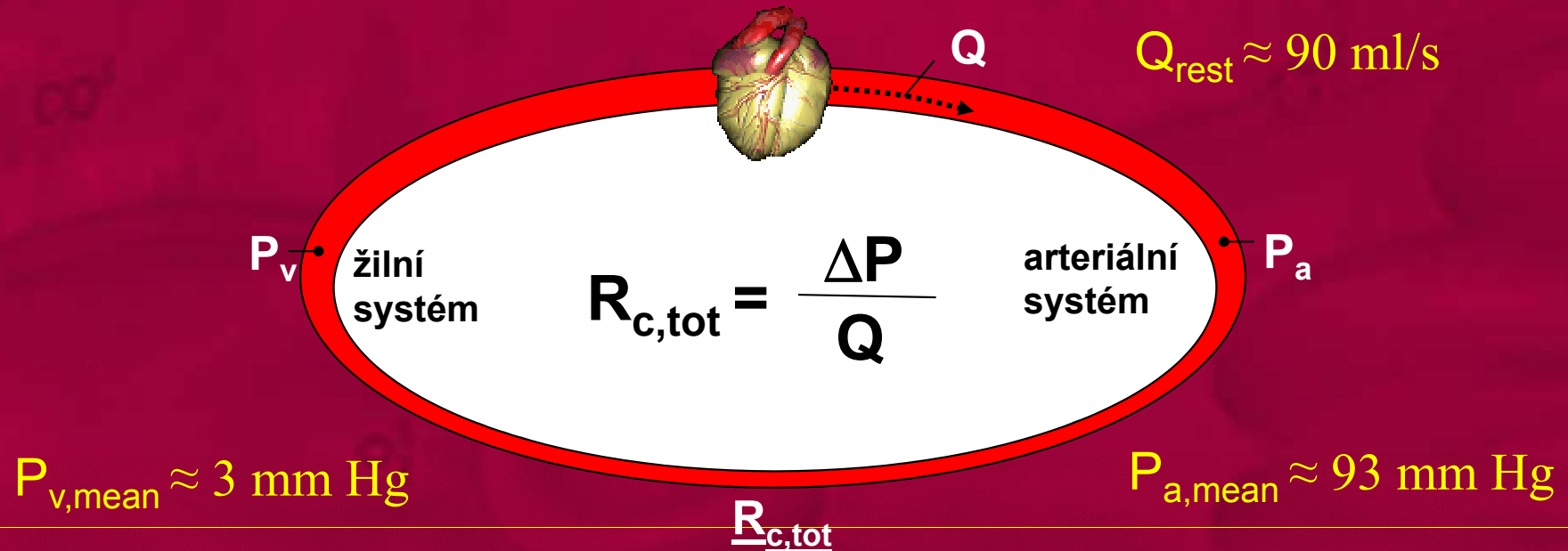
pro $R_1=R_2=R_3=R_n$

$$R_c = R \cdot n$$

Vztah mezi průměrem cév a cévní rezistencí



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



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

$$P_a \approx R_{c,tot} \times Q$$

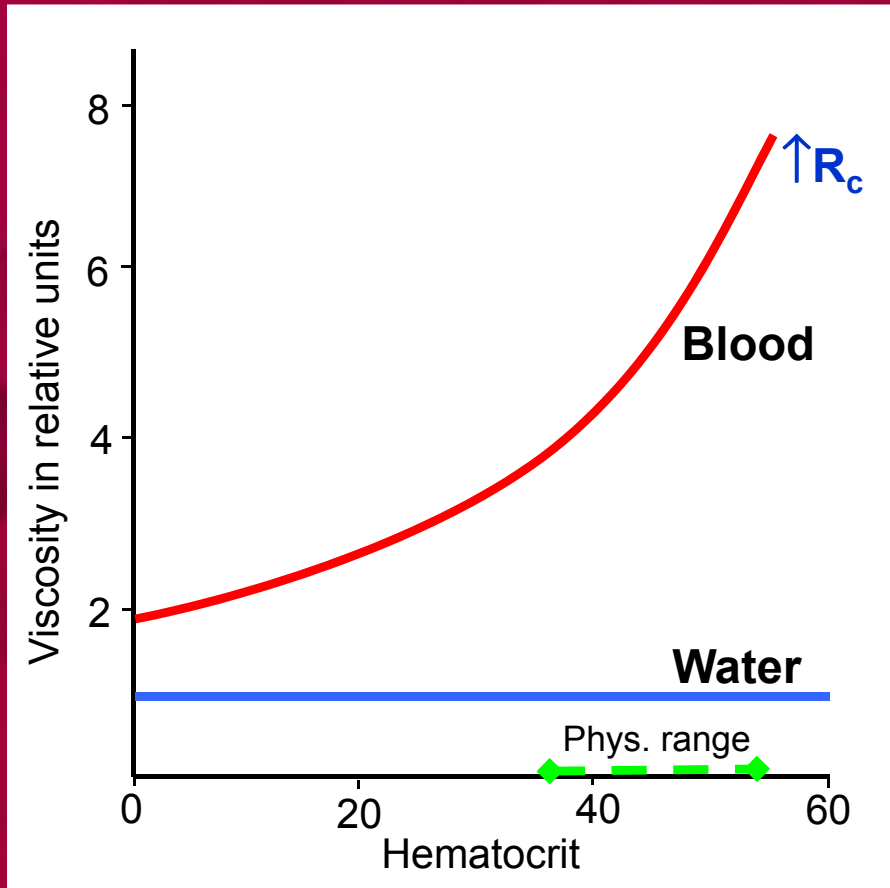
Pro konstantní Q : $\uparrow R_{c,tot} \Rightarrow \uparrow P_a \Rightarrow$ hypertenze \Rightarrow hypertrofie,

2. Reologické vlastnosti krve a cév

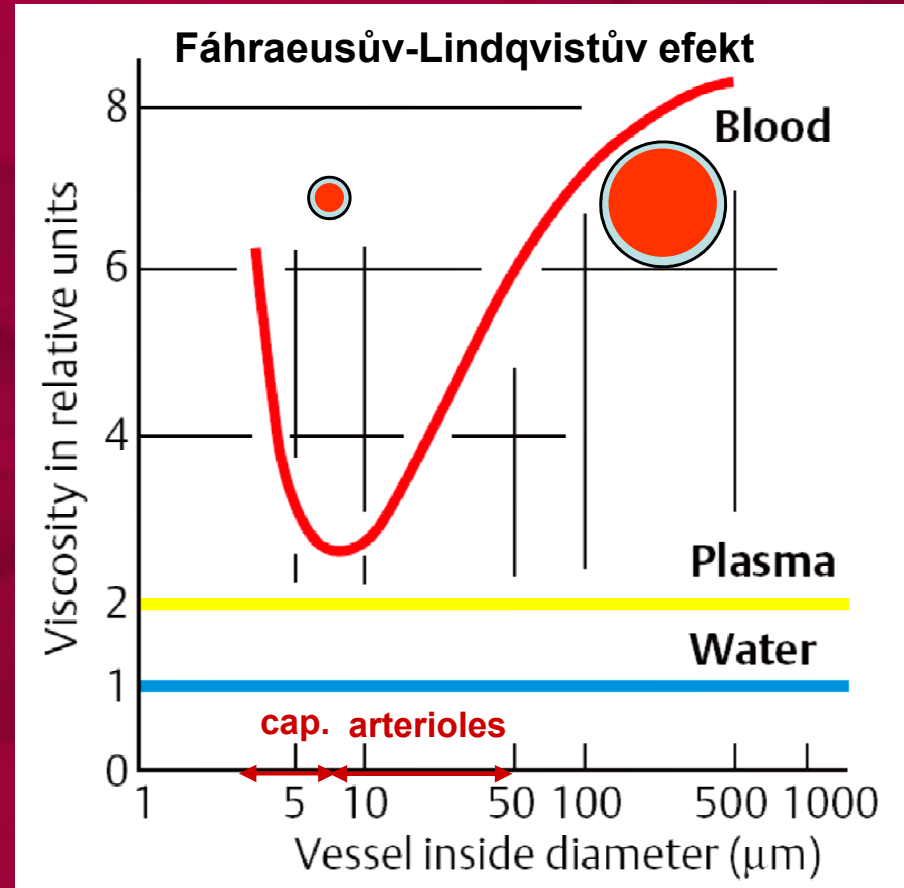
Viskozita krve

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

Vliv hematokritu



Vliv poloměru cév

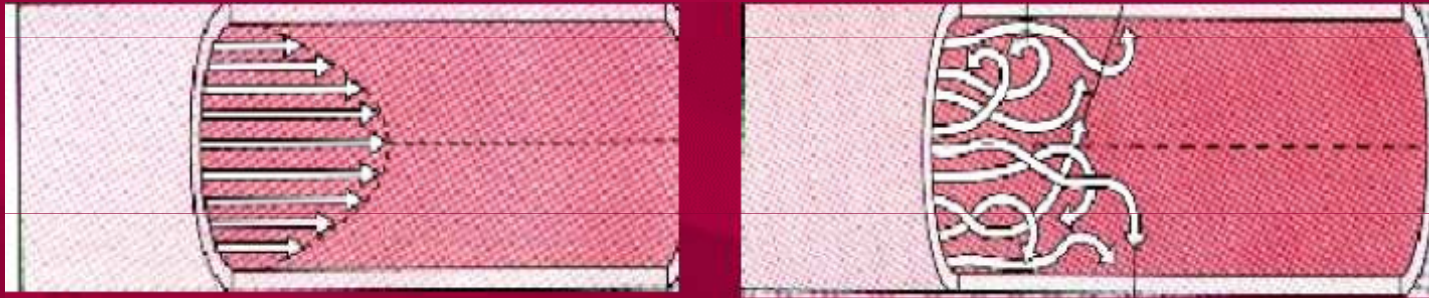


Další faktory zvyšující viskozitu krve:

- pokles rychlosti proudění
- zmnožení plazmatických bílkovin

Laminární a turbulentní proudění

Rychlostní profil při laminárním a turbulentním proudění



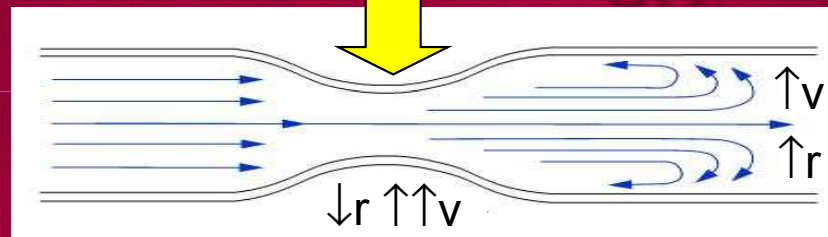
Charakter proudění určuje Reynoldsovo číslo

laminární proudění
 $Re < 2000$

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

turbulentní proudění
 $Re > 3000$

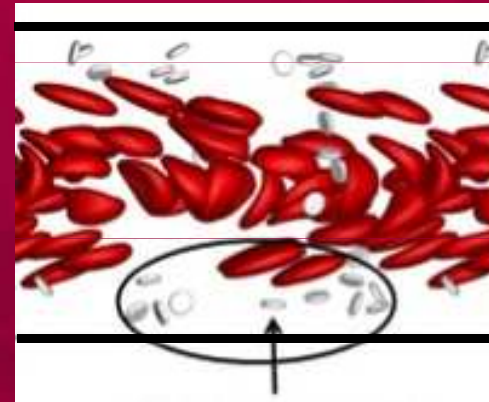
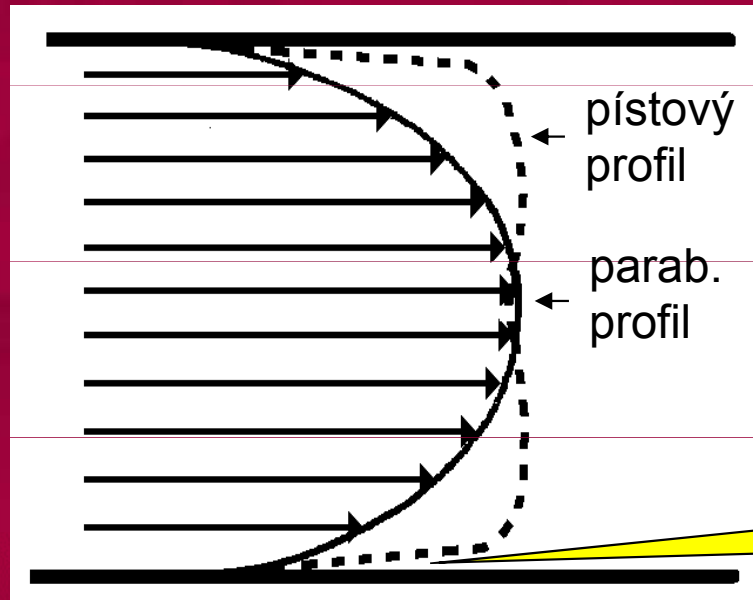
Náhlá změna průřezu cévy



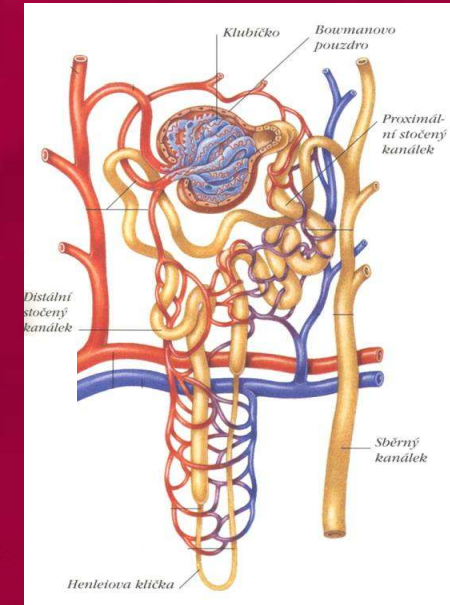
$$\uparrow Re \Rightarrow \uparrow R_c$$

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

Rychlostní profil toku krve v cévách

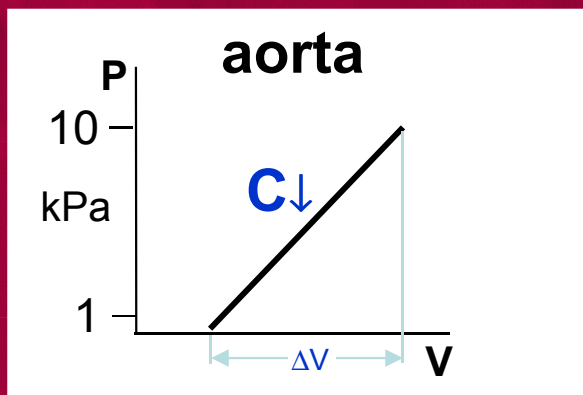
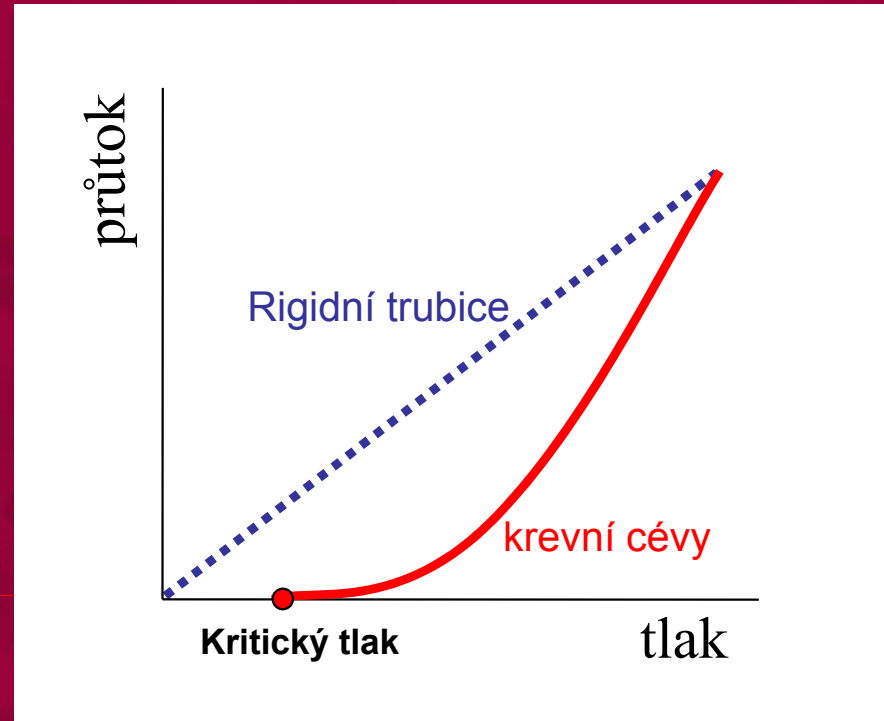


plasma-skimming



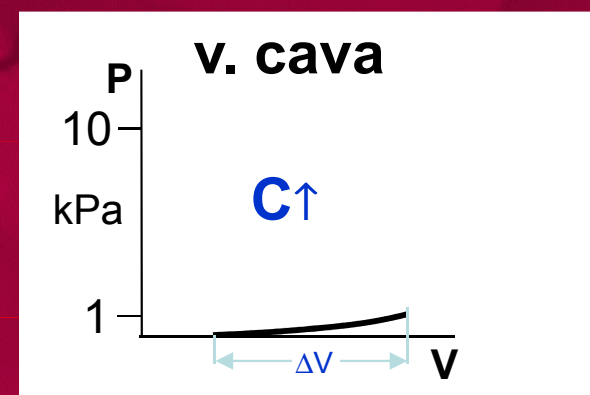
- V malých tepnách (při $r < 100 \mu\text{m}$) způsobuje středový pohyb erytrocytů pístový profil krevního proudu.
- Ve větších tepnách (při $r > 500 \mu\text{m}$) převládá laminární proudění a rychlostní profil krevního proudu má parabolický tvar.
- Ve velkých tepnách (především v aortě) dochází při zvýšeném srdečním výdeji k turbulentnímu proudění ($R_e > 3000$) a následně ke změně parabolického na pístový profil krevního proudu.

Elasticita cév

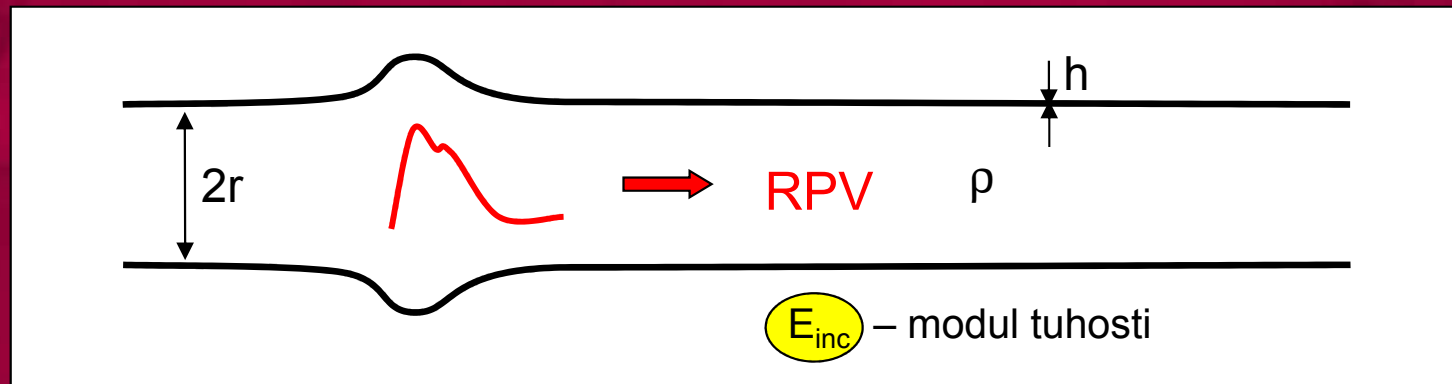


poddajnost

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



Rychlost pulzní vlny

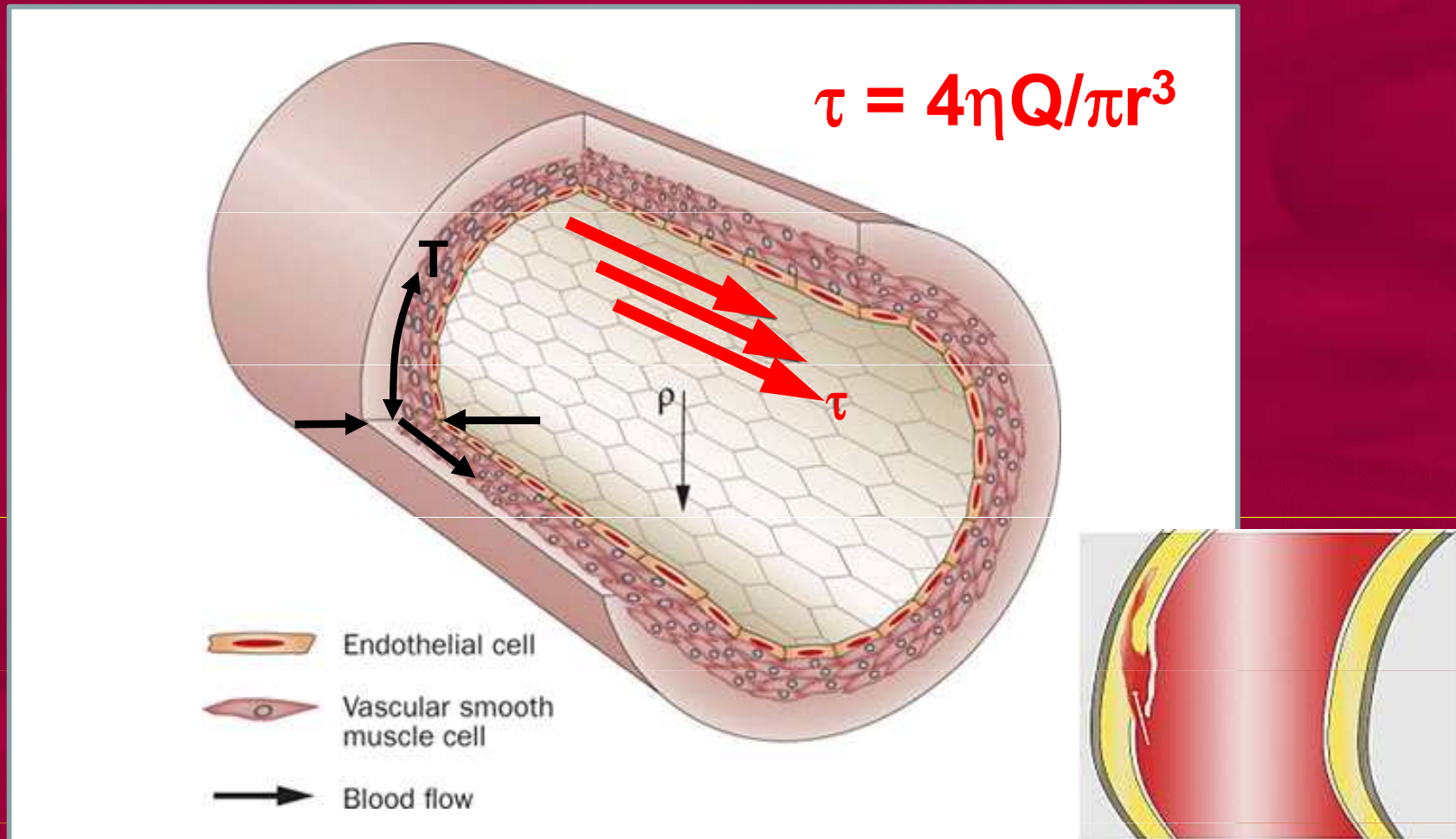


Moens-Korteweg (1878)

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

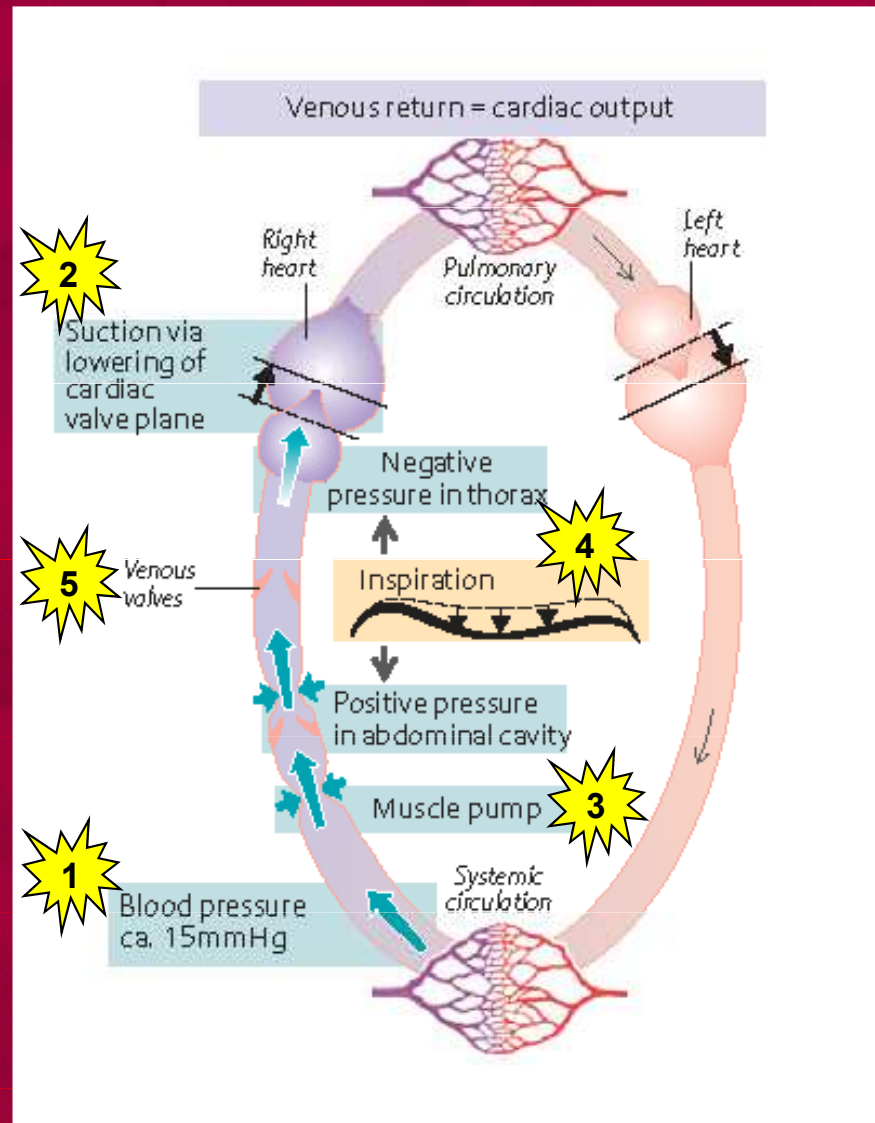
V aortě $RPV = 4 - 6 \text{ m/s}$

Střihové napětí ve stěně cévy



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

Mechanizmy venózního návratu



1. Tlakový gradient mezi venózním systémem a pravou síní

2. Sací účinek systoly

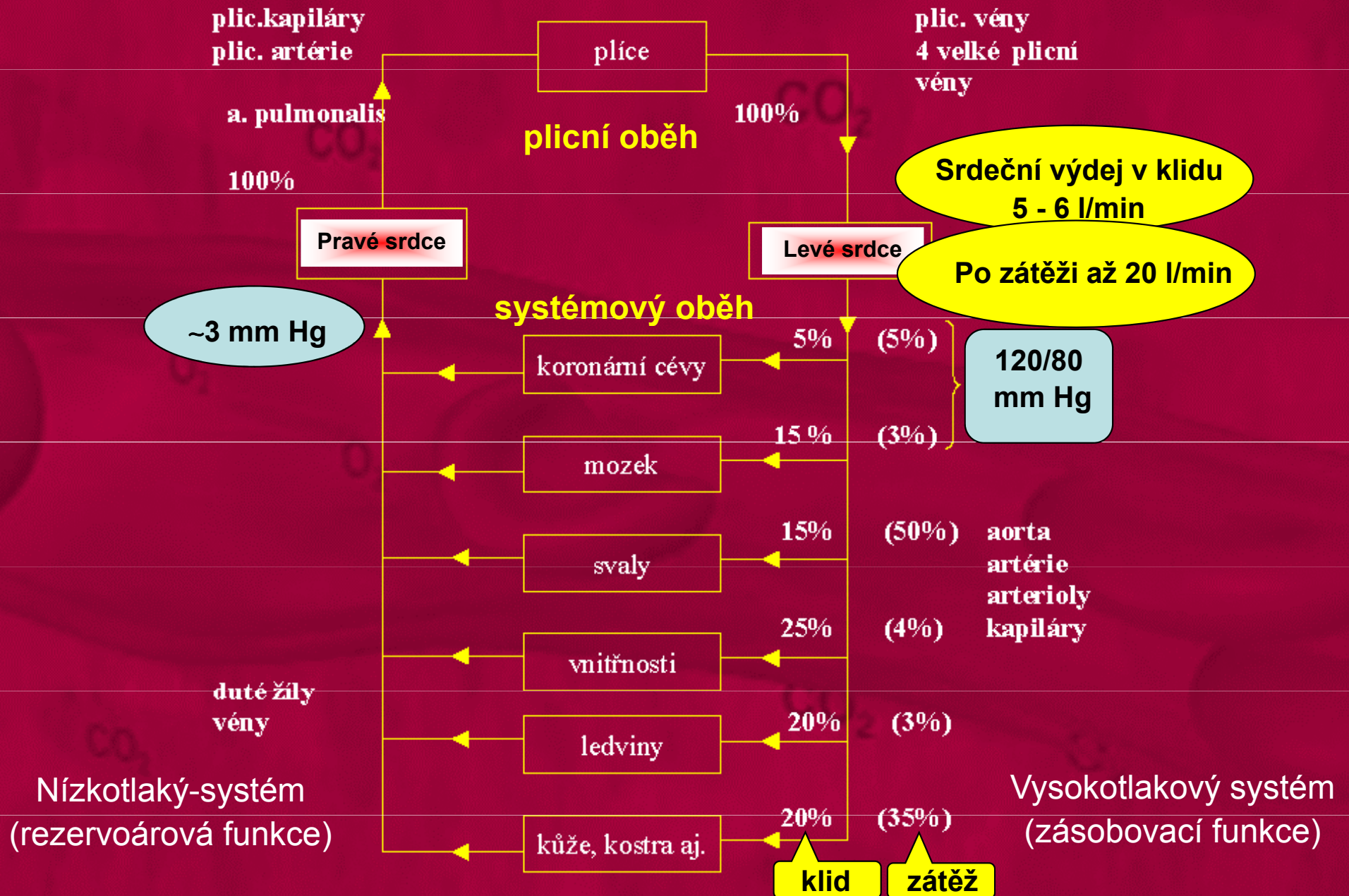
3. Kontrakce kosterních svalů

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

5. Žilní chlopně

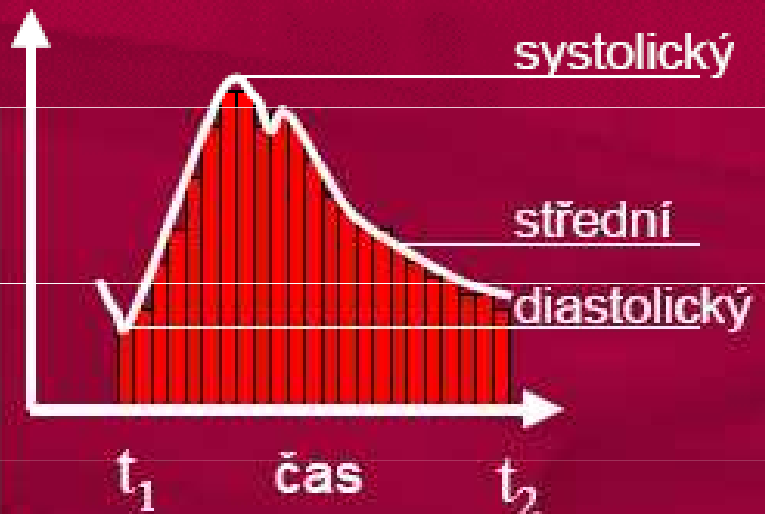
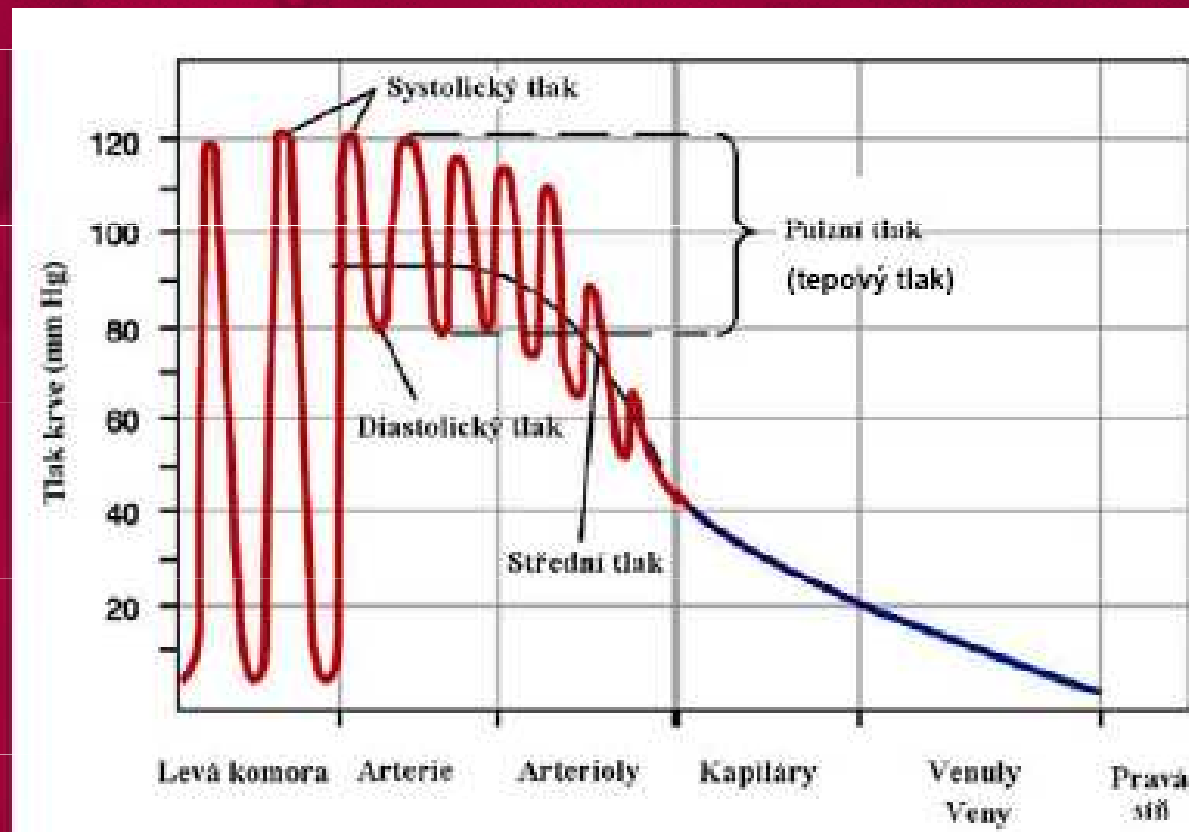
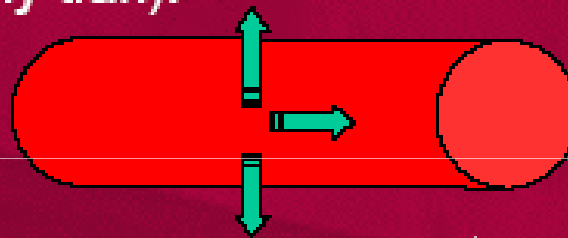
3. Krevní oběh a tlak

Krevní oběh



Krevní tlak

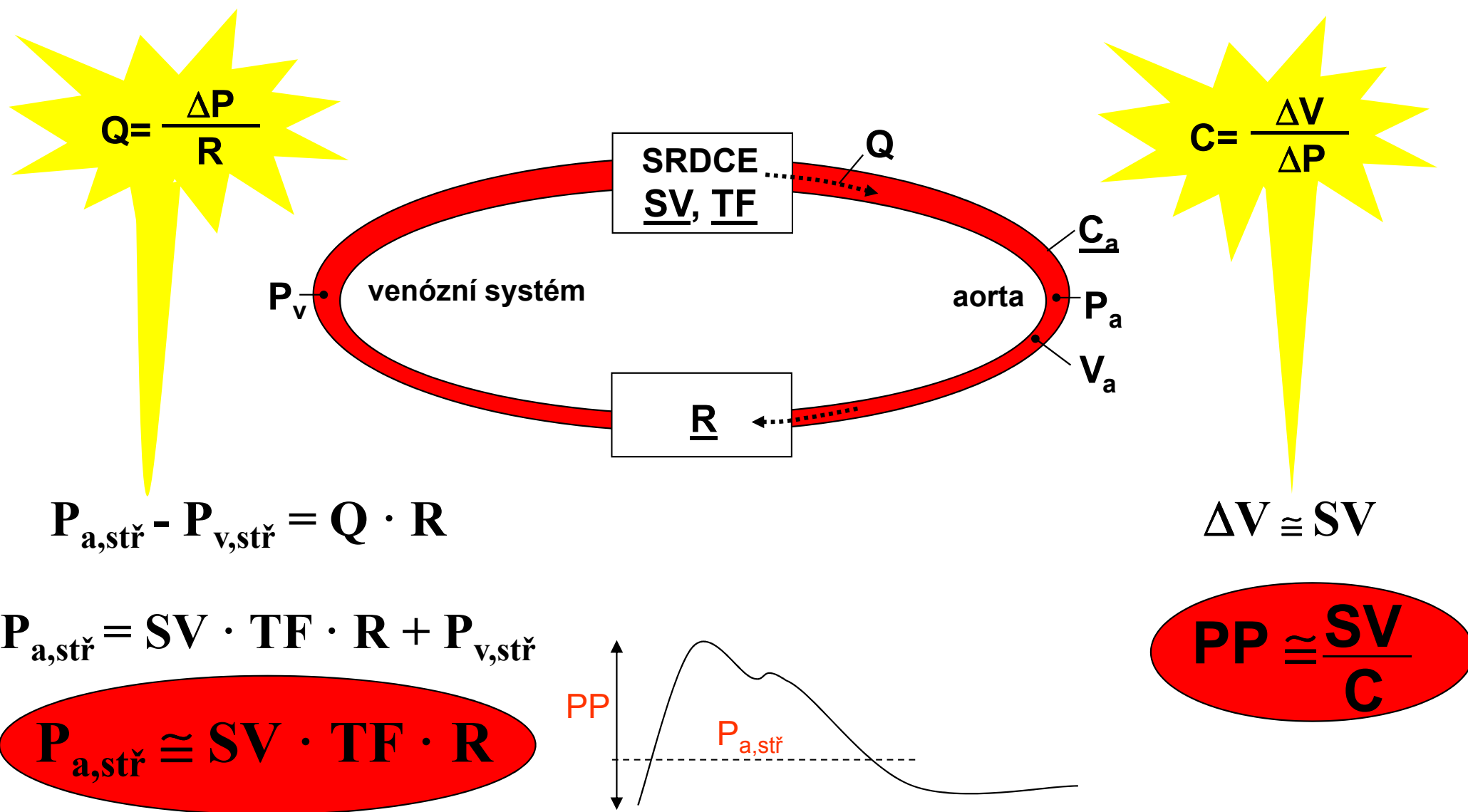
- tlak krve působící na stěnu cévy- nejvyšších hodnot dosahuje ve vypuzovací fázi srdeční akce (systolický tlak), nejnižších ve fázi plnění srdečních komor (diastolický tlak).



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

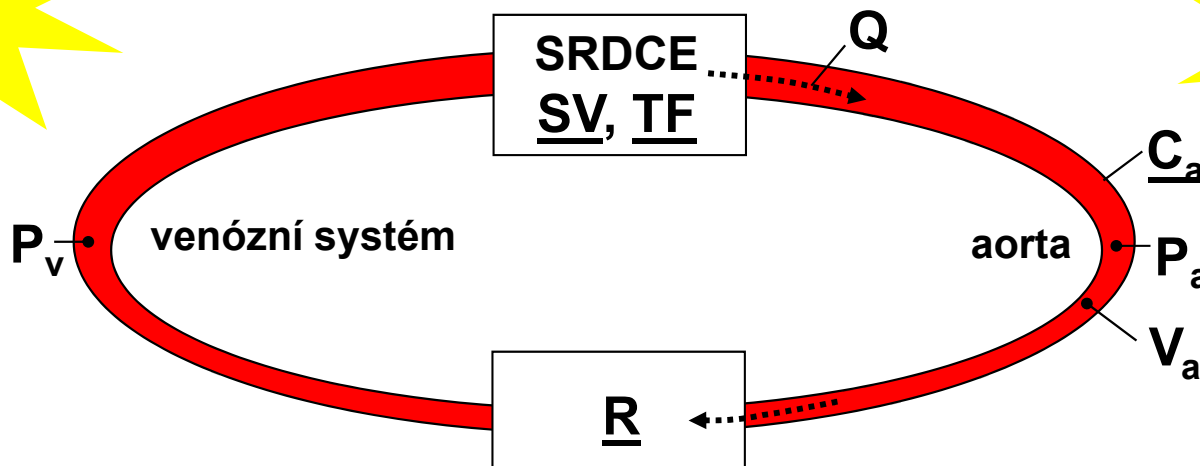
$$P_{středni} \cong Pd + \frac{1}{3}(Ps - Pd)$$

Krevní tlak při změnách parametrů cévního systému a srdečního výdeje



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

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



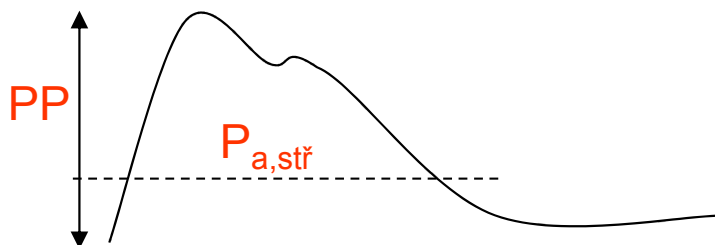
$$P_{a,stř} - P_{v,stř} = Q \cdot R$$

$$\Delta V \cong SV$$

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

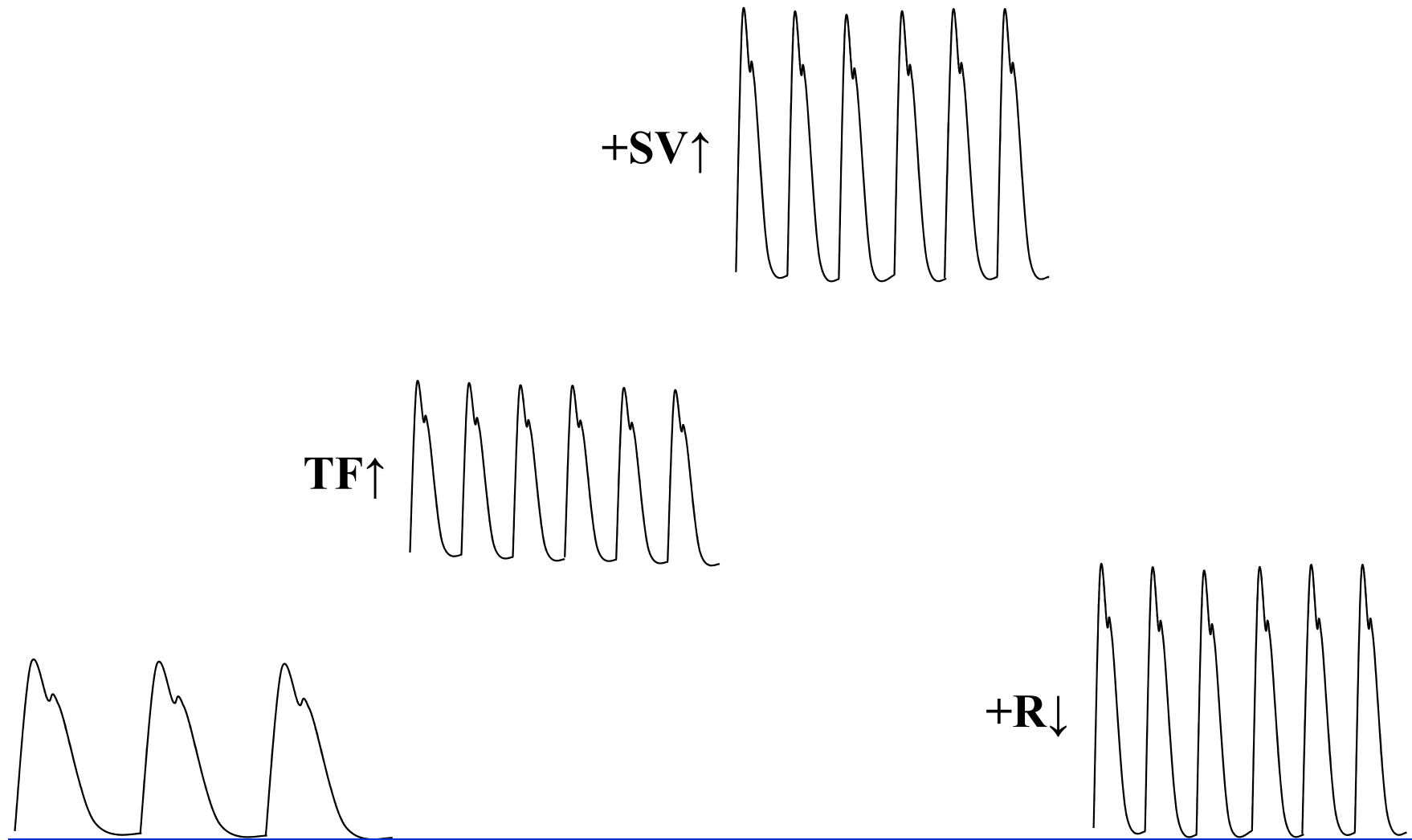
$$P_{a,stř} \cong SV \cdot TF \cdot R$$

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



klidový stav

aktivita



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

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

Model aortálního pružníku

Výpočet P_a

