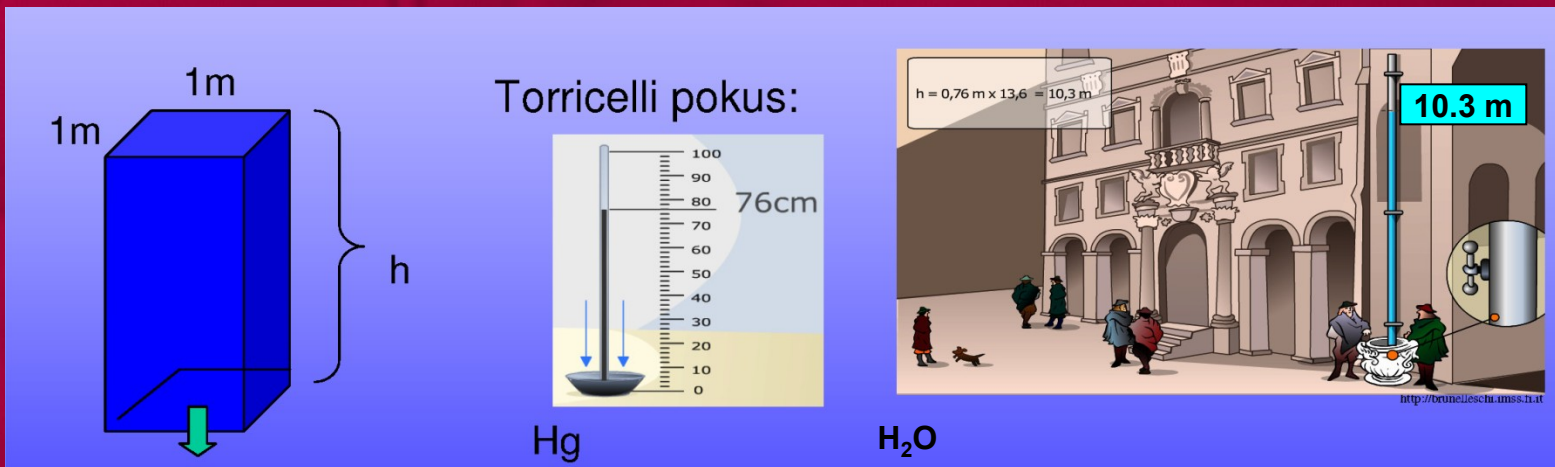
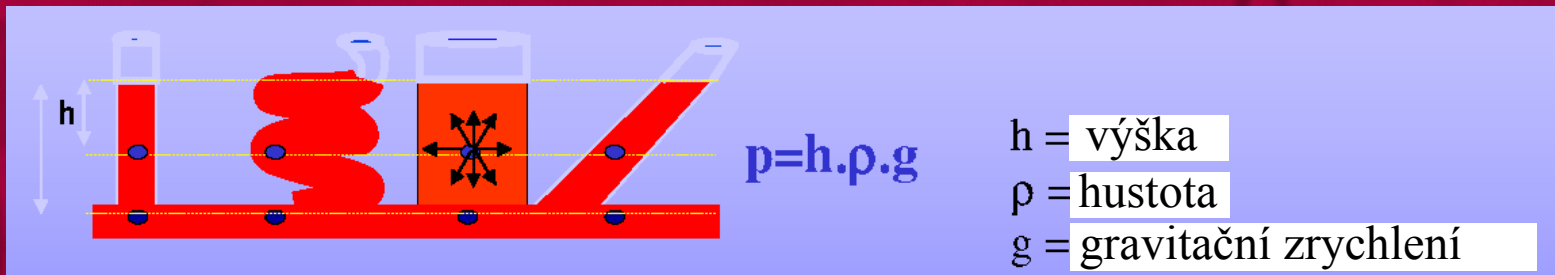


# Reologie krevního oběhu

# 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.



Pa

mm Hg

mm H<sub>2</sub>O

133,322 Pa = 1 mm Hg

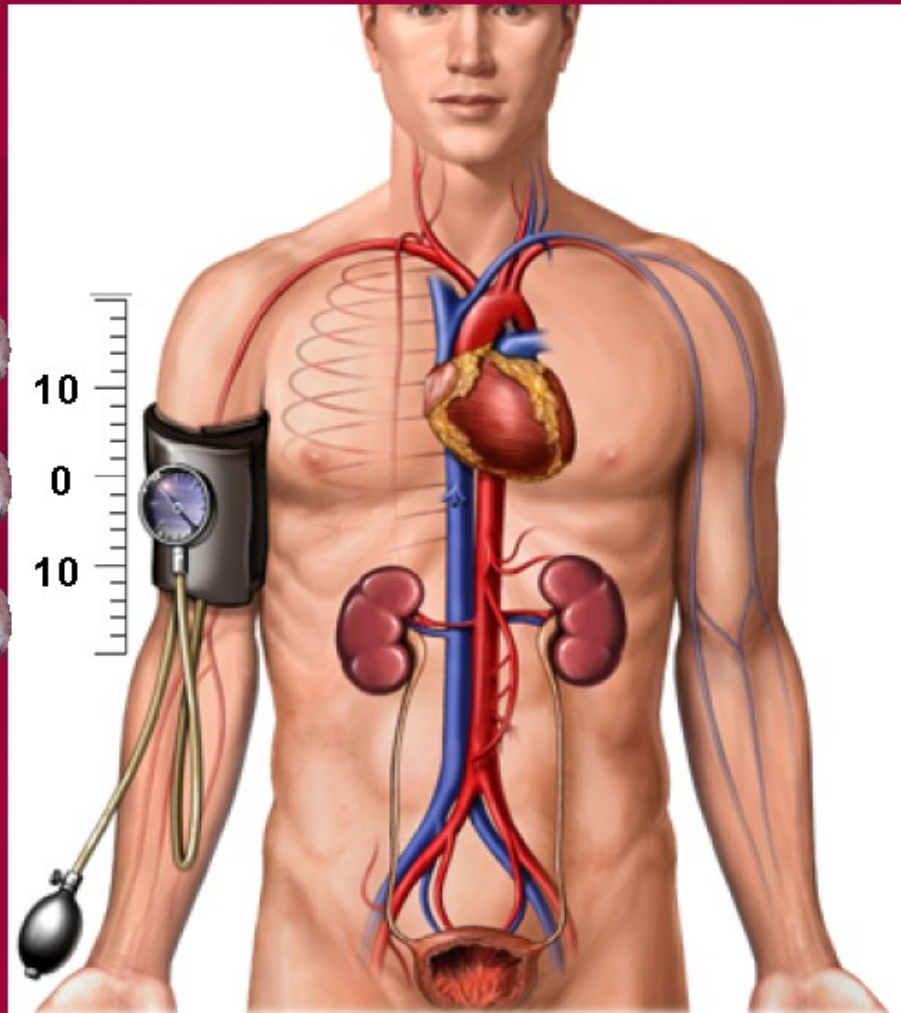
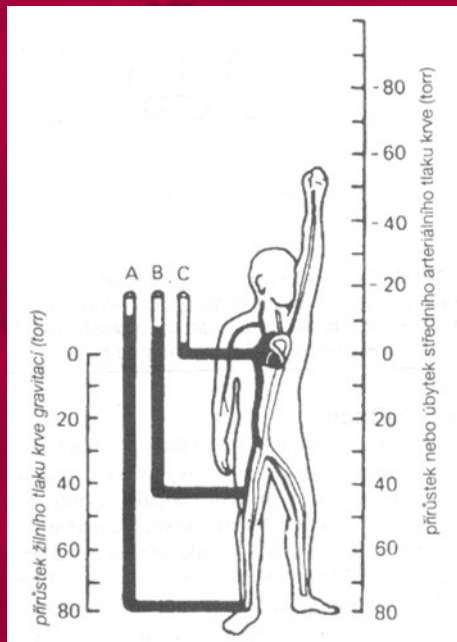
760 mmHg = 1 atm = 10.3 m H<sub>2</sub>O

# 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:

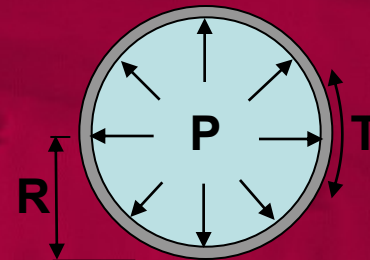
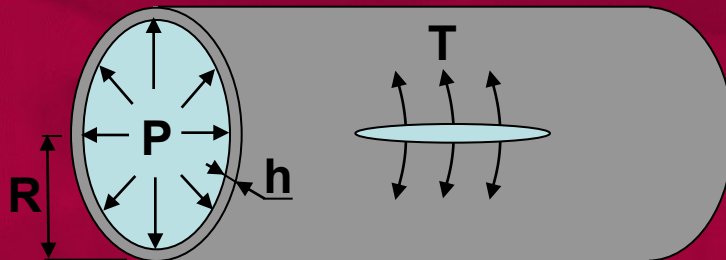
$$R_2 = \infty \Rightarrow$$

$$T = P \cdot R$$

Koule:

$$R_1 = R_2 \Rightarrow$$

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



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

## Charakteristika cév

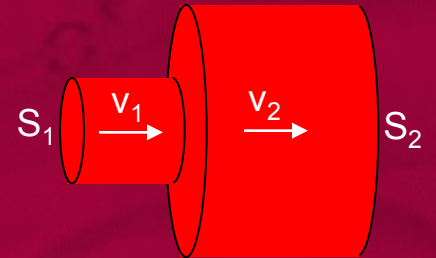
	<b>P</b>	<b>R</b>	<b>P.R</b>	<b>h</b>	<b>P.R/h</b>
Céva	Tlak (kPa)	Poloměr	Tečné napětí (N/m)	Tloušťka stěny	Tečné napětí (N/m <sup>2</sup> )
aorta a velké artérie	13,3	13 mm nebo méně	170	2 mm	<b>85000</b>
malé artérie	12	5 mm	60	1 mm	<b>60000</b>
arterioly	8	150–62 μm	1,2–0,5	20 μm	<b>40000</b>
kapiláry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

# 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



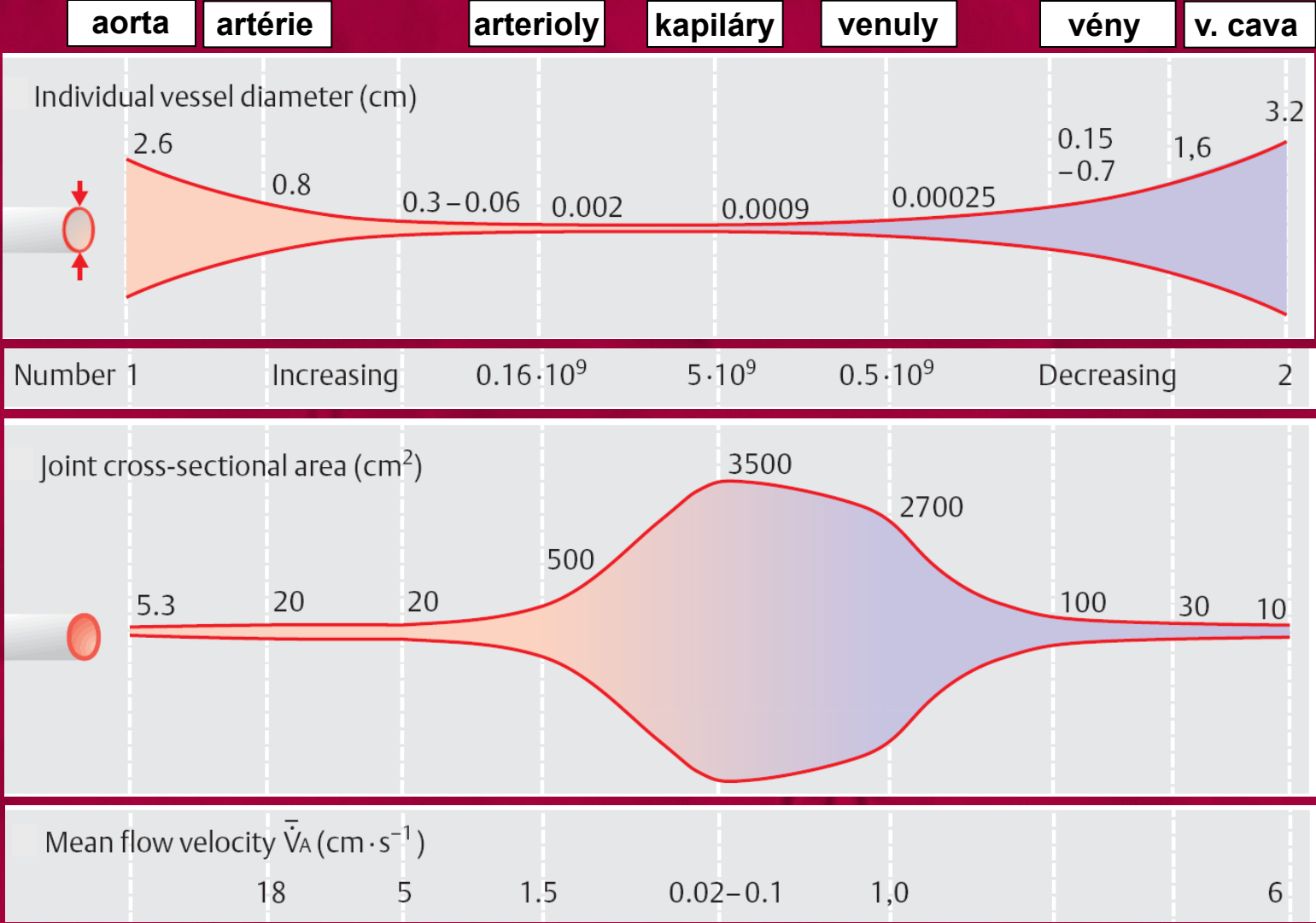
Průměrná rychlost krve v cévách

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

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

céva	průměr	počet	celková plocha	rychlost
aorta	2.6 cm	1	5.3 cm <sup>2</sup>	~ 18 cm/s
arterioly	20-50 μm			~ 1.5 cm/s
kapiláry	4-9 μm	5×10 <sup>9</sup>	2000 cm <sup>2</sup>	~ 0.04 cm/s
venuly				~ 1 cm/s
vena cava		2		~ 7 cm/s

# Vztah mezi průměrem cév a rychlostí krevního průtoku





# Bernoulliho rovnice

- zákon zachování energie pro nestlačitelnou kapalinu:

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

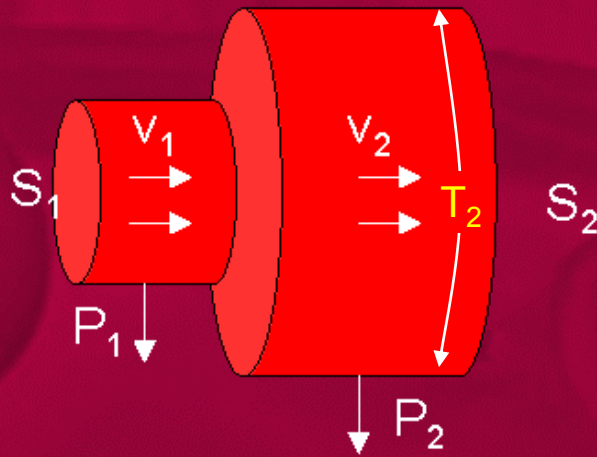
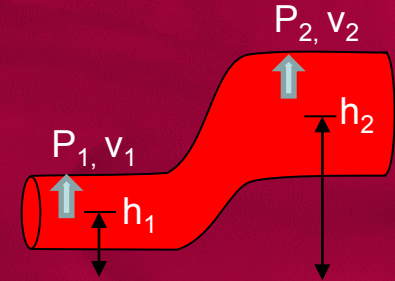
dynamický tlak

+

statický tlak

=

celkový tlak



$$T_2 = P_2 \cdot R_2$$

## Důsledek při aneurysmatu aorty

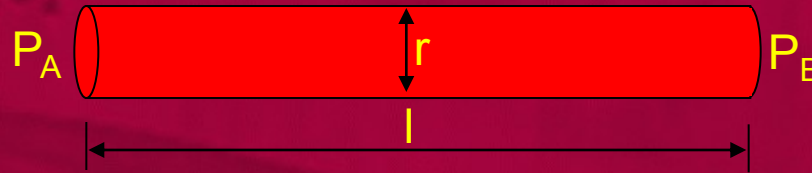
$S_1 v_1 = S_2 v_2$  a je-li  $S_1 < S_2$ , musí platit:  $v_1 > v_2$

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

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

**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 ( $\eta$ ).

## **Platnost:**

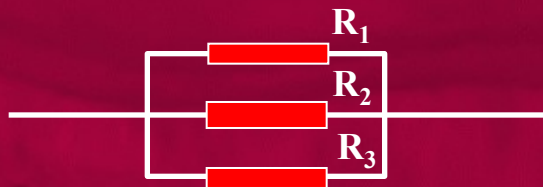
- pro stacionární proudění newtonovských tekutin, u kterých je viskozita konstantní a nezávislá na rychlosti proudění.

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

**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

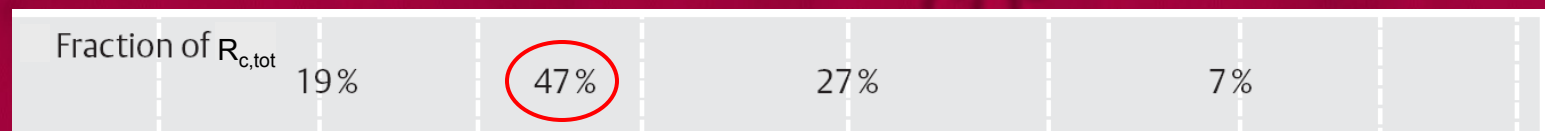
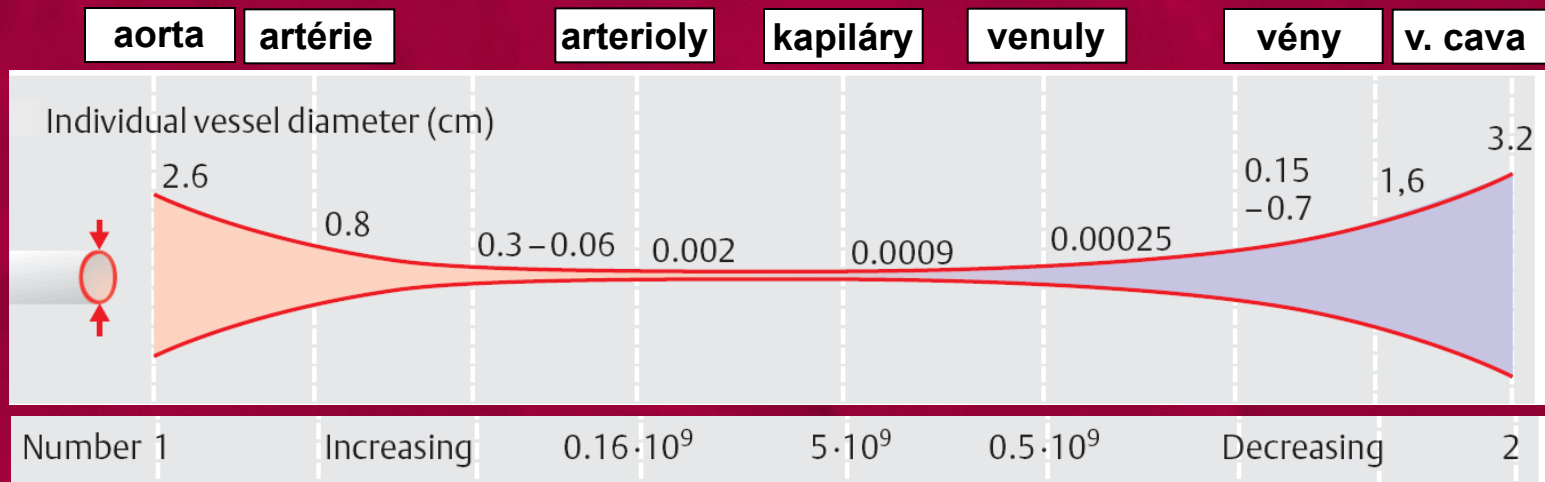


$$R_c = R_1 + R_2 + \dots$$

pro  $R_1=R_2=R_3=R_n$

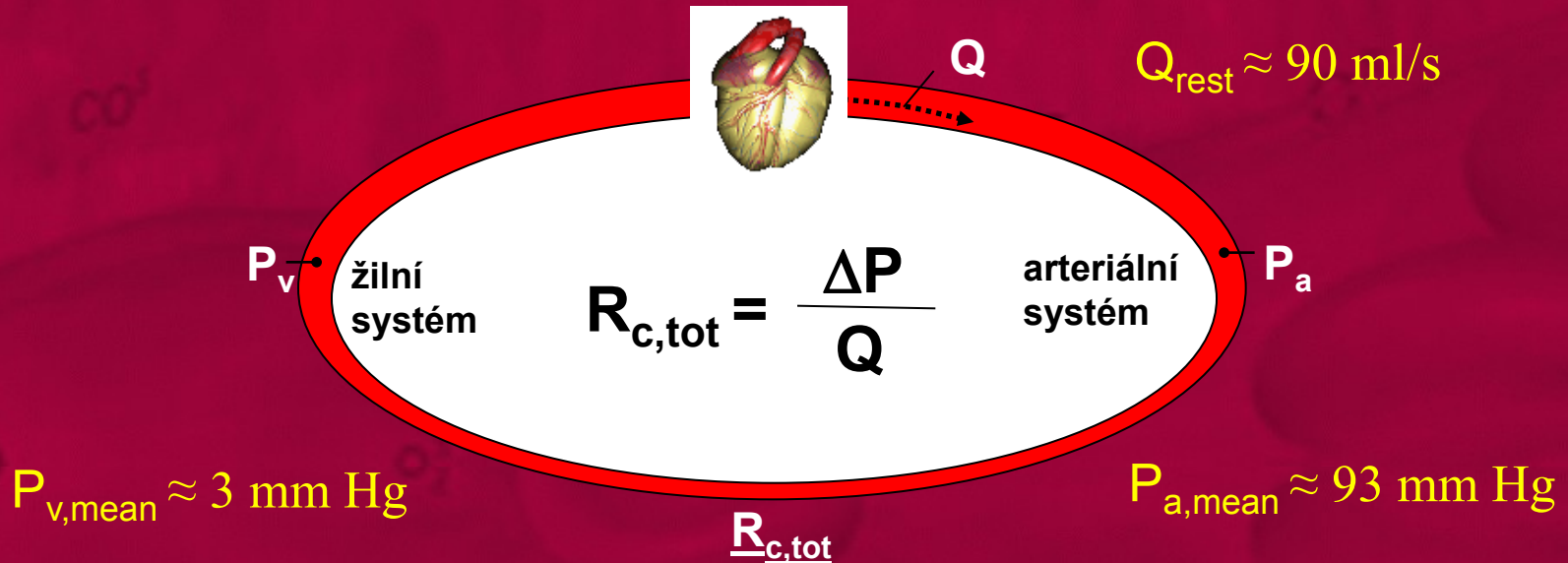
$$R_c = R \cdot n$$

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

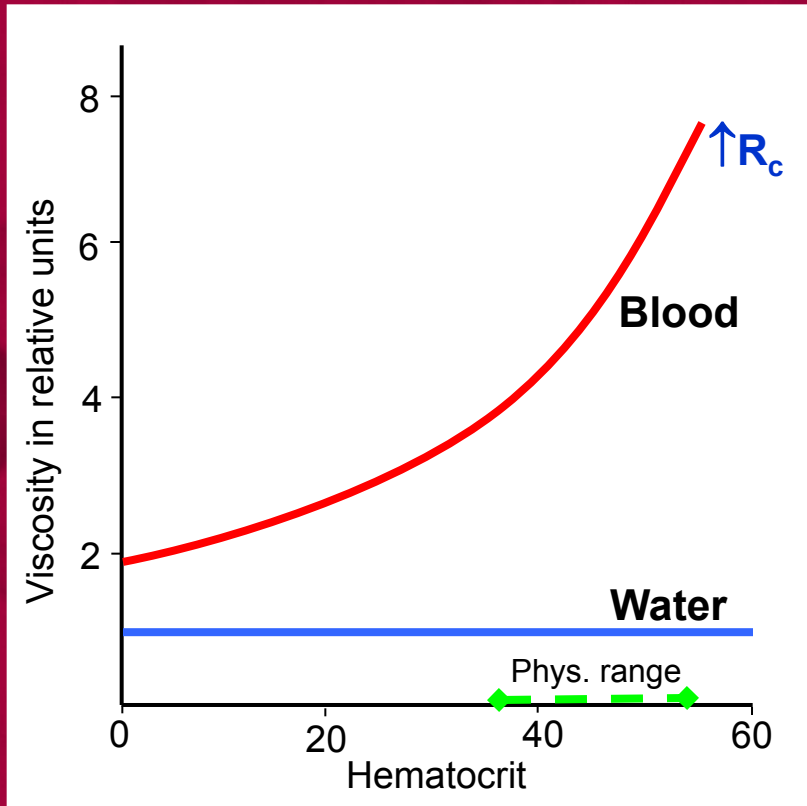
The background features a stylized illustration of a blood vessel with red blood cells. The chemical formulas CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> are scattered throughout the scene, suggesting the transport of these gases. The overall color scheme is a deep red with a subtle grid pattern.

## 2. Reologické vlastnosti krve a cév

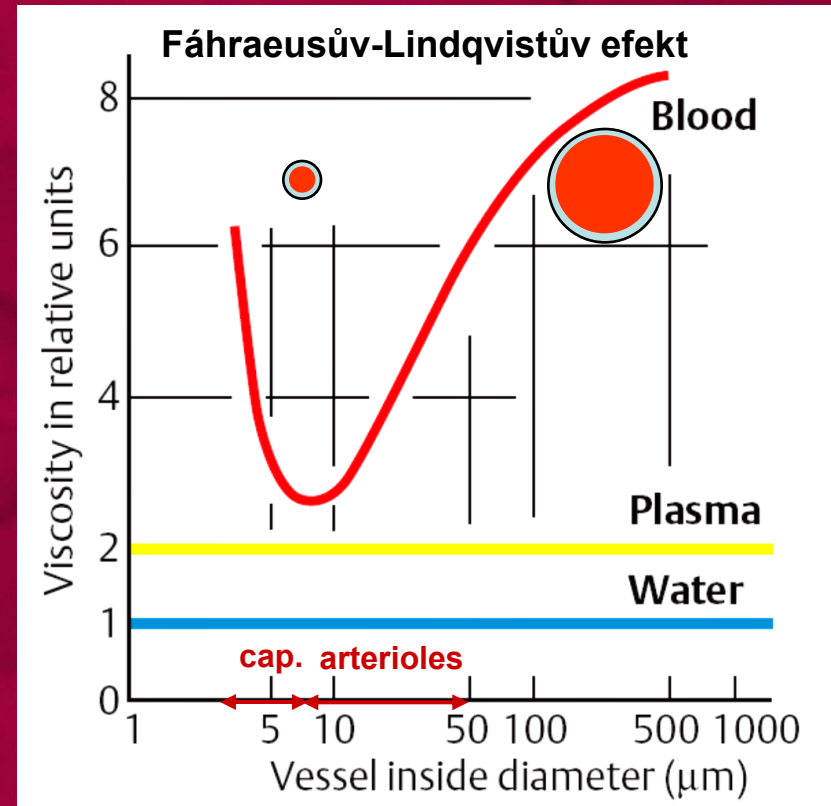
# Viskozita krve

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

## 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



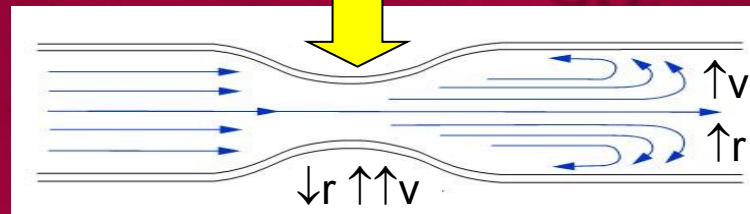
Charakter proudění určuje Reynoldsovo číslo

laminární proudění  
 $Re < 2000$

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

turbulentní proudění  
 $Re > 3000$

Náhlá změna průřezu cévy

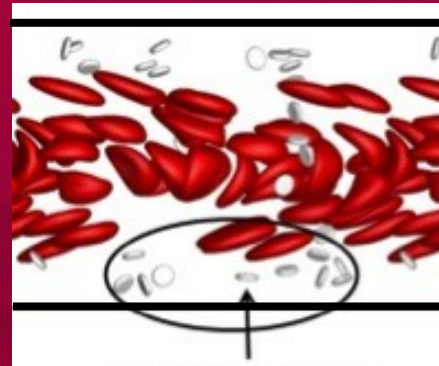
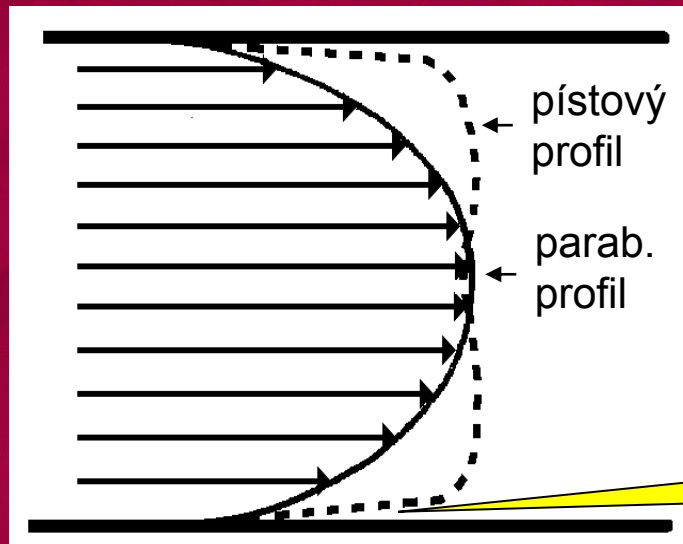


$$\uparrow Re \Rightarrow \uparrow R_c$$

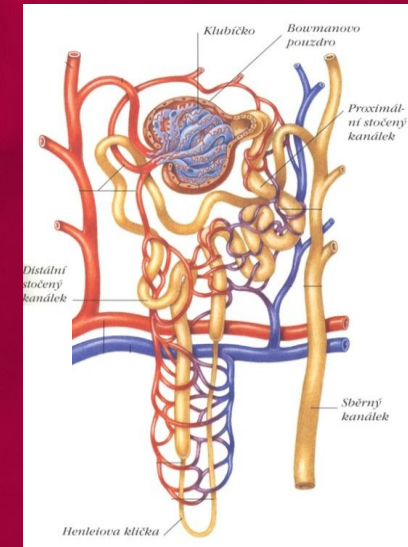
Patologické stavy způsobující turbulentní proudění: stenóza, ateroskleróza, aneurisma, rozdělení cév.



# Rychlostní profil toku krve v cévách

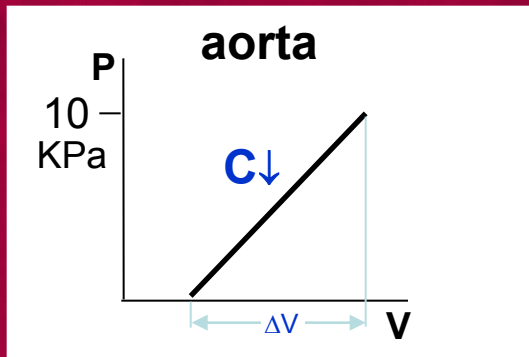
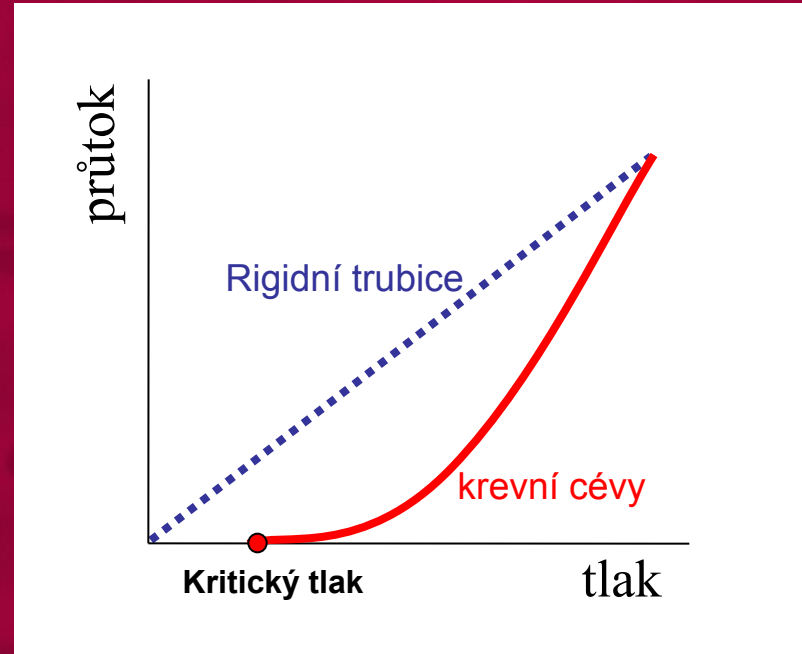


plasma-skimming



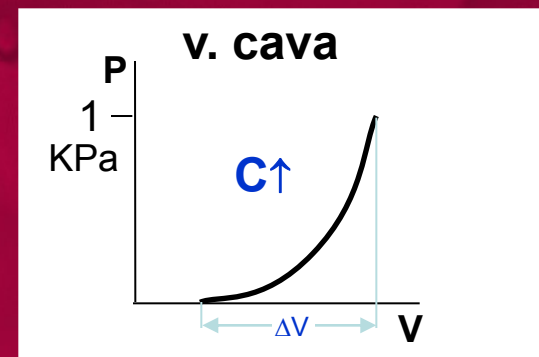
- V malých tepnách (při  $r < 100 \mu\text{m}$ ) způsobuje středový pohyb erytrocytů pístový profil krevního proudu.
- Ve větších tepnách (při  $r > 500 \mu\text{m}$ ) převládá laminární proudění a rychlostní profil krevního proudu má parabolický tvar.
- Ve velkých tepnách (především v aortě) dochází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

# Elasticita cév

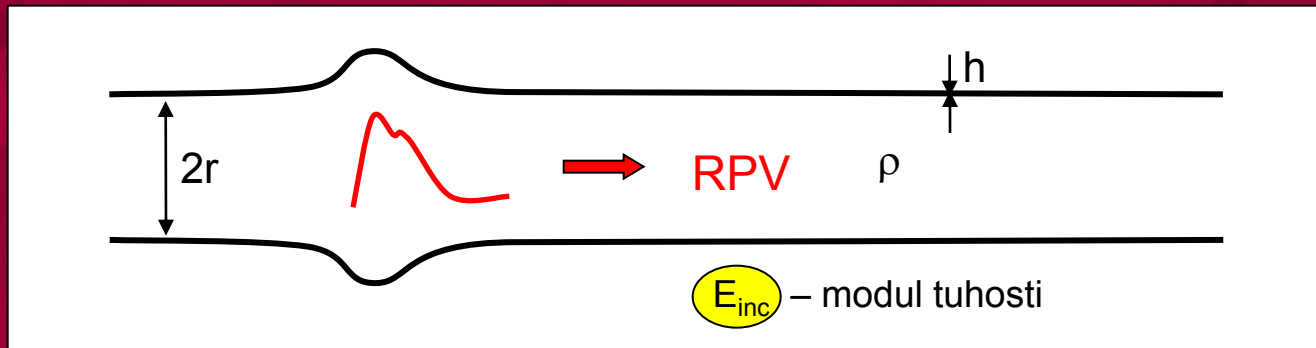


**poddajnost**

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



# Rychlost pulzní vlny

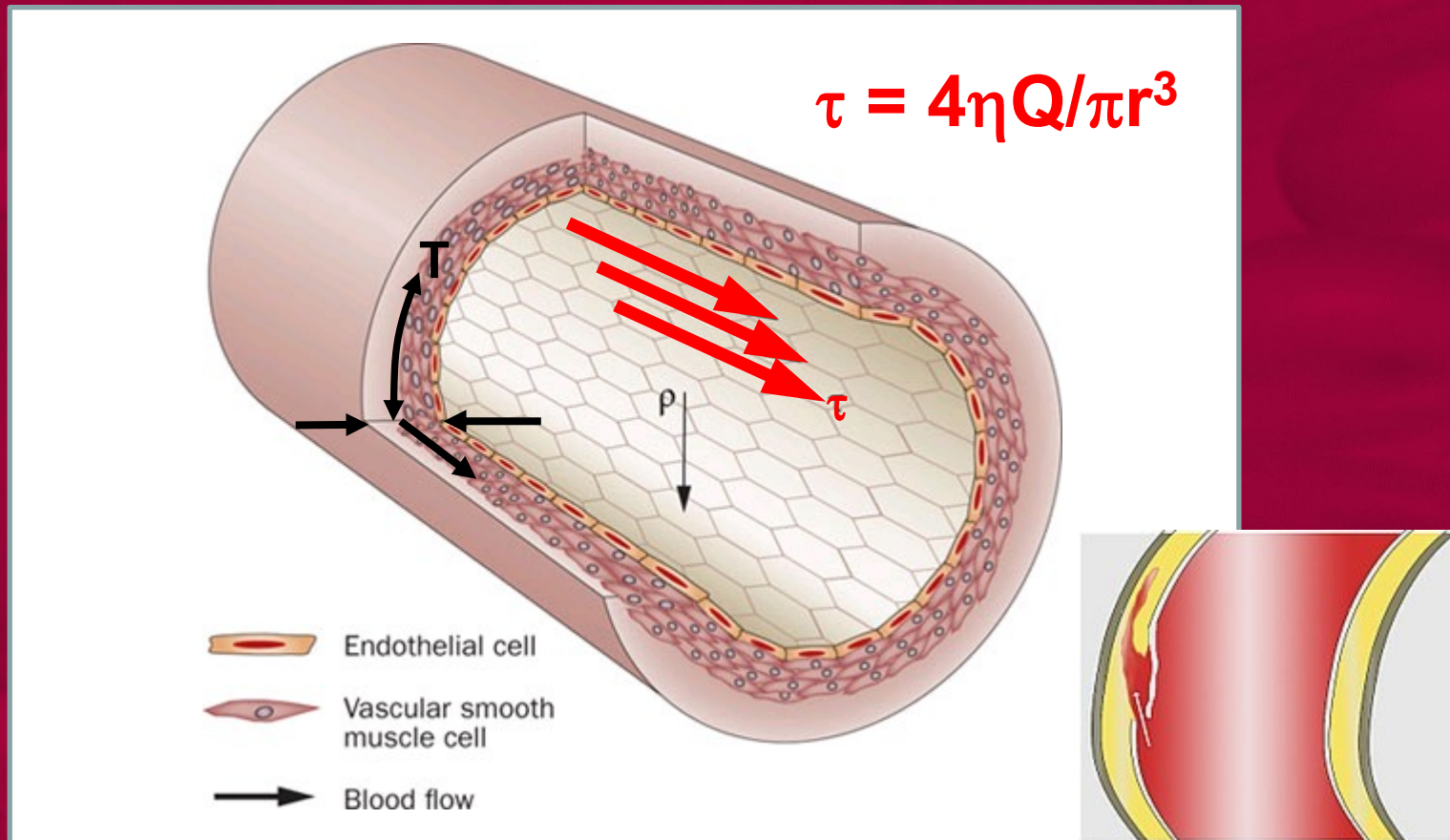


Moens-Korteweg (1878)

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

V aortě  $RPV = 4 - 6 \text{ m/s}$

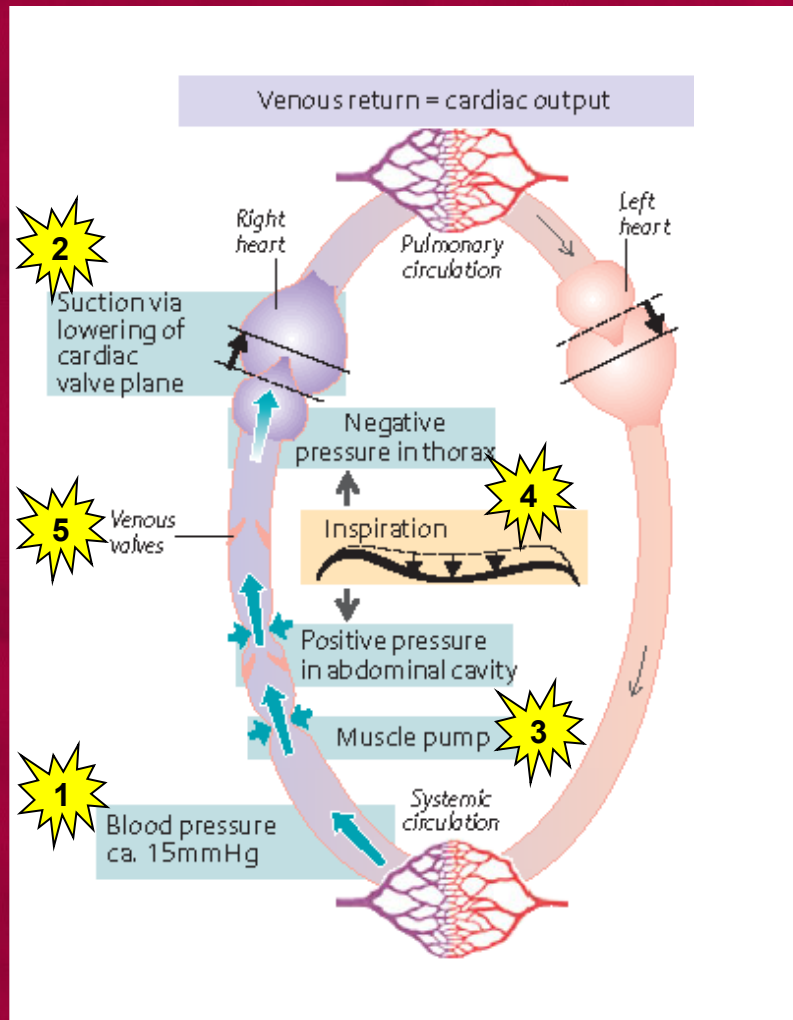
## Střihové napětí ve stěně cévy



- 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

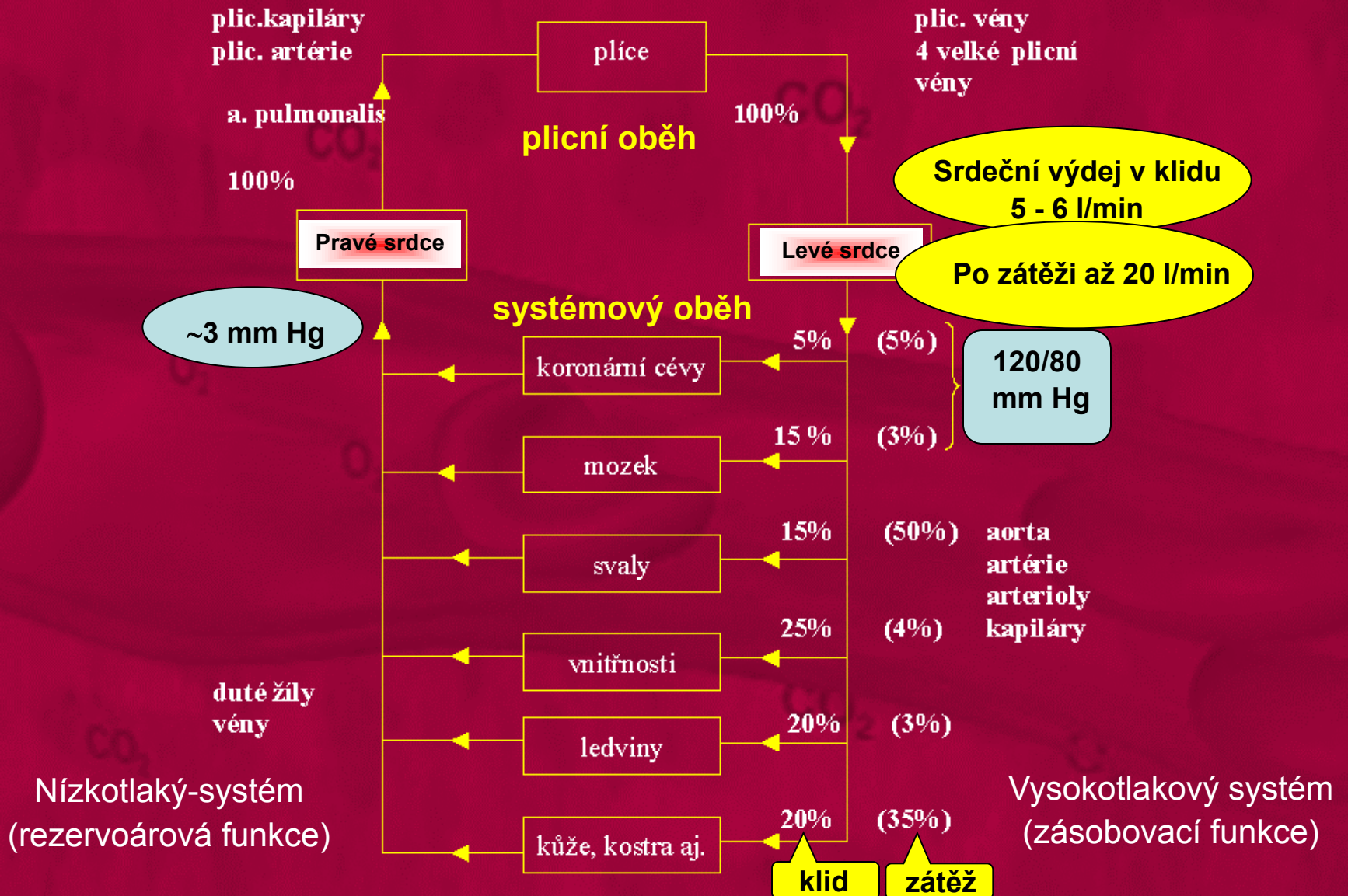
4. Přetlak v břišní dutině a podtlak v hrudní dutině během nádechu

5. Žilní chlopně

The background features a faint, light-colored diagram of a blood vessel with several red blood cells. The vessel is shown in cross-section, with a central lumen. The chemical formulas  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  are scattered throughout the diagram, indicating the presence of these gases in the blood. The overall color scheme is a dark red gradient.

### **3. Krevní oběh a tlak**

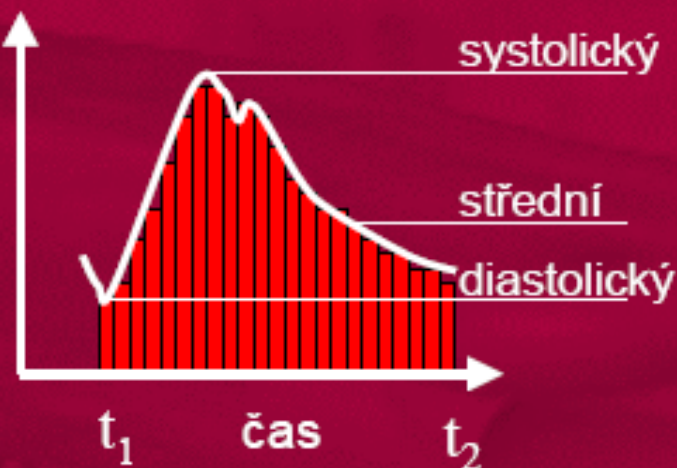
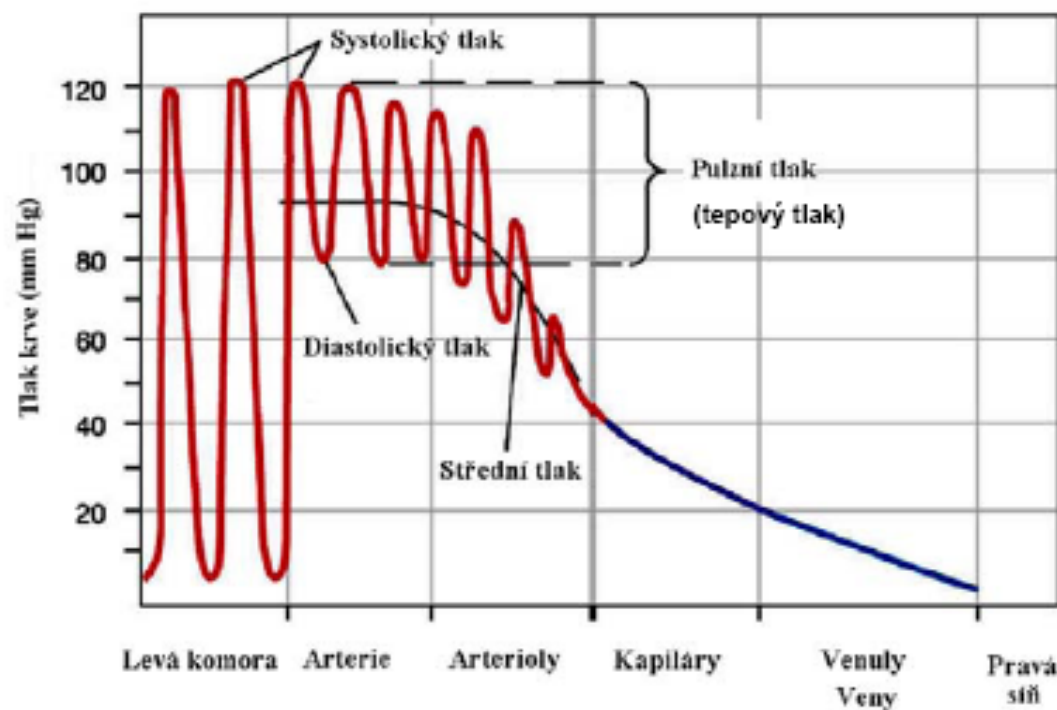
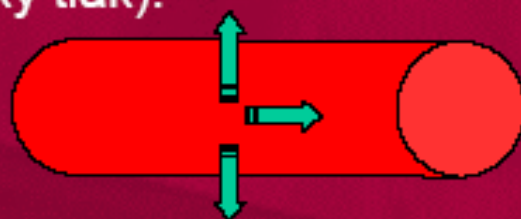
# Krevní oběh





# 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).

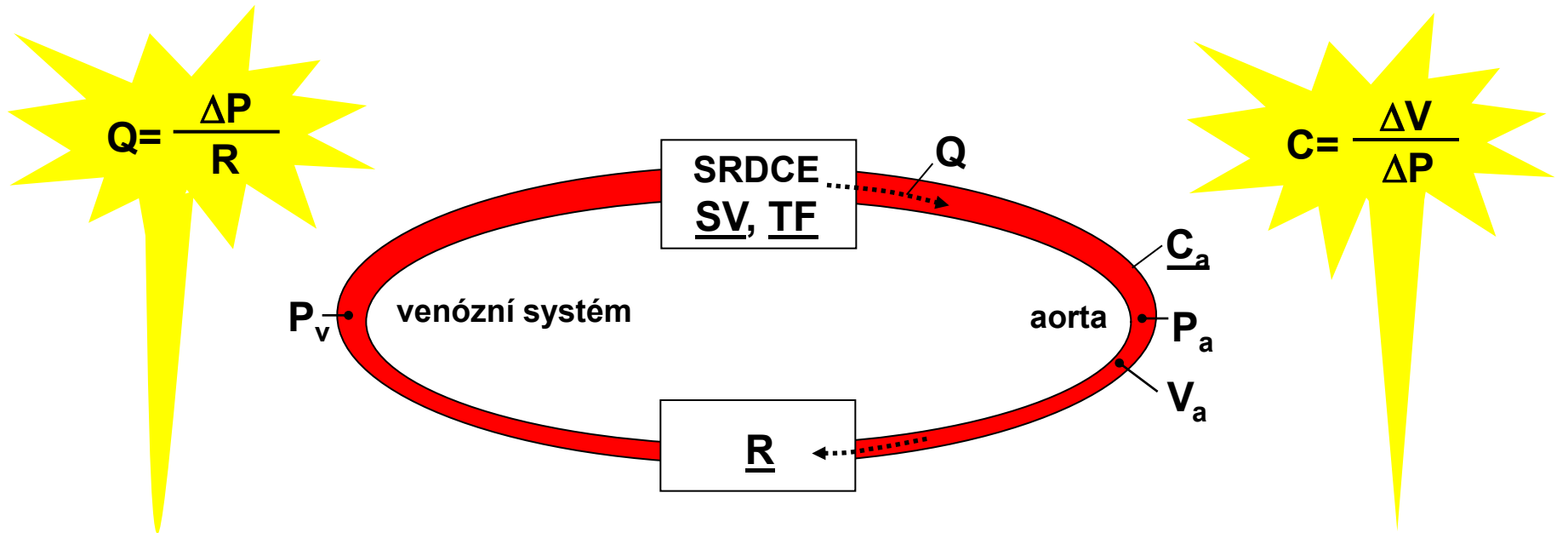


$$P_{stredni} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{P dt}{t_2 - t_1}$$

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



# Krevní tlak při změnách parametrů cévního systému a srdečního výdeje

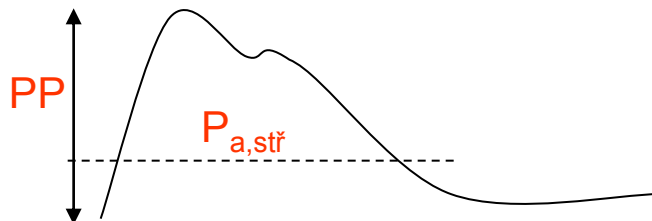


$$P_{a, \text{stř}} - P_{v, \text{stř}} = Q \cdot R$$

$$\Delta V \cong SV$$

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

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

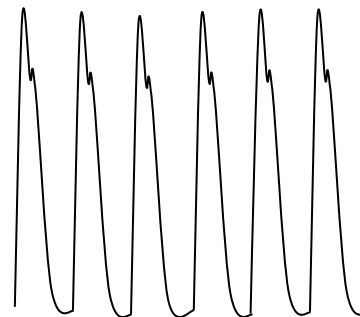


$$PP \cong \frac{SV}{C}$$

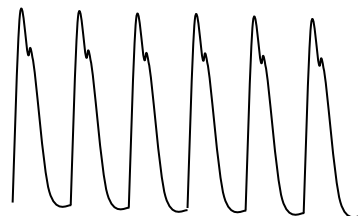
klidový stav

aktivita

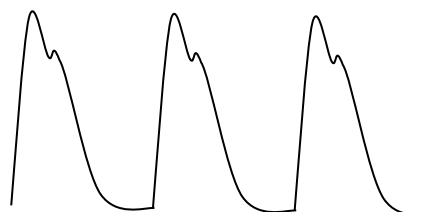
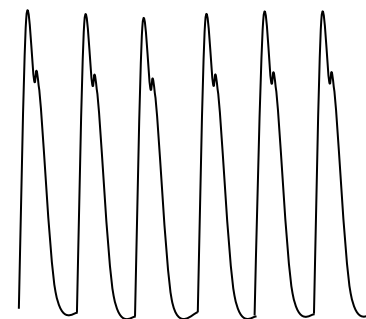
+SV↑



TF↑



+R↓



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

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

# Model aortálního pružníku

Výpočet  $P_a$

