

# Regulace krevního průtoku

Doc. MUDr. Markéta Bébarová, Ph.D.

*Fyziologický ústav LF MU*



**Tato prezentace obsahuje pouze stručný  
výťah nejdůležitějších pojmů a faktů. V  
žádném případě není sama o sobě  
dostatečným zdrojem pro studium ke  
zkoušce z Fyziologie.**

# Definice krevního průtoku

matematické vyjádření - analogie s elektrickým proudem

Ohmův zákon

$$I = U / R \longrightarrow$$

$$Q = \Delta P / R$$

- |            |  |
|------------|--|
| Q          | krevní průtok  |
| $\Delta P$ | rozdíl tlaků na začátku a konci cévy (cévního řečiště) |
| R          | odpor cévy<br>(cévního řečiště - periferní odpor)      |

# Definice krevního průtoku

$$Q = \Delta P / R$$

$$R = 8\eta l / \pi r^4$$

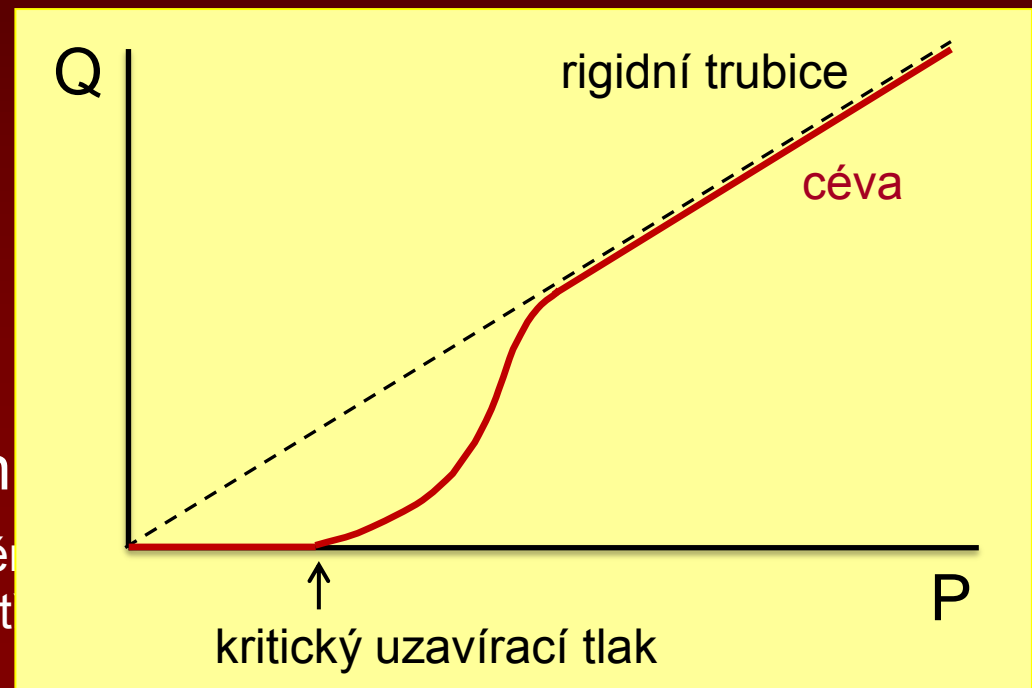
r poloměr průsvitu cévy  
 $\eta$  viskozita krve  
l délka cévy

Platí pro ustálené laminární

Viskozita krve není konstantní (úměrně  
neproudí laminárně, erythrocyty ve stěně)  
Elasticita cév.

Hagen - Poiseuillův zákon

$$Q = \Delta P \cdot \pi r^4 / 8\eta l$$



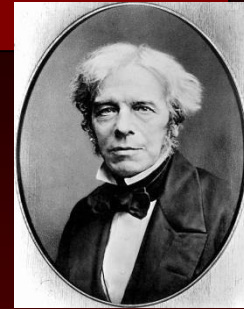
# Metody měření krevního průtoku

A. kanylou zavedenou do cévy

**B. bez nutnosti přímého kontaktu s krevním proudem**

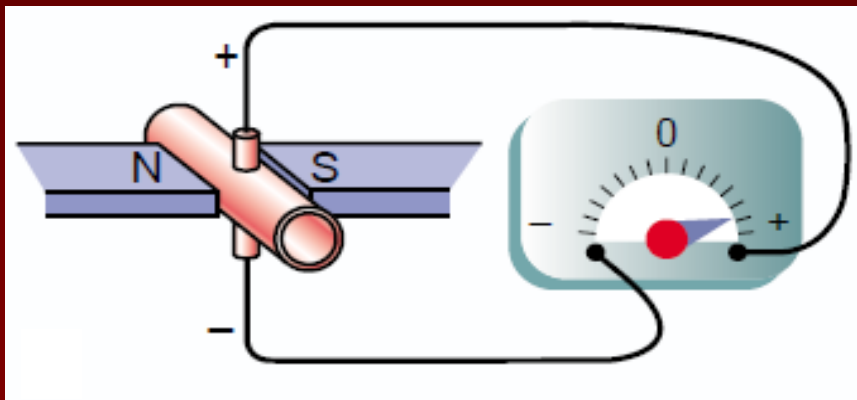
1. princip elektrické indukce
2. Dopplerův jev
3. pletysmografie
4. Fickův princip

# Metody měření krevního průtoku



## 1. princip elektrické indukce (Faraday, 1791-1867)

- ❖ elektromagnetický průtokoměr
- ❖ v krvi (vodič) je při pohybu v magnetickém poli indukováno elektrické napětí (měřeno elektrodou na povrchu cévy) úměrné rychlosti jejího pohybu



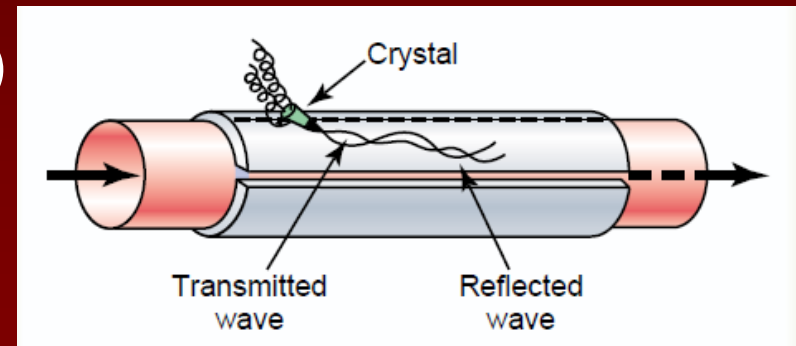
- ❖ umožňuje detekovat změny rychlosti menší než 0,01 s → měření stabilního krevního toku i jeho rychlých změn (pulzace)

# Metody měření krevního průtoku



## 2. Dopplerův jev (Christian Doppler, Praha 1842)

- ❖ ultrazvukový Dopplerův průtokoměr; nejčastěji užívané
  - ultrazvukové vlny známé vlnové délky (frekvence) jsou vysílány ve směru krevního toku šikmo do cévy z drobného piezoelektrického krystalu
  - odrazí se od krvinek → změna (↑) vlnové délky (↓ frekvence)
  - odražené vlny jsou opět vychytávány krystalem
- ❖ změna vlnové délky (frekvence) ultrazvukových vln po jejich odrazu od krvinek je úměrná rychlosti krevního proudu
- ❖ rovněž umožňuje měřit jak stabilní rychlost krevního toku, tak i jeho rychlé změny

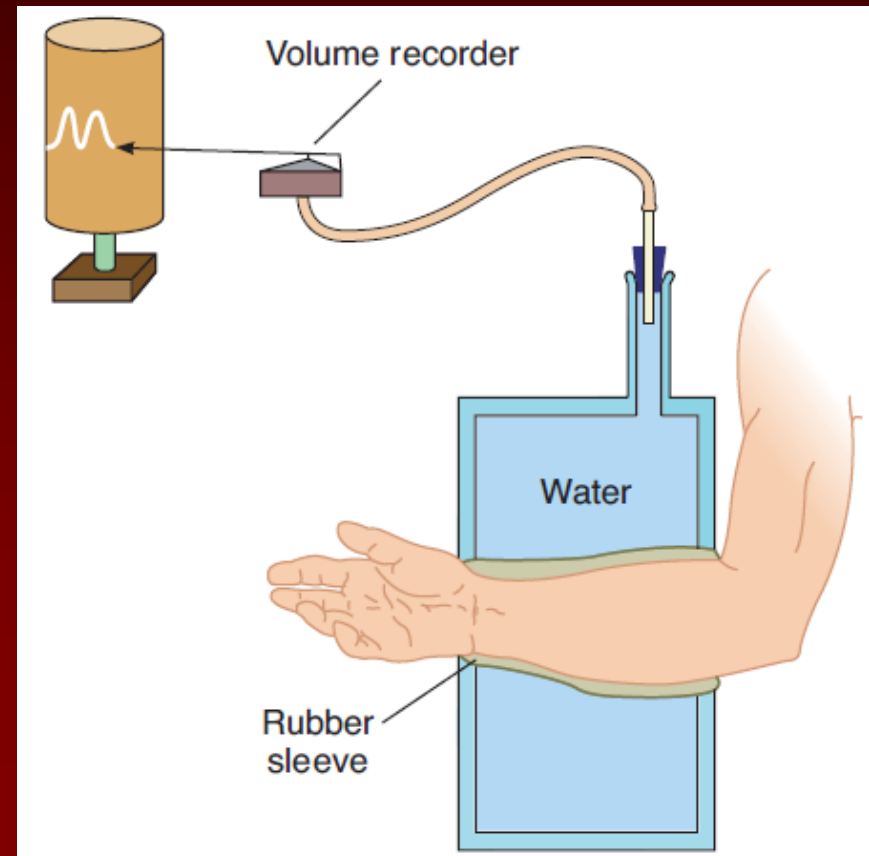


# Metody měření krevního průtoku

## 3. pletysmografie

- ❖ obvykle jako venózní okluzní pletysmografie
- ❖ na končetinách

- venózní drenáž končetiny uzavřena (např. manžetou)
- narůstající objem končetiny (vytlačující vodu z uzavřené nádoby, měřeno jako změna objemu) je pak přímo úměrný arteriálnímu přítoku krve





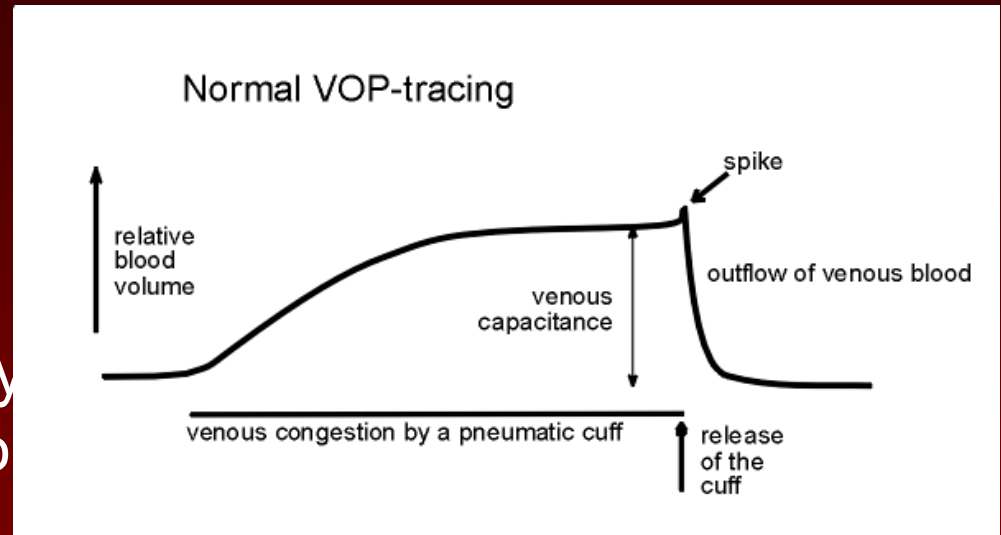
# Metody měření krevního průtoku

## 3. pletysmografie

- ❖ obvykle jako venózní okluzní pletysmografie
- ❖ na končetinách

- venózní drenáž končetiny uzavřena (např. manžeta)

- narůstající objem končetiny (vytlačující vodu z uzavřené nádoby, měřeno jako změna objemu) je pak přímo úměrný arteriálnímu přítoku krve



[http://schueler.ws/?page\\_id=21](http://schueler.ws/?page_id=21)

# Metody měření krevního průtoku

## 4. Fickův princip - přímá Fickova metoda

$$Q = \frac{M / \text{čas}}{AV \text{ rozdíl}}$$

- krev vstupující z pravého srdce do plic – cca 150 ml O<sub>2</sub> / 1 l  
(vzorek smíšené venózní krve odebraný z plicní arterie katetrem zavedeným cestou brachiální žíly)
- krev vystupující z plic do levého srdce – cca 200 ml O<sub>2</sub> / 1 l  
(vzorek arteriální krve z kterékoliv arterie, obsah O<sub>2</sub> v tepnách se neliší)

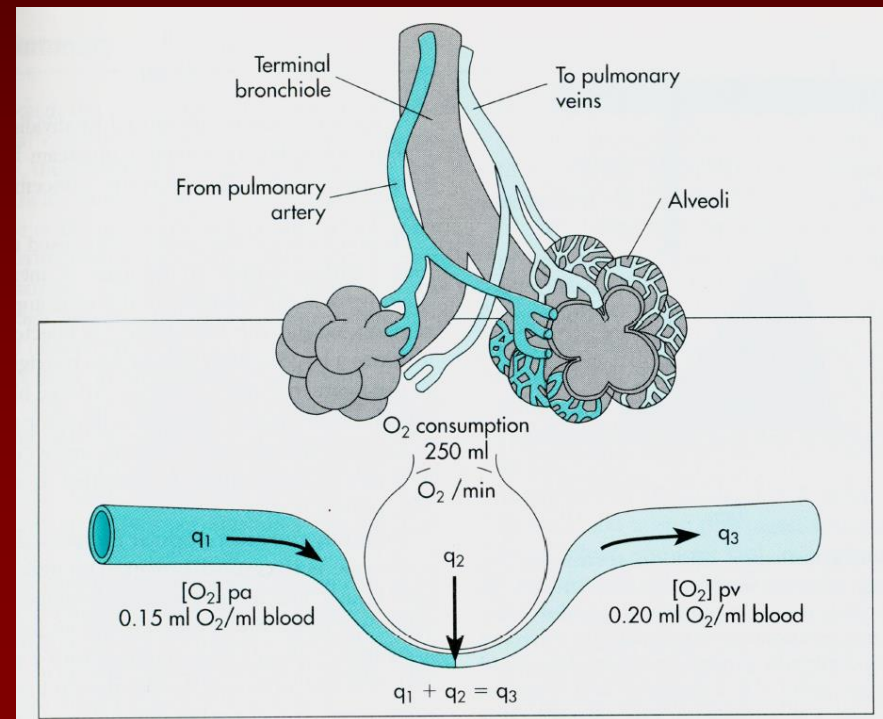


Každý litr krve zachytí během průchodu plicemi 50 ml O<sub>2</sub>.

- celkově z plic do krve absorbováno 250 ml O<sub>2</sub> za 1 min  
(úbytek O<sub>2</sub> ve vydechovaném vzduchu oproti vzduchu vdechovanému, oxymetr)



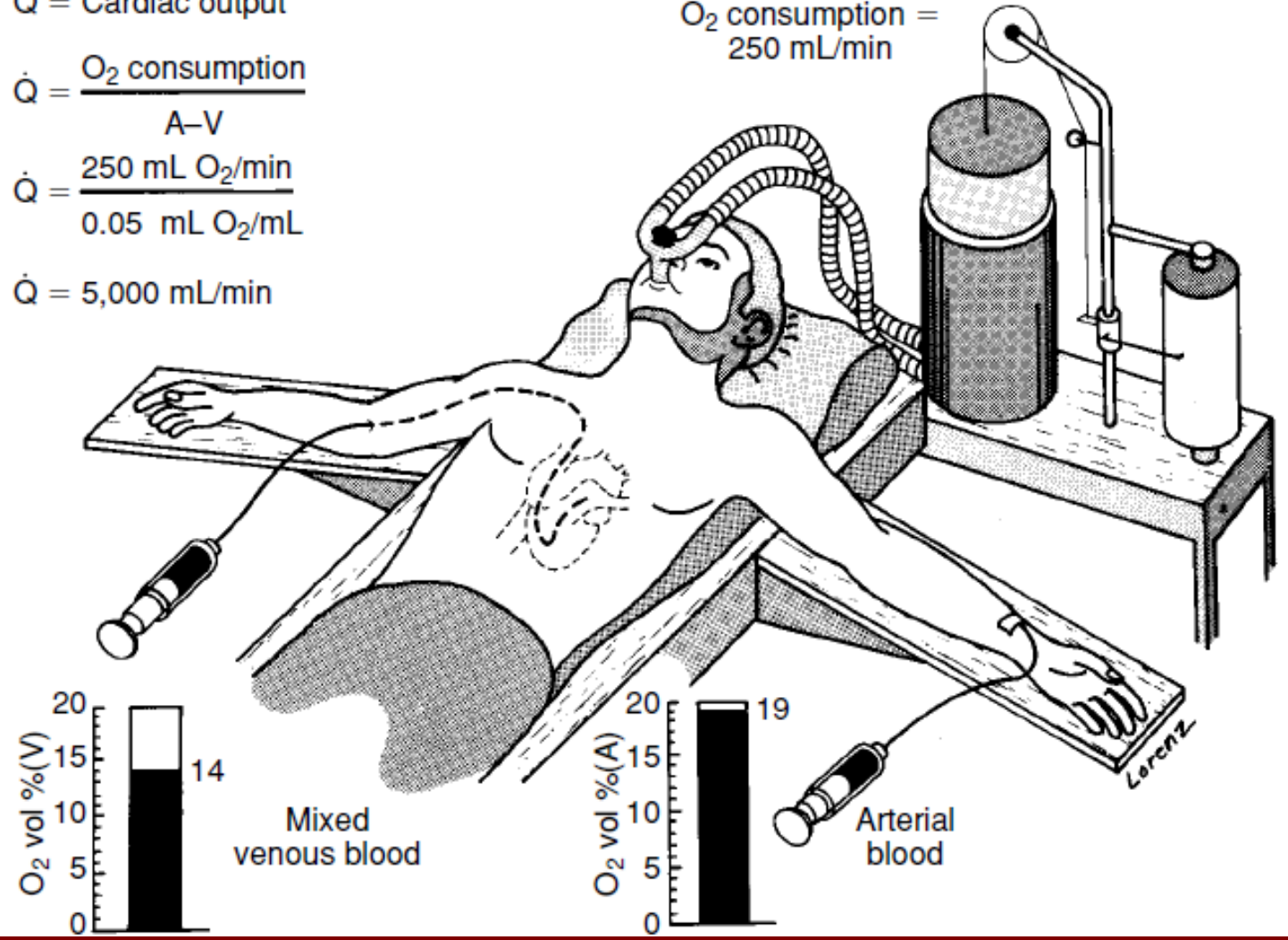
$$SV = \frac{250 \text{ ml O}_2 / \text{min}}{50 \text{ ml O}_2 / \text{l}} = 5 \text{ l} / \text{min}$$



# Metody měření krevního průtoku

$$\dot{Q} = \text{Cardiac output}$$
$$\dot{Q} = \frac{\text{O}_2 \text{ consumption}}{A-V}$$
$$\dot{Q} = \frac{250 \text{ mL O}_2/\text{min}}{0.05 \text{ mL O}_2/\text{mL}}$$
$$\dot{Q} = 5,000 \text{ mL/min}$$

O<sub>2</sub> consumption = 250 mL/min



# Metody měření krevního průtoku

## 4. Fickův princip – metoda indikátorového plynu

- ❖ ke stanovení okamžitého průtoku krve konkrétní tkáně
- ❖ např. stanovení průtoku krve mozkiem (či koronární průtok) pomocí oxidu dusného  $N_2O$  – Ketyho metoda

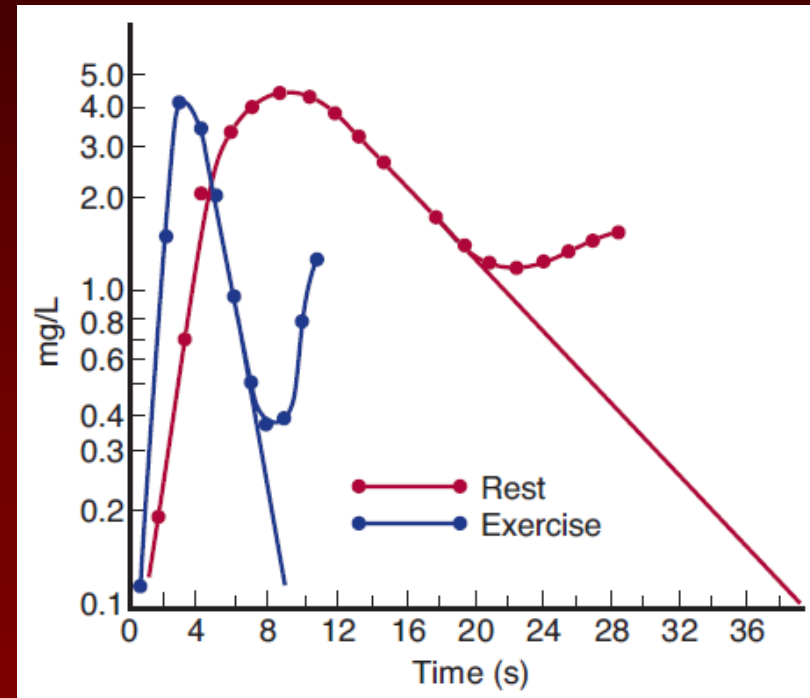
$$\text{průtok krve mozkiem} = \frac{\text{množství } N_2O \text{ ve venózní krvi} \downarrow \text{ } N_2O \text{ extrahovaný mozkiem z krve} / \text{čas}}{\text{průměrný arteriovenózní rozdíl } N_2O}$$

# Metody měření krevního průtoku

## 4. Fickův princip - indikátorová diluční technika

- vstříknutí známého množství indikátoru (barviva či radioaktivního izotopu) do periferní žíly ( $A$ , [mg])
- sledování koncentrace indikátoru v sérii vzorků tepenné krve
- stanovení průměrné koncentrace indikátoru v tepenné krvi během jednoho oběhu ( $C$ , [mg/ml])

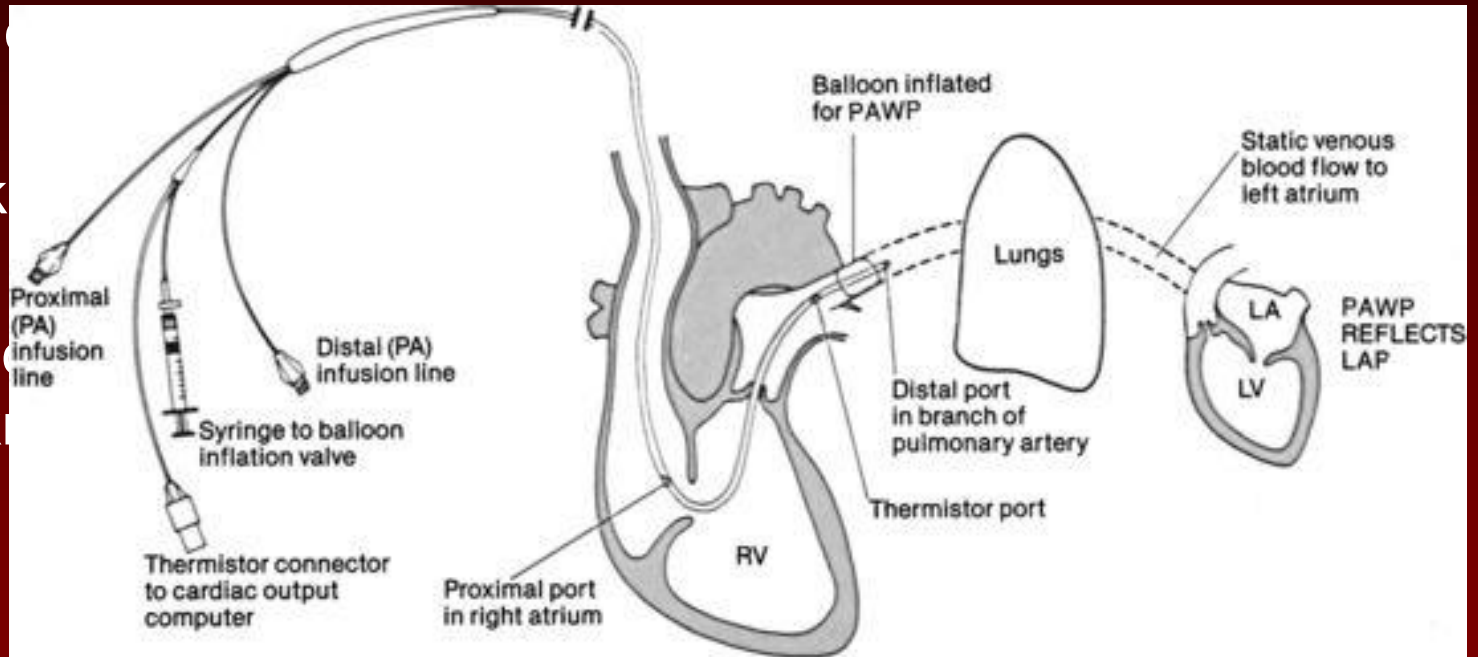
$$SV = \frac{A}{C (t_2 - t_1)} \quad \begin{array}{l} \text{[mg]} \\ \text{[mg.ml}^{-1}\text{.s]} \end{array}$$



# Metody měření krevního průtoku

## 4. Fickův princip - indikátorová diluční technika

- vstříknutí známého množství indikátoru (barviva či radiokativního izotopu) do
  - sledování
  - stanovení
- tepenné k  
oběhu ( $C_p$



### ❖ termodiluční metoda

chladný fyziologický roztok (indikátor) dvoucestným katetrem do pravé síně; termistorem na druhém konci katetru zaznamenávají změny teploty v plicnici (nepřímo úměrné průtoku)

# Regulace krevního průtoku

$$Q = \Delta P \cdot \pi r^4 / 8 \eta l$$

**klidový cévní tonus** (stav středního napětí cév)

- ❖ je dán tonickou vzrušovací aktivitou vazokonstrikčních sympatických vláken
- ❖ roli by mohla hrát i: myogenní odpověď na napětí v cévách dané tlakem protékající krve (dále), vysoká tenze  $O_2$  v arteriální krvi, přítomnost  $Ca^{2+}$

**bazální cévní tonus**

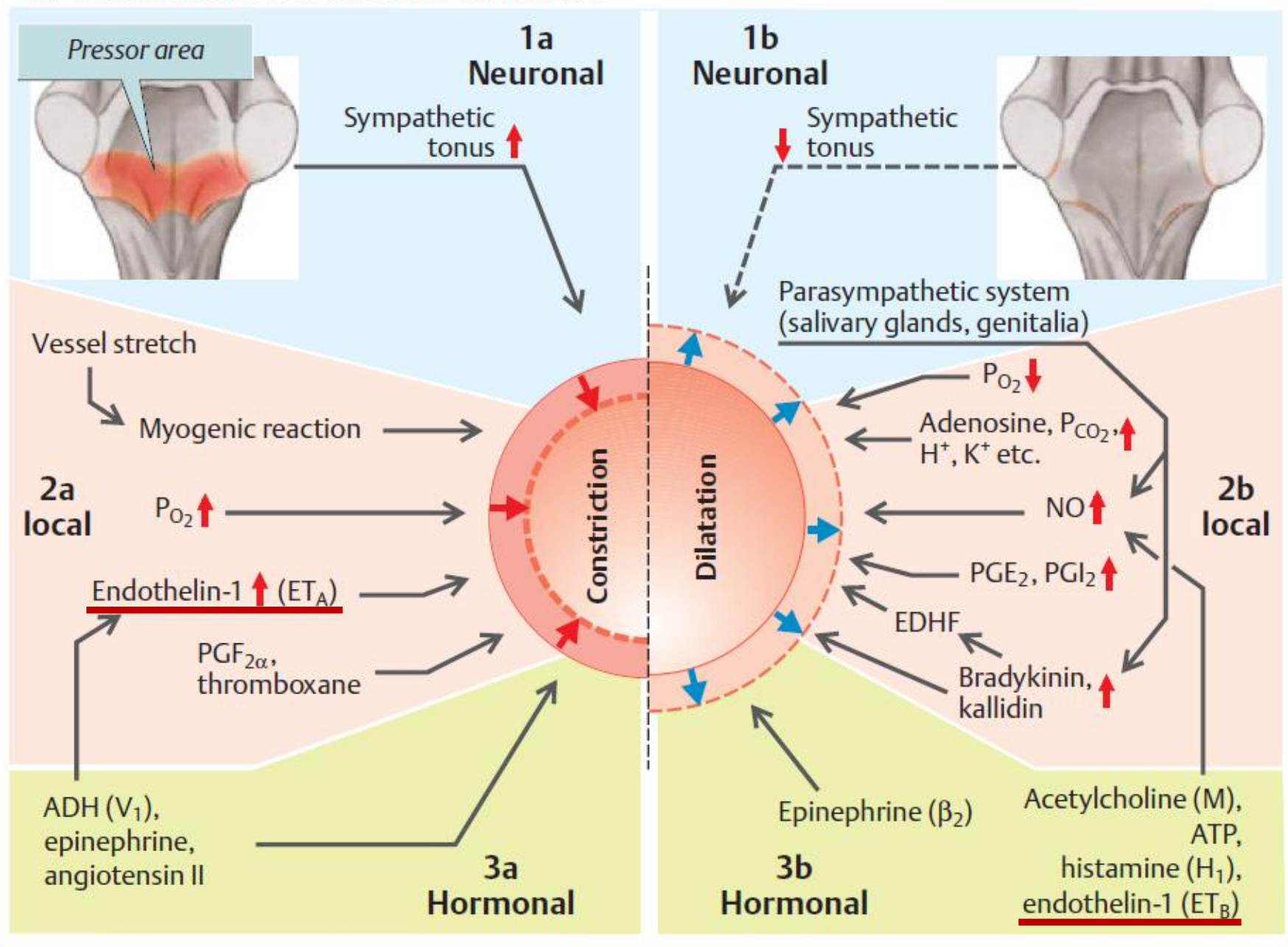
- ❖ po denervaci; dán spontánními depolarizacemi hladké svaloviny cév

## Regulace

Místní

Systémová

## B. Vasoconstriction and vasodilatation





# Regulace krevního průtoku - místní

## A. Akutní

*sekundy až minuty, ale nekompletní (zhruba ze 3/4)*

1. **Metabolická autoregulace**
2. Myogenní autoregulace
3. Regulace zprostředkovaná lokálními působky

## B. Chronická

*hodiny, dny až týdny*

# Regulace krevního průtoku - místní

## Metabolická autoregulace

nedostatečný krevní průtok  $\begin{cases} \nearrow \uparrow \text{metabolické nároky tkáně} \\ \searrow \downarrow \text{nebo zastavené zásobení krví} \end{cases}$

→ hromadění metabolitů ( $\text{CO}_2$ , kys. mléčná, adenosin,  $\text{K}^+$ , ionty fosfátu),  $\downarrow$  pH,  $\uparrow$  osmolarity v intersticiu,  $\uparrow$  teploty tkáně (metabolické teplo);  $\downarrow$   $\text{pO}_2$  (druhá teorie založená na nedostatku  $\text{O}_2$  a živin)

→ **vazodilatace**

V zájmu zachování nutného prokrvení tkání při vznikající hypoxii má přednost před systémovou regulací.

*Klíčovou roli hraje např. v mozku, srdci a kosterních svalech.*

# Regulace krevního průtoku - místní

## Metabolická autoregulace

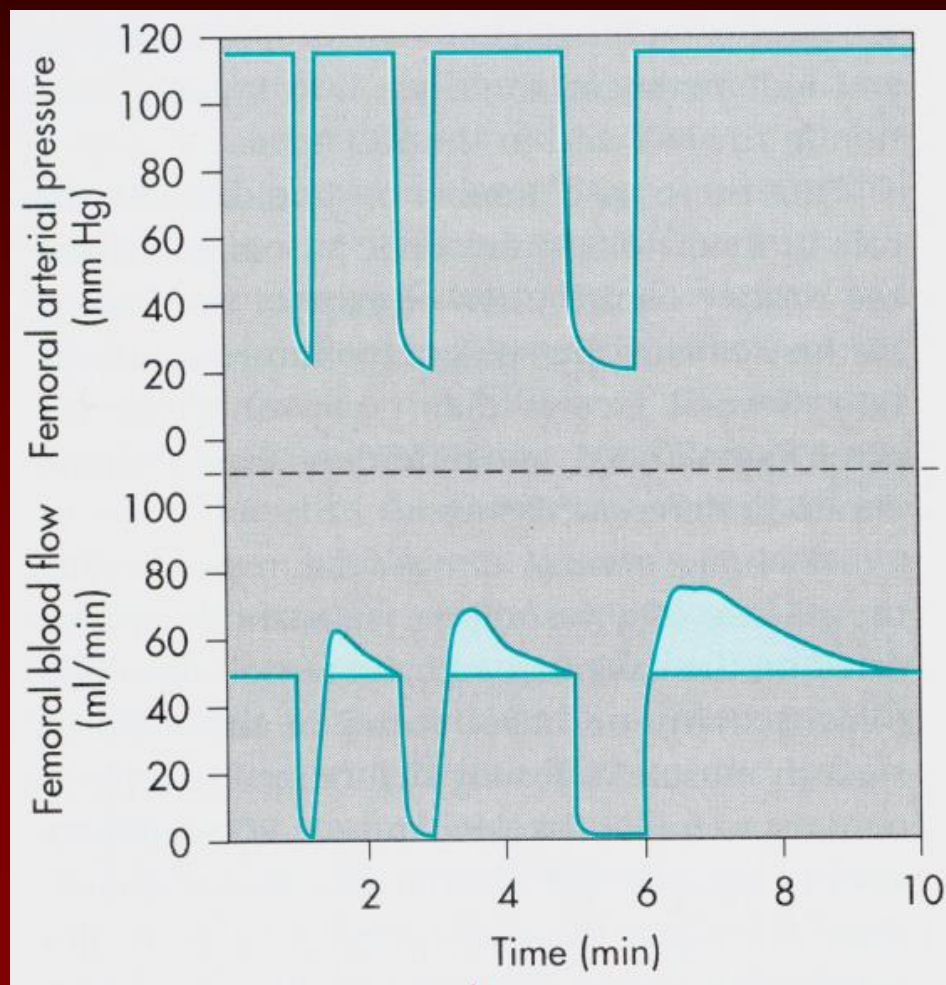
### aktivní hyperémie

(vzestup krevního průtoku daný navýšením metabolické aktivity tkáně)

### reaktivní hyperémie

(přechodný vzestup krevního průtoku nad běžnou úroveň po obnovení dočasně zastaveného krevního průtoku tkání)

(okluze a. femoralis psa po dobu 15, 30 a 60 s)



# Regulace krevního průtoku - místní

## A. Akutní

*sekundy až minuty, ale nekompletní (zhruba ze 3/4)*

1. Metabolická autoregulace
2. Myogenní autoregulace
3. Regulace zprostředkovaná lokálními působky

## B. Chronická

*hodiny, dny až týdny*

# Regulace krevního průtoku - místní

## Myogenní autoregulace (Baylissův efekt)

↑ krevního tlaku

→ ↑ krevního průtoku i ↑ napětí cévní stěny

$$Q = \Delta P / R$$

Laplaceův zákon

$$T = P \cdot r$$

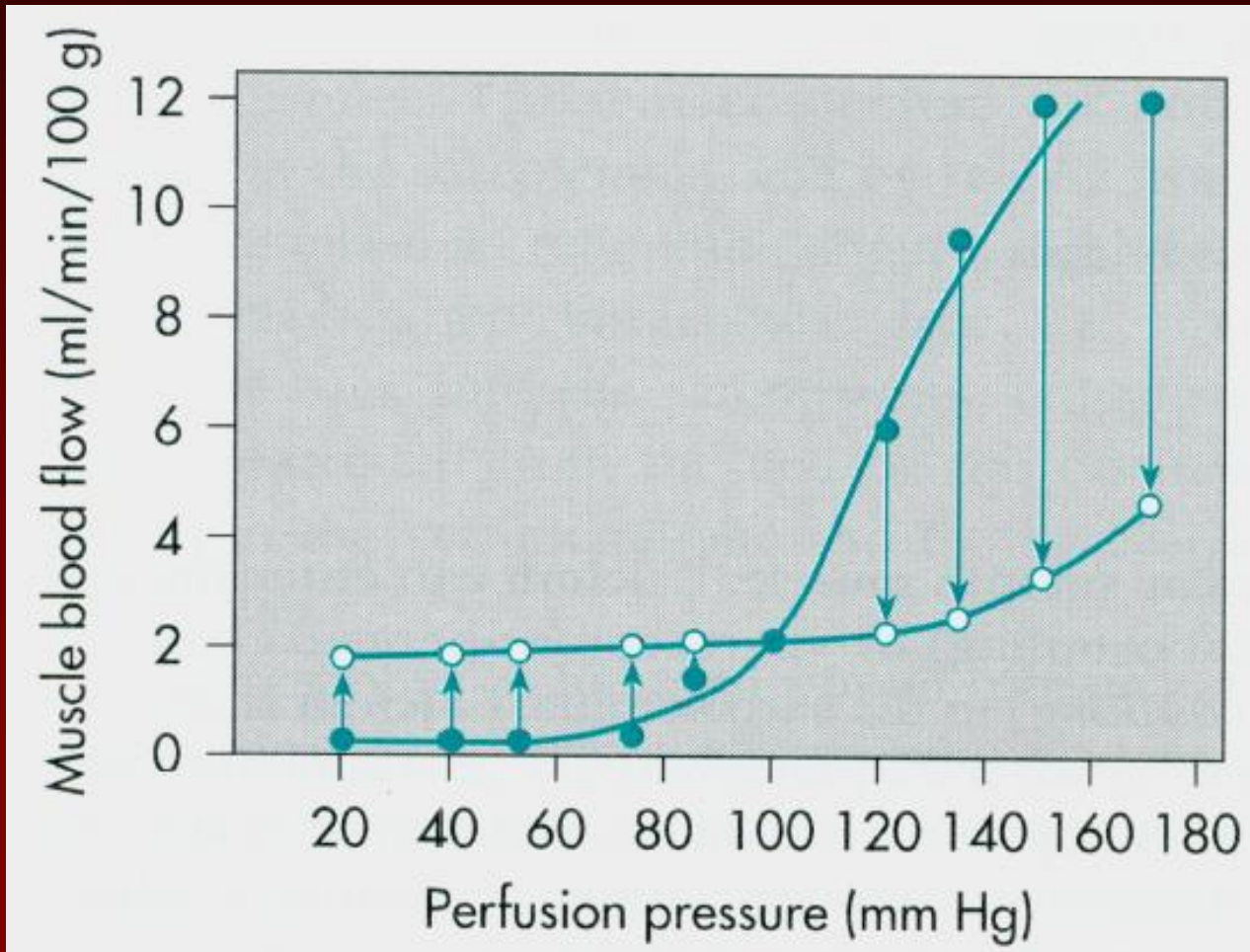
→ mechanické podráždění, depolarizace a následná kontrakce buněk hladké svaloviny cévní stěny → vazokonstrikce

→ návrat krevního průtoku k původní hodnotě

*Výrazně se uplatňuje zejména v mozku a ledvinách.*

# Regulace krevního průtoku - místní

## Myogenní autoregulace



# Regulace krevního průtoku - místní

## A. Akutní

*sekundy až minuty, ale nekompletní (zhruba ze 3/4)*

1. Metabolická autoregulace
2. Myogenní autoregulace
3. Regulace zprostředkovaná lokálními působky

## B. Chronická

*hodiny, dny až týdny*

# Regulace krevního průtoku - místní

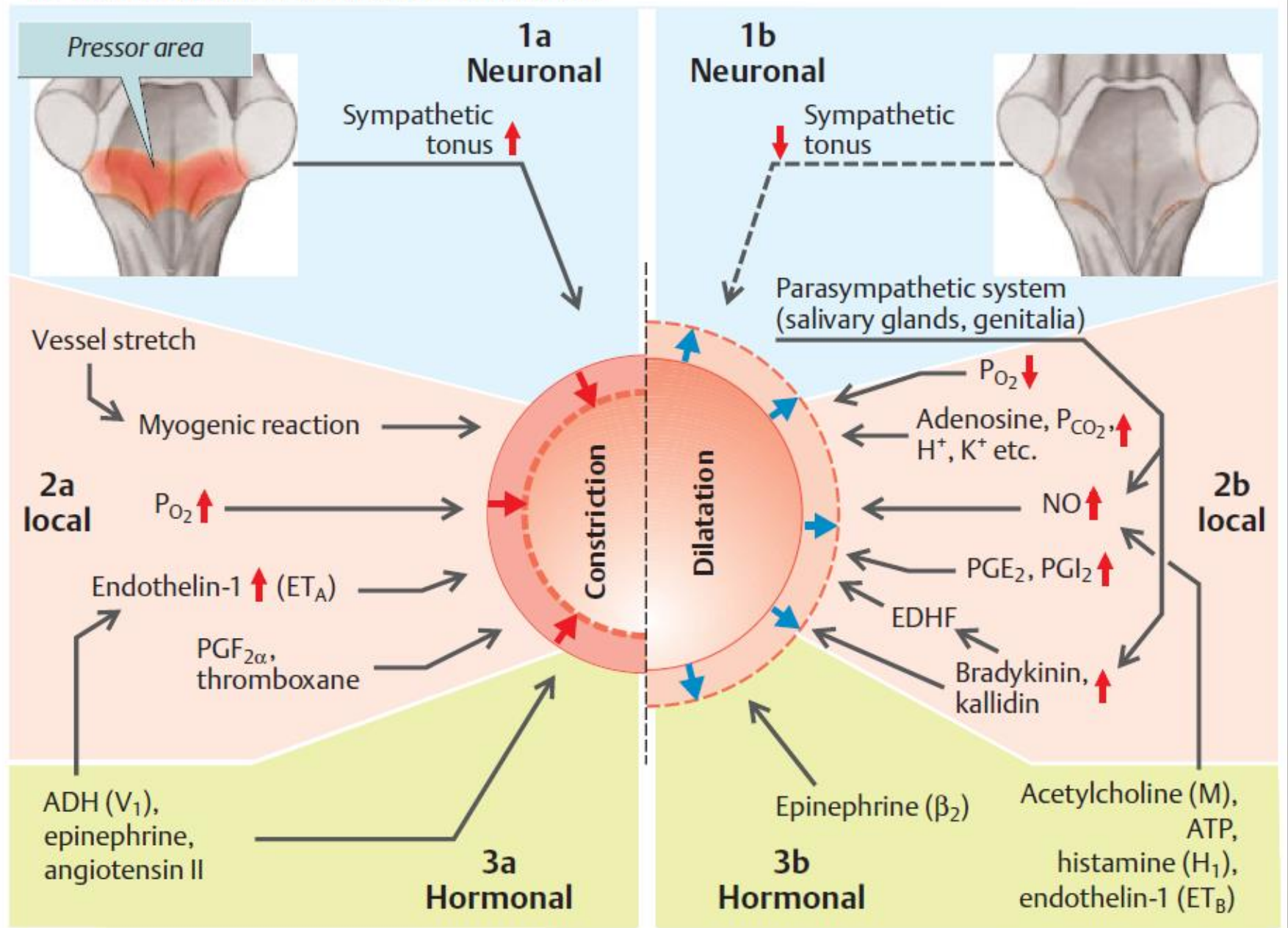
## Regulace zprostředkovaná působky

*endothelial-derived relaxing factor (EDRF) – NO*  
(poločas v krvi pouze 6 s) → vazodilatace

- ❖ uplatní se u **větších arterií**, kam již přímo nedosáhnou metabolické změny vyvolané lokálně nedostatečným krevním průtokem
- ❖ je syntetizován v **endoteliálních buňkách** arteriol a malých arterií v závislosti na tzv. **smykovém napětí** vyvolaném proudící krví (působí deformaci buněk ve směru toku)
- ❖ jeho **syntéza** stimulována **produkty shlukování destiček** (udržuje průchodnost cév s neporušeným endotelem) a také řadou **primárně vazokonstrikčních látek**

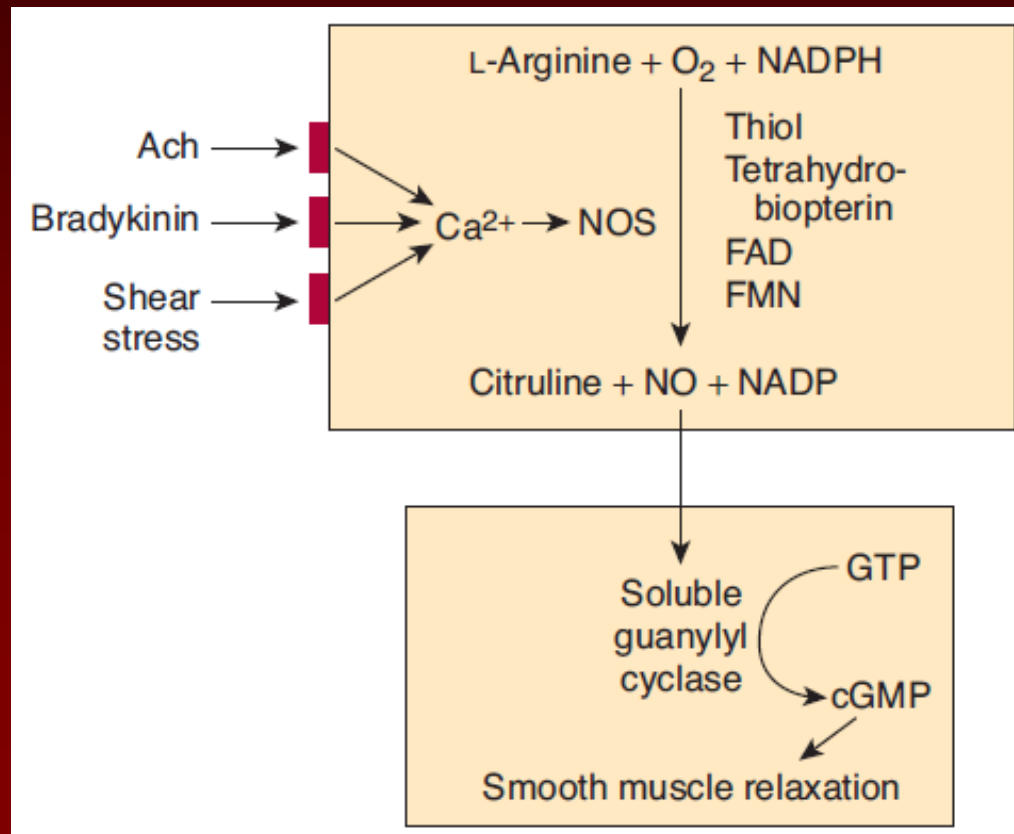


## B. Vasoconstriction and vasodilatation



# Regulace krevního průtoku - místní

## Regulace zprostředkovaná působky *endothelial-derived relaxing factor* (EDRF) – NO



# Regulace krevního průtoku - místní

## Regulace zprostředkovaná působky

### prostacyklin

- ❖ syntetizován v endoteliích z arachidonové kyseliny
- ❖ inhibice agregace destiček a vyvolání **vazodilatace**

### tromboxan $A_2$

- ❖ syntetizován z arachidonové kyseliny destičkami
- ❖ podpora agregace destiček a vyvolání **vazokonstrikce**

*Pro vytvoření lokalizované sraženiny a zachování krevního průtoku nutná rovnováha mezi těmito dvěma látkami. (aspirin)*

# Regulace krevního průtoku - místní

## Regulace zprostředkovaná působky

### endoteliny

- ❖ několik podobných polypeptidů syntetizovaných endotelem (ET-1 až 3)
- ❖ 2 endotelinové **receptory**:
  - ET<sub>A</sub> – specifický pro ET-1, především v cévách různých tkání,  
→ **vazokonstrikce**
  - ET<sub>B</sub> – ET-1 až ET-3, funkce neznámá (možná vazodilatace a v jejich nepřítomnosti vývojové defekty)
- ❖ **ET-1 - nejúčinnější doposud izolovaná vazokonstrikční látka**
- ❖ přesná fyziologická role není známa
- ❖ uvolňovány z endotelu při poškození tkáně → vazokonstrikce → omezení krvácení
- ❖ role při uzavírání *ductus arteriosus* při narození

# Regulace krevního průtoku - místní

## Serotonin (5-OH tryptamin)

### ❖ vazokonstrikční efekt

- v poškozené tkáni
- přímý lokální efekt
- uvolněn z trombocytů

### ❖ vazodilatační efekt

- ve zdravé, nepoškozené tkáni
- přes zvýšenou produkci NO

# Regulace krevního průtoku - místní

## Další, specifické mechanismy

- ❖ lokální vazokonstrikce poškozených arterií a arteriol  
(díky vyplavení serotoninu a tromboxanu A<sub>2</sub> z destiček a endotelinu-1 z endoteliálních buněk)
- ❖ vazokonstrikce (vazodilatace) vyvolaná poklesem (nárůstem) tkáňové teploty
- ❖ specializované tkáně (ledviny, mozek apod.)

# Regulace krevního průtoku - místní

## A. Akutní

*sekundy až minuty, ale nekompletní (zhruba ze 3/4)*

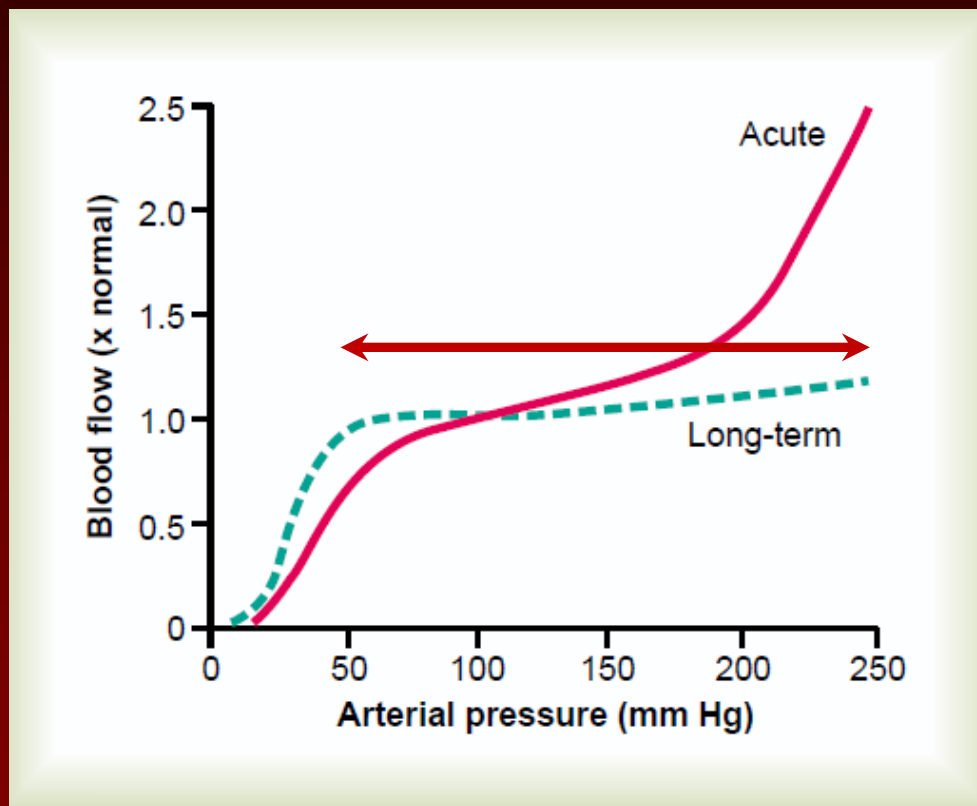
1. Metabolická autoregulace
2. Myogenní autoregulace
3. Regulace zprostředkovaná lokálními působky

## B. Chronická

*hodiny, dny až týdny*

# Regulace krevního průtoku - místní

## Chronická regulace



*Důležitá zvláště při dlouhodobé změně metabolických nároků tkáně - dostatečný průtok bez nadměrného zatížení cirkulace.*



# Regulace krevního průtoku - místní

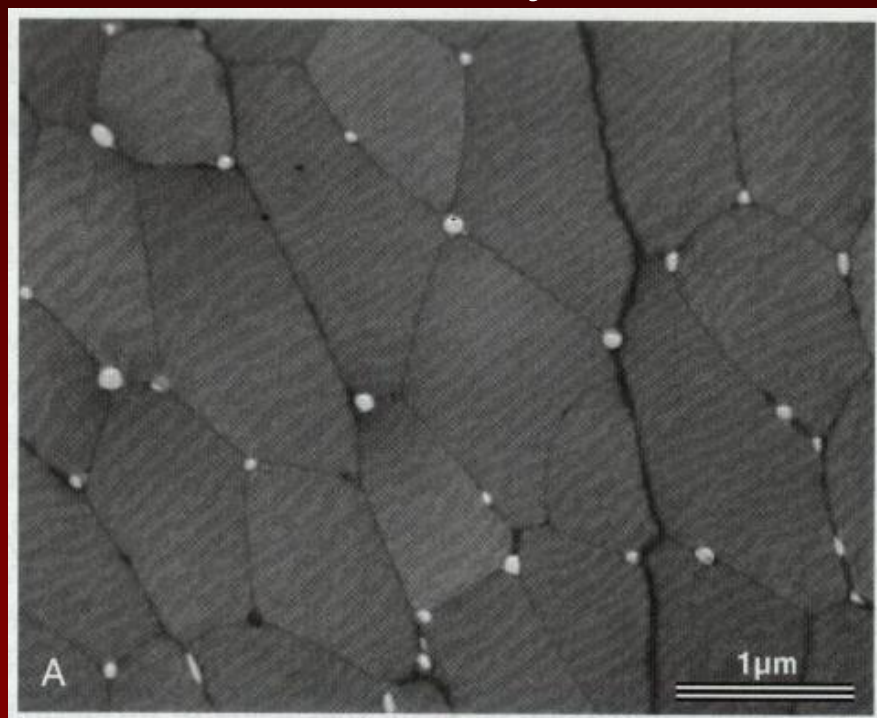
## Chronická regulace

- ❖ prostřednictvím změny vaskularizace tkáně
- ❖ klíčová role – **nedostatek O<sub>2</sub>** (vyšší nadmořská výška, retrolentální fibroplazie u nedonošených novorozenců po léčebném pobytu v kyslíkovém stanu) a rovněž **živin**
- ❖ identifikována již celá řada faktorů zvyšujících růst nových cév – tzv. **angiogenní (cévní růstové) faktory**, malé peptidy, nejlépe charakterizované: vaskulární endoteliální růstový faktor, růstový faktor produkovaný fibroblasty a angiogenin
- ❖ probíhá rychle – v řádu dní – u mladých jedinců a v nově formované tkáni (čerstvá jizva, nádorová tkáň) vs. až měsíce u starých lidí a diferencovaných tkání

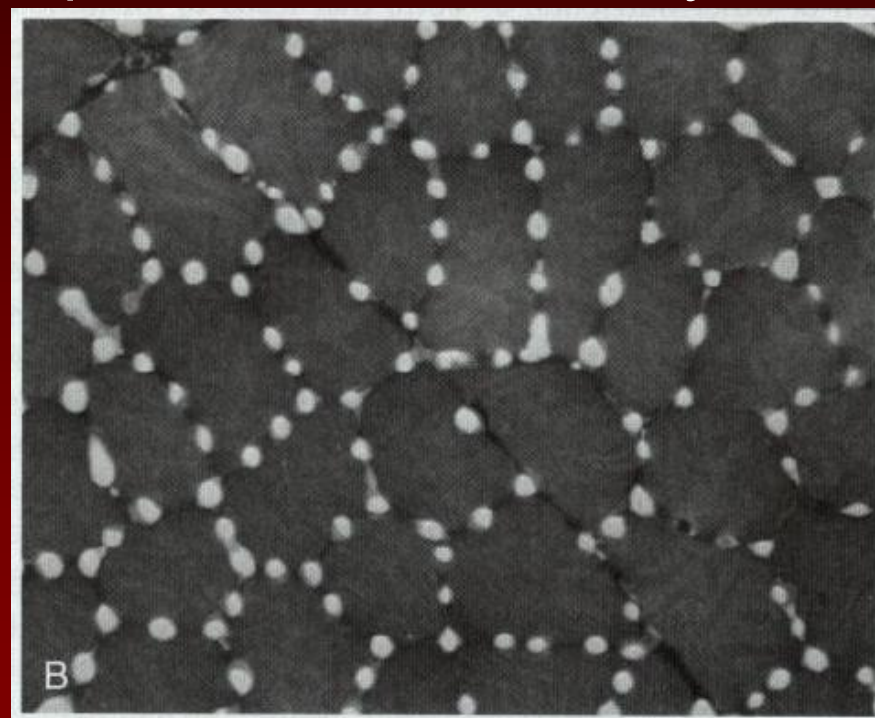
# Regulace krevního průtoku - místní

## Chronická regulace

nestimulovaný sval



pravidelně stimulovaný sval



# Regulace krevního průtoku

Místní

**Systemová**

A. Nervová

**B. Humorální**

# Regulace krevního průtoku - systémová

## Humorální regulace

### Vazokonstrikční látky

#### ❖ noradrenalin

→ generalizovaná vazokonstrikce ( $\alpha_1$ -rec.)  
( $\uparrow$  TK  $\rightarrow$  reflexní bradykardie,  $\downarrow$  MSV)

#### ❖ adrenalin (vysoká hladina)

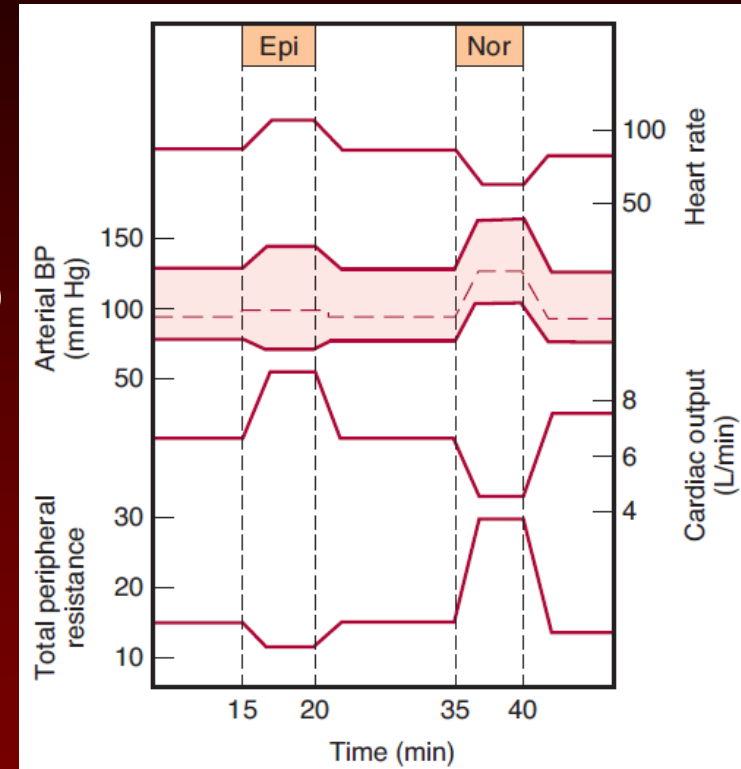
→ vazodilatace v kosterním svalstvu,  
játrech a koronárních arteriích ( $\beta_2$ -rec.)  
→ vazokonstrikce v ostatních tkáních

#### ❖ angiotensin II

$\downarrow$  TK  $\rightarrow \uparrow$  sekrece reninu z ledvin  $\rightarrow$  tvorba angiotensinu II z angiotensinu I  
 $\rightarrow$  generalizovaná vazokonstrikce (+  $\uparrow$  příjmu vody a  $\uparrow$  tvorba aldosteronu)

#### ❖ vazopresin (antidiuretický hormon)

$\rightarrow$  generalizovaná vazokonstrikce (+  $\uparrow$  reabsorpce vody v ledvinách)



# Regulace krevního průtoku - systémová

## Humorální regulace

### Vazodilatační látky

#### ❖ atriální natriuretický peptid (ANP)

→ ↓ reaktivity hladkého svalstva cév na vazokonstrikční podněty (+ ↑ natriuréza – možná prostřednictvím ↑ glomerulární filtrace díky relaxaci mesangiálních buněk, + inhibice sekrece vazopresinu, + ↓ sekrece aldosteronu)

#### ❖ VIP (vazoaktivní intestinální peptid)

→ vazodilatace (+ mnoho dalších vlivů v GIT, zejména relaxace hladké svaloviny střev včetně svěračů)

#### ❖ histamin

- uvolňován tkáněmi (mastocyty) při jejich poškození či zánětu (i alergickém), případně basofily v krvi;

→ vazodilatace arterioli + ↑ permeability kapilární stěny (otoky)  
(anafylaktický šok)

↙  
cestou NO (sám o sobě – kontrakce hladké svaloviny)

# Regulace krevního průtoku - systémová

## Humorální regulace

### Vazodilatační látky

#### ❖ kininy - bradykinin a lysylbradykinin (neboli kalidin)

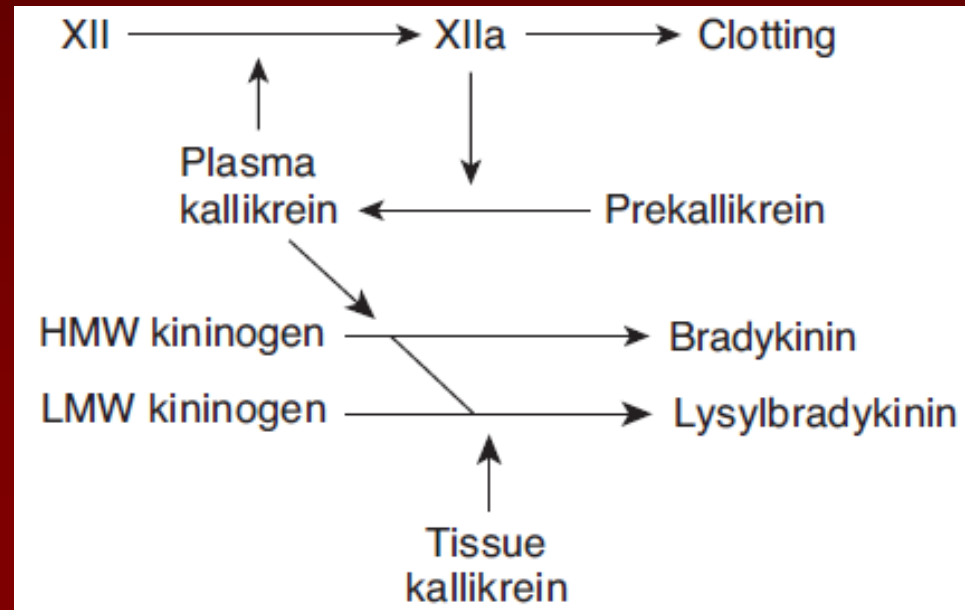
- malé polypeptidy, poločas rozpadu několik minut

→ vazodilatace arterioli + ↑ permeability kapilární stěny  
(podobné histaminu)

regulace krevního průtoku a  
úniku tekutin z kapilár v  
zanícené tkáni

+

regulace krevního průtoku kůží,  
slinnými a GIT žlázami za  
běžných podmínek



# Regulace krevního průtoku - systémová

## Humorální regulace

### Další vlivy

#### ❖ ionty

vazokonstrikce:  $\uparrow \text{Ca}^{2+}$ , mírný  $\downarrow \text{H}^+$

vazodilatace:  $\uparrow \text{K}^+$ ,  $\uparrow \text{Mg}^{2+}$ ;  $\uparrow \text{H}^+$ , výrazný  $\downarrow \text{H}^+$   
acetát, citrát (anionty) – jen mírný vliv