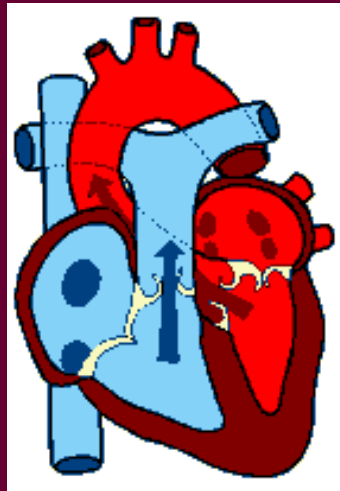
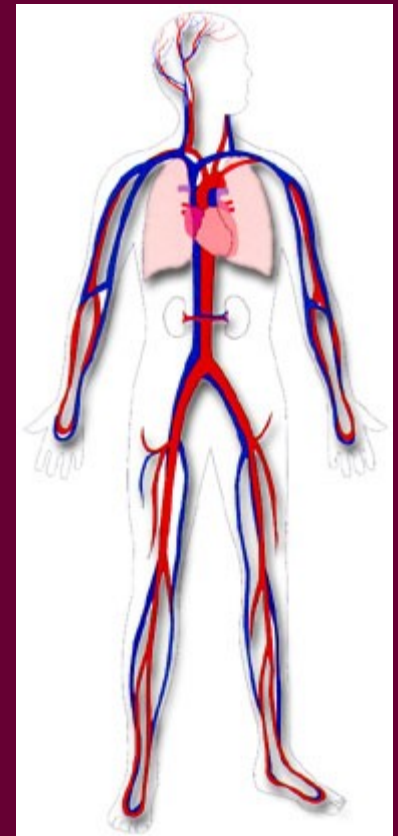


Přednášky z lékařské biofyziky

Biofyzikální ústav Lékařské fakulty
Masarykovy univerzity, Brno



Biofyzika kardio- vaskulárního systému



Obsah přednášky

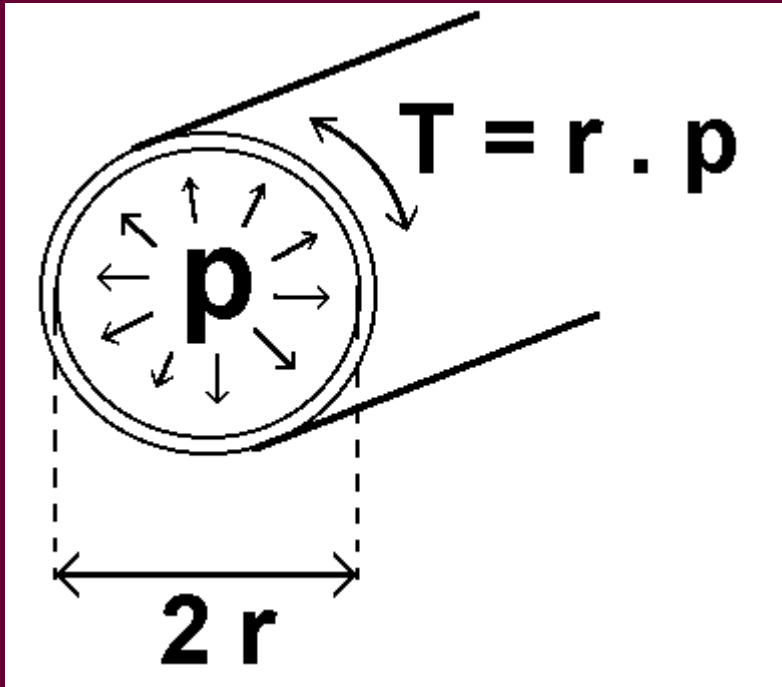
- Mechanické vlastnosti cév
- Reynoldsovo číslo
- Proudění krve v cévách
- Periferní odpor krevního řečiště
- Mechanická práce a výkon srdce
- Kapilární ultrafiltrace
- Ledviny: práce ledvin a glomerulární ultrafiltrace
- Měření tlaku krve

Mechanické vlastnosti kardiovaskulárního systému

Uzavřený oběhový a transportní systém

- Hlavní části:
 - Srdeční sval
 - Uzavřený systém cév
 - Krev
- Hlavní funkce:
 - Dodávání výživy a kyslíku buňkám,
 - Transport hormonů a jiných chemických signálů,
 - Odstraňování odpadních a vedlejších produktů z buněk (tkání)
 - Přenos tepla

Mechanické vlastnosti cév

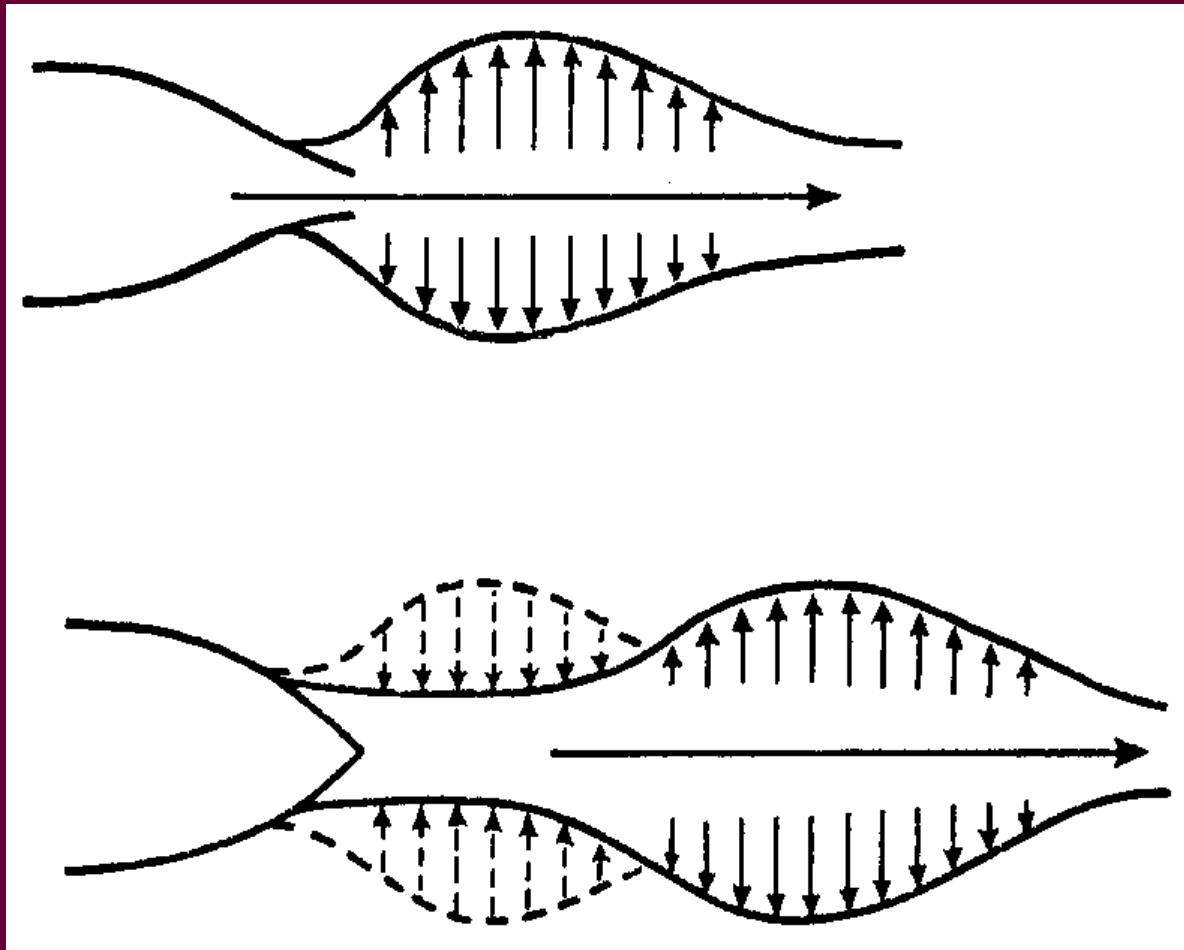


Napětí ve stěnách některých cév:

céva	r(m)	p(kPa)	T(N.m ⁻¹)
aorta	0.012	13	156
artérie	0.005	12	60
kapilára	6×10^{-6}	4	0.024
véna	0.005	2	10
vena cava	0.015	1.3	20

•Laplaceův zákon –
mechanické namáhání
stěn cév je přímo
úměrné tlaku a
poloměru cévy

Pružníkové a muskulární cévy



- Aorta se chová jako typická pružníková céva

Reynoldsovo číslo

- Proudění krve: laminární
- turbulentní
- Reynolds (1883)

- Reynoldsovo číslo:

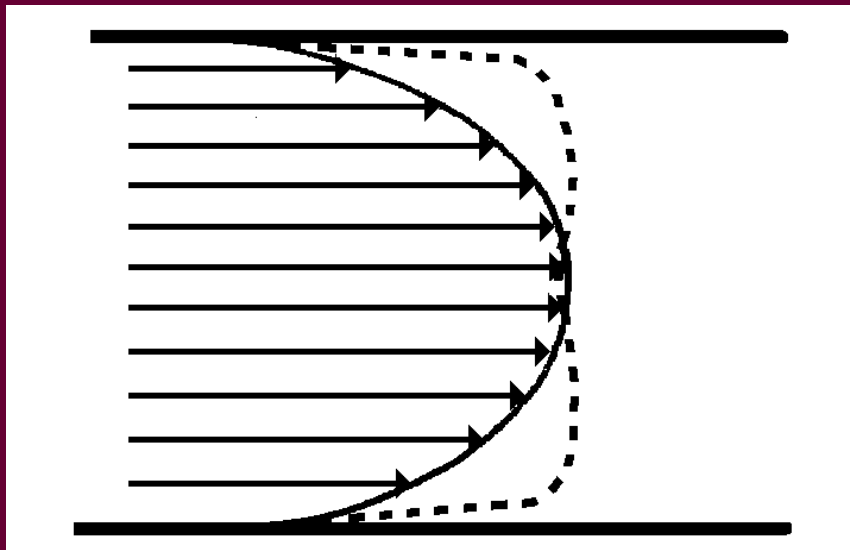
$$Re = \frac{r v_s \cdot \rho}{\eta}$$

(ρ – hustota kapaliny, v_s – střední rychlost toku, r – poloměr cévy, η – koeficient dynamické viskozity)

- Kritická rychlost:

$$v_k = \frac{1000}{r \cdot \rho}$$

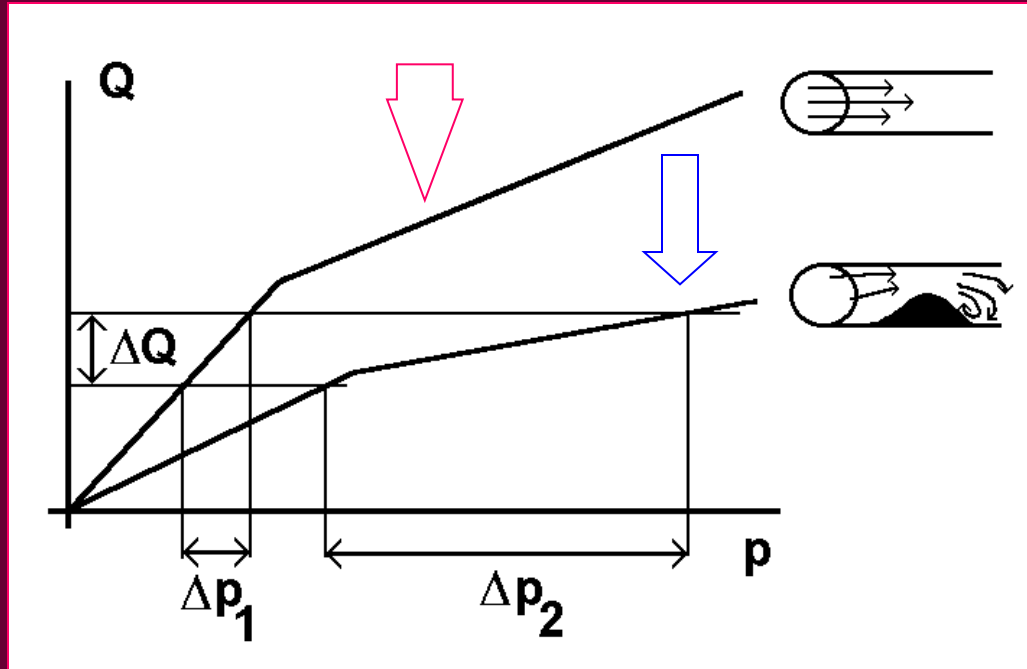
Teoretický a skutečný rychlostní profil toku krve v cévě



- Odchytky od teoretického rychlostního profilu jsou dány průřezem cévy, charakterem její stěny a především tím, že krev je neneutonská kapalina

- V malých tepnách má rychlostní profil parabolický tvar, ve velkých pak pístový tvar.
- Rychlostní profil se mění v průběhu tepové vlny
- Z jeho tvaru a absolutních hodnot naměřené rychlosti lze získat významné diagnostické informace

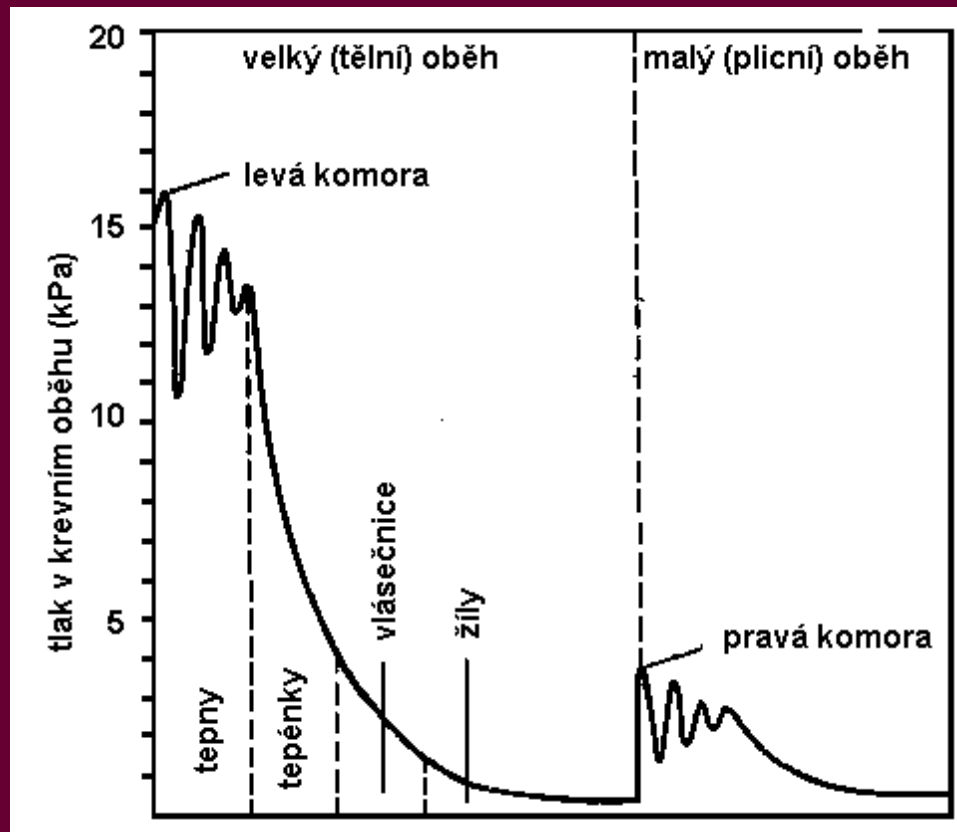
Průtok krve v cévě s překážkou



•Obr. Dle Camerona a kol., 1999

- Horní křivka popisuje průtok krve v cévě bez obstrukce, dolní křivka v cévě s aterosklerotickým zúžením (stenózou).
- Ke stejnému zvýšení průtoku ΔQ je třeba většího zvýšení tlaku Δp .

Tlak v jednotlivých částech krevního oběhu

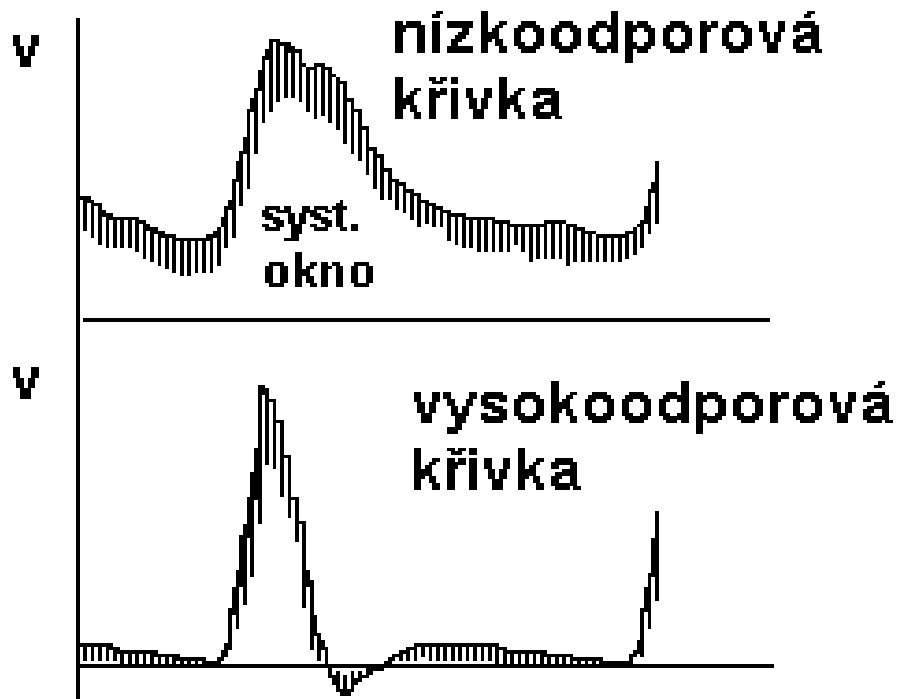


Periferní odpor cév

- Analogie elektrického odporu či spíše impedance ($R = U/I$)
- napětí U odpovídá tlak p
- proudu I odpovídá průtočný objem Q
- $R = \Delta p/Q$
- Vycházíme z Hagen-Poiseuilleova vzorce pro průtočný objem:

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta \Delta l} \Rightarrow \frac{\Delta p}{Q} = \frac{8 \eta \Delta l}{\pi r^4}$$

Periferní odpor cév



Nízká cévní impedance je typická pro mozkové tepny a tepny parenchymatosních orgánů (jater, sleziny, ledvin). Rychlost toku na konci diastoly nikdy neklesá k nule

Vysoká cévní impedance (např. v kosterních svalech) způsobuje, že rychlost toku na konci diastoly klesá k nule

Periferní odpor cév

- Podíl jednotlivých úseků krevního oběhu na celkovém periferním odporu:
 - artérie 66 %
 - (z toho arterioly 40 %)
 - kapiláry 27 %
 - vény 7 %
- Při **vasodilataci** R klesá - zátěž srdce se snižuje
- Při **vasokonstrikci** R roste - zátěž srdce se zvyšuje

Mechanický výkon srdce

- Mechanický výkon srdce
(pro tepovou frekvenci 70 min^{-1}) 1,3 W
- Celkový výkon srdce
(za klidových podmínek) 13 W
- Celkový výkon lidského organismu
(v klidu) 115 W

- Pro srdeční sval platí:
mechanická práce: $W = \int p \cdot dV$
práce se koná při vypuzení objemu krve dV proti
vnějšímu tlaku p . Z malé části se mění též v kinetickou
energii krve.

Práce srdce při jedné systole (odhad)

- $p = konst. \Rightarrow W = p \cdot \Delta V$

- *Levá komora* *Pravá komora*

$$p_{stř.} = 13.3 \text{ kPa}$$

$$\Delta V = 70 \text{ ml}$$

$$W = 0.93 \text{ J}$$

$$p_{stř.} = 2.7 \text{ kPa}$$

$$\Delta V = 70 \text{ ml}$$

$$W = 0,19 \text{ J}$$

- Z toho W_k :

$$= 0.009 \text{ J}$$

$$= 0,0018 \text{ J}$$

(dle vzorce $1/2 \cdot \rho v^2 \Delta V$, $\rho = 1.06 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$,

$v_{stř.} = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$, resp. 0.22 m.s^{-1})

Práce a účinnost srdečního svalu

- Energie potřebná k udržování tonu srdečního svalu:

$$\alpha \int T . dt$$

- T – mechanické napětí srdeční stěny (tonus) [N.m⁻¹], t - čas
- Celková potřebná energie:

$$E_c = \int p . dV + \alpha \int T . dt$$

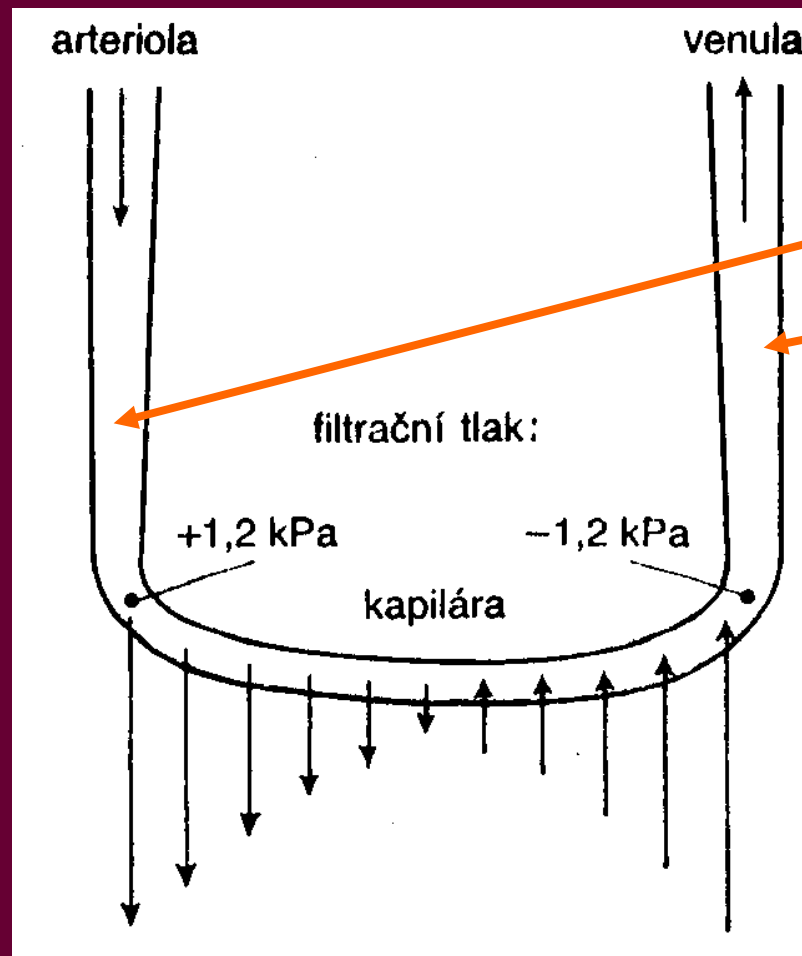
- Mechanická účinnost: W/E_c (max. 10 %)

Kapilární ultrafiltrace

	tlak [kPa]	
	Arteriální konec	Žilní konec
hydrostat. tlak	4,7	2,3
onkotický tlak	-3,5	-3,5
Filtrační tlak	1,2	-1,2
	Filtrát vstupuje do intersticia	Filtrát opouští intersticium

Filtrační pochody v kapilární kličce

• Onkotický tlak
= 3,5 kPa



• Hydrostatický tlak:

= 4,7 kPa

= 2,3 kPa



Otoky vznikají v důsledku nízké hladiny bílkovin v krevní plazmě, která způsobuje nízký onkotický tlak a tím zvyšuje filtrační tlak.

Práce ledvin a glomerulární ultrafiltrace

- Osmotická práce potřebná pro přenesení látky z prostředí o koncentraci C_2 do prostředí o koncentraci C_1 . Jedná se o přenos tělu potřebných látek z primární moči zpět do krve.

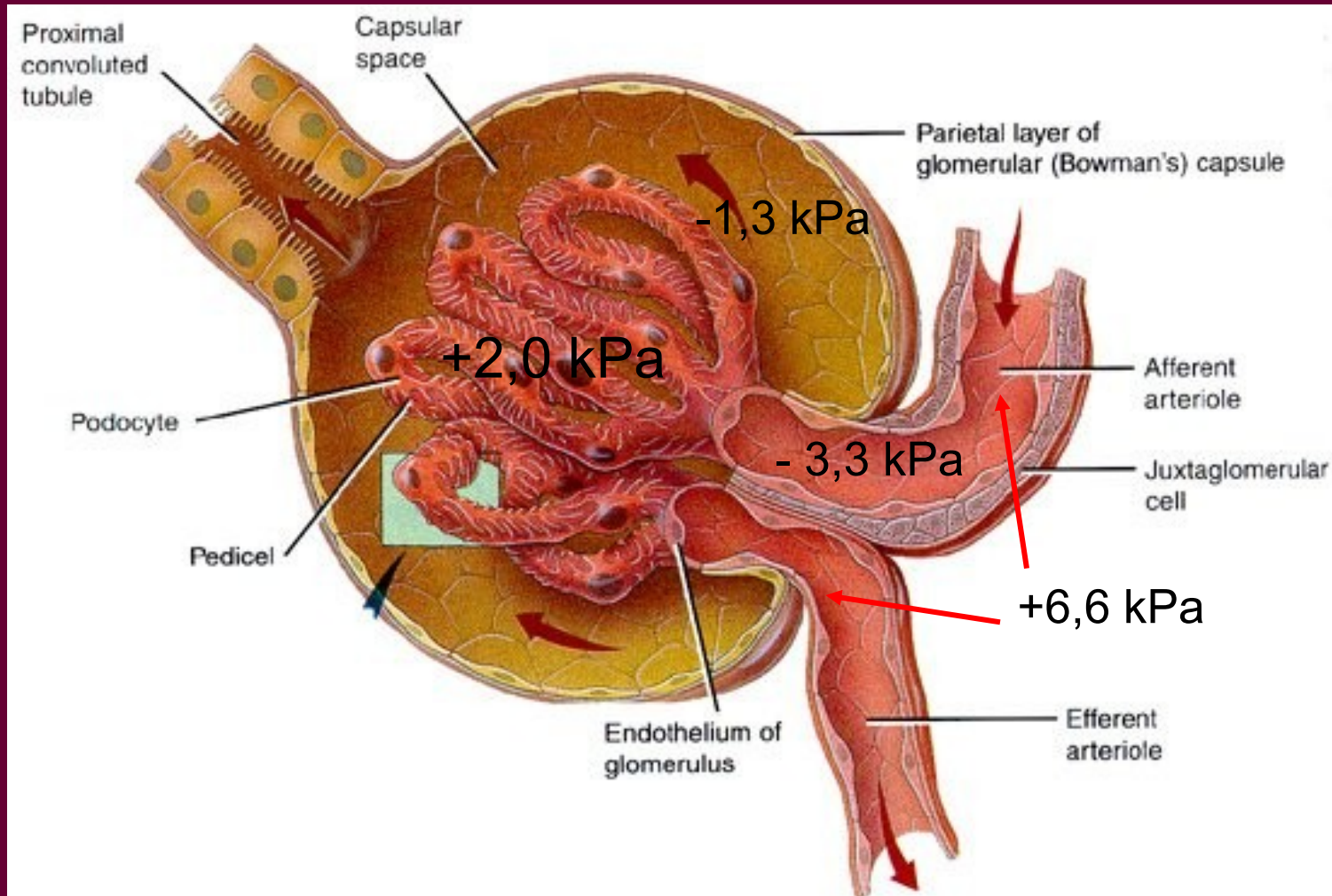
$$W = 2,3 n.R.T.\log C_1/C_2$$

- Glomerulární ultrafiltrace:

Hydrostatický tlak v glomerulárních kapilárách je asi 6,6 kPa (50 mm Hg). Proti tomuto tlaku působí hydrostatický tlak v Bowmanově pouzdře - 1,3 kPa (10 mm Hg) a onkotický tlak plasmatických bílkovin - 3,3 kPa (25 mm Hg), takže výsledný filtrační tlak v glomerulu je za normálních okolností 2 kPa (15 mm Hg).

Glomerulus

<http://coe.fgcu.edu/faculty/greenep/kidney/Glomerulus.html>



Měření tlaku krve (TK)

- Tlak je definovaný jako síla působící na jednotkovou plochu v plynu nebo kapalině.

$$p = F/S \quad [\text{N}\cdot\text{m}^{-2}],$$

kde F je síla působící na plochu S .

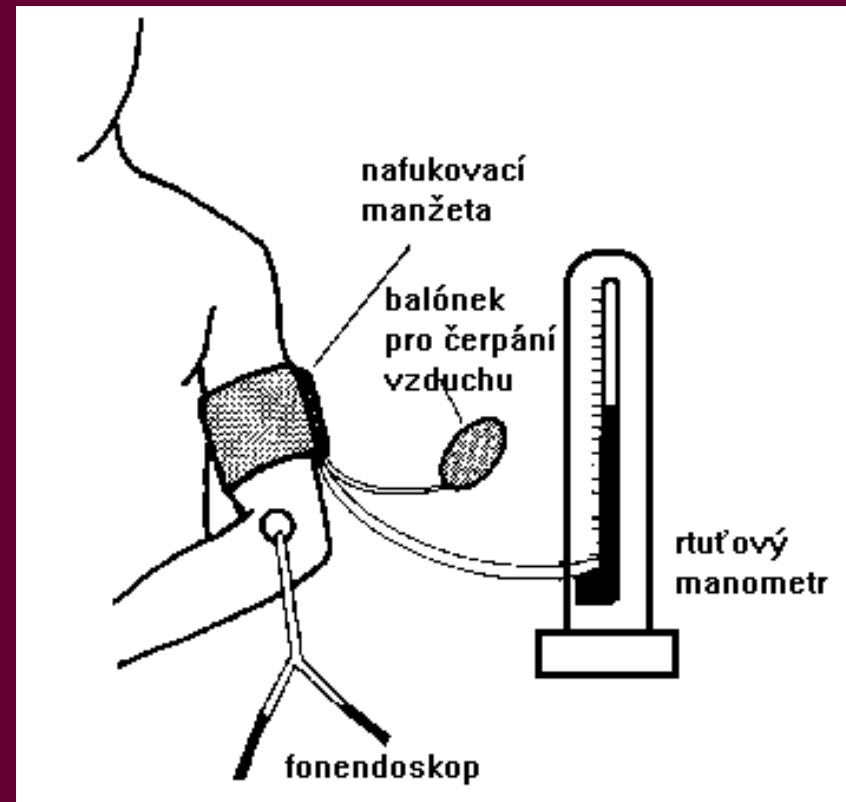
- V soustavě SI je tlak měřen v $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$, jednotka se nazývá **pascal [Pa]**.
- V medicíně je TK nejčastěji udáván jako výška rtuťového sloupce v milimetrech - mmHg.
- $1 \text{ mmHg} = 1 \text{ torr} = 133.3 \text{ Pa}$

Měření TK

- V tepnách TK kolísá mezi hodnotou maximální (systolickou) a hodnotou minimální (diastolickou).
- Křivka časového průběhu TK v tepně má periodický, avšak nesinusový průběh.
- Rozdíl mezi systolickým a diastolickým tlakem je maximální na začátku aorty; tlak kolísá v rozpětí hodnot od 10,5 do 16 kPa, tj. od 80 do 120 mmHg.
- Střední hodnota TK v plicní tepně představuje jen pětinu hodnoty středního tlaku v aortě.

Riva-Rocciho metoda

S manometrem spojená nafukovací manžeta je nasazena na paži nad loketní jamkou (úroveň srdce), nafouknuta na tlak, který je vyšší než systolický tlak v *a. brachialis*. Tím je zastaven tok krve. Tlak v manžetě je postupně snižován. Při **systolickém tlaku** začíná zúženým místem proudit krev. Turbulentní proudění krve způsobuje akustický šum – **Korotkovovy zvuky**, slyšitelné ve fonendoskopu přiloženém k loketní jamce. Při snižování tlaku v manžetě se zvuky stávají hlasitějšími, kulminují a postupně slábnou. Při dosažení **diastolického tlaku** mizí (obnovení laminárního proudění). Max. hlasitost mají při hodnotě středního arteriálního tlaku.



Riva-Rocciho metoda

- The Riva-Rocciho metoda může být objektivizována a automatizována pro monitorování pacientů. Manžeta je pravidelně nafukována pomocí malého kompresoru (např. každých deset minut) a Korotkovovy zvuky jsou snímány mikrofonem. Naměřené hodnoty systolického a diastolického tlaku jsou zobrazeny na displeji (u jednoduchých přístrojů) nebo uloženy do paměti přístroje a vyhodnoceny později. V druhém případě se metoda nazývá **Holterovo monitorování TK**.
- U malých dětí může auskultační metoda selhat. V takovém případě lze použít dopplerovské detektory toku krve v místech, kde došlo k zúžení cévy manžetou.

Přímé měření TK

- Přímá metoda měření TK je invazivní. Do cévy se zavádí ohebný katétr. Jeho volný konec je připojen k měniči (kapacitnímu nebo piezoelektrickému) avšak je možné zavést piezoelektrický měnič přímo do cévy.
- Metoda je poměrně riskantní, takže je relativně málo používána. Je to však jediná metoda, která umožňuje měřit tlak v žilách a v srdci.

Autor:
Vojtěch Mornstein

Obsahová spolupráce:
C.J. Caruana, I. Hrazdira

Grafika:

- - -

Poslední revize: Září 2008