

Biomechanika krevního oběhu

Biomechanika krevního oběhu popisuje strukturu a mechanické vlastnosti oběhu, a tím vysvětluje, jak vlastně krev v těle proudí.

Srdce

 *Podrobnější informace naleznete na stránce Srdce.*

Srdce je dutý orgán cévní soustavy, který rytmickým smršťováním pohání krev krevním řečištěm. Tato funkce je umožněna srdeční svalovinou – myokardem ^[1].

Kromě mechanických vlastností některé buňky srdce vykazují i určitou elektrickou aktivitu a podílejí se tím na vyvolání srdečních stahů – tzv. srdeční automacii. Komplex těchto buněk nazýváme převodním systémem srdečním ^[1].

Na stahy srdce působí i nervová regulace (sympaticus/parasympaticus), ta je však nezapřičiňuje, ale pouze ovlivňuje (zrychlení/zpomalení). Není tedy nutná pro samotnou činnost srdce, jako spíš pro vyrovnání výkyvů způsobených zátěží ^[2].

Mechanické vlastnosti

Srdce funguje jako pumpa tvořená čtyřmi oddělenými jednosměrnými čerpadly (dvě komory, dvě síně) a pracující jako synchronizované dvojité čerpadlo (malý a velký oběh). **Mechanická energie** (https://cs.wikipedia.org/wiki/Mechanická_energie) se spotřebuje z 90 % na udržování tonu svalů, zbylých 10 % se využije na mechanickou práci, a to na tlakově-objemovou práci (při vysokém odporu převaha tlakové, při vysokém žilním návratu převaha objemové) a práci udávající zrychlení, kterým se rozpohybuje hmota tepového objemu v závislosti na rychlosti při vypuzení.

Srdeční cyklus

 *Podrobnější informace naleznete na stránce Srdeční revoluce.*

Srdeční cyklus popisuje tok krve **mezi dvěma tepey srdce**. Doba trvání jednoho srdečního cyklu je **0,75 s** ^[3].

Průběh

Fáze rychlého plnění komor, izometrická fáze

Srdeční cyklus začíná **systolou síní**, při které dojde k doplnění komor krví (plnění začalo už před systolou) ^[3]. Díky mechanismu ventilové roviny je vzniklým podtlakem zároveň podpořen žilní návrat.^[4] Samotná systola pak probíhá do doby, než se vyrovná tlak v síních (zvětšený v důsledku stahu svaloviny) s tlakem v komorách. Vyrovnání se projeví **uzavřením cípátých chlopní** v důsledku vířivých proudů ve výklencích na jejich "zevní" straně.

Fáze rychlého vypuzování, ejekční fáze

Síně přecházejí do diastoly, zatímco v komorách dochází ke stahu jejich svaloviny, což vede k dalšímu zvýšení vnitřního tlaku. Ten způsobí **otevření poloměsíčitých chlopní** a vypuzení krve do aorty a plicní tepny^[3]. Zároveň se díky vzniklému podtlaku začnou plnit síně krví. ^[4] Systola opět probíhá do vyrovnání tlaků. Potom se, díky vířivým proudům ve výklencích na "zevní" straně, chlopně opět uzavrou. Tento jev také vybudí **vibrační pohyby** na tepnách. V komorách však stále zůstává přibližně 50% jejich plného objemu - tzv. **reziduální komorový objem** ^[3].

Izovolumická relaxační fáze

Komory přecházejí do **diastoly** (https://cs.wikipedia.org/wiki/Mechanická_energie). V důsledku naplnění komor krví v předchozí fázi však dochází ke vzniku tlakových rozdílů mezi síní a komorou, které vedou k **otevření cípátých chlopní**.

Plnicí fáze

Komory se začínají plnit krví. Tato fáze je přerušena až kontrakcí síňové svaloviny, která vede k počátku fáze izometrické.

Srdeční ozvy

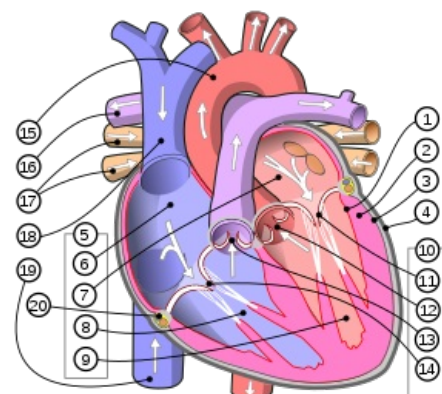


Schéma srdce: 1 – endokard; 2 – myokard; 3 – epikard; 4 – perikard; 5 – srdeční dutiny; 6 – pravá síň; 7 – levá síň; 8 – pravá komora; 9 – levá komora; 10 – srdeční chlopně; 11 – mitrální chlopeň; 12 – aortální chlopeň; 13 – pulmonální chlopeň; 14 – trikuspidální chlopeň; 15 – oblouk aorty; 16 – pravá plicní tepna; 17 – pravé plicní žíly; 18 – horní dutá žíla; 19 – dolní dutá žíla; 20 – síňo-komorové septum.

Během srdečního cyklu můžeme poslouchat srdeční ozvy. Jsou způsobené uzavíráním chlopní. **Systolické** ozvy můžeme slyšet při uzavírání cípátých chlopní v izometrické fázi. **Diastolické** potom při uzavírání chlopní poloměsíčitých v ejekční fázi. (Poslech typů srdečních ozev viz Zvuky srdce a plic (http://solutions.3mcesko.cz/wps/portal/3M/cs_CZ/Littmann/stethoscope/education/heart-lung-sounds/)^[5])

Mechanismus otevírání a uzavírání chlopní

Otevírání a uzavírání srdečních chlopní není řízeno kontrakcí specializovaných svalů, ale už samotným **tlakem proudící krve**. Působící síly jsou tedy **hydrodynamické**.

Otevírání způsobuje **rozdíl tlaků** mezi dvěma kompartmenty srdce (síň-komora či komora-céva). Vlivem tohoto rozdílu jsou chlopně vychlípeny směrem do oblasti s menším tlakem a umožní tak jednosměrné přelití krve. Uzavírání je však složitější. Dochází k němu díky vířivým proudům vznikajícím ve vychlípeninách chlopně na straně, kam se krev přelévá. Po vyrovnání tlaků mezi kompartmenty tyto proudy „zatlačí“ chlopeň zpět na její původní místo. S mechanismem pohybu souvisí i rozdílná plocha cípátých a poloměsíčitých chlopní. Ta je způsobena nepoměrem tlaků, na které musí tyto chlopně reagovat.

Definování mechanické činnosti srdce pomocí fyzikálních veličin

■ Práce

Srdce v organismu funguje jako pumpa a vykonává tedy určitou práci. Tu můžeme vypočítat jako součet práce kinetické (vynaložené na předání určitého zrychlení) a práce tlakově-objemové (která posunuje daný objem krve proti odporu v cévách).

■ Celková práce

$$W = W_k + W_p$$

■ Tlakově-objemová práce

Tlakově-objemová práce srdce nabývá v různých kompartmentech různých fyziologických hodnot. Je to způsobeno především rozdílem ve funkci pravé a levé části srdce. Zatímco kontrakce pravé má za úkol krev přesunout "pouze" malým oběhem – tedy do plic a zpět, levá rozvádí již okysličenou krev do celého těla. Je tedy logické, že levá strana srdce bude vykazovat mnohem větší vykonanou práci, než část pravá (frekvence stahů se rovnají).

	levá komora	pravá komora
Objem	70 ml = $70 \times 10^{-6} \text{ m}^3$	70 ml = $70 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Tlak	120 mmHg = $120 \times 133 \text{ Pa}$	15 mmHg = $15 \times 133 \text{ Pa}$
Tlakově-objemová práce		
$W_p = p \cdot V$	1,117 J	0,140 J

■ Práce způsobující zrychlení

- m = hmotnost tepového objemu
- probíhá v obou komorách

- $m = 74 \text{ g} = 0,074 \text{ kg}$
- $v = 0,5 \text{ m/s}$

$$W_k = \frac{1}{2} \times mv^2 \times 2 = 0,018 \text{ J}^{[3]}$$

■ Účinnost

První termodynamický zákon říká, že žádný orgán (ani přístroj) nedokáže využívat 100% spotřebované energie na svou práci. Část této energie je "ztracena" například tvorbou tepla. Proto je ve fyzice zavedena veličina, která nám udává, jaká část energie je skutečně využita na požadovanou práci.^[6]

- **Účinnost myokardu** = 30 %
- **Účinnost celého srdce** = 10 % (při zátěži vzrůstá)

■ Efektivní výkon srdeční činnosti

Efektivní srdeční výkon je výkon, který je třeba k vykonání určité práce. Obvykle se vztahuje k množství vypuzené krve během jedné systoly do velkého krevního oběhu. Proto k jeho vypočítání slouží **porovnávání pulzového (tepového) a komorového reziduálního objemu**.

■ pulzový (tepový) objem

- = množství krve vypuzené systolou do aorty
- závisí na námaze a patologických stavech
- přirozený = 70-90 ml

■ komorový reziduální objem

- = množství krve, které po systole zůstává v komoře
- při patologickém ochabování komory vzrůstá
- přirozený = okolo 50 ml

▪ **Hodnoty efektivního srdečního výkonu**

- přirozené – mezi 0,55–0,67
- jednoznačně snížené – menší než 0,4

▪ **$EF = (eDV - eSV)/eDV$**

- EF = efektivní výkon
- eDV = objem komory na konci diastoly
- eSV = objem komory na konci systoly
- eDV - eSV = komorový reziduální objem

▪ **Minutový objem**

- = množství krve vypuzené za jednu minutu
- hodnoty jsou značně proměnlivé
- průměrně – 5000–9000 ml/min

▪ **$V_{60} = V_p * P_{60}$**

- V_{60} = minutový objem
- V_p = tepový objem
- P_{60} = počet pulzů za minutu

Elektrické vlastnosti

Více informací v článku Převodní systém srdeční

Srdce má svou vlastní automacii, což znamená, že si samo vytváří podněty ke stahům srdeční svaloviny. Převod srdečního impulsu je zprostředkován buňkami srdce, které můžeme rozdělit do 3 typů dle podoby a funkce: **nodální myocyty** (považované za zdroj náboje), **myocyty přechodního typu** (šířící signál mezi nodálními myocyty a buňkami typu Purkyňových vláken) a **myocyty typu Purkyňových vláken** (zodpovědné za rychlé vedení vzruchu na buňky myokardu).

Činnost srdce

Aktivita mechanická a elektrická od sebe nejsou striktně odděleny. Probíhají zároveň a mechanická je elektrickou řízena.

▪ **Zjednodušený průběh stahu srdce:**

- podráždění sinusového uzlíku
- systola síní -> doplnění komor krví (začínají se plnit ještě před síňovou systolou)
- přenos podráždění z pravé síně do komor
- systola komor -> vytlačení krve do arterie
- diastola a plnění srdce krví ^[2]

Cévy

Cévy jsou rozvodovou částí uzavřeného oběhu. Elasticitou, roztažností a aktivní kontraktilitou se **podílejí na udržení pohybu krve**. Cévy se dělí na **arterie**, **vény** a **kapiláry**, kdy každá má při vedení krve jiný význam a dohromady tvoří systém krevního řečiště. V arteriích proudí krev vysokým tepem a šíří se v nich tlaková vlna, která je hmatná jako puls. Ve vénách proudí krev pomaleji a pod nižším tlakem než v arteriích, proto proudění krve ve vénách musí napomáhat další mechanismy, především systém chlopní a svalová práce dolních končetin (zdroje 2, 3). Kapiláry mají snadno propustné stěny a krev nich proudí konstantní rychlostí bez kolísání tlaku, proto v nich probíhá výměna látek s okolními tkáněmi.

Můžeme je rozdělit na tři oběhové systémy:

- **koronární oběh** zajišťující prokrvení srdce
- **plicní oběh** zajišťující nasycení krve kyslíkem ^[2]
- **velký oběh** zajišťující rozvod okysličené krve do těla

Proudění v cévách

S ohledem na individualitu každého jedince je těžké přesně charakterizovat vlivy působící na jednotlivé děje, proto říkáme, že zde platí fyzikální zákony biomechaniky kapalin aproximálně. Při proudění krve se v cévách uplatňuje zejména Bernoulliův zákon a Hagen-Poiseuillův zákon.

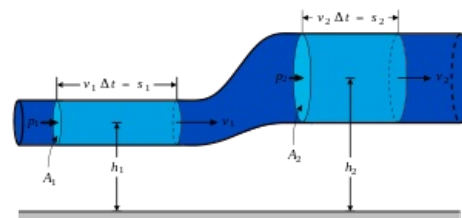
Bernoulliův zákon

Bernoulliův zákon je vyjádřen vztahem:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + h\rho g + P = \text{konst.},$$

kde v je rychlost proudění, P je tlak, ρ je hustota, g je gravitační zrychlení.

V místě s **větším průřezem** má proudící kapalina **vyšší tlak**, ale **nižší rychlost**, zatímco v místě s **menším průřezem** má **nižší tlak**, ale **vyšší rychlost**. Tlak proudící kapaliny tedy klesá s její rostoucí rychlostí.



Bernoulliův zákon

Hagen-Poiseuillův zákon

Hagen-Poiseuillův zákon je dán následujícím vztahem:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} (Q) = \Delta P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

kde Q je objemový tok, ΔP je rozdíl tlaku na začátku a na konci trubice, η je dynamická viskozita kapaliny, R je poloměr trubice, L je délka trubice. Závislost na čtvrté mocnině poloměru v Hagen-Poiseuillově zákoně způsobuje, že například zmenšení poloměru arteriol následkem kontrakce hladkých svalů v jejich stěnách o 19% způsobí snížení průtoku krve až zhruba na polovinu. ^[3]

Laminární a turbulentní proudění

Za normálních podmínek je proudění krve v cévách laminární, přičemž se vrstvička krve těsně při stěně cévy téměř nepohybuje a směrem do středu cévy rychlost proudu vzrůstá. **Laminární proudění** se však udržuje jen do určité kritické rychlosti a nad ní se stává proudění **turbulentním**. Tato hraniční hodnota se určuje za pomoci **Reynoldsova čísla**. Ke změně proudění dochází u hodnot tohoto čísla kolem 2000, při hodnotách nižších se jedná o laminární, při vyšších o turbulentní proudění ^[3]. Reynoldsovo číslo je dáno vztahem:

$$R = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta}$$

kde R je Reynoldsovo číslo, ρ je hustota kapaliny, d je průměr trubice, v je rychlost proudění, η je viskozita kapaliny

Elastance a poddajnost cév

Časový průběh tuhosti komory v průběhu srdečního cyklu vyjadřuje elastance (E), která je definována jako:

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

kde p je tlak a V je objem.

Převrácená hodnota se udává jako **compliance** C (poddajnost)cév, tu udává vztah:

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

kde p je opět tlak a V objem.

Krevní tlak

Krevní tlak je tlak, kterým působí protékající krev na stěnu cévy. Hodnota tlaku krve je různá v různých částech krevního řečiště, nejvyšší je ve velkých arteriích, směrem do periferie klesá, nejnižší je pak v žilním systému. Pojmem krevní tlak se nejčastěji myslí arteriální (tepenný) krevní tlak. Arteriální krevní tlak se mění během srdečního cyklu, nejvyšší je v ejekční fázi = systolický tlak, nejnižší během plnicí fáze = diastolický tlak. Rozdíl mezi systolickým a diastolickým tlakem je tlaková (tepová) amplituda. Hodnota krevního tlaku se skládá ze dvou čísel oddělených lomítkem, vyšší číslo je hodnota systolického tlaku, nižší číslo je diastolický tlak (vyjadřuje se nejčastěji v mmHg, méně často v kPa). Např. hodnota tlaku 120/80 mmHg znamená, že systolický tlak je 120 mmHg a diastolický tlak 80 mmHg. U zdravého dospělého člověka by hodnota systolického tlaku neměla překročit 130 mmHg a hodnota diastolického tlaku 90 mmHg. Nízký krevní tlak se označuje jako hypotenze, vysoký krevní tlak je hypertenze. ^[7]

Systolický tlak

Systolický tlak ($S7$) je tlak ve velkých arteriích na vrcholu vypuzovací fáze. Je ovlivněn mírou kontraktility myokardu a objemem vypuzené krve. U zdravého dospělého jedince by neměl přesáhnout hodnotu 130 mmHg (17,3 kPa) ^[3].

Diastolický tlak

Diastolický tlak (*DT*) je nejnižší krevní tlak ve velkých arteriích. Dochází k němu na konci izovolemické fáze dříve než dojde k uzavření aortální chlopně. Jeho hodnotu ovlivňuje nejvíc míra elasticity stěn velkých tepen. Ani v době diastoly neklesá krevní tlak v cévách nikdy k nule (na rozdíl od srdečních komor). Krevní oběh je v době diastoly udržován krví, která byla nahromaděna v dilatovaných cévách. U zdravého dospělého jedince by hodnota diastolického tlaku neměla přesáhnout 90 mmHg (11,3 kPa) ^[3].

Střední tlak

Střední arteriální tlak (*SAT*) je průměrná hodnota nebo přesněji střední hodnota krevního tlaku během jednoho srdečního cyklu. Hodnotu středního arteriálního tlaku nelze vypočítat jako aritmetický průměr hodnoty systolického (*ST*) a diastolického (*DT*) tlaku, protože průběh krevního tlaku v závislosti na čase je poměrně složitý. Především diastola trvá při klidové srdeční frekvenci přibližně dvakrát déle než systola. Z tohoto důvodu je hodnota *SAT* bližší hodnotě tlaku diastolického. Při fyziologických hodnotách krevního tlaku (120/80 mmHg) je hodnota středního arteriálního tlaku 93,3 mmHg.

Pro přesný výpočet by bylo třeba znát detailní průběh hodnot arteriálního tlaku během celého srdečního cyklu. Tato podmínka bývá částečně splněna jen při invazivním měření, proto se při odhadu středního arteriálního tlaku používají vztahy využívající skutečnost, že *SAT* významně závisí na hodnotě systolického a diastolického tlaku:

$$SAT = \frac{2DT + ST}{3}$$

resp.

$$SAT = DT + \frac{ST - DT}{3}$$

resp.

$$SAT = DT + \frac{TA}{3}^{[9]}$$

SAT= střední arteriální tlak, *DT*= diastolický tlak, *ST*=systolický tlak

Tlaková amplituda

Tlaková amplituda ("*TA*") nebo též tepový či pulsový tlak je rozdíl mezi systolickým a diastolickým tlakem. Při fyziologických hodnotách krevního tlaku (120/80 mmHg) je tlaková amplituda rovna 40 mmHg. Tlaková amplituda je největší ve velkých artériích, směrem do periférie se snižuje. Velikost tlakové amplitudy určuje hlavně systolický objem (zvýšení systolického objemu vede ke zvýšení tlakové amplitudy) a poddajnost cév (větší poddajnost cév tlakovou amplitudu snižuje).

$$TA = ST - DT^{[8]}$$

TA=tlaková amplituda, *ST*=systolický tlak, *DT*= diastolický tlak

Ortostáza

Ortostáza je vzpřímená poloha těla. V této poloze mají na tlak v cévách i jiné vlivy než činnost srdce. Směrem k periférii těla klesá tlaková amplituda a roste vliv jiných faktorů než srdeční činnost, a to především hydrostatického tlaku (zvláště pak při vzpřímeném postoji). Na 1cm výšky "od srdce k patě" připadá vzrůst tlaku o 1mmHg. Naopak v oblastech hlavy může být ve vzpřímené poloze venózní tlak vlivem gravitace i negativní. Gravitace působí stejně na žíly i arterie, proto je rozdíl mezi nimi zanedbatelný. Jelikož je cévní systém uzavřený, naměříme hodnoty tlaku nižší, než bychom naměřili v systému trubic nahoře otevřeném. Asi 5–10cm pod bránicí leží hydrostaticky indiferentní rovina, zde se tlak krve při změně polohy nemění. Proti kolapsu žil hrudníku působí subatmosférický tlak ^[3].

Odkazy

Související články

- Srdce
- Kontrakce srdečního svalu
- Velký krevní oběh
- Plicní oběh
- Oběhová soustava

- Krevní tlak
- Tlaková amplituda
- Měření krevního tlaku

Externí odkazy

- Článek Srdeční cyklus na české Wikipedii
- Prezentace (<http://www.biomechanika.cz/materials/Biomechanika%20srde%C4%8Dn%C4%9Bc%C3%A9vn%C3%AD%20soustavy%20a%20konstitutivn%C3%AD%20chov%C3%A1n%C3%AD%20c%C3%A9v%20l.pdf>) na stránkách ČVUT

Reference

1. ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 3*. 2. vydání. Praha : Grada Publishing, 2004. 692 s. ISBN 978-80-247-1132-4.
2. NOVOTNÝ, Ivan a Michal HRUŠKA. *Biologie člověka : pro gymnázia*. 3. vydání. Praha : Fortuna, 2003. ISBN 8071688193.
3. NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, et al. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
4. LEJSEK, Jan. *Poznámky z fyziologie* [online]. [cit. 2014-05-19]. <<http://stary.lf2.cuni.cz/projekty/mua/3y1.htm>>.
5. *Zvuky srdce a plic* [online]. Praha, 2015 [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: http://solutions.3mcesko.cz/wps/portal/3M/cs_CZ/Littmann/stethoscope/education/heart-lung-sounds/
6. TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ, et al. *Odmaturoj! z fyziky*. 2. vydání. Brno : Didaktis, c2006. ISBN 8073580586.
7. ŠVÍGLEROVÁ, Jitka. *Střední arteriální tlak* [online]. [cit. 27.11.2013]. <https://web.archive.org/web/20160306065550/http://wiki.lfp-studium.cz/index.php/St%C5%99edn%C3%AD_arteri%C3%A1ln%C3%AD_tlak>.
8. ŠVÍGLEROVÁ, Jitka. *Tlaková amplituda* [online]. [cit. 27.11.2013]. <https://web.archive.org/web/20161225092053/http://wiki.lfp-studium.cz/index.php/Tlakov%C3%A1_amplituda/>.

Použitá literatura

- ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 3*. 2. vydání. Praha : Grada Publishing, 2004. 692 s. ISBN 978-80-247-1132-4.
- NOVOTNÝ, Ivan a Michal HRUŠKA. *Biologie člověka : pro gymnázia*. 3. vydání. Praha : Fortuna, 2003. ISBN 8071688193.
- NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, et al. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- LEJSEK, Jan. *Poznámky z fyziologie* [online]. [cit. 2014-05-19]. <<http://stary.lf2.cuni.cz/projekty/mua/3y1.htm>>.
- *Zvuky srdce a plic* [online]. Praha, 2015 [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: http://solutions.3mcesko.cz/wps/portal/3M/cs_CZ/Littmann/stethoscope/education/heart-lung-sounds/
- TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ, et al. *Odmaturoj! z fyziky*. 2. vydání. Brno : Didaktis, c2006. ISBN 8073580586.
- ŠVÍGLEROVÁ, Jitka. *Střední arteriální tlak* [online]. [cit. 27.11.2013]. <https://web.archive.org/web/20160306065550/http://wiki.lfp-studium.cz/index.php/St%C5%99edn%C3%AD_arteri%C3%A1ln%C3%AD_tlak>.
- ŠVÍGLEROVÁ, Jitka. *Tlaková amplituda* [online]. [cit. 27.11.2013]. <https://web.archive.org/web/20161225092053/http://wiki.lfp-studium.cz/index.php/Tlakov%C3%A1_amplituda/>