

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**  
**FARMACEUTICKÁ FAKULTA V HRADCI KRÁLOVÉ**  
**KATEDRA BIOFYZIKY A FYZIKÁLNÍ CHEMIE**



**BIOMECHANIKA KAPALIN A PROUDĚNÍ TĚLNÍCH TEKUTIN**

**(Bakalářská práce)**

**Vedoucí práce: Mgr. MONIKA KUCHAROVÁ, Ph.D.**

**Hradec Králové, 2021**

**Martin Horní**

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že tato bakalářská práce na téma Biomechanika kapalin a proudění tělních tekutin je mým vlastním autorským dílem. Veškerá literatura a další zdroje, ze kterých jsem při zpracování čerpal jsou uvedeny v seznamu zdrojů a jsou v práci řádně citovány. Práce nebyla použita k získání jiného titulu.“

Datum:

Podpis

## **Poděkování**

Děkuji paní Mgr. Monice Kuchařové PhD. za odborné vedení mé práce, za její pomoc, připomínky a poznámky při zpracovávání mé práce.

## Obsah

1.	Úvod .....	6
2.	Zadání práce.....	7
3.	Anatomie krevního oběhu a mízního systému .....	8
3.1.	Vlastnosti a funkce krve .....	8
3.2.	Složení krve .....	8
3.2.1.	Plazma.....	8
3.2.2.	Krevní elementy.....	8
3.3.	Anatomická stavba srdce .....	11
3.3.1.	Obecná stavba.....	11
3.3.2.	Anatomická stavba srdeční stěny .....	13
3.4.	Typologie a stavba cév.....	14
3.4.1.	Tepny.....	15
3.4.2.	Arterioly.....	16
3.4.3.	Kapiláry.....	16
3.4.4.	Venuly.....	17
3.4.5.	Žíly.....	17
3.5.	Lymfatický systém.....	17
3.5.1.	Míza (Lymfa).....	18
3.5.2.	Mízní (lymfatické) cévy .....	19
3.6.	Lymfatické orgány .....	20
3.6.1.	Primární lymfatické orgány.....	20
3.6.2.	Sekundární lymfatické orgány.....	21
4.	Fyziologie krevního oběhu a lymfatického systému.....	25
4.1.	Fyziologie srdce .....	25
4.1.1.	Elektrické vlastnosti srdce.....	26
4.1.2.	Převodní systém srdeční.....	26
4.2.	Malý a velký krevní oběh.....	28
4.2.1.	Výměna dýchacích plynů .....	29
4.3.	Mikrocirkulace ve tkáních .....	29
4.4.	Funkční rozdělení cév .....	31
4.5.	Fyziologie lymfatického systému.....	32
4.5.1.	Mízní cévy.....	32

4.5.2. Lymfatické tkáně .....	33
5. Hydrodynamika krevního oběhu a mízního systému .....	34
5.1. Krevní oběh .....	34
5.2. Krev .....	34
5.2.1. Proudění krve .....	35
5.3. Lymfatický systém .....	39
6. Biomechanika kardiovaskulárního oběhu a mízní soustavy .....	40
6.1. Srdce .....	40
6.1.1. Srdeční cyklus .....	40
6.1.2. Tlakově objemová práce srdce .....	42
6.1.3. Efektivní výkon srdce .....	43
6.2. Cévy .....	45
6.2.1. Koronární oběh .....	45
6.2.2. Tepny .....	46
6.2.3. Kapiláry .....	47
6.2.4. Žíly .....	47
6.2.5. Mízní cévy .....	48
6.3. Krev .....	49
6.3.1. Krvinky .....	50
6.3.2. Plazma .....	51
6.3.3. Rychlost proudění krve v tepnách .....	51
6.3.4. Rychlost proudění v žílách .....	52
6.3.5. Objem krve ve velkých cévách .....	52
6.3.6. Arteriální a žilní tlak .....	52
6.4. Smykové napětí a rychlost .....	53
7. Závěr .....	55
8. Seznam obrázků .....	56
9. Seznam tabulek .....	56
10. Seznam použité literatury .....	57

# 1. Úvod

Kardiovaskulární systém je jednou z orgánových soustav těla. Skládá se ze srdce a soustavy cév, skrze které proudí krev. Ta je vysoce specializovanou tělní tekutinou vykonávající řadu pro organismus nezbytných funkcí. Pro správné vykonávání svých funkcí musí neustále proudit oběhovým systémem a být dodávána do tkání. Proudění krve je ovlivňováno jejími vlastním chováním, dále prací srdce a vlastnostmi cév. Biomechanika krevního oběhu se zabývá mechanickými ději a principy, které se v něm odehrávají a ovlivňují tok krve.

Oběhová soustava je propojena s mízním (lymfatickým) systémem. Ten má také řadu důležitých funkcí. Skládá se z lymfatických orgánů a soustavy mízních (lymfatických) cév, kterými míza proudí. V terminální části oběhového systému na rozhraní krve a tkání dochází k filtraci krve ze které vzniká tkáňový mok. Mízní systém odvádí přebytečný tkáňový mok ve formě mízy. Lymfatické cévy vytváří rozvětvenou soustavu obdobnou krevnímu oběhu. Proudění lymfy je ovlivňováno obdobnými mechanickými principy jako krevní oběh a oba systémy jsou předmětem studia biomechaniky.

## **2. Zadání práce**

Má bakalářská práce je prací rešeršní. Jejím cílem je popis krevního oběhu a mízní soustavy. V práci se zabývám prouděním krve a mízy (lymfy), anatomí, fyziologií a biomechanickými vlastnostmi kardiovaskulárního systému a lymfatické soustavy. V první kapitole popisuji anatomickou stavbu kardiovaskulárního systému a mízní (lymfatické) soustavy. V druhé kapitole se zabývám jejich fyziologií. Ve třetí kapitole se věnuji hydrodynamickým zákonům uplatňujícím se při proudění krve a mízy (lymfy). V závěrečné kapitole se zabývám biomechanickými vlastnostmi kardiovaskulárního systému a mízní (lymfatické) soustavy. Popisuji především reologické vlastnosti krve, mechanickou práci srdce a biomechanické vlastnosti cév.

## **3. Anatomie krevního oběhu a mízního systému**

### **3.1. Vlastnosti a funkce krve**

Krev je neprůhledná kapalina červené barvy. Je hlavní složkou vnitřního prostředí organismu. Lidské tělo průměrně obsahuje kolem 5 litrů krve, to je zhruba 7 % tělesné hmotnosti. Její funkcí je transport dýchacích plynů, živin, hormonů, vitamínů a odpadních produktů metabolismu, termoregulace, udržování acidobazické rovnováhy (stálost pH), udržování stálé hladiny osmoticky aktivních látek, hemokoagulace a hemostáza a účastní se imunitních reakcí (Mourek, 2012; Petřek, 2019).

### **3.2. Složení krve**

Krev se skládá ze dvou složek: krevní plazmy a krevních tělísek (*corpuscula sanguinis*). Plazma je tekutou částí krve, ve které jsou rozptýlena krevní tělíska. Podíl plazmy v objemu krve je u mužů asi 55 %, u žen je podíl vyšší, okolo 59 %. (Čihák, 2016).

#### **3.2.1. Plazma**

Plazma je kapalina nažloutlé barvy. Jde o koloidní roztok složený z rozpuštěných organických a anorganických látek. Hlavní složkou plazmy je voda, která představuje 90-92 % jejího objemu. Zbýlých 8-10 % představují bílkoviny – albumin, globuliny, fibrinogen, glukóza, volné mastné kyseliny, lipoproteiny, ketolátky, aminokyseliny, močovina, močová kyselina, kreatin, bilirubin a hormony, sodné, draselné, vápenaté a hořečnaté kationty, chloridové a hydrogenuhličitanové anionty a rozpuštěné dýchací plyny – kyslík a oxid uhličitý (Lavríková, Fontana, 2013; Mathew, Sankar et al., 2020).

#### **3.2.2. Krevní elementy**

Mezi formované krevní elementy řadíme červené krvinky (erytrocyty), bílé krvinky (leukocyty) a krevní destičky (trombocyty). Všechny formované krevní elementy se vyvíjejí z pluripotentní kmenové buňky (Glenn, Armstrong, 2019).



### 3.2.2.1. Červené krvinky

Červené krvinky (erythrocyty) jsou bezjaderné buňky, jejichž funkcí je transport dýchacích plynů (kyslíku a oxidu uhličitého) a živin. Počet erythrocytů v krvi u dospělého muže je  $4,3-5,3 \times 10^{12}/l$  a u ženy  $3,8-4,8 \times 10^{12}/l$ . Erythrocyty mají tvar bikonkávního disku. Tento tvar jim spolu s pružnou membránou a absencí jádra zajišťuje pružnost potřebnou pro průchod malými kapilárami. Specifickou červenou barvu dává erythrocytům krevní barvivo hemoglobin. Hemoglobin je tvořen čtyřmi podjednotkami, které se skládají z proteinového řetězce – globinu a pigmentu – hemu. Hem ve své struktuře obsahuje dvojmocné železo ( $Fe^{2+}$ ), schopné vázat kyslík. Krev se okysličuje v plicích a vzniká oxyhemoglobin. Kyslík je uvolňován ve tkáních a z oxyhemoglobinu se stává hemoglobin. Oxid uhličitý z tkání je červenými krvinkami transportován ve formě karbaminohemoglobinu do plic, kde je vydechován (Mourek, 2012; Lüllman-Rauch, 2012; Barbalato, Pillarisetty, 2020).

### 3.2.2.2. Bílé krvinky

Bílé krvinky (leukocyty) zajišťují obranné reakce organismu. Množství leukocytů v krvi se u dospělého jedince pohybuje mezi  $4-10 \times 10^9/l$ . Jde o různorodou skupinu buněk, kterou můžeme podle tvaru jádra a barvitelnosti granul rozdělit na granulocyty a agranulocyty. Granulocyty můžeme dále dělit podle barvitelnosti jader na neutrofilny, eozinofily a bazofily. Mezi agranulocyty řadíme monocyty a lymfocyty.

Granulocyty se také, kvůli svému segmentovanému jádru, nazývají polymorfonukleáry. Jádro neutrofilů je rozděleno na 2-5 segmentů, spojených tenkými můstky. Neutrofilní granulocyty jsou nejpočetněji zastoupené leukocyty, tvoří 60-70 % všech cirkulujících leukocytů. Jejich základní funkcí je fagocytóza, proto se také nazývají mikrofágy. Neutrofilny obsahují granula, která se nebarví kyselými ani bazickými barvivy. Rozlišujeme dva druhy granul: specifická a azurofilní. Specifická granula obsahují např. alkalickou fosfatázu, lysozym nebo kolagenázy. Azurofilní granula představují lysozomy s vysokým obsahem hydrolytických enzymů. Eozinofilní granulocyty mají méně členité jádro a hrubší, kyselými barvivy (eosinem) barvitelná granula. Eozinofily hrají úlohu při alergických reakcích a ochraně před parazity. Jejich množství v krvi tvoří 3-5 %

z celkového počtu leukocytů. Bazofilní granulocyty jsou nejméně zastoupené leukocyty, tvoří 0,5-1 % všech cirkulujících leukocytů. Cytoplazma bazofilů obsahuje granula s heparinem a histaminem, a tím ochraňují tělo během alergických reakcí.

Agranulocyty nemají v cytoplazmě granula a mají nesegmentované jádro, proto se také nazývají mononukleáry. Monocyty se morfologicky podobají velkým lymfocytům. Jádro je ledvinovitého tvaru a jejich cytoplazma obsahuje jemná azurofilní granula. Monocytů je v krvi 3-8 % z celkového množství leukocytů. Monocyty v krevním oběhu cirkulují jako buněčné prekurzory. Poté se ve tkáních diferencují ve specifické makrofágy. Makrofágy se spolu s neutrofilními granulocyty označují jako profesionální fagocyty. Spolu s granulocyty a NK-buňkami tvoří buněčnou složku nespecifické imunity. Monocyty dále spolupracují s lymfocyty při tvorbě protilátkové imunity. Monocyty se řadí mezi antigen předkládající buňky. Jsou schopné zpracovávat antigeny a následně je vystavovat na svém povrchu a předkládat je lymfocytům. Lymfocyty jsou buněčnou složkou specifické imunity. Představují 15-40 % z celkového počtu leukocytů. Lymfocyty můžeme podle významu a funkce při imunitních reakcích rozdělit na T-lymfocyty, B-lymfocyty a NK-buňky. T-lymfocyty získávají své imunokompetentní vlastnosti v brzlíku (*thymu*). Účastní se buněčné imunity. Podle jejich funkce je můžeme rozdělit na Th-helperské (pomocné), Tc-cytotoxické a Ts-supresorové. B-lymfocyty nejsou závislé na thymu, vyžívají v kostní dřeni (*medulla ossium*). Jsou spojeny s humorální (protilátkovou) imunitou, v přítomnosti antigenu se transformují v plazmatické buňky produkující protilátky (imunoglobuliny). NK-buňky ničí tumory a buňky napadené virovou infekcí (Šajdíková, Fontana, 2013; Čihák, 2016; Mourek, 2012).

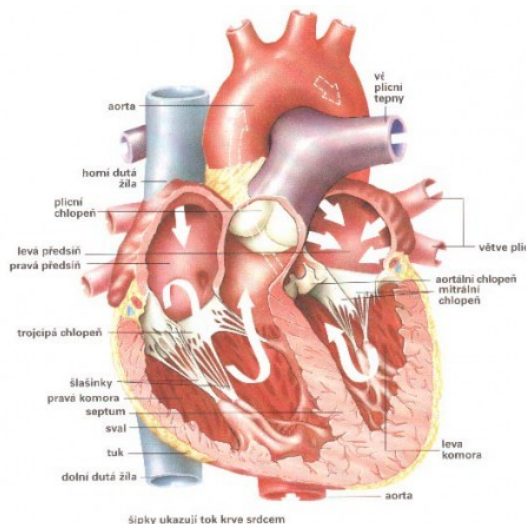
### **3.2.2.3. Krevní destičky**

Krevní destičky (trombocyty) jsou fragmenty megakaryocytů. V krevním oběhu jich je  $150-300 \times 10^9/l$ , 2/3 cirkulují v krvi a 1/3 je uložena ve slezině. Trombocyty obsahují dva typy granula: alfa granula důležitá pro srážení krve a denzní granula obsahující enzymy a lysozym. Funkcí trombocytů je hemostáza (krevní srážení) – uzavírání poškozené stěny cév (Šajdíková, Fontana, 2013).

### 3.3. Anatomická stavba srdce

Srdce (*cor*) je svalový orgán, složený ze čtyř dutin: dvou síní a dvou komor. Srdce pracuje jako pumpa. Rytmičtým smršťováním a ochabováním pohání krev pod tlakem skrze krevní oběh. Je situováno v mediastinu za hrudní kostí (*sternum*) (Whitaker, 2018).

Následující Obrázek 1 ilustruje stavbu srdce:



Obrázek 1: Srdce  
(Srdce-Cardia.webnode, 2010)

#### 3.3.1. Obecná stavba

Srdce má tvar nepravidelného kužele s hrotem orientovaným dopředu dolů a doleva. Na srdci můžeme rozlišit bázi srdeční (*basis cordis*) a hrot srdeční (*apex cordis*). Báze srdeční je širší kraniální část, kde se nachází síně, do kterých vstupují velké žíly a z komor zde vystupuje aorta a plicnice. Hrot srdeční je užší zaoblená část, ve které se nachází srdeční komory. Srdeční stěna má tři vrstvy – endokard (*endocardium*), myokard (*myocardium*) a epikard (*epicardium*). (Čihák, 2016).

##### 3.3.1.1. Osrdečník

Osrdečník (*pericardium*) je vnější obal srdce. Perikard vytváří serózní dutinu, ve které je srdce uloženo. Poskytuje srdci ochranu a zároveň dostatek prostoru pro expanzi komor. Vnější vazivová vrstva perikardu splývá s vnější vrstvou (*tunica adventitia*) aorty, plicnice, horní duté žíly a s centrální šlachou

bránice. Je složen ze dvou listů. Pod vazivem se nachází dva serózní listy perikardu *lamina parietalis* a *lamina visceralis*. *Lamina parietalis* je tenká a lesklá blána, krytá jednovrstevným plochým epitelem, pokrývající vnitřní (k srdci obrácený) povrch perikardu. *Lamina visceralis (epicardium)* je vnitřní list srostlý s povrchem srdce. Mezi listy je dutina (*cavitas pericardialis, cavum pericardii*) vyplněná serózní tekutinou (*liquor pericardii*), která zmírňuje tření obou listů při pohybech srdce (Čihák, 2016; Whitaker, 2018).

### **3.3.1.2. Prává síň a pravá komora**

Pravá strana srdce se skládá z pravé síně (*atrium dextrum*) a pravé komory (*ventriculus dexter*). Do pravé síně ústí horní a dolní dutá žíla (*vena cava superior et inferior*), které přivádí odkysličenou krev. Stažením síně se krev vypudí, přes trojcípou (trikuspidální) chlopeň (*valva atrioventricularis dextra seu tricuspidalis*), do pravé komory. Následně je krev stažením komory vypuzena do plicnice (*truncus pulmonalis*). Na začátku plicnice se nachází plicnicová chlopeň (*valva trunci pulmonalis*) zabraňující toku krve z tepny zpět do komory. Plicnice se následně dělí na dvě plicní tepny (*arteria pulmonalis dextra et sinistra*), každá vede krev do jedné z plic, kde se krev okysličuje (Grim, Naňka et al., 2017; Rehman, Rehman, 2020; Suresh, Shimoda, 2016; Kachlík, 2018).

### **3.3.1.3. Levá síň a levá komora**

Levá část srdce se podobně jako ta pravá skládá ze síně (*atrium sinistrum*) a komory (*ventriculus sinister*). Mezi síní a komorou se nachází dvojcípá (bikuspidální) nebo také mitrální chlopeň (*valva mitralis seu bicuspidalis*). Okysličená krev se z plic vrací do levé síně čtyřmi plicními žilami (*venae pulmonales*). Stažením síně je krev vypuzena do komory. Z levé komory vychází srdečnice (aorta), kterou je krev odváděna do krevního oběhu celého těla. Při ústí aorty se nachází aortální chlopeň (*valva aortae*), která zabraňuje návratu krve z velkého krevního oběhu zpět do srdce (Grim, Naňka et al., 2017; Rehman, Rehman, 2020).

### 3.3.2. Anatomická stavba srdeční stěny

Srdeční stěna je tvořena třemi vrstvami. Vnitřní vrstva se nazývá endokard (*endocardium*), prostřední svalová vrstva myokard (*myocardium*) a vnější vrstva epikard (*epicardium*).

Endokard tvoří lesklá, hladká a průsvitná membrána, vystýlající srdeční dutiny. Povrch endokardu je tvořen jednou vrstvou plochých endotelových buněk. Pod endotelem se nachází vazivová *lamina propria* tvořená sítěmi kolagenních a elastických vláken, které splývají až ve fenestrované membrány. V *lamina propria* se kromě kolagenních a elastických vláken nachází také roztroušené hladké svalové buňky, především ve stěně síní a v septu. Pod endokardem se nachází tenká vrstva řídkého vaziva tzv. subendokardové vazivo pevně připojující *laminu propriu* k srdeční svalovině.

Z endokardu vznikají srdeční chlopně. Ty jsou plochou duplikaturou endokardu vyztuženého vazivovou ploténkou. Ploténky jsou propojeny se srdečním skeletem. Skelet je prostorovým podpurným útvarem v místě srdečních chlopní tvořený hustým fibrózním vazivem. Srdeční skelet tvoří čtyři vazivové prstence (*anuli fibrosi*), vzájemně spojené dalšími vazivovými útvary (*trigonum fibrosum dextrum et sinistrum, tendo infundibuli*). Na srdeční skelet se kromě chlopní upíná i myokard. Skelet elektricky izoluje myokard síní od myokardu komor, jediným spojením zůstává převodní systém srdeční (viz dále).

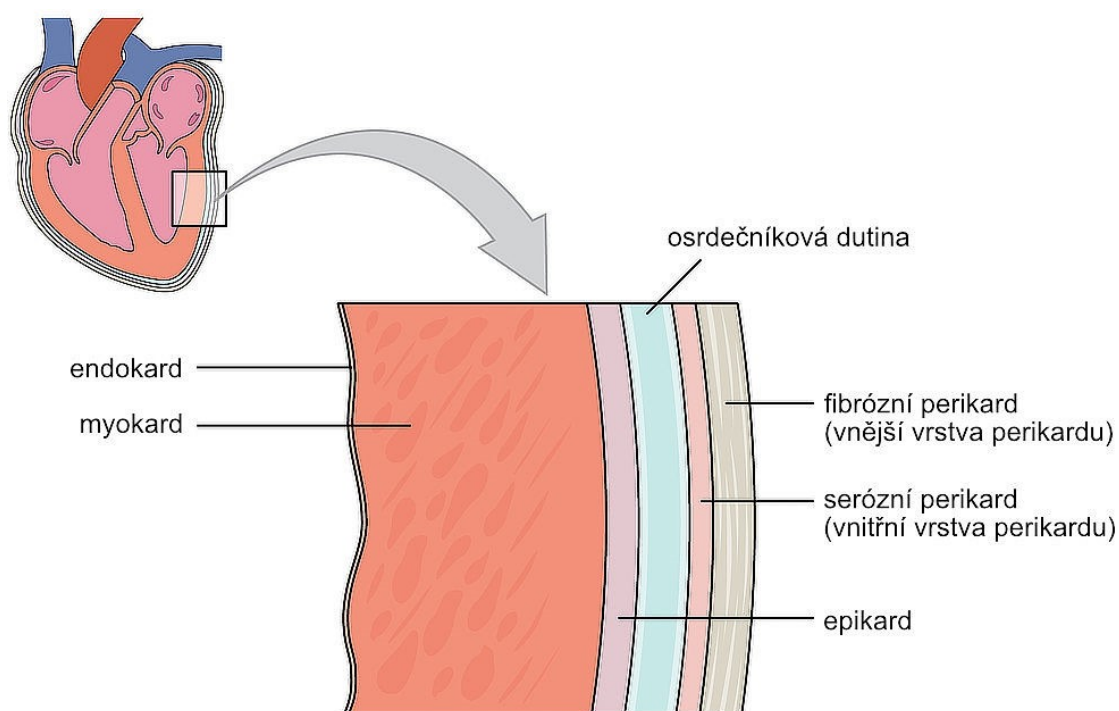
Další vrstvou srdeční stěny je myokard. Jde o hlavní složku srdeční stěny. Myokard je zvláštní druh příčně pruhované svaloviny. Ta sestává z vláken tvořených jednotlivými buňkami. Vlákna jsou spojována šikmými můstky a vytváří tak prostorovou síť. Buňky jsou od sebe odděleny interkalárními disky. Buňky srdeční svaloviny mají uprostřed uložené oválné jádro, kolem kterého jsou kontraktilní myofibrily podobné těm v příčně pruhovaném kosterním svalstvu. Myokard stěn a septa síní je tenčí, než ten ve stěnách a septu komor. Myokard síní obsahuje více vaziva než myokard komor. Svalovina v levé komoře je až třikrát silnější než svalovina pravé komory.

Poslední vrstvou je epikard. Ten tvoří serózní povlak na povrchu srdce. Pod vlastním epikardem se nachází elastické a tukové vazivo. Vazivem, spojujícím

epikard s myokardem, prochází kmeny cév a nervů srdce. Epikard přechází v místech vstupu a výstupu cév ze srdce v osrdečník (viz výše).

Srdeční stěna je vyživovaná pomocí dvou koronárních tepen pravé a levé věnčité tepny (*arteria coronaria cordis dextra et sinistra*). Jde o první větve aorty. Tepny na povrchu srdce vytváří síť kapilár dodávající myokardu krev (Čihák, 2016; Dylevský, 2011; Štejfa, Bakala et al., 2007).

Stavbu srdeční stěny ilustruje Obrázek 2



Obrázek 2: Stavba srdeční stěny  
(Openstax College, 2013)

### 3.4. Typologie a stavba cév

Cévní systém člověka je tvořen soustavou uzavřených trubic. Cévy se podle své stavby dělí na několik úseků. Mezi tyto strukturně charakteristické úseky patří tepny (*arteriae*), které se postupně větví, zmenšují tak svůj průsvit, a postupně přechází v arterioly (*arterioly*). Arterioly se dále větví a postupně přechází v síť vlásečnic – kapilár (*vasa capillaria*). Kapiláry přechází ve venuly (*venulae*) a vzniká tak žilní část oběhu. Hranice mezi tepennou a žilní částí krevního oběhu není přesná. Probíhá na úrovni kapilár a jediným rozlišovacím znakem tepenné a žilní části je hladina kyslíku v krvi. Venuly se sbíhají a tvoří žíly (*venae*).

Stěny velkých cév mají tři vrstvy. Vnitřní vrstva (*tunica intima*) vystylající cévy je tvořena endotelem, zajišťujícím nesmáčivý a hladký povrch cévy. Buňky endotelu jsou ploché a polygonální, protažené ve směru proudění krve. Části vnitřní vrstvy jsou uspořádané longitudinálně. Pod endotelem je vrstva subendotelového vaziva.

Střední vrstva (*tunica media*) je tvořena vrstvou hladké svaloviny. Svalovina dává cévám schopnost měnit svůj průsvit podle potřeby a regulovat tak průtok krve cévou (regulace krevního tlaku) a zároveň dodává stěně pružnost. Velké cévy, především tepny mají velmi silnou svalovinu. Kromě svaloviny se ve střední vrstvě nachází elastická a retikulární vlákna. Elastická vlákna se často koncentrují na okrajích střední vrstvy a vytváří blanky *membrana elastica interna* a *membrana elastica externa* oddělující jednotlivé vrstvy cévní stěny.

Vnější vrstva (*tunica adventitia*) je tvořena vazivem. Hlavní součástí jsou longitudinální kolagenní a elastická vlákna. Kromě nich zde můžeme najít fibroblasty, adipocyty a hladké svalové buňky. V adventicii větších cév se dále nachází cévy cév (*vasa vasorum*), zajišťující výživu cévní stěny. Kromě nich můžeme v adventicii také nalézt lymfatické kapiláry a zakončení nervových vláken (Dylevský, 2011; Vajner, Uhlík et al., 2017).

### 3.4.1. Tepny

Stěny tepen (*arteriae*) jsou pružné a relativně tlusté. Stavba jejich stěny je adaptovaná na nárazy krve při systole. Během systoly je krev vypuzena ze srdce do cévního systému, čímž vzniká tlaková vlna, hmatatelná jako tep. Elasticita stěny tepen zajišťuje kontinuitu krevního toku. Stěna tepen má tři vrstvy, vnitřní vrstvu (*tunica intima*), střední vrstvu (*tunica media*) a vnější vrstvu (*tunica adventitia*).

Tepny můžeme podle stavby cévní stěny rozdělit na tepny svalové a tepny elastické. Hlavní rozdíl je ve střední vrstvě (*tunica media*). Svalové tepny mají ve střední vrstvě až 40 vrstev hladkých svalových buněk. Elastické tepny mají ve střední vrstvě elastické blanky, jejichž počet se s věkem zvyšuje. K elastickým tepnám patří velké tepny např. aorta, její větší větve a plicnice. Mezi svalové tepny patří většina tepen zásobujících tkáň a orgány.

Vnitřní vrstva (*tunica intima*) je tvořena plochými endotelovými buňkami. Pod endotelem se nachází elastické blanky, elastická a kolagenní vlákna. Elastické blanky a elastická vlákna se souhrnně nazývají *membrana elastica interna*.

Střední vrstva (*tunica media*) je tvořena hlavně cirkulárně nebo spirálovitě uspořádanými hladkými svalovými buňkami. Mezi svalovými buňkami jsou propletena kolagenní a elastická vlákna, případně elastické blanky. Jde o nejsilnější vrstvu stěny. Podle stavby této vrstvy můžeme tepny rozdělit na elastické a svalové (viz výše).

Vnější vrstva (*tunica adventitia seu externa*) je tvořena fibrilárním vazivem s elastickými a kolagenními vlákny. Tato vlákna tvoří síť, které přechází do okolního vaziva a pružně cévu ukotvují. Od střední vrstvy může být oddělena elastickou blankou *membrana elastica externa* (Čihák, 2016; Vajner, Uhlík et al., 2017).

### **3.4.2.Arterioly**

Arterioly (*arteriolae*) jsou nejmenší tepny přecházející v kapiláry. Vnitřní vrstva (*tunica intima*) je tvořena longitudinálně uspořádanými endotelovými buňkami. Střední vrstva (*tunica media*) je tvořena převážně hladkými svalovými buňkami a elastickými blankami. Vnější vrstva (*tunica adventitia seu externa*) je tvořena fibroblasty, extracelulární matrix a kolagenními vlákny. Ve vnější vrstvě se nachází volná nervová zakončení. Díky inervaci mohou arterioly rychle měnit svůj průsvit, a tak regulovat průtok krve. Arterioly hrají důležitou roli v regulaci tepenného krevního tlaku (Rahman, Siddik, 2020; Kachlík, 2018).

### **3.4.3.Kapiláry**

Kapiláry (*vasa capillaria*) jsou malé cévy tvořící přechod mezi tepennou a žilní částí krevního oběhu. Průtok krve kapilárami je regulován hlavně pomocí prekapilárních sfinkterů (viz dále). Stěna kapilár je tenká, tvořená vrstvou endotelových buněk. Místy může být stěna posílena pericyty. Hlavním úkolem kapilár je látková výměna, probíhající prostřednictvím difuze nebo za pomoci transportéru. Stěna kapilár může být různě upravena v závislosti na funkci



kapiláry a na orgánu, kde se daná kapilára nachází (Godwin, Tariq et al., 2021; Kachlík, 2018).

#### **3.4.4. Venuly**

Venuly (*venulae*) jsou drobné žíly, které se sbírají z kapilár. Jejich stěna má tři vrstvy. Vnitřní vrstva (*tunica intima*) se skládá z endotelu a tenké vrstvy subendotelového vaziva. Střední vrstva (*tunica media*) je tvořena tenkou vrstvou hladké svaloviny. Vnější vrstva (*tunica adventitia seu externa*) je tvořena poměrně silnou vrstvou longitudinálně uspořádaného kolagenního vaziva (Vajner, Uhlík et al., 2017)

#### **3.4.5. Žíly**

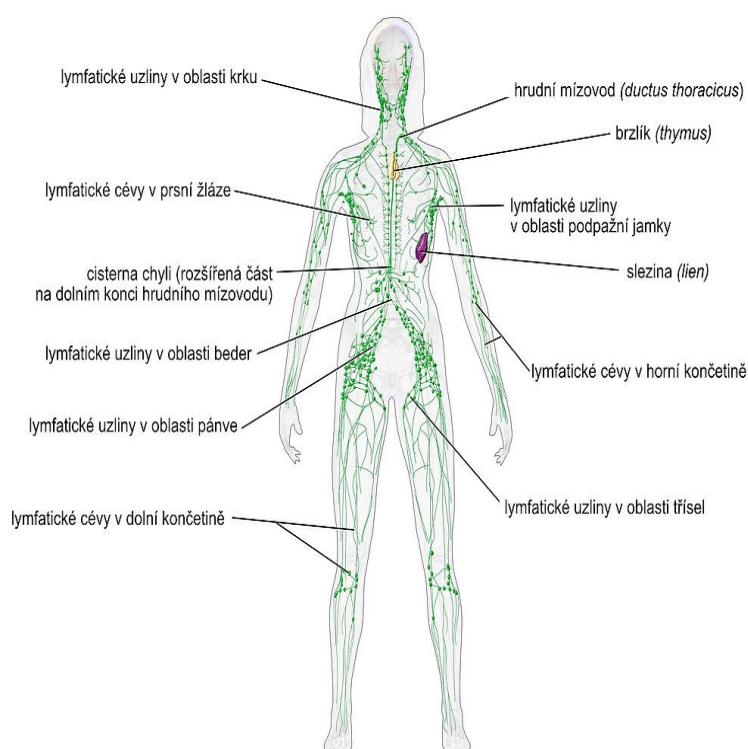
Stěny žil (*venae*) jsou oproti tepnám srovnatelné velikosti tenčí. Jednotlivé vrstvy stěny jsou u žil méně rozeznatelné. Stěny žil se skládají ze tří vrstev, jejichž stavba se od stěn tepen liší tloušťkou a histologickou stavbou jednotlivých vrstev. Vnitřní vrstva (*tunica intima*) je podobně jako u tepen tvořena vrstvou endotelu a subendotelovým vazivem. *Membrana elastica interna* se tvoří až u větších žil. Střední vrstva (*tunica media*) je tvořena jen několika vrstvami longitudinálně a cirkulárně uspořádaných hladkých svalových buněk a je tenčí než u tepen. Cirkulární svalovina v medii není tak kompaktní jako u tepen a je prostoupena kolagenními a elastickými vlákny. Vnější vrstva (*tunica adventitia*) je u žil na rozdíl od tepen nejtlustší vrstvou stěny. Je složena z longitudinálně uspořádané hladké svaloviny. Oproti tepnám mají žíly *bohatší vasa vasorum* a jsou méně inervované. Pro žíly jsou typické žilní chlopně (*valvulae venosae*). Jde o duplikatury vnitřní vrstvy (*tunica intima*). Jsou to poloměsíčitě chlopně orientované tak, že krev může proudit jen jedním směrem. Jejich úkolem je zabránění zpětného toku krve (Lüllman-Rauch, 2012; Waschke, Böckers et al., 2015).

### **3.5. Lymfatický systém**

Lymfatický systém je složen z lymfatických cév vedoucích lymfu a lymfatické tkáně. Ta může tvořit lymfatické orgány (slezina, brzlík atd.) nebo se koncentrovat v mukóze a submukóze sliznic např. v trávicím systému nebo plicích (mucosa

associated lymphoid tissue – MALT). Lymfatické orgány můžeme rozdělit na primární (kostní dřeň a brzlík) a sekundární (slezina, mízní uzliny a specifické oblasti mukózy a submukózy). Lymfatický systém má tři funkce: udržování rovnováhy tělních tekutin, transport lipidů a účast na imunitních reakcích. Lymfatický systém odvádí z tkání tkáňový mok vznikající přestupem plazmy přes stěnu kapilár do tkání. Další funkcí je transport tuků přijatých potravou ze střeva do krve. Lymfatický systém je součástí imunitního systému. Poskytuje ideální podmínky pro tvorbu lymfocytů, jejich dozrávání a diferenciaci (Šajdíková, Fontana, 2013; Liao, von der Weid, 2015).

Následující Obrázek 3 ilustruje rozložení lymfatických orgánů na lidském těle



Obrázek 3: Rozložení lymfatických orgánů a cév  
(Blausen.com staff, 2014)

### 3.5.1. Míza (Lymfa)

Stěna krevních kapilár je částečně propustná pro krevní bílkoviny a plazmu. Plazma prostupuje přes stěnu kapilár do mezibuněčného prostoru a dochází k ultrafiltraci. Ultrafiltrát plazmy tvořící tekuté prostředí tkáňových buněk se nazývá tkáňový mok. Tkáňový mok musí být ze tkání odváděn, jinak by došlo k jeho nahromadění a zástavě tkáňové cirkulace. Průměrný objem tkáňového

moku v těle je zhruba 10,5 litrů. Z části tkáňového moku vzniká míza (lymfá). Většina tkáňového moku je reabsorbována zpět do krve. Denně je z tkáňového moku vytvořeno 2-2,5 litrů mízy. V lymfatickém systému proudí okolo 1 litru mízy. Míza je průhledná, bezbarvá nebo nažloutlá tekutina. Složením se míza od plazmy odlišuje menším obsahem bílkovin a vyšším obsahem tukových kapének a odpadních metabolitů. Míza dále obsahuje lymfocyty. Funkcí mízy je drenáž tkáňového moku, transport živin a odpadních produktů a ochrana organismu, jelikož míza obsahuje bílé krvinky (leukocyty). Mízu z tkání odvádí mízní cévy (Šajdíková, Fontana, 2013; Dylevský, 2011; Morfoisse, Noel, 2019).

### **3.5.2. Mízní (lymfatické) cévy**

Mízní cévy začínají ve tkáních jako slepé mízní kapiláry (*vasa lymphocapillaria*), ve kterých dochází k přestupu tkáňového moku do kapilár. Tyto slepé konce jsou uzpůsobeny pro snadný přestup moku. Jejich stěna je tvořena jen jednou vrstvou lymfatických endotelových buněk bez pericytů a hladkých svalových buněk. Kapiláry vzájemně anastomosují a vytváří lymfokapilární síť (*rete lymphocapillare*). Mízní kapiláry se nachází ve všech orgánech, kromě centrálního nervového systému a kostní dřeně. Stěna mízních kapilár se stavbou podobá krevním kapilárám. Je tvořena jednou vrstvou endotelových buněk. Tyto buňky mají mezi sebou četné štěrby a často jim chybí *lamina basalis*. Na vnější straně mají buňky drobné výběžky kotvící fibrily, které zasahují do okolního vaziva, ukotvují kapiláru a brání jejímu kolapsu.

V lymfokapilárních sítích se kapiláry sbíhají a vznikají tak sběrné mízní cévy zvané *vasa lymphatica*. Ty odvádí mízu do lymfatických uzlin. Stěna sběrných mízních cév má tři vrstvy: intimu, medii a adventii. Struktura jejich stěn je podobná žilám. Na rozdíl od žilní stěny je jejich stěna tenčí a hranice mezi jednotlivými vrstvami jsou hůře rozeznatelné. Pro sběrné mízní cévy jsou typické po dvojicích uspořádané chlopně usměřující tok mízy. Cévy vedoucí mízu do mízních uzlin jsou označovány jako *vasa afferentia*. K jedné uzlině jich vede několik. Cévy vedoucí mízu z uzlin jsou označovány jako *vas efferens*. Z každé uzliny vystupuje jen jedna *vas efferens*. Spojením více *vasa efferentia* vznikají mízní kmeny (*trunci lymphatici*). Jejich stavba odpovídá menším žilám, jejichž stěna má

oproti stejně velkým žilám větší množství svaloviny v medii (Vajner, Uhlík et al., 2017; Fiala, Valenta et al., 2015; Morfoisse, Noel, 2019).

## 3.6. Lymfatické orgány

Lymfatické orgány jsou tvořeny lymfatickou tkání. Ta je složena z lymfatických buněk a makrofágů uložených v retikulárním vazivu. Lymfatické orgány se dělí na primární a sekundární (Šajdíková, Fontana, 2013).

### 3.6.1. Primární lymfatické orgány

Mezi primární lymfatické orgány řadíme kostní dřeň (*medulla ossium*) a brzlík (*thymus*). V primárních orgánech vznikají (kostní dřeň) a dozrávají (kostní dřeň a brzlík) buňky imunitního systému – leukocyty (Jílek, 2014).

#### 3.6.1.1. Kostní dřeň

Kostní dřeň (*medulla ossium*) je měkká tkáň vyplňující vnitřek kostí. V dlouhých kostech je uložena v dřeňové dutině a ve spongiózní kosti hlav dlouhých kostí a ve spongióze krátkých kostí. Rozlišujeme tři typy kostní dřene: červenou, žlutou a šedou. Červená kostní dřeň (*medulla ossium rubra*) je tvořena retikulárním vazivem s krevními vlásečnicemi. Mezi trámci retikulárního vaziva se nachází krvetvorná tkáň – kmenové buňky. V červené kostní dřeni vznikají červené krvinky, krevní destičky a většina bílých krvinek.

Během stárnutí dochází k nahrazování retikulárního vaziva tukovým vazivem. Z červené kostní dřene se stává žlutá kostní dřeň (*medulla ossium flava*), ve které již neprobíhá krvetvorba. V dospělosti probíhá krvetvorba v obratlích, pánvi, žebrech, zápěstních a zánártních kostech, hrudní kosti a houbové kostní tkáni dlouhých kostí. Ve stáří dochází ke ztrátám tuku z dřene a ze žluté kostní dřene se stává šedá kostní dřeň (*medulla ossium grisea*) (Dylevský, 2009; Arcus Brno Onko a lymfocentrum, © 2021).

#### 3.6.1.2. Brzlík

Brzlík (*thymus*) je primární lymfatický orgán uložený za hrudní kostí (sternum) v mediastinu. Brzlík se nachází před prstenčitou chrupavkou

a průdušnicí, mírně pod štítnou chrupavkou. Již od narození je plně vyvinutý a funkční. Od puberty podléhá regresí, tuková tkáň a vazivo postupně nahrazují tkáň lymfatickou. Brzlík je složen ze dvou asymetrických laloků: pravý a levý lalok (*lobus dexter et lobus sinister*). Levý lalok bývá obvykle větší a delší než pravý. Laloky jsou spojeny v isthmu (šíji). Na povrchu je brzlík kryt jemným vazivovým pouzdrém (*capsula thymi*). Z pouzdra pronikají dovnitř orgánu vazivová septa dělící vnitřní prostor brzlíku na lalůčky (*lobuli thymi*). Základem stavby brzlíku je síť z retikulárního epitelu. Kvůli epitelovému původu buněk se v retikulu brzlíku nenachází retikulární vlákna. Síť je tvořena pouze epitelovými buňkami, jejichž výběžky jsou spojeny desmozomy. Oka retikulární sítě jsou vyplněna lymfocyty. Množství lymfocytů v brzlíku je tak velké, že představují až 90 % jeho hmotnosti. Podle množství a míry zralosti T-lymfocytů můžeme v brzlíku rozlišit kůru a dřeň. Kůra obsahuje větší množství lymfocytů než dřeň, proto se v mikroskopickém preparátu zdá tmavší. V kůře se nachází malé, dozrávající lymfocyty. Ve dřeni se nachází větší, vyztářejší lymfocyty.

Hlavní funkcí brzlíku je diferenciací lymfocytů. T-lymfocyty se zde stávají imunokompetentními. Brzlík tak udržuje potřebný počet T-lymfocytů v krevním oběhu. Hraje důležitou roli krátce po narození, kdy zajišťuje normální vývoj lymfatické tkáně v mízních uzlinách a orgánech. Brzlík má také endokrinní funkci. Produkuje humorální faktory ovlivňující proliferaci, zrání, diferenciací a získávání imunokompetence lymfocytů. Brzlík tak reguluje lymfopoézu v sobě samém, i dalších lymfatických orgánech (Čihák, 2016; Šajdíková, Fontana, 2013).

### **3.6.2. Sekundární lymfatické orgány**

Mezi sekundární lymfatické orgány řadíme např. mízní uzliny, slezinu a lymfatické tkáně asociované se sliznicemi. Tyto orgány jsou osídleny zralými imunocyty. Imunocyty se v orgánech mohou soustřeďovat do oblastí s jedním převládajícím buněčným typem – zóna B a zóna T podle převládajícího typu lymfocytů (Jílek, 2014; Šajdíková, Fontana, 2013).

#### **3.6.2.1. Lymfatické uzliny**

Mízní uzliny (*nodi lymphatici*) jsou lymfatické orgány ledvinovitého tvaru. Uzliny bývají uloženy ve specifických oblastech těla, jde o místní nebo také

regionální uzliny. Umístění uzlin na těle odpovídá jejich příslušnosti k jednotlivým orgánům a krajinám těla.

Na povrchu uzliny se nachází vrstva kolagenního vaziva tvořící pouzdro (*capsula*). Z pouzdra vychází vazivové trámce (*trabeculae*) dělící vnitřní prostor uzliny na několik neúplně uzavřených oddílů. Pod pouzdem se nachází subkapsulární sinus, kterým proudí míza. Sinem prochází retikulární buňky a vlákna. V uzlině můžeme rozlišit kůru (*cortex*), dřeň (*medulla*) a parakortikální zónu.

Kůra uzliny (*cortex*) se nachází po obvodu uzliny pod subkapsulárním sinem. Je charakteristická B-lymfocyty koncentrovanými v lymfatické uzlíky. Kromě nich můžeme v kůře nalézt vrstvu s velkou koncentrací T-lymfocytů – parakortikální zónu.

Dřeň (*medulla*) je vnitřní vrstvou uzliny. Skládá se z medulárních provazců a medulárních sinusů. Medulární provazce obsahují plazmatické buňky, B-lymfocyty a makrofágy. Medulárními sinusy odvádí mízu z uzliny do *vas efferens* (Bujoreanu, Gupta, 2021; Dylevský, 2011; Kachlík, 2018).

### **3.6.2.2. Slezina**

Slezina (*lien*) je největší lymfatický orgán těla. Je uložena mezi žaludkem a bránicí v levé hypochondriální části dutiny břišní. Imunitní funkce sleziny je zajištěna velkým množstvím makrofágů ve slezině a také tvorbou protilátek a lymfocytů v mízních uzlíčcích. Slezina má řadu dalších funkcí: vychytávání a destrukci červených krvinek, recyklaci železa, slouží jako zásobárna krve. Ve fetálním období vývoje probíhá ve slezině krvetvorba. Přes všechny svoje funkce není slezina orgánem nezbytně důležitým pro život.

Na povrchu se nachází vazivové pouzdro (*capsula lienis*). Ve vazivu pouzdra nalézáme myofibroblasty, které mu umožňují vykonávat slabé kontrakce, které pomáhají při vypuzování krve ze sleziny. Pouzdro rovněž slezině umožňuje výrazně zvětšit její objem a skladovat či vypudit velké množství krve. Z pouzdra vystupují vazivové trámce (*trabeculae splenicae*) vedoucí dovnitř sleziny cévy, částečně rozdělující vnitřní prostor sleziny.

Vnitřní prostor sleziny je sítí retikulární tkáně, která vytváří stroma sleziny. Mezi trámci retikulární tkáně se nachází parenchym – *pupla splenica*. Pulpu

rozlišujeme na červenou a bílou. Červená pulpa je složena z Billrothových provazců a slezinných sinů. Její funkcí je odbourávání přestárých nebo poškozených erytrocytů. Sinusy jsou rozšířené kapiláry, kterými pomalu proudí krev. Přestárle a poškozené erytrocyty jsou v kontaktu s makrofágy z Billrothových provazců a jsou jimi odbourávány. Normální a životaschopné erytrocyty se vrací zpátky do krevního oběhu. Červená pulpa je také schopná vychytávat z krve cizorodé částice (viry, bakterie, houby nebo toxiny). Rovněž slouží jako zásobárna bílých krvinek a krevních destiček, které jsou uvolňovány v případě poranění, infekce či ke kompenzaci krevních ztrát. Bílá pulpa je tvořena periarteriální lymfatickou pochvou, mízními uzlíky (*nodi lymphoidei splenici*) a marginální zónou. V periarteriální lymfatické pochvě jsou utvořeny dvě vrstvy. Vnitřní se skládá převážně z T-lymfocytů a vnější z T-lymfocytů i B-lymfocytů. V mízních uzlíčcích převažují B-lymfocyty. Marginální zóna představuje okrajovou vrstvu mízních uzlíčků obsahujících různé buňky bílé krevní řady (Vasković, 2021; Chaudhry, Luskin et al., 2020; Fiala, Valenta et al., 2015; Vajner, Uhlík et al., 2015)

### 3.6.2.3. Lymfatické tkáně asociované se sliznicemi (MALT)

Lymfatická tkáň se nachází také v různých částech respiračního, trávicího a močopohlavního systému. Tyto lymfatické tkáně jsou tvořeny mízními uzlíky a retikulárním vazivem.

Jedná se o Waldeyerův lymfatický okruh. Ten se skládá z patrové mandle (*tonsilla palatina*), jazykové mandle (*tonsilla lingualis*), hltanové mandle (*tonsillae pharyngae*) a *tonsilla tubaria*. Na povrchu mandlí je nerohovatějící vrstevnatý epitel a v případě hltanové mandle víceřadý cylindrický epitel s řasinkami. Místa jsou na povrchu mandlí prohlubně (krypty). V těchto místech je epitel mandlí infiltrován lymfocyty. *Tonsilla tubaria* je pokračování hltanové mandle. Jde o nahromaděnou lymfatickou tkáň v okolí ústí Eustachovy trubice.

Lymfatická tkáň ve formě mízních uzlíku se nachází po celé délce trávicího traktu. Uzlíky jsou obvykle volně roztroušené *folliculi lymphatici solitarii*. Ve stěně tenkého střeva (*ileae*) nebo *appendixu* dochází ke hromadění uzlíků ve větší celky *folliculli lymphatici aggregati* – Peyerovy plaky. *Appendix vermiformis* je červovitý přívěsek slepého střeva (*intestinum caecum*). Jeho stěna obsahuje lymfatickou

tkáň s lymfatickými uzlíky. Appendix zřejmě funguje jako lokální mízní uzlina (Arcus Brno Onko a lymfocentrum, © 2021; Čihák, 2013; Lüllmann-Rauch, 2012).



## 4. Fyziologie krevního oběhu a lymfatického systému

### 4.1. Fyziologie srdce

Krev je tělní tekutina nezbytná pro život. Má řadu funkcí, které se však mohou uplatnit pouze v případě, je-li v dostatečném množství a při daných fyziologických parametrech cirkulací dodávána do všech tkání. Hlavním úkolem cirkulace je rychlý transport na vzdálenosti, pro které by difuze byla neefektivní. Cirkulace je zprostředkována kardiovaskulárním systémem. Ten se skládá ze soustavy trubic – cév, kterými proudí krev pomocí čerpadla – srdce.

Z konstrukčního hlediska je srdce čerpadlo komorového typu, v němž je krev usměřována pomocí chlopní. V kardiovaskulární soustavě člověka se uplatňuje princip čerpadla s vlastní kontraktilní stěnou a také princip čerpadla využívajícího vnější zdroj síly. Čerpadlo s vlastní kontraktilní stěnou představuje srdce. Princip čerpadla s vnějším zdrojem síly se uplatňuje ve velkých žilách v dolních končetinách. Místo kontraktilní stěny zde působí tlak okolních tkání např. při svalové kontrakci. Tzv. svalová pumpa umožňuje proudění krve směrem k srdci proti gravitační síle.

Srdce jako pumpa pracuje díky kontraktilním schopnostem svalstva. Obaluje-li sval dutý orgán (v případě srdce síně a komory), dochází při jeho kontrakci ke zmenšení vnitřního objemu daného orgánu. V případě, že je orgán vyplněn tekutinou (krví), dojde při kontrakci svalu k vytlačení této tekutiny ven z orgánu. Čerpací funkci srdce zajišťuje pravidelné střídání kontrakcí (systola) a následné ochabování (diastola) srdečního svalu. Při diastole se srdce naplní krví, která je následně ze srdce vypuzena během systoly. Síně plní funkci pomocných čerpadel. Při systole napomáhají plnění komor. Hlavními čerpadly jsou komory, ze kterých je krev vypuzena skrze velké tepny (aorta, plicnice) do velkého a malého krevního oběhu. Krev z pravé komory je vypuzována do nízkotlakého řečiště malého oběhu. Z levé komory je krev vypuzována proti většímu odporu velkého krevního oběhu. Levá komora je tedy více namáhaná než pravá, a z toho důvodu má silnější stěnu s mohutnější vrstvou svaloviny (Mourek, 2012; Kittnar, Jandová et al., 2011).

### **4.1.1. Elektrické vlastnosti srdce**

Základními elektrofyziologickými vlastnostmi srdce jsou automacie, dráždivost, vodivost a stažlivost. Automacie (chronotropie) je schopnost srdečních pacemakerových buněk tvořit elektrické impulsy– vzruchy. Ty vedou k pravidelným rytmickým kontrakcím, vznikajícím bez vnějších podnětů. Vodivost (dromotropie) umožňuje vedení vzruchů do celého srdce. Díky tomu dochází k synchronizované kontrakci pracovního myokardu. Dráždivost (bathmotropie) srdce zajišťuje, že kontrakci svaloviny vyvolávají jen vzruchy určité intenzity (tzv. nadprahové). Pokud je impuls dostatečně silný (nadprahový) dochází k systole a srdce reaguje jako celek. Pokud je signál slabší, srdce nezareaguje vůbec. Platí zákon všechno nebo nic. Kontraktilita – stažlivost (inotropie) udává sílu svalové kontrakce.

Předpokladem pro elektrickou aktivitu srdce je klidový membránový potenciál. Ten je vytvářen nerovnoměrným rozložením iontů na vnitřní a vnější membráně buněk. Hlavními ionty při tvorbě klidového membránového i akčního potenciálu jsou sodné  $\text{Na}^+$ , draselné  $\text{K}^+$  a vápenaté  $\text{Ca}^{2+}$  kationty. Draselné kationty  $\text{K}^+$  převažují uvnitř buňky a sodné  $\text{Na}^+$  a vápenaté  $\text{Ca}^{2+}$  kationty vně buňky. Elektrická aktivita srdce se projevuje depolarizací. Dochází ke změně potenciálu z  $-90$  mV až na  $+20$  mV. Během depolarizace dojde k rychlému přesunu  $\text{Na}^+$  iontů dovnitř buňky. Což vede k depolarizaci z původního polarizačního napětí k hodnotám  $0$  až  $+20$  mV. Poté dojde k uzavření  $\text{Na}^+$  kanálů a otevření  $\text{K}^+$  a  $\text{Ca}^{2+}$  kanálů a dochází k rychlé repolarizaci. Následuje plateau fáze, způsobená tokem vápenatých iontů dovnitř buňky. Po depolarizaci dochází k repolarizaci a ukončení akčního potenciálu. Repolarizace proběhne díky transportu  $\text{K}^+$  iontů ven z buňky. Poté dochází k výměně iontů a k obnovení původního stavu (Wei, Yohannan et al., 2020; Grunnet, 2010; Ivák, Maďa et al., 2013).

### **4.1.2. Převodní systém srdeční**

Myokard síní a komor je elektricky izolován srdečním skeletem. Jediným spojením je převodní systém srdeční. Ten je tvořen specializovanými částmi myokardu, které vytváří vzruchy vyvolávající kontrakce a rozvádí je na celé srdce.

Do převodního systému srdečního řadíme: sinusový uzel (*nodus sinuatrialis*), síňokomorový uzel (*nodus atrioventricularis*), spoje mezi uzly, atrioventrikulární svazek (*facies atrioventricularis*), pravé a levé raménko (*crus dextrum et sinistrum*) vystupující z atrioventrikulárního svazku a Purkyňova vlákna (*rami subendocardiales*). Činností převodního systému vznikají rytmicky se opakující kontrakce myokardu. Postupují od ústí žil přes síně k atrioventrikulárním ústím a odtud k srdečnímu hrotu. Kontrakční vlny dále postupují stěnou komor k tepenným a atrioventrikulárním ústím (Čihák, 2016).

#### **4.1.2.1. Sinusový uzel**

Sinusový uzel (*nodus sinuatrialis*) leží ve stěně pravé síně u *crista terminalis* a horní duté žíly. Sinusový uzel je srdečním pacemakerem. Dochází zde k depolarizaci a tvorbě potenciálu jehož výsledkem je elektrický vzruch, který je rozváděn převodním systémem srdečním na celé srdce (Kashou, Basit et al., 2020; Grim, Naňka et al., 2017).

#### **4.1.2.2. Síňokomorový uzel**

Vzruchy ze sinového uzlu se šíří do síňokomorového uzlu (*nodus atrioventricularis*). Ten je uložen v Kochově trojúhelníku v síňovém septu poblíž *sinus coronarius* (Heaton, Goyal, 2020; Grim, Naňka et al., 2017).

#### **4.1.2.3. Internodální dráhy**

Internodální dráhy jsou nesouvislé pruhy buněk srdeční svaloviny, které se od běžného myokardu liší svými elektrofyziologickými vlastnostmi. Tyto dráhy usnadňují přenos vzruchu ze sinového uzlu na síňokomorový uzel (Štejfá, Bakala et al., 2007).

#### **4.1.2.4. Atrioventrikulární svazek**

Atrioventrikulární svazek (*fasciculus atrioventricularis*) také zvaný Hisův svazek přenáší vzruchy ze síňokomorového uzlu na komory. Vychází ze síňokomorového uzlu jako truncus a následně se dělí na dvě raménka: pravé a levé (*crus dexter et sinister*) (Patra, Zhang et al., 2020; Kachlík, 2018).

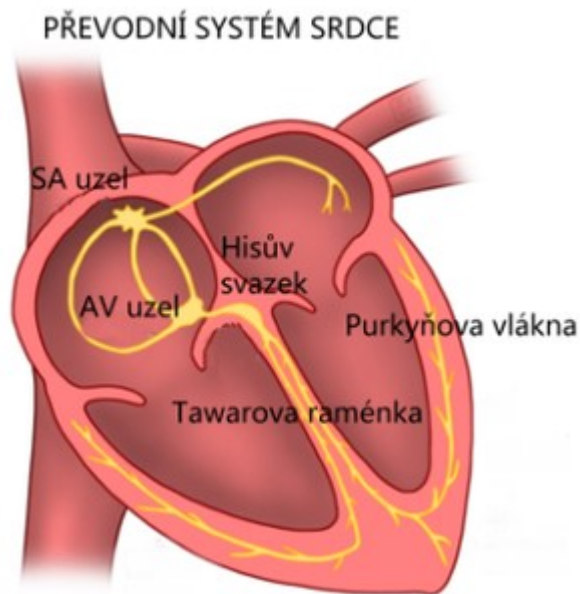
#### 4.1.2.5. Tawarova raménka

Tawarova raménka (*crus dexter et sinister*) jsou raménka vycházející z atrioventrikulárního svazku. Raménka vedou vzruch na komory, kde se dělí na Purkyňova vlákna (Fiala, Valenta et al., 2015).

#### 4.1.2.6. Purkyňova vlákna

Purkyňova vlákna (*rami subendocardiales*) jsou terminální částí převodního systému srdečního. Vlákna vytváří sítě pod endokardem. Elektrické vzruchy jsou jimi vedeny do pracovního myokardu, ve kterém končí (Sedmera, Gourdie, 2014).

Následující obrázek č.4 ilustruje převodní systém srdeční



Obrázek 4: Převodní systém srdeční  
(Wikisripta, 2010)

## 4.2. Malý a velký krevní oběh

Cévní systém je tvořen dvěma oddělenými cirkulačními okruhy: malým a velkým oběhem, které jsou poháněny jedním čerpadlem – srdcem.

Odkysličená krev se horní a dolní dutou žilou dostává do pravé síně a následně do pravé komory. Z pravé komory je krev vypuzena do malého krevního oběhu. Ten začíná jako plicnice (*truncus pulmonalis*) vystupující z pravé komory. Plicnice se dělí na pravou a levou plicní tepnu (*arteria pulmonalis dextra et sinistra*). Tepny se dále dělí a větví až na plicní kapiláry, ve kterých probíhá

vlastní výměna dýchacích plynů. Ze sítě plicních kapilár se sbírají čtyři plicní žíly (*venae pulmonales*) vedoucí okysličenou krev zpátky do srdce. Plicní žíly ústí do levé síně.

Krev z levé síně prochází přes levou komoru do velkého krevního oběhu. Velký krevní oběh začíná aortou. Její větve následně rozvádí krev po celém těle. Krev prochází krevním oběhem a poté se horní a dolní dutou žílou vrací do srdce (Čihák, 2013; Dylevský, 2009).

#### **4.2.1. Výměna dýchacích plynů**

Hlavní funkcí dýchacího systému je výměna dýchacích plynů ( $O_2$  a  $CO_2$ ) mezi organismem a okolím. Výměnu plynů mezi krví a plícemi zajišťuje malý krevní oběh. Vlastní výměna probíhá na úrovni plicních kapilár. Dochází k difuzi dýchacích plynů přes kapilární stěnu. Výměnu vzduchu mezi plícemi a okolním prostředím zprostředkovává plicní ventilace (Wagner, 2014; Suresh, Shimoda, 2016).

### **4.3. Mikrocirkulace ve tkáních**

Mikrocirkulace je terminální částí krevního oběhu. Je tvořena mikrocévami s průměrem menším než 20  $\mu m$ . Mikrocévami nazýváme kapiláry, arterioly a postkapilární venuly. V těchto cévách probíhá vlastní výměna dýchacích plynů mezi krví a tkáněmi. Dále jsou schopny regulovat výměnu rozpuštěných látek. Jsou zodpovědné za transport hormonů a živin ke tkáním. Podílí se i na imunitních reakcích organismu a krevní hemostáze. Průtok krve cévami je ovlivňován kontrakcemi hladkého svalstva, neurohumorálně a pomocí metabolické regulace. Mikrocirkulace je klíčová například pro správnou funkci ledvin.

Stěna cév mikrocirkulace je tvořena endotelovými buňkami. Mezi buňkami jsou četné fenestrace a mezerové spoje, umožňující výměnu plynů a rozpuštěných látek mezi krví a tkáněmi. Jednou z nejdůležitějších částí stěny je glykokalyx nacházející se na vnitřní straně stěny. Glykokalyx se skládá z proteoglykanů, glykosaminoglykanů, plazmatických proteinů a dalších látek

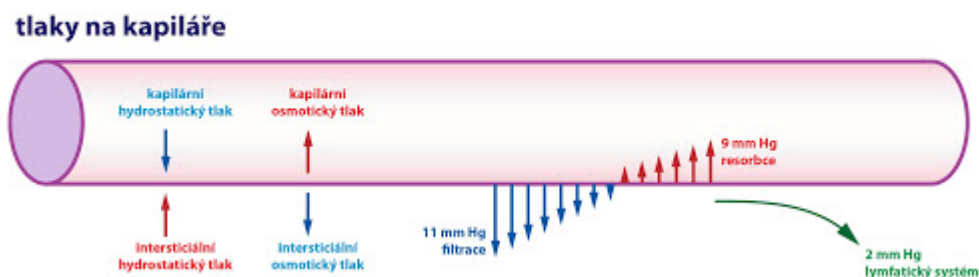
např. antitrombinu. Je zodpovědný za fyziologické funkce cév jako jsou homeostáza, transport rozpuštěných látek, hemostáza a imunitní funkce.

Filtrací krve na rozhraní kapilár a tkání vzniká tkáňový mok, který je následně ze tkání odváděn pomocí mízních (lymfatických) cév. Hlavním mechanismem transportu přes kapilární stěnu je difuze. Přechod látek přes kapilární stěnu je udáván čtyřmi tzv. Starlingovými silami. Mezi Starlingovy síly řadíme kapilární hydrostatický tlak působící směrem z kapiláry, intersticiální hydrostatický tlak, jehož velikost závisí na daném orgánu, kapilární koloidně – osmotický tlak působící směrem dovnitř kapiláry (jeho hodnoty se rovnají onkotickému tlaku) a intersticiální koloidně-osmotický tlak působící směrem ven z kapiláry.

Na rozdíl Starlingových sil je závislá rychlost filtrace v kapilárách. Rozdíl hydrostatických tlaků definuje hydrostatický tlakový gradient a rozdíl koloidně-osmotických tlaků určuje osmotický tlakový gradient, působící převážně směrem dovnitř. Na arteriálním konci mikrocirkulace obvykle filtrační tlak převyšuje ten onkotický (výsledná síla působí směrem ven z kapiláry), na venózním konci to bývá naopak (výsledná síla působí dovnitř kapiláry).

Stavba cév se liší v závislosti na konkrétním orgánu, a i rozdíly Starlingových sil působících v kapilárách se v závislosti na orgánu liší (Ivák, Maďa et al., 2013; Guven, Hilty et al., 2019).

Následující obrázek č.5 ilustruje působení tlaků v kapilárách



Obrázek 5: Působení tlaků v kapilárách  
(Ivák, Maďa et al., 2013)

## 4.4. Funkční rozdělení cév

### Pružník

Jako pružník označujeme velké a středně velké tepny. Tyto tepny zajišťují přívod krve k orgánům. Pomáhají tlumit kolísání krevního tlaku při systole a zajišťují dostatečné prokrvení orgánů při diastole. Ve své stěně obsahují velké množství elastických vláken. Díky elastickým vlastnostem jsou v závislosti na tlaku krve schopny dilatace či kontrakce. Mezi tepny pružnickového typu řadíme aortu, plicnici a jejich větší větve (Ferng, 2020).

### Rezistenční cévy

Rezistenční cévy regulují tok krve do tkání a orgánů. Můžeme je rozdělit na malé tepny a tepénky (prekapilární rezistenční cévy) a venuly (postkapilární rezistenční cévy). Malé tepny a tepénky mají silnou stěnu s velkým obsahem hladkého svalstva. Díky svalovině dokážou měnit svůj průsvit a tím i regulovat průtok krve.

Venuly dokážou ve spolupráci s prekapilárními rezistenčními cévami pomocí svého tonu regulovat hydrostatický tlak v kapilárách. Představují pouze malou část cévní rezistence (Kittnar, Jandová et al., 2011).

### Prekapilární sfinktery

Prekapilární sfinktery představují konečné úseky malých tepen a tepének. Svoji konstrikcí a dilatací regulují počet otevřených kapilár (Langmeier, Kittnar et al., 2009).

### Kapiláry

Kapiláry představují rozhraní mezi krví a tkáněmi. Na jejich úrovni probíhá výměna látek mezi krví a tkáněmi. Výměna probíhá buď prostou difuzí v případě nízkomolekulárních látek nebo pomocí transportéru u vysokomolekulárních látek. Průtok krve kapilárami je regulován pomocí prekapilárních sfinkterů (Godwin, Tariq et al., 2021).

## **Arteriovenózní zkraty**

Jsou úseky cévního systému obcházející kapiláry. Nalezneme je jen v některých tkáních např. v kůži. Jejich funkcí je rychlý transport krve mezi tepennou a žilní částí krevního řečiště. Pokud jsou tyto cévy otevřeny, dojde ke zpomalení či zástavě průtoku krve kapilárami a zároveň dojde ke zrychlení průtoku krve tkáni (Langmeier, Kittnar et al., 2009).

## **Kapacitní cévy**

Kapacitní cévy jsou žíly mající stěnu s vysokou roztažností, díky čemuž dokážou pojmout velké množství krve a slouží jako rezervoár. Hrají významnou roli v měnící se distribuci krve pro orgány a ovlivňují žilní návrat krve do srdce (Kittnar, Jandová et al. 2011).

## **4.5. Fyziologie lymfatického systému**

Hlavní funkcí lymfatického systému je odvod přebytečného tkáňového moku a vysokomolekulárních látek, převážně bílkovin a lipidů z mezibuněčných prostorů do krve. Dále se lymfatický systém účastní imunitních reakcí proti cizorodým látkám. V lymfatickém systému probíhá tvorba, vyžívání a diferenciací bílých krvinek (Šajdíková, Fontana, 2013).

### **4.5.1. Mízní cévy**

Podobně jako kardiovaskulární systém je i lymfatický systém tvořen sítí specializovaných cév vykonávajících transportní a výměnou funkci.

Mízní cévy fungují jako podpůrný drenážní systém tkání. Cévy odvádí z tkání tkáňový mok ve formě mízy (lymfy). Ta má podobné složení jako krevní plazma. Liší se nižším obsahem bílkovin, než je v plazmě.

Stěna mízních kapilár je velmi propustná. Tkáňový mok difunduje do kapilár přes štěrby buněčných membrán. Ionty a nízkomolekulární látky přechází přes mezibuněčné přechody. Vysokomolekulární a korpuskulární látky přestupují přes kapilární stěnu skrze neselektivní fenestrace. V malé míře se uplatňuje i pinocytóza.



Přestup tkáňového moku do mízních kapilár je dán jeho tlakem. Přestup dále podporují svou dilatací samy kapiláry. Proudění mízy se udržuje kontrakcemi hladkého svalstva ve stěnách mízních kapilár, kontrakcemi kosterního svalstva v okolí cév, dýchacími pohyby hrudníku, činností srdce a peristaltikou střev. Proud mízy je usměřován pomocí chlopní (Kittnar, Jandová et al., 2011).

#### **4.5.2.Lymfatické tkáně**

Mezi lymfatické tkáně řadíme kostní dřeň, brzlík, slezinu, mízní uzliny a tkáně asociované se sliznicemi, např. tonsily. Bílé krvinky se zde shlukují, vyvíjejí a setkávají s antigeny.

Všechny bílé krvinky (stejně jako červené krvinky) se vyvíjí z prekurzorových buněk v kostní dřeni. Všechny bílé krvinky s výjimkou T-lymfocytů také v kostní dřeni vyzrávají. T-lymfocyty dozrávají v brzlíku. Rozlišujeme primární lymfatické orgány a sekundární lymfatické orgány. V primárních lymfatických orgánech dochází k vývoji a dozrávání bílých krvinek (kostní dřeň a brzlík). Sekundární lymfatické orgány jsou místa shromažďování zralých bílých krvinek (sleziny, tonsily, mízní uzliny). V těchto tkáních vykonávají bílé krvinky svoji imunologickou funkci. Sekundární periferní tkáně vytváří bariéru zachycující mikroorganismy a další cizorodé částice (Grujičić, 2020).

## 5. Hydrodynamika krevního oběhu a mízního systému

Mechanika tekutin (plynů a kapalin) je součástí obecné mechaniky. Mechaniku kapalin můžeme rozdělit na hydrostatiku a hydrodynamiku. Hydrostatika se věnuje rovnováze sil v klidovém stavu. Pohyb tekutiny se nazývá proudění. Proudění kapalin se věnuje hydrodynamika. Zabývá se rovnováhou sil v pohybu.

Speciálním oborem, který studuje proudění krve je hemodynamika. Je to v podstatě hydrodynamika vztažená na oběh krve. Z fyzikálního hlediska zkoumá zákony řídící tok krve (Šob, 2008; Klaubunde, 2012).

### 5.1. Krevní oběh

Hlavní hnací silou krve v oběhu je tlak generovaný srdcem během systoly. Na toku krve se podílí viskózní charakteristika krve, geometrická struktura a mechanické vlastnosti cév. V závislosti na průměru cévy a dalších fyzikálních parametrech může při proudění nastat celá řada jevů. Mezi síly působící na cévní stěnu řadíme smykové napětí vznikající průtokem krve a obvodové napětí vyplývající z krevního tlaku (Secomb, 2016).

### 5.2. Krev

Krev je kapalina složená ze dvou fází. Buněčná složka (červené a bílé krvinky a krevní destičky) je rozptýlena v roztoku plazmy (vodný roztok organických a anorganických látek). Reologické vlastnosti krve závisí na vlastnostech těchto dvou fází a jejich přispívání k vlastnostem plné krve.

Krev můžeme charakterizovat jako neneutonskou kapalinu s thixotropickými a viskoelastickými vlastnostmi. Thixotropické jsou látky u kterých je jejich viskozita závislá na čase při působení smykových rychlostí. Při rozrušení jejich struktury např. třepáním nebo mícháním dochází ke snížení jejich viskozity. Látka nabývá své viskozity až po určitém čase po odstranění stresu. Obnovování jejich vlastností je pozvolné. U newtonských kapalin je viskozita konstantou. U neneutonských kapalin je viskozita funkcí, která se mění v závislosti na smykovém napětí a čase. Viskozita krve se vzrůstajícím

smykovým napětím klesá a stále se snižuje v čase. Hlavní podíl na viskozitě krve má hematokrit (objem červených krvinek v krvi). Plazmu bez krvinek můžeme považovat za newtonskou kapalinu, jejíž viskozita se se změnami smykového napětí nemění. Krevní tok má pulzující charakter, způsobený systolou. Rychlost proudění krve, i její viskozita se mění jako funkce času. Krev se chová při smykových rychlostech nad  $100 \text{ s}^{-1}$  jako newtonská kapalina. K tomu může docházet například v aortě, kde je vysoká smyková rychlost (Moon, Suh et al., 2014; Nader, Skinner et al., 2019; Vinoth, Kumar et al., 2017; Šob, 2008; Izdebska, Thomas, 2016)

### **5.2.1. Proudění krve**

Krev může proudit dvěma způsoby: laminárně a turbulentně. Laminárně proudí krev v rovných úsecích zdravých cév s nepoškozeným endotelem. Krev proudí uspořádaně a můžeme skrze ni proložit proudnice. To jsou pomyslné vzájemně se nekřížící čáry procházející všemi molekulami krve. Laminární proudění má parabolický rychlostní profil. Krev se nejrychleji pohybuje ve středu cévy a nejpomaleji u její stěny.

Pokud je rychlost toku příliš vysoká, v cévě se nachází překážka, (např. trombus) nebo dojde ke zúžení cévy a krev proudí turbulentně. Při takovém proudění vznikají víry, kterými nelze proložit proudnici. Dojde ke snížení toku krve jako důsledku zvýšení odporu cévy (Ivák, Maďa et al., 2013).

#### **5.2.1.1. Rychlost toku krve**

Rychlost toku krve je ovlivňována krevním tlakem, odporem řečiště a viskozitou krve. Cévy mohou vazokonstrikcí a vazodilatací měnit svoji plochu v průřezu a tím ovlivňovat rychlost proudění krve. Nejvyšší průměrná rychlost toku krve je v aortě, okolo  $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . V kapilárách je rychlost toku nejnižší okolo  $0,03 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . V žilách se opět zvyšuje, obvykle se pohybuje mezi  $10\text{-}16 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  (Larsen et al., 2020; Petřek, 2019).

#### **5.2.1.2. Tlak**

Tlak krevního oběhu je vyjádřen hydrostatickým tlakem, což je síla působící na plochu v objemu.

Tlak můžeme vyjádřit vztahem:

$$P = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Kde je  $P$  skalární veličina tlaku a  $F$  tlaková síla působící na plochu  $S$ .

Působením gravitační síly na pevné částice v krvi vzniká hydrostatická tlaková síla  $F_h$ . Ta se přenáší na všechny ostatní částice v krvi a na cévní stěnu. Tlak, kterým tato síla působí, se nazývá hydrostatický tlak  $P_h$ . Ten můžeme vyjádřit jako:

$$P_h = \rho * h * g \quad (2)$$

Kde  $\rho$  je hustota kapaliny,  $h$  je hloubka a  $g$  gravitační síla.

Jednotkou tlaku je 1 pascal (Pa) = 1 N\*m<sup>-2</sup>. V medicíně se využívá jednotka mm Hg (Rosina, Vránová et al., 2013; Beneš, Kyplová et al., 2015; Secomb, 2016).

### 5.2.1.3. Laplaceův zákon

Laplaceův zákon popisuje vztah mezi napětím tepenné a žilní stěny  $T$  a tlakem  $P$ , kterým stěny na krev působí. Cévy dokážou vyvíjet tlak díky elastické povaze své stěny. Vzorec pro Laplaceův zákon je dán rovnicí:

$$P = \frac{w}{r} * T \quad (3)$$

Kde  $w$  je tloušťka stěny,  $r$  je vnitřní poloměr cévy a  $T$  je napětí působící ve stěně.

Tento zákon nám říká, že tlak, kterým cévní stěna působí na krev je přímo úměrný napětí stěny a nepřímo úměrný jejímu poloměru. Čím je céva menší tím větším tlakem může na krev působit (Fitridge, Thompson, 2011; Beneš, Kyplová et al., 2015).

### 5.2.1.4. Odpor řečiště

Tok krve v cévách je ovlivňován odporem řečiště. Odpor řečiště je určen vlastnostmi cév (průměrem a délkou cév), organizací oběhu (větvení cév)

a vlastnostmi krve (viskozita). Odpor můžeme vyjádřit pomocí upraveného Ohmova zákona:

$$R = \frac{\Delta P}{F} \quad (4)$$

$\Delta P$  je rozdíl tlaků ve dvou bodech cévy, závisí na délce cévy a  $F$  je tok krve (Klaubunde, 2012).

#### 5.2.1.5. Hagenův - Poiseuillův zákon

Krev proudící oběhem je ovlivňována odporem řečiště. Na něm se podílí např. geometrická stavba cévy a viskozita krve. Vztah mezi průtokem krve, délkou trubice (cévy), viskozitou, a tlakem kapaliny (krve) popisuje Hagenův -Poiseuillův zákon:

$$Q = \frac{(P_2 - P_1) * \pi * r^4}{8 * \eta * l} \quad (5)$$

$Q$  je objemový průtok,  $P$  je tlak,  $\pi$  je pí,  $r$  je poloměr trubice,  $\eta$  je viskozita kapaliny a  $l$  je délka trubice.

Hagenův - Poiseuillův zákon platí pro laminární proudění skrze trubici. Tento zákon vyjadřuje přímou závislost objemového průtoku na tlakovém gradientu (rozdíl tlaků v úseku trubice) a průměru trubice umocněným na čtvrtou a nepřímo úměrný viskozitě kapaliny (Kopot, Vovk, 2021; Larsen et al., 2020).

#### 5.2.1.6. Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je vyjádřením zákona o zachování energie. Platí pro ustálené proudění ideální kapaliny. Tato rovnice vyjadřuje fakt, že součet kinetické a tlakové potencionální a tíhové potencionální energie objemové jednotky je v celé kapalině konstantní.

Bernoulliho rovnici můžeme vyjádřit:

$$\frac{1}{2} * \rho * v^2 + h * \rho * g + P = konstantní \quad (6)$$

Kde  $v$  je rychlost proudění,  $\rho$  je hustota,  $P$  je tlak,  $g$  je gravitační síla a  $h$  je výška sloupce kapaliny.

Z toho vyplývá, že při vodorovném proudění je v místech s vyšším tlakem rychlost kapaliny nižší (Beneš, Kyplová et al., 2015).

#### 5.2.1.7. Youngův modul a pulzní tok

Youngův modul můžeme využít k popisu vlastností tepen. Modul nám ukazuje, jak snadno tepna dilatuje a kontrahuje, což můžeme využít ke zjištění patofyziologického stavu cévy. Během stárnutí nebo v průběhu některých nemocí (např. ateroskleróza) dochází ke zvýšení tuhosti tepenné stěny, což vede ke zvýšení hodnot Youngova modulu.

Youngův modul můžeme vyjádřit jako:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

Kde  $\sigma$  je napětí působící na stěnu a  $\varepsilon$  je deformace stěny.

Proudění krve v tepnách má pulzující charakter, který je způsoben systolou. Tepny mají elastickou stěnu kontrahující a relaxující, podle toho, jak nimi proudí krev. Rychlost krve v tepně je určena rychlostí pulzu na elastické trubici. Tuto rychlost  $c$  můžeme vypočítat pomocí Moen-Kortewegovy rovnice:

$$c \approx \sqrt{\frac{E \cdot h}{\rho \cdot d}} \quad (8)$$

$E$  je Youngův modul,  $h$  je tloušťka stěny tepny,  $d$  je vnitřní průměr tepny a  $\rho$  je hustota krve.

Se zvyšující se hodnotou Youngova modulu roste i rychlost pulzního toku krve (Fitridge, Thompson, 2011; Mayo clinic, 2021).

#### 5.2.1.8. Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo udává podmínky při kterých je proudění krve v kapilárách laminární. Hlavními faktory ovlivňujícími Reynoldsovo číslo jsou viskozita a externí faktory působící na cévu.

Reynoldsovo číslo můžeme vyjádřit jako:

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \quad (9)$$

Kde  $\rho$  je hustota,  $v$  je rychlost proudění,  $d$  je průměr válce (cévy) a  $\eta$  je dynamická viskozita kapaliny.

Čím je Reynoldsovo číslo vyšší, tím je pravděpodobnost, že krev proudí turbulentně, větší (Pollock, Murray et al., 2020).

### 5.3. Lymfatický systém

Mízní systém má řadu důležitých rolí např. odvádí ze tkání přebytečný tkáňový mok, udržuje homeostázu, účastní se imunitních reakcí. K plnění těchto funkcí musí mízní systém transportovat mízu z mezibuněčných prostor mízními cévami do mízních uzlin. Z těch je míza odváděna eferentními mízními cévami do velkých žil. Rozdíly tlaku v mízním systému pasivnímu pohybu mízy obvykle nepomáhají. Míza ke svému pohybu potřebuje dodat energii. Tuto energii využívá lymfa k překonání negativního hydraulického tlakového gradientu v řečišti a rovněž také k překonání gravitace. Tlakové gradienty se uplatňují při tvorbě mízy, tzn. při přestupu tkáňového moku do vznikajících mízních cév.

Energii míznímu systému dodávají lymfatické pumpy: vnější a vnitřní. Činnost pump spolu s odporem mízních cév podléhá kontrole. Vnitřní lymfatická pumpa pohání mízu oběhem kontrakcemi lymfatických svalů. Ty jsou regulovány pomocí místních fyzikálních vlivů jako jsou tlak, průtok mízy, natažení cév a napětí ve stěnách cév. Činnost pumpy roste spolu s tlakem a natažením cév až do bodu, kdy začne selhávat. Napětí ve stěnách cév a tok regulují činnost pumpy komplexněji. V závislosti na charakteristice toku ji mohou aktivovat nebo inhibovat. Hydrodynamická regulace toku mízy se liší v závislosti na hydrodynamických podmínkách a patofyziologickém stavu. Vnější pumpa využívá energii ze zdrojů mimo mízní systém (např. kontraktlní činnost srdce, dýchací pohyby, kontrakce kosterních svalů nebo motilitu střev). Pumpy dodávají energii míznímu oběhu, ze které vznikají tlakové gradienty. Ty ovlivňují činnost lymfatických chlopní regulujících tok lymfy (Gashev, Zawieja, 2010).

## 6. Biomechanika kardiovaskulárního oběhu a mízní soustavy

Biomechanika je obor, který se zabývá mechanickými vlastnostmi, mechanickou strukturou a chováním organismů a jejich částí a mechanickými interakcemi organismu s okolním prostředím. Biomechanika člověka je část obecné biomechaniky zaměřující se na lidské tělo.

Krevní oběh má řadu životně důležitých funkcí. Skládá se ze srdce, cév a krve. Filtrací krve dochází ke vzniku tkáňového moku, který je následně odváděn z tkání ve formě lymfy lymfatickými cévami (Rosina, Vránová et al., 2013; Kittnar, Jandová et al., 2011).

### 6.1. Srdce

Srdce pumpuje krev do cévního systému, dodává orgánům a tkáním kyslík a živiny potřebné pro jejich správnou funkci. Synchronizované kontrakce srdečního svalu vytváří tlak, který pohání krev skrze krevní oběh. Výkon srdce závisí na síle srdeční kontrakce, podmínkách plnění síní a komor, velikosti a tvaru komor a funkci chlopní. Pravidelně se opakující kontrakce zajišťují kontinuitu krevního proudění a dostatečné krevní zásobení všech orgánů.

V řízení srdečních funkcí hrají důležitou roli biomechanické principy. Srdce je víceúrovňový systém fungující na orgánové, tkáňové, buněčné a proteinové úrovni. Mechanické namáhání srdce hraje důležitou roli v regulaci funkcí na každé úrovni. Biologické pochody srdce spolu s mechanickým namáháním regulují funkci myocytů a strukturu extracelulární matrix a tím kontrolují funkci srdce (Voorhees, Han, 2015).

#### 6.1.1. Srdeční cyklus

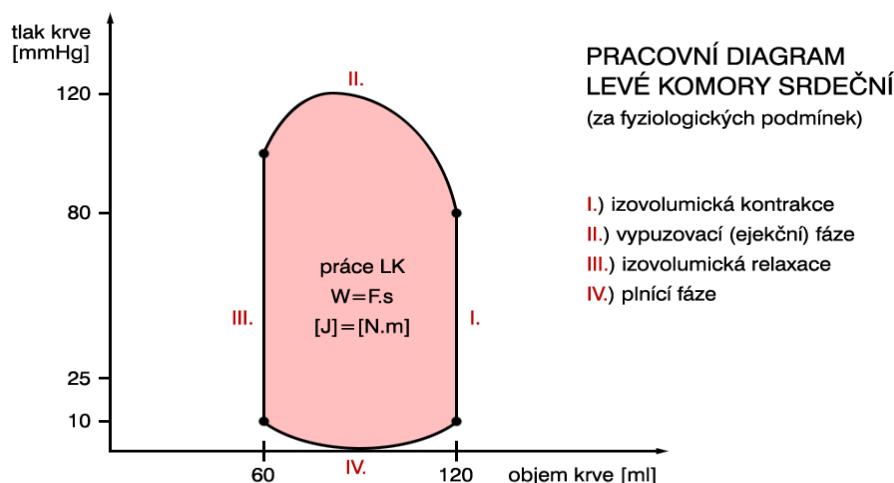
Srdeční cyklus je přesně definovaná sekvence střídajících se kontrakcí a relaxací síní a komor. Střídání kontrakcí a relaxací pumpuje krev skrze oběhovou soustavu. U zdravého člověka se kontrakce jednotlivých oddílů srdce opakují 60 – 90krát za minutu.

Srdeční cyklus začíná vznikem spontánního akčního potenciálu v sinovém uzlu (*nodus sinuatrialis*). Akční potenciál vyvolává řadu reakcí síní a komor.



Všechny tyto reakce jsou organizované do dvou fází: diastoly a systoly. Během diastoly dochází k ochabnutí a plnění srdce krví. Během systoly dochází ke kontrakci a krev je ze srdce vypuzována. Systola a diastola plynule přechází jedna v druhou.

Následující Obrázek 6 ilustruje změny tlaku a objemu během srdečního cyklu v levé komoře:



Obrázek 6: Pracovní diagram levé komory srdeční  
(Wikiskripta, 2010)

Na obrázku je vidět, jak během první fáze roste tlak v srdci beze změny objemu krve. Ve druhé fázi dojde k vypuzení krve ze srdce, objem krve klesá a tlak roste. Následuje relaxace a snížení tlaku beze změny objemu. V poslední fázi dojde k nárůstu objemu, tlak nejdříve klesá a po dosažení minima opět roste.

První fází srdečního cyklu je diastola síní. Ty slouží jako kanály usnadňující tok krve do komor, případně mohou sloužit jako pumpy a pohánět zbytkovou krev do komor. Během diastoly je pravá síň plněna krví z horní a dolní duté žíly (*vena cava superior et inferior*) a levá síň je plněna z plicních žil. Plnění probíhá do bodu, než tlak v síních převyší tlak v komorách, což způsobí otevření chlopní a umožní tok krve do komor.

Akční potenciál spontánně vzniklý v sinovém uzlu se šíří myokardem síní a způsobuje depolarizaci membrán kardiomyocytů. To vyvolá kontrakci síní (systola síní) pumpující zbytkovou krev do komor.

Další fází srdečního cyklu je diastola komor. Na počátku fáze jsou uzavřené atrioventrikulární a semilunární chlopně a množství krve v komorách se nemění.

Dochází k poklesu tlaku v komorách. Tuto část diastoly nazýváme izovolumetrickou relaxací. Nakonec je tlak v komorách nižší než tlak v síních, což vede k otevření atrioventrikulárních chlopní. Otevření chlopní vede k rychlému naplnění komor krví. Ke konci diastoly komor probíhá systola síní a zbytková krev ze síní je pumpována do komor. Celkové množství krve v komorách na konci diastoly se nazývá end-diastolický objem.

Po diastole následuje systola komor, během které dochází ke kontrakci komor. Elektrický impulz ze sinového uzlu doputuje do síňokomorového uzlu. V něm je impulz zdržen, aby síně mohly dokončit kontrakci předtím, než dojde k depolarizaci komor. Impulz je následně převodním systémem srdečním rozveden do myokardu komor, kde vyvolá jejich kontrakci. V komorách roste tlak. Ve chvíli, kdy se tlak v komorách vyrovná tlaku v síních, dojde k uzavření atrioventrikulárních chlopní. Tlak však není dostatečně velký, aby došlo k otevření semilunárních chlopní. Dochází ke změně tlaku, ale celkový objem krve zůstává stejný, nastává izovolumetrická kontrakce. Tlak v komorách následně překoná tlak v aortě a plicnici a dojde k otevření semilunárních chlopní. Dojde k ejekční fázi a krev je z komor vypuzována do plicnice a aorty. Množství krve, které zůstane v komoře na konci systoly se nazývá end-systolický objem. Množství krve vypuzené z komory se nazývá tepový objem. Poměr end-systolického a tepového objemu se nazývá ejekční frakce. Její hodnoty se obvykle pohybují okolo 60 %.

Komory se následně vrátí do fáze izovolumetrické relaxace. Síně se plní krví a celý cyklus se opakuje (Crumble 2021; Bulava, 2017).

### **6.1.2. Tlakově objemová práce srdce**

Srdce pracuje jako tlaková pumpa, vykonávající tlakově objemovou práci. Kontrakcemi srdečního svalu je vytvářen tlak, který pohání krev. Nejvíce energie se soustřeďuje v levé komoře. Krev z levé komory je vypuzována proti velkému odporu vysokotlakého řečiště systémového oběhu. Pravá komora spotřebovává menší část energie. Krev z ní je vypuzována proti menšímu odporu nízkotlakého malého oběhu. Na vypuzení krve srdce spotřebovává 1/10 z celkové mechanické energie, zbylých 9/10 je spotřebováno na udržení stálého napětí srdeční svaloviny. Změny tlaku a průtoku krve v jednotlivých srdečních oddílech a cévách

jsou způsobeny kontrakcemi těchto oddílů. Mechanický výkon zdravého srdce se při námaze zvyšuje. Účinnost srdeční svaloviny (myokardu) se pohybuje okolo 30 %. Je závislá na typu vykonávané práce a na celkovém stavu srdce. Trénované srdce má vyšší účinnost než srdce netréované. Mechanická účinnost srdce je poměrně nízká, jde jen o několik málo procent, při námaze je zvýšena na 10 %.

Následující Tabulka 1 uvádí hodnoty tlakově objemové práce srdce.

Tabulka 1: Hodnoty tlakově objemové práce srdce  
(převzata z Navrátil, Rosina et al., 2019)

<b>Tlakově-objemová práce: <math>p \cdot V</math> (klidové hodnoty)</b>		
• <i>levá komora</i>		
$p = 120 \text{ mm Hg}$	$= 120.133 \text{ Pa}$	
$V = 70 \text{ ml}$	$= 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	$p \cdot V = \mathbf{1,117 \text{ J}}$
• <i>pravá komora</i>		
$p = 15 \text{ mm Hg}$	$= 15.133 \text{ Pa}$	
$V = 70 \text{ ml}$	$= 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	$p \cdot V = \mathbf{1,140 \text{ J}}$
<b>Práce při zrychlení:</b>	$m = 74 \text{ g} = 0,07 \text{ kg}$	
$\frac{1}{2} mv^2$	$v = 0,5 \text{ m/s}$	$2 \cdot \frac{1}{2} mv^2 = \mathbf{0,018 \text{ J}}$
<b>Celková práce v klidu:</b>		$A = \mathbf{1,275 \text{ J}}$

Z tabulky vyplývá že v klidovém stavu levá komora spotřebovává více energie než pravá komora (Navrátil, Rosina et al., 2019).

### 6.1.3. Efektivní výkon srdce

Efektivní výkon srdce se může vztahovat na tepový objem. Ten udává množství krve vypuzené při systole do aorty. Tento objem obvykle nabývá hodnot od 70–90 ml, není však konstantní. Při tělesné činnosti nebo patologických stavech může objem narůstat. Určitý objem krve zůstává na konci systoly v komoře. Tento objem se nazývá komorový reziduální objem a jde asi o 50 ml

krve. Podílem tepového objemu a end-diastolického objemu (celkové množství krve v komoře na konci diastoly) získáme ejekční frakci. Ejekční frakce je vyjádřena vztahem:

$$EF = \frac{eDV - eSV}{eDV} \quad (10)$$

$EF$  je ejekční frakce,  $eDV$  je objem krve v komoře na konci diastoly a  $eSV$  je objem krve v komoře na konci systoly.

Fyziologické hodnoty se pohybují mezi 0,55 – 0,67, hodnoty <0,4 jsou považovány za klinicky snížené. Hodnoty ejekční frakce nám poskytují informace o výkonnosti komor. Spolu s komorovým reziduálním objemem nám umožňují rozlišit zdravé a selhávající srdce.

Výkon srdce můžeme vyjádřit pomocí minutového objemu (srdeční výdej) udávající množství krve vypuzené za jednotku času (obvykle za 1 minutu).

Minutový srdeční objem je vyjádřen vztahem:

$$V_{60} = V_p * P_{60} \quad (11)$$

$V_{60}$  je minutový objem,  $V_p$  je tepový objem a  $P_{60}$  je počet pulzů za minutu.

Minutový objem obvykle nabývá hodnot mezi 5000-9000 ml/min. Je velmi proměnlivý, závislý na tepovém objemu a na tepové frekvenci. Lidské tělo v závislosti na aktuální potřebě kyslíku může regulovat minutový objem úpravou tepové frekvence nebo tepového objemu.

Celková mechanická práce při jedné systole je dána součtem statické a kinetické práce:

$$W = W_k + W_p \quad (12)$$

$W$  je celková mechanická práce při jedné systole,  $W_k$  je kinetická práce a  $W_p$  je statická práce.

Pokud známe tlak krve při systole, rychlost, kterou je krev vypuzována ze srdce a tepový objem, můžeme vypočítat mechanickou práci srdce při jedné systole. U zdravého srdce je mechanická práce při jedné systole 1,1 J. Levá komora se na tom podílí z 80 %. Výkon srdce je závislý na tepové frekvenci. Při frekvenci 60 tepů za minutu činí 1,0 W a při 70 tepech za minutu je 1,3 W. Srdce

se chová jako hydro-viskoelastický zpětnovazebný systém. Výsledná dynamika srdce je tvořena setrvačnými silami srdeční svaloviny a tlaky v jednotlivých oddílech srdce. Tyto tlaky jsou nerovnoměrné v čase i prostoru (Navrátil, Rosina et al., 2019; King, Lowery, 2020; Wikiskripta, 2019).

## 6.2. Cévy

Cévy tvoří uzavřenou soustavu trubic představující rozvodný systém krevního oběhu. Skrze ně je po těle rozváděna krev, životně důležitá tekutina mající řadu důležitých funkcí. Cévy se podle své stavby dělí na několik funkčních celků: tepny, arterioly, kapiláry, vénuly a žíly. Mechanické vlastnosti cév plynou ze složité stavby jejich stěny. Svou roli hraje nehomogenita vrstev stěny, aktivní a pasivní elementy stěny a posuny vedoucí k deformacím. Mechanické vlastnosti cév se v jednotlivých funkčních celcích liší (Čapek, Hájek et al., 2018; Ivák, Maďa et al., 2013).

### 6.2.1. Koronární oběh

Koronární oběh zásobuje srdce krví a živinami. Přívod krve zajišťují dvě věnčité tepny (*arteriae coronariae*). Odkysličená krev je odváděna koronárními žilami (*venae cordis*). Žíly se sbíhají do žilního splavu (*sinus coronarius*) ústícího do pravé síně. V klidovém stavu je průtok v koronárních tepnách asi 250 ml/min, při zátěži dochází ke zvýšení průtoku na 4-5ti násobek.

Mechanické vlastnosti tepen koronárního oběhu vychází ze struktury jejich cévní stěny. Ta se skládá ze tří hlavních mechanických částí: kolagenu, elastinu a hladkých svalových buněk. Elastická vlákna jsou snadno deformovatelná a uplatňují se při nízkém tlaku koronárního řečiště. Kolagenní vlákna jsou při nízkém tlaku zvlněná a nejsou schopna nést mechanickou zátěž. Při zvýšení tlaku se kolagenní vlákna narovnají a nesou většinu mechanické zátěže. Tepny koronárního oběhu jsou schopny vazokonstrikce. Tuto schopnost tepnám dávají hladké svalové buňky.

Mechanické vlastnosti jednotlivých vrstev koronárních cév se liší na základě jejich struktury. Nejvíce přispívá k mechanickým vlastnostem koronárních tepen střední vrstva (*tunica media*). Vnitřní vrstva (*tunica intima*) koronárních tepen je

velmi tenká a nijak výrazněji nepřispívá k jejich mechanickým vlastnostem. Některé studie proto nahlíží na stěnu koronárních tepen jako na dvouvrstvou strukturu (Čihák, 2016; Mourek, 2012; Chen, Kassab, 2016).

## 6.2.2. Tepny

Tepny hrají hlavní roli v zásobování těla krví a živinami. Rozvádí po těle okysličenou krev pod velkým tlakem, čemuž je přizpůsobena stavba jejich stěn. Obsahuje velké množství elastických vláken a méně hladkých svalových buněk. Tato stavba dává tepnám elasticitu a schopnost se v případě potřeby roztáhnout. Podle stavby můžeme tepny rozdělit na dva typy: elastické a svalové. Elastické tepny obsahují ve své stěně velké množství elastických vláken. Mezi elastické tepny řadíme ty, které jsou nejbližší srdci např. aorta. Stavba jejich stěny jim umožňuje zachovávat kontinuální proud. Tepny se postupně větví v jednotlivé větve vedoucí krev k orgánům. Menší tepny mají ve své stěně méně elastických vláken a více hladkých svalových buněk – tepny muskulárního typu. Stěny těchto tepen jsou méně mechanicky namáhané, protože se nemusí vyrovnávat s nárazy krve při systole.

Třemi hlavními mechanickými vlastnostmi tepen je anizotropie, nelinearita a viskoelasticita. Anizotropie znamená odlišnost napětově – deformačních křivek získaných z různě orientovaných vzorků odebraných ze stejného místa. Na anizotropii se podílí především kolagenní a elastická vlákna vytvářející síť a rozptýlené struktury, které se liší podle umístění v tepně a jejího patofyziologického stavu. Napětově – deformační křivky tepen jsou také nelineární. Stěna tepen je při nízkém tlaku měkčí a pružnější a se zvyšujícím se tlakem se stěna stává tužší. Vlivem viskoelasticity tepen se odlehčovací a zatěžovací část křivky liší, dochází k disipaci části energie. Viskoelasticita je způsobena přítomností elastických vláken a viskózní matrix ve stěně. Energie procházející stěnou se dělí. Část energie se ve tkáni ukládá a díky elasticitě může být získána zpět a část se maří kvůli viskóznímu charakteru matrix (Holzapfel, Ogden, 2018; Tucker, Arora et al., 2021; Pettazzoni, Pallotti et al., 2017).

### 6.2.3. Kapiláry

Kapiláry jsou nejmenší cévy krevního oběhu. Jejich průběh se řádově pohybuje v mikrometrech. Kapiláry se velkou měrou podílí na odporu krevního oběhu. Průtok krve kapilárami je udáván saturací krve kyslíkem. Ta reguluje tonus prekapilárních sfinkterů a tím i průtok krve kapilárami.

Na úrovni kapilár probíhá vlastní výměna tekutin a v nich rozpuštěných látek mezi krví a tkáněmi. Kapiláry jsou uzpůsobeny k filtraci krevní plazmy. Mají velký vnitřní povrch a tenkou stěnu, často fenestrovanou. Přestup látek přes kapilární stěnu je zprostředkován několika mechanismy: póry, spoji mezi buňkami kapilární stěny, filtrací a vezikulárním transportem. Hlavním mechanismem transportu přes stěnu je difuze.

Filtrace krevní plazmy a výměna tekutin mezi krví a tkáněmi je určována Starlingovými silami (viz výše). Úloha Starlingových sil v přestupu tekutin přes stěnu je vyjádřena vztahem:

$$V = K * (p_k - p_i + \pi_i - \pi_k) \quad (13)$$

$V$  je objem přefiltrované tekutiny,  $K$  je konstanta daná propustností kapilární stěny,  $P_k$  je hydrostatický tlak krve v kapiláře,  $P_i$  je hydrostatický tlak tkáňového moku,  $\pi_i$  je onkotický tlak tkáňového moku a  $\pi_k$  je onkotický tlak krevní plazmy.

Denně se takto přefiltruje asi 20 litrů tkáňového moku. Většina se následně reabsorpcí vrací do krevního oběhu. Část je odváděna ze tkání mizními cévami ve formě mízy (Čapek, Hájek et al., 2018; Wikiskripta, 2021; Ivák, Maďa et al., 2013).

### 6.2.4. Žíly

Žíly přivádí odkysličenou krev ze tkání do malého krevního oběhu k okysličení. Žilní část oběhu obsahuje většinu krve. Žíly mají s tepnami srovnatelné velikosti tenčí a méně elastické stěny. Krev proudí žilami pod menším tlakem. Žilní oběh je na rozdíl od tepenného nízkotlaký. Stěny žil tedy nejsou tolik namáhané jak stěny tepen.

Stěna žil se skládá ze tří vrstev: vnitřní, střední a vnější vrstvy. Obsahuje množství hladkých svalových buněk a kolagenních vláken. Podobně jako u tepen

mají i žíly aktivní mechanické chování a pasivní mechanické vlastnosti. Aktivní chování žil je zprostředkováno hladkými svalovými buňkami. Jejich kontrakce pomáhají pohánět krev k srdci proti směru gravitace. Pasivní vlastnosti jsou určeny viskoelasticitou a hyperelasticitou stěny. Viskoelasticitu je podobně jako u tepen způsobena přítomností elastických vláken a viskózní matrix ve stěně. Energie procházející stěnou se dělí. Část energie se ve tkáni ukládá a díky elasticitě může být získána zpět a část se maří kvůli viskóznímu charakteru matrix. Hyperelastická stěna snáší lépe změny tlaku a napětí než lineárně elastická. Stěna se při deformaci stává pevnější a má vyšší tendenci zachovávat svoji původní strukturu. Hyperelastický materiál potřebuje k udržení deformace více energie než materiál elastický. Při nízkém průtoku krve  $Q$  a nízkém  $\beta$  (FSI fluid structure interaction parametr) vydrží elastické cévy větší rozdíly tlaku než hyperelastické a méně se deformují. Při vysokém průtoku  $Q$  a vysokém  $\beta$  je to naopak (Li, 2018; Tucker, Arora et al., 2021; Pettazzoni, Pallotti et al., 2017; Altenbach, Belyaev et al., 2019).

### **6.2.5. Mízní cévy**

Míza vzniká z tkáňového moku. Ten vzniká filtrací krve přes stěnu kapilár. Filtrace v kapilárách je určena hydrostatickými a onkotickými tlaky krevní plazmy a tkáňového moku. Tyto tlaky nazýváme Starlingovými silami (viz výše). Většina tkáňového moku se reabsorbuje zpět do krevního oběhu. Přebytečný mok je ze tkání odčerpáván ve formě lymfy.

Podobně jako při tvorbě tkáňového moku je tvorba lymfy řízena gradienty hydraulického tlaku, které si vyvíjí mezi intersticiem tkáně a vznikajícími mízními cévami. V mízních cévách obsahujících ve své stěně hladké svalové buňky jsou tlaky, a tedy rychlost proudění lymfy určené především spontánními kontrakcemi těchto svalových buněk. V počínajících cévách bez hladké svaloviny je lymfa poháněna pouze pohyby okolní tkáně. Mízní cévy jsou ovlivňované změnami místního tkáňového napětí. Pro správnou funkci mízní cirkulace jsou potřebné aktivní svalové kontrakce, ne pasivní pohyby tkáně. Mechanické vlastnosti mízních cév hrají důležitou roli v proudění mízy. Mízní cévy vykazují nelineární elastické, heterogenní a anizotropické vlastnosti, které jsou dané stavbou a složením stěny. Mechanické chování cévy není konstantní. Napětí není úměrné



deformaci. U nelineárních látek je napětí funkcí deformace. Poddajnější cévy slouží jako rezervoáry mízy. Cévy s tužší stěnou jsou schopné lépe využívat napětí v okolních tkáních a pohánit mízu skrze oběh. K tomu, aby mohly pohyby tkáně pohánět mízu je potřeba, aby tkáňové napětí bylo převedeno na lymfatické cévy a v nich na tlakové vlny. Tento proces probíhá v cévách s tužší stěnou lépe. Tuhost cévy ovlivňuje způsob šíření napětí ve stěně cévy. Vysoká napětí mají tendenci působit spíše na povrchové mízní cévy s poddajnější stěnou. Ve vnitřních cévách s tuhou stěnou se napětí rozprostírají po celém povrchu cévy a dosahují tak nižších hodnot.

Kromě mechanických vlastností cév hrají důležitou roli v pohybu mízy i vlastnosti okolní tkáně. Cévy obklopené měkkou a poddajnou tkání slouží jako rezervoáry mízy a jsou hlavními místy její tvorby. Takové cévy musí mít dobře vyvinutou vrstvu hladké svaloviny nutnou k udržování toku mízy. Cévy, které jsou uloženy v tuhé tkáni proudí míza rychleji. V některých tkáních (např. kosterních svalech, srdci nebo bránici) je pohyb mízy v cévách zajišťován pravidelnými kontrakcemi tkáně. Cévy proto postrádají hladkou svalovinu (Negrini, Moriondo, 2011; Michel, Woodcock et al., 2020; Caulk, Shaw et al., 2015; Mihai, Goriely, 2017).

### **6.3. Krev**

Oběhová soustava se skládá ze srdce a rozvětveného systému cév, kterými proudí krev. Ta představuje tekutou tkáň spojující všechny buňky, tkáně a orgány těla. Krev má řadu důležitých funkcí: zajišťuje zásobení těla kyslíkem a živinami, odvádí ze tkání oxid uhličitý a odpadní produkty metabolismu, udržuje homeostázu, účastní se termoregulace a hemostázy a podílí se na imunitních funkcích. Studium mechanických vlastností krve a jejím prouděním se zabývá hemodynamika.

Proudění krve je závislé na několika faktorech: tlaku, který při systole pohání krev ze srdce, na mechanických vlastnostech cév a na vlastnostech krve. Vlastnosti proudění krve jsou dány jejím charakterem. Krev je suspenzí buněčných elementů rozptýlených v tekutém prostředí. Červené a bílé krvinky spolu s krevními destičkami jsou buněčnými elementy a plazma představuje tekuté prostředí, ve kterém jsou elementy rozptýleny. Plazma je nažloutlá

kapalina tvořená převážně vodou. Dále obsahuje koagulační faktory, plazmatické proteiny, elektrolyty a imunoglobuliny. Fakt, že krev je buněčnou suspenzí silně ovlivňuje tok krve a její vlastnosti (Secomb, 2016; Mathew, Sankar et al., 2020; Earl, Mohammadi, 2018).

### **6.3.1.Krvinky**

Mezi buněčné elementy krve řadíme červené krvinky, bílé krvinky a krevní destičky.

Červené krvinky představují 40 – 45 % objemu krve. Jejich úkolem je transport kyslíku a oxidu uhličitého ve vazbě na hemoglobin. Mají tvar binkonkávního disku. Díky tomuto tvaru, absenci jádra, elastické membráně a spektrínové kostře se snadno deformují a mohou tak procházet těmi nejmenšími kapilárami. Cytoplazma krvinek má viskoelastické vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou udávány množstvím hemoglobinu v erytrocytární mase (MCHC mean corpuscular hematocrite). Krvinky s větším objemem a větším obsahem hemoglobinu se deformují hůře. Schopnost deformace krvinek je regulována třemi způsoby: velkým poměrem povrchu krvinky vůči jejímu objemu, viskozitou cytoplazmy a viskoelasticitou membrány. Vysoká deformabilita se uplatňuje v cévách, kde působí vysoká smyková rychlost (např. v kapilárách). Krvinky musí k udržení proudu krve adherovat na cévní stěnu. V cévách s nízkou smykovou rychlostí mají krvinky tendenci agregovat.

Krvinky se mohou v oběhu pohybovat třemi způsoby: omíláním (tumbling), houpáním (swinging) a šlapáním v nádrži (tank treading). K omílání dochází v cévách s nízkou smykovou rychlostí. Červené krvinky se během omílání prakticky nedeformují a během pohybu se otáčí kolem své osy. Se vzrůstající smykovou rychlostí se z omílání stává houpání. Krvinky se částečně deformují a nedokážou se otáčet kolem své osy. Při šlapání v nádrži dochází k deformacím. Krvinky se pohybují v krvi jen v malém množství, zabraňují tak dalším kolizím a snižují viskozitu krve. Se zvyšující se smykovou rychlostí se snižuje viskozita krve.

Bílé krvinky jsou součástí imunitního systému. Funkčně a morfologicky se jedná o heterogenní skupinu. Mezi bílé krvinky řadíme neutrofilní segmenty, eosinofilní segmenty, bazofilní segment, lymfocyty a monocyty. Každý druh

bílých krvinek vykonává specifické imunitní funkce. Bílé krvinky jsou schopné amébovitého pohybu. V případě zánětu dojde ke shlukování bílých krvinek v místě zánětlivé reakce, což spolu se zvýšeným přestupem tekutiny do tkání zpomalí tok krve. Krevní destičky se účastní srážení krve. Agregací trombocytů vznikají tromby, které ovlivňují proudění krve (Earl, Mohammadi, 2018; Mourek, 2012; Healthengine, Inflammation, 2006; Fontana, Lavříková, 2013; Ingleson, 2019).

### **6.3.2.Plazma**

Plazma je nažloutlá kapalina. Představuje tekuté prostředí krve, ve kterém jsou rozptýleny červené a bílé krvinky a krevní destičky. Plazma zaujímá zhruba 55 % z celkového objemu krve. Plazma se skládá z 92 % z vody, zbylých 8 % představují rozpuštěné organické a anorganické složky. Obsahuje koagulační faktory (hlavně fibrinogen), plazmatické proteiny (albumin a globuliny), elektrolyty (sodné, draselné, chloridové ionty) a imunoglobuliny. Plazma a krev mají společné některé funkce (Mathew, Sankar et al., 2020).

### **6.3.3.Rychlost proudění krve v tepnách**

Rychlost proudění krve v aortě je ovlivňována nárazy krve při systole (má fázový charakter). Při systole levé komory může rychlost krve v aortě dosáhnout až 500 m/s. Při diastole se může krev vracet zpět k srdci. V dalších úsecích aorty a velkých cévách proudí krev při systole rychleji než při diastole.

Vzhledem ke složitosti krve, řadě faktorů působících na krevní proudění a individualitě každého jedince je velmi těžké charakterizovat jednotlivé děje pouze pomocí fyzikálních zákonů. O fyzikálních zákonech vztažených na biologický systém říkáme, že platí aproximativně (přibližně). To platí i pro dva následující zákony, které charakterizují oběhový systém: Bernoulliův zákon a Hagenův-Poiseuillův zákon (viz výše).

Za fyziologického stavu proudí krev v cévách laminárně. Krví lze proložit pomyslné vzájemně se nekřížící křivky procházející každou molekulou krve – proudnice. Laminární proudění je charakteristické parabolickým profilem rychlosti. Vrstva u cévní stěny se vlivem tření téměř nepohybuje. Rychlost proudu roste se vzdáleností od stěny a dosahuje maxima ve středu cévy. Proudění je

laminární do dosažení kritické rychlosti. Nad touto hodnotou se proudění stává turbulentním. Turbulentní proudění vzniká, pokud je tlak krve příliš vysoký, při zúžení cévy, nebo pokud se krevním oběhu vyskytuje překážka. Proudění má kvůli existenci vnitřních vírů vyšší odpor závislý na viskozitě krve a velikosti cévy (šíři trubice). Dochází ke snížení krevního toku. Hraniční hodnotu udává Reynoldsovo číslo (viz výše) (Navrátil, Rosina et al., 2019; Ivák, Maďa et al., 2013).

#### **6.3.4.Rychlost proudění v žilách**

Směrem k srdci dochází v žilách k nárůstu rychlosti proudění, který je způsoben snížením jejich celkového objemu. Rychlost toku krve ve velkých žilách je zhruba čtvrtinová oproti aortě (Navrátil, Rosina et al., 2019).

#### **6.3.5.Objem krve ve velkých cévách**

Rezistenční cévy jsou tepny, v nichž je tlak určován odporem stěn, který působí proti nárůstu objemu krve. Jako kapacitní cévy označujeme žíly schopné pojmout velké množství krve předtím, než v nich naroste tlak.

Pokud je tělo v klidu, vyskytuje se minimálně 50 % krve v žilách, 11 % v tepnách, 5 % v kapilárách, 12 % je obsaženo v dutinách srdce a 18 % v malém krevním oběhu (Navrátil, Bartůňková et al., 2017).

#### **6.3.6.Arteriální a žilní tlak**

Krevní tlak je síla, kterou krev působí na cévní, nebo srdeční stěnu. Arteriální tlak ve velkých cévách se skládá z několika složek: arteriálního a žilního tlaku, pulsního tlaku a středního tlaku. Systolický tlak je tlak krve v cévách při systole srdce. Jeho fyziologické hodnoty se pohybují okolo 120 mm Hg Tento tlak bývá vyšší než diastolický tlak. Diastolický tlak je tlak krve při diastole srdce. Fyziologicky dosahuje hodnot okolo 80 mm Hg.

Pulsní tlak je určen rozdílem systolického a diastolického tlaku. Za fyziologických stavu by měl představovat alespoň 25 % systolického tlaku. Snížení tohoto tlaku může ukazovat na městnavé selhání srdce. Ke zvýšení tlaku

dochází u zdravých lidí při namáhavém cvičení. Chronické zvýšení tlaku je způsobeno zvýšeným odporem cév, k čemuž dochází u řady různých poruch.

Střední tlak je průměrný tlak krve v oběhu. Hodnotu středního tlaku můžeme spočítat podle vztahu:

$$\text{Střední tlak} = \frac{\text{Systolický tlak} + 2 * \text{diastolický tlak}}{3} \quad (14)$$

Hodnoty středního tlaku se obvykle pohybují v rozmezí 70 až 110 mm Hg. Hodnoty krevního tlaku se zvyšující se vzdáleností od srdce klesají. To je zapříčiněno ztrátami energie, které jsou způsobené viskoelastickým charakterem krve. Hodnoty žilního tlaku se pohybují od 5 – 10 mm Hg. Je ovlivňován činností srdce, respirační, činností žilních chlopní a také gravitací, která ovlivňuje tlak skrze hydrostatické síly. Svoji roli v působení gravitace na krevní tlak hraje také poloha těla (Thanos et al., 2017)

## 6.4. Smykové napětí a rychlost

Krev bychom, vzhledem k jejímu složení a chování červených krvinek, mohli definovat jako neneutronovskou, pseudoplastickou kapalinu. Pseudoplastické chování krve je dáno především reologickými vlastnostmi červených krvinek. K reologickým vlastnostem červených krvinek řadíme deformovatelnost a agregovatelnost. Deformovatelnost krvinek je umožněna jejich tvarem, absencí jádra, cytosolickými faktory, viskozitou (dána především obsahem hemoglobinu v krvinece MCH) a viskoelastickými vlastnostmi membrány (cytoskelet ze spektrinových vláken a dvojvrstva lipidů membrány). Krvinky se více agregují v místech s nízkými smykovými rychlostmi jako jsou žíly nebo místa větvení cév. Vliv agregace na tok krve závisí na charakteru cévy. V mikrocirkulaci na úrovni kapilár zvyšují shluky krvinek (tromby) rezistenci cév a zpomalují tok krve. Ve velkých cévách je efekt agregace závislý na orientaci cévy. V horizontálních cévách zvyšuje agregace krvinek jejich sedimentaci, a tím zvyšuje odpor. Ve vertikálních cévách naopak agregace krvinek podporuje axiální migraci a usnadňuje tok. Viskozita krve klesá se vzrůstajícími smykovými silami. Viskozita krve je nejnižší v tepenné části krevního oběhu a nejvyšší v žilní části. Je ovlivňována složením krevní plazmy (obsahem plazmatických bílkovin),

deformacemi červených krvinek a jejich shlukováním, množstvím hematokritu, průsvitem cév a prouděním krve.

Krev při svém proudění generuje mechanické třecí síly, které působí na cévní stěnu jako smykové napětí. To odpovídá viskóznímu odporu, kterým krev díky svým viskózním vlastnostem působí na cévní stěnu. Smykové napětí závisí na reologických vlastnostech krve a charakteristice cév. Jeho hodnota se liší ve středu a u stěny cévy. Dále je ovlivňován poloměrem a geometrií cév nebo například jejich větvením. Napětí je detekováno kardiovaskulárním systémem, který na něj může reagovat modifikací krevního toku.

Tok krve cévami je komplexní. Je ovlivňovaný nárazy krve při systole a dalšími proudy krve při větvení cév. Smyková rychlost stejně jako smykové napětí nabývá minima u stěny cévy a maxima v jejím středu. Smyková rychlost ovlivňuje viskozitu krve. Ta se vzrůstající rychlostí exponenciálně klesá. V oblastech s nízkou smykovou rychlostí, jako jsou žíly a místa větvení cév (bifurkace), dochází ke shlukování červených krvinek. Shluky krvinek se v oblastech s vysokou smykovou rychlostí (tepny) opět rozrušují. Patologicky nízká smyková rychlost je spolu s krevními destičkami a povrchy schopnými vázat vWF (von Willebrandův faktor) jeden z faktorů, který vede k tvorbě tepenného trombu bez účasti koagulačních faktorů (Simmonds, Meiselman et al., 2013; Roux, Bougaran et al., 2020; Nader, Skinner et al., 2019; Golob, Chesler et al., 2016).

## 7. Závěr

Cílem této práce bylo pochopit biomechanické vlastnosti krevního oběhu a mízní (lymfatické) soustavy a jejich vliv na proudění krev a mízy (lymfy). V první kapitole byla popsána anatomická stavba kardiovaskulárního systému a mízní (lymfatické) soustavy. Druhá kapitola se zabývá jejich fyziologií. Ve třetí kapitole jsem se věnoval hydrodynamickými zákony uplatňujícími se při proudění krve a mízy (lymfy). V závěrečné kapitole jsem se zabýval biomechanickými vlastnostmi kardiovaskulárního systému a mízní (lymfatické) soustavy. Popisují především reologické vlastnosti krve, mechanickou práci srdce a biomechanické vlastnosti cév.

Tato rešeršní práce představuje ucelený soubor informací zabývajících se popisem problematiky na základní úrovni.

## 8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Srdce ( <i>Srdce-Cardia.webnode, 2010</i> ) .....	11
Obrázek 2: Stavba srdeční stěny ( <i>Openstax College, 2013</i> ) .....	14
Obrázek 3: Rozložení lymfatických orgánů a cév ( <i>Blausen.com staff, 2014</i> )..	18
Obrázek 4: Převodní systém srdeční ( <i>Wikisripta, 2010</i> ) .....	28
Obrázek 5: Působení tlaků v kapilárách ( <i>Ivák, Maďa et al., 2013</i> ) .....	30
Obrázek 6: Pracovní diagram levé komory srdeční ( <i>Wikiskripta, 2010</i> ) .....	41

## 9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty tlakově objemové práce srdce (převzata z Navrátil, Rosina et al., 2019) .....	43
--	----



## 10. Seznam použité literatury

ALTENBACH, H. ET AL. **Dynamical processes in generalized continua and structures**. Springer, 2019, s. 29-31. ISBN 9783030116651

ARCUS BRNO ONKO A LYMFO CENTRUM. **Lymfatický systém**. Lymfologické pracoviště Arcus Brno – centrum péče o lymfatický systém – Arcus Brno [online]. 2021, [citováno 2021-03-21]. dostupné z: <https://www.arcus-lymfo.cz/lymfaticky-system/>

MAYO CLINIC STAFF. **Arteriosclerosis/ atherosclerosis**. In: Mayo Clinic. [online]. 2021 March 16, [citováno 2021-05-10]. dostupné z: <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/arteriosclerosis-atherosclerosis/symptoms-causes/syc-20350569>

BARBALATO, L., PILLARISETTY, L.S., **Histology. Red Blood Cell**. In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 July 3, [citováno 2021-03-19]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30969524/>

BENEŠ, J ET AL. **Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi**. Grada Publishing, 2015, s. 106-108. ISBN 978-80-247-4712-5

BLAUSEN.COM STAFF. **Lymfatický systém**. Medical gallery of Blausen Medical 2014. WikiJournal of Medicine [online]. 2014, [citováno 2021-05-15]. DOI:10.15347/wjm/2014.010. dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=28086436>.

BUJOREANU, I., GUPTA, V. **Anatomy, Lymph Nodes**. In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2021 February 6, [citováno 2021-03-21]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32491649>

BULAVA, A. **Kardiologie pro nelékařské zdravotnické obory**. Grada Publishing, 2017, s. 19-20. ISBN 978-80-271-0468-0

CAULK, A.W. ET AL. **Quantification of the passive and active biaxial mechanical behaviour and microstructural organization of rat thoracic ducts**. Journal of the Royal Society, Interface. [online]. 2015 July 6, 12 (108):

20150280, [citováno 2021-05-10]. DOI: 10.1098/rsif.2015.0280. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26040600/>

CRUMBLE, L. **Cardiac cycle**. [online]. 2021 February 25, [citováno 2021-04-25]. dostupné z: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/cardiac-cycle>

ČAPEK, L. ET AL. **Biomechanika člověka**. Grada Publishing, 2018, s. 55, 61-62. ISBN 978-80-271-0367-6

ČIHÁK, R. **Anatomie 2: Třetí doplněné a upravené vydání**. Grada Publishing, 2013, s. 14, 66, 116, 222. ISBN 978-80-247-4788-0

ČIHÁK, R. **Anatomie 3: Třetí upravené a doplněné vydání**. Grada Publishing, 2016, s. 4-7, 26-47, 54, 79-81, 204-208. ISBN 978-80-271-5636-3

DYLEVSKÝ, I. **Funkční anatomie**. Grada Publishing, 2009, s. 77, 403. ISBN 978-80-247-3240-4

DYLEVSKÝ, I. **Základy funkční anatomie**. Poznání, 2011, s. 125-129, 153-157. ISBN 978-80-87419-06-9

EARL, E., MOHAMMADI, H. **Biomechanics of Human Blood**. [online]. 2018 November 13, [citováno 2021-05-01]. DOI: 10.5772/intechopen.78305. dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/biomechanics/biomechanics-of-human-blood/>

FERNG, A. **Atherosclerosis**. [online]. 2020 August 31, [citováno 2021-03-31]. dostupné z: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/atherosclerosis>

FIALA, P. ET AL. **Stručná anatomie člověka**. Univerzita Karlova Karolinum, 2015, s. 77, 94, 96-97. ISBN 978-80-246-2693-2

FITRIDGE, R., THOMPSON, M. **Mechanisms of Vascular Disease: A Reference Book for Vascular Specialists**. University of Adelaide press [online]. 2011, [citováno 2021-05-07]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30484990>

FONTANA, J., LAVRÍKOVÁ, P. **V. Krev a orgány imunitního systému – 4. Hemostáza**. Funkce buněk a lidského těla multimediální skripta [online]. 2013,

[citováno 2021-05-01]. dostupné z: <http://fbt.cz/skripta/v-krev-a-organy-imunitniho-systemu/4-hemostaza/>

GASHEV, A.A., ZAWIEJA, D.C. **Hydrodynamic regulation of lymphatic transport and the impact of aging.** Pathophysiology. [online]. 2010 September, 17 (4): 277–287, March, [citováno 2021-05-08]. DOI: 10.1016/j.pathophys.2009.09.002. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20226639/>

GLENN, A., ARMSTRONG, C.E. **Physiology of red and white blood cells.** Anaesthesia & Intensive Care Medicine. [online]. 2019 March, 20 (3): 170-174, [citováno 2021-03-11]. DOI: 10.1016/j.mpaic.2019.01.001. dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1472029919300013>

GODWIN, L. ET AL. **Histology, Capillary.** In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2021 February 9, [citováno 2021-03-20]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31536187/>

GRIM, M. ET AL. **Atlas anatomie člověka II. - Atlas of human anatomy II.: hlava a krk vnitřní orgány, neuroanatomie – Head and neck internal organs, neuroanatomy.** Grada Publishing, 2017, s. 90, 106-108, 113-116, 124-125. ISBN 978-80-271-4156-7

GRUJIČIĆ, R. **Lymphatic systém.** Kenhub [online]. 2020 October 29, [citováno 2021-03-31]. dostupné z: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/lymphatic-system>

GRUNET, M. **Repolarization of the cardiac action potential. Does an increase in repolarization capacity constitute a new anti-arrhythmic principle?** Acta physiologica. [online]. 2010 February, 198 (676): 1–48, [citováno 2021-03-31]. DOI: 10.1111/j.1748-1716.2009.02072.x. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20132149/>

GUVEN, G. ET AL. **Microcirculation: Physiology, Pathophysiology.** Blood Purification. [online]. 2020, 49 (1-2): 143-150, December, [citováno 2021-04-18]. DOI: 10.1159/000503775. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31851980/>

HEALTHENGINE. **Inflammation**. [online]. 2006 September 13, [citováno 2021-05-01]. dostupné z: <https://healthengine.com.au/info/inflammation>

HEATON, J., GOYAL, A. **Atrioventricular Node**. In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 August 9, [citováno 2021-03-29]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32491596/>

HOLZAPFEL, G.A., OGDEN, R.W. **Biomechanical relevance of the microstructure in artery walls with a focus on passive and active components**. American Journal of Physiology. [online]. 2018 August 27, [citováno 2021-04-30]. DOI: 10.1152/ajpheart.00117.2018. dostupné z: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpheart.00117.2018>

CHAUDHRY, S.R. ET AL. **Anatomy, Abdomen and Pelvis, Spleen**. In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 July 27, [citováno 2021-03-21]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29489170/>

CHEN, H., KASSAB, G.S. **Microstructure-based biomechanics of coronary arteries in health and disease**. Journal of Biomechanics [online]. 2016 August, 16, 49 (12): 2548-59, March, [citováno 2021-04-30]. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2016.03.023. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27086118/>

INGLESON, K. **Everything you need to know about a thrombus**. Medical News Today [online]. 2019 July 30, [citováno 2021-05-01]. dostupné z: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/318522#types>

IVÁK ET AL. **Tlaky v kapiláře**. Funkce buněk a lidského těla multimediální skripta, X. Srdce a oběh krve – 2. Krevní oběh. [online]. 2013, [citováno 2021-05-13]. dostupné z: <http://fbt.cz/skripta/x-srdce-a-obeh-krve/2-krevni-obeh/>

IVÁK, P. ET AL. Funkce buněk a lidského těla multimediální skripta, **V. Krev a orgány imunitního systému – 6. Lymfatický systém a imunita**. [online]. 2013, [citováno 2021-04-01]. dostupné z: <http://fbt.cz/skripta/v-krev-a-organy-imunitniho-systemu/6-thymus-mizni-uzliny-a-difuzni-imunitni-system/>

IVÁK, P. ET AL. Funkce buněk a lidského těla multimedialní skripta, **X. Srdce a oběh krve – 1. Srdce**. [online]. 2013, [citováno 2021-02-26]. dostupné z: <http://fbt.cz/skripta/x-srdce-a-obeh-krve/1-srdce/>

IVÁK, P. ET AL. Funkce buněk a lidského těla multimedialní skripta, **X. Srdce a oběh krve – 2. Krevní oběh**. [online]. 2013, [citováno 2021-05-10]. dostupné z: <http://fbt.cz/skripta/x-srdce-a-obeh-krve/2-krevni-obeh/>

IZDEBSKA, J., **Thomas S. Printing on Polymers: Fundamentals and Applications**. Elsevier, 2016, s. 89. ISBN 978-0-323-37468-2

JÍLEK, P. **Imunologie: stručně, jasně, přehledně**. Grada Publishing, 2014, s. 9-10. ISBN 978-80-247-4822-1

KACHLÍK, D. **Anatomie pro nelékařské zdravotnické obory**. Univerzita Karlova Karolinum, 2018, s. 84-85, 88, 102. ISBN 978-80-246-4058-7

KASHOU, A.H. ET AL. **Physiology, Sinoatrial Node**. In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 October 6, [citováno 2021-03-28]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29083608/>

KING, J., LOWERY, D.R. **Physiology, Cardiac Output**. In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 September 15, [citováno 2021-04-29]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29262215/>

KITTAR, O. ET AL. **Lékařská fyziologie**. Grada Publishing, 2011, s. 121, 155-159, 163-164, 232-233. ISBN 978-80-247-3068-4

KLAUBUNDE, R.E. **Cardiovascular Physiology Concepts, second edition**. Wolters, Kluwer. Health; Lippincott Williams and Wilkins, 2012, s. 96, 100, 106, 154. ISBN 978-1-4511-1384-6

KOPOT, A., VOVK, A. **Classical physics, Continuity equation and bernoulli's principle playlist: Poiseuille's Equation and Blood Flow**. AKLectures. [online]. 2021, [citováno 2021-05-07]. dostupné z: <https://aklectures.com/lecture/poiseuilles-equation-and-blood-flow>

LANGMEIER, M. ET AL. **Základy lékařské fyziologie**. Grada Publishing, 2009, s.56. ISBN 978-80-247-2526-0

LARSEN ET. AL. **12.4: Viscosity and Laminar Flow; Poiseuille's Law.** Libretexts Physics. [online]. 2020 October 25, [citováno 2021-05-07]. dostupné z: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College\\_Physics/Book%3A\\_College\\_Physics\\_\(OpenStax\)/12%3A\\_Fluid\\_Dynamics\\_and\\_Its\\_Biological\\_and\\_Medical\\_Applications/12.04%3A\\_Viscosity\\_and\\_Laminar\\_Flow\\_Poiseuilles\\_Law](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/Book%3A_College_Physics_(OpenStax)/12%3A_Fluid_Dynamics_and_Its_Biological_and_Medical_Applications/12.04%3A_Viscosity_and_Laminar_Flow_Poiseuilles_Law)

LARSEN ET. AL. **18.7A: Velocity of blood flow.** Libretexts Medicine. [online]. 2020 August 14, [citováno 2020-05-08]. dostupné z: [https://med.libretexts.org/Bookshelves/Anatomy\\_and\\_Physiology/Book%3A\\_Anatomy\\_and\\_Physiology\\_\(Boundless\)/18%3A\\_Cardiovascular\\_System%3A\\_Blood\\_Vessels/18.7%3A\\_Blood\\_Flow\\_Through\\_the\\_Body/18.7A%3A\\_Velocity\\_of\\_Blood\\_Flow](https://med.libretexts.org/Bookshelves/Anatomy_and_Physiology/Book%3A_Anatomy_and_Physiology_(Boundless)/18%3A_Cardiovascular_System%3A_Blood_Vessels/18.7%3A_Blood_Flow_Through_the_Body/18.7A%3A_Velocity_of_Blood_Flow)

LAVRÍKOVÁ, P., FONTANA, J. V. **Krev a orgány imunitního systému – 2. Složky krevní plazmy.** Funkce buněk a lidského těla multimediální skripta. [online]. 2013, [citováno 2020-09-27]. dostupné z: <http://fbt.cz/en/skripta/v-krev-a-organy-imunitniho-systemu/2-slozky-krevni-plazmy/>

LI, W. **Biomechanical property and modelling of venous wall.** Progress in Biophysics and Molecular Biology. [online]. 2018 March, (133): 56-75, [citováno 2020-05-01]. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2017.11.004. dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079610717302158?casa\\_token=dWgMIV8qac0AAAAA:toEf1Fi0lftHmlfqrB5-5kPz7tjsHyBAht0guZXluLbIYBuT72xXo5dBiRRaBVuLKv9VriPHo](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079610717302158?casa_token=dWgMIV8qac0AAAAA:toEf1Fi0lftHmlfqrB5-5kPz7tjsHyBAht0guZXluLbIYBuT72xXo5dBiRRaBVuLKv9VriPHo)

LIAO, S., VON DER WEID, P.Y. **Lymphatic system: An active pathway for immune protection,** Seminars in Cell & Developmental Biology. [online], 2015 February, 38: 83-89, [citováno 2020-03-14]. dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S108495211400322X?casa\\_token=25oqS7\\_gub4AAAAA:35sv-vTTAtk0Dhr3iinIPmyxEzv6hyhqErvM7Tps-yEP9e7mxQ0-g3lWi49hURGRu4PzzYUZYHg](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S108495211400322X?casa_token=25oqS7_gub4AAAAA:35sv-vTTAtk0Dhr3iinIPmyxEzv6hyhqErvM7Tps-yEP9e7mxQ0-g3lWi49hURGRu4PzzYUZYHg)

LÜLLMANN-RAUCH, R. **Histologie – Překlad 3.vydání.** Grada Publishing, 2012, s. 217-218, 232-233, 278-282. ISBN 978-80-247-3729-4

MATHEW, J. ET AL. **Physiology, Blood Plasma**. In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 October 27, [citováno 2021-05-01]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30285399/>

MIHAI, L.A., GORIELY A. **How to characterize a nonlinear elastic material? A review on nonlinear constitutive parameters in isotropic finite elasticity**. Proceeding Mathematical, Physical, and Engineering Sciences. [online]. 2017 November, 473 (2207): 20170607, November, [citováno 2021-05-10]. DOI: 10.1098/rspa.2017.0607.. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29225507/>

MICHEL, C.CH. ET AL. **Understanding and extending the Starling principle**. Acta Anaesthesiologica Scandinavia. [online]. 2020 September, 64 (8): 1032-1037, [citováno 2021-05-03]. DOI: 10.1111/aas.13603.. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32270491/>

MOON, J.Y. ET AL. **Considerations of blood properties, outlet boundary conditions and energy loss approaches in computational fluid dynamics modeling**. Neurointervention. [online]. 2014 February, 9 (1): 1-8., [citováno 2021-05-08]. DOI: 10.5469/neuroint.2014.9.1.1.. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24642855/>

MORFOISSE, F., NOEL, A. **Lymphatic and blood systems: Identical or fraternal twins?**. The International Journal of Biochemistry & Cell Biology. [online]. 2019 September, 114, [citováno 2021-03-14]. DOI: 10.1016/j.biocel.2019.105562. dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1357272519301335?casa\\_token=dRyPp1EzCeoAAAAA:fkEJr91rYF9fD3HHSTsISWu7nfr7FxuCO CZ7uWgnqtqwmRXN7h3o002wyV2bqNih8fPD\\_nZ2wXc](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1357272519301335?casa_token=dRyPp1EzCeoAAAAA:fkEJr91rYF9fD3HHSTsISWu7nfr7FxuCO CZ7uWgnqtqwmRXN7h3o002wyV2bqNih8fPD_nZ2wXc)

MOUREK, J., **Fyziologie – Učebnice pro studenty zdravotnických oborů, 2., doplněné vydání**. Grada Publishing, 2012, s. 19-24, 29-30, 35-36, 42-43. ISBN 978-80-247-3918-2

NADER, E. ET AL. **Blood Rheology: Key Parameters, Impact on Blood Flow, Role in Sickle Cell Disease and Effects of Exercise**. Frontiers in Physiology. [online]. 2019 October 17, 10:1329, [citováno 2021-05-08]. DOI:

10.3389/fphys.2019.01329. dostupné z:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31749708/>

NAVRÁTIL, L ET AL. **Medicínská biofyzika: 2. zcela přepracované a doplněné vydání.** Grada Publishing, 2019, s. 78-81, 83-84. ISBN 978-80-271-0209-9

NAVRÁTIL, L. ET AL. **Vnitřní lékařství pro nelékařské zdravotnické obory: 2.zcela přepracované a doplněné vydání.** Grada Publishing, 2017, s.59. ISBN 978-80-271-0210-5

NEGRINI, D., MORIONDO, A. **Lymphatic anatomy and biomechanics.** Journal of Physiology. [online]. 2011 June 15, 589 (12): 2927-34, [citováno 2021-05-03]. DOI: 10.1113/jphysiol.2011.206672. dostupné z:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21486777/>

OPENSTAX COLLEGE. **Anatomy & Physiology, Connexions.** Openstax college - Web site. [online]. 2013 June 19, [citováno 2021-05-15]. dostupné z:  
<http://cnx.org/content/col11496/1.6/>.

PATRA, C. ET AL. **Physiology, Bundle of His.** In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 May 24, [citováno 2021-03-29]. dostupné z:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30285393/>

PETŘEK, J. **Základy fyziologie člověka: pro nelékařské zdravotnické obory.** Grada Publishing, 2019, s. 31-32, 49. ISBN 978-80-271-2208-0

PETTAZZONI, P. ET AL. **The study of viscoelastic behavior of blood vessels.** Blood, heart and circulation. [online]. 2017 August 18, [citováno 2021-05-10]. DOI: 10.15761/BHC.1000110. dostupné z: [https://www.oatext.com/the-study-of-viscoelastic-behavior-of-blood-vessels.php#Article\\_Info](https://www.oatext.com/the-study-of-viscoelastic-behavior-of-blood-vessels.php#Article_Info)

POLLOCK, J.D. ET AL. **Physiology, Cardiovascular Hemodynamics.** In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 April 22, [citováno 2021-05-08]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29261894/>

RAHMAN, M., SIDDIK, A.B. **Anatomy, Arterioles.** In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 October 15, [citováno 2021-03-20]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32310381/>



REHMAN, I., REHMAN, A., **Anatomy, Thorax, Heart**. In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2020 December 28, [citováno 2021-03-12]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29262022/>

ROSINA, J. ET AL. **Biofyzika: pro zdravotnické a medicínské obory**. Grada Publishing, 2013, s. 49, 154. ISBN 978-80-247-4237-3

ROUX, E. ET AL. **Fluid Shear Stress Sensing by the Endothelial Layer**. Frontiers in Physiology. [online]. 2020 July 24, 11: 861, [citováno 2021-05-02]. DOI: 10.3389/fphys.2020.00861. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32848833/>

SECOMB, T.W. **Hemodynamics**. Comprehensive Physiology. [online]. 2016 March 15, 6 (2): 975-1003, [citováno 2021-05-05]. DOI: 10.1002/cphy.c150038. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27065172/>

SEDMERA, D., GOURDIE, R.G. **Why do we have Purkinje fibers deep in our heart?**. Physiological research. [online]. 2014, 63 (Suppl 1): S9-18, [citováno 2021-03-29]. DOI: 10.33549/physiolres.932686. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24564668/>

SIMMONDS, M.J. ET AL. **Blood rheology and aging**. Journal of Geriatric Cardiology. [online]. 2013 September, 10 (3): 291-301, [citováno 2021-05-02]. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5411.2013.03.010. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24133519/>

SRDCE-CARDIA. **Dutiny srdce**. Srdce-Cardia.webnode.cz [online]. 2010, [citováno 2021-05-13]. dostupné z: <https://srdce-cardia.webnode.cz/dutiny-srdce/>

SURESH, K., SHIMODA, L.A. **Lung Circulation**. Comprehensive Physiology. [online]. 2016 March 15, 6 (2): 897-943, [citováno 2021-03-30]. DOI: 10.1002/cphy.c140049. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27065170/>

ŠAJDÍKOVÁ, M., FONTANA J. V. **Krev a orgány imunitního systému – 3. formované krevní elementy**. Funkce buněk a lidského těla multimediální skripta. [online]. 2013, [citováno 2020-09-28]. dostupné z: <http://fblt.cz/skripta/v-krev-a-organy-imunitniho-systemu/3-formovane-krevni-elementy/>

ŠAJDÍKOVÁ, M., FONTANA, J. V. **Krev a orgány imunitního systému – 6. Lymfatický systém a imunita.** Funkce buněk a lidského těla multimediální skripta. [online]. 2013, [citováno 2021-02-18]. dostupné z: <http://fb.lt.cz/skripta/v-krev-a-organy-imunitniho-systemu/6-thymus-mizni-uzliny-a-difuzni-imunitni-system/>

ŠOB, F. **Hydromechanika.** Akademické vydavatelství CERM, 2008, s. 17, 36, 62. ISBN 978-80-214-3578-0

ŠTEJFA, M. ET AL. **Kardiologie – 3. přepracované a doplněné vydání.** Grada Publishing, 2007, s. 3, 19. ISBN 978-80-271-1385-4

THANOS ET AL. **Blood flow, blood pressure and resistance.** Lumen learning, Simple book production. [online]. © 2017, [citováno 2021-05-04]. dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/ap2/chapter/blood-flow-blood-pressure-and-resistance-no-content/>

THANOS ET AL. **Systemic blood pressure.** Lumen learning, Simple book production. [online]. © 2017, [citováno 2021-05-04]. dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/ap2/chapter/blood-flow-blood-pressure-and-resistance-no-content/>

**Tkáňový mok.** WIKISKRIPTA. In: Wikiskripta.eu. [online]. 2021 February 10, [citováno 2020-05-01]. dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Tk%C3%A1%C5%88ov%C3%BD\\_mo](https://www.wikiskripta.eu/w/Tk%C3%A1%C5%88ov%C3%BD_mo)

TUCKER, W.D. ET AL. **Anatomy, Blood Vessels.** In: StatPearls [online]. Treasure Island (FL), 2021 February 12, [citováno 2021-04-30]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29262226/>

VAJNER, L. ET AL. **Lékařská histologie II.: Mikroskopická anatomie.** Univerzita Karlova Karolinum, 2017, s. 6-8, 10-11, 13-14. 24. ISBN 978-80-246-3827-0

VASKOVIĆ, J. **Histology of the spleen.** [online]. 2021 February 18, [citováno 2021-03-21]. dostupné z: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/histology-of-the-spleen>

VINOTH, R. ET AL. **Non-Newtonian and Newtonian blood flow in human aorta: A transient analysis.** Biomedical Research. [online]. 2017, 28 (7), [citováno 2021-05-08]. dostupné z: <https://www.alliedacademies.org/articles/nonnewtonian-and-newtonian-blood-flow-in-human-aorta-a-transient-analysis.html>

Voorhees, A.P., Han, H-Ch. **Biomechanics of Cardiac Function.** Comprehensive Physiology. [online]. 2015 September 20, 5 (4): 1623-44, [citováno 2021-04-21]. DOI: 10.1002/cphy.c140070. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26426462/>

WAGNER, P.D. **The physiological basis of pulmonary gas exchange: implications for clinical interpretation of arterial blood gases.** The European Respiratory Journal. [online]. 2015 January, 45 (1): 227-43, [citováno 2021-03-30]. DOI: 10.1183/09031936.00039214. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25323225/>

WANG, Z. ET AL. **C. Viscoelastic Properties of Cardiovascular Tissues.** [online]. 2016 September 21, [citováno 2021-05-10]. DOI: 10.5772/64169. dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/viscoelastic-and-viscoplastic-materials/viscoelastic-properties-of-cardiovascular-tissues>

WASCHKE, J. ET AL. **Anatomie das lehrbuch – Sobotta.** Elsevier, Urban & Fischer Munchen, 2015, s. 37. ISBN 978-3-437-16941-0

WEI, X. ET AL. **Physiology, Cardiac Repolarization Dispersion and Reserve.** In: StatPearls. [online]. Treasure Island (FL), 2020 April 30, [citováno 2021-03-28]. dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30725879/>

WHITAKER, R.E. **Anatomy of Heart.** Medicine. [online]. 2018 August, 46 (8): 423-426, [citováno 2021-03-12]. DOI: 10.1016/j.mpmed.2018.05.010. dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1357303918301270?casa\\_token=cv5IYPEy9ZgAAAAA:xzVgijOHIzgvGP1WXb3JDvyy2EWqyqx4Blghvj9fhBs1zybwcVtUbKWFa7\\_Mc1cBV\\_j4Zu81Yc](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1357303918301270?casa_token=cv5IYPEy9ZgAAAAA:xzVgijOHIzgvGP1WXb3JDvyy2EWqyqx4Blghvj9fhBs1zybwcVtUbKWFa7_Mc1cBV_j4Zu81Yc)

WIKISKRIPTA. **Biomechanika krevního oběhu.** In: Wikiskripta.eu. [online]. 2019 May 5, [citováno 2020-04-20]. dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Biomechanika\\_krevn%C3%ADho\\_ob%C4%9Bhu](https://www.wikiskripta.eu/w/Biomechanika_krevn%C3%ADho_ob%C4%9Bhu)

WIKISKRIPTA. **Srdeční revoluce.** In: Wikiskripta.eu. [online]. 2010 December 10, [citováno 2020-05-13]. dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Srde%C4%8Dn%C3%AD\\_revoluce](https://www.wikiskripta.eu/w/Srde%C4%8Dn%C3%AD_revoluce)

WIKISKRIPTA. **Převodní systém srdeční.** In: Wikiskripta.eu. [online]. 2010 November 17, [citováno 2020-05-13]. dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/P%C5%99evodn%C3%AD\\_syst%C3%A9m\\_srde%C4%8Dn%C3%AD](https://www.wikiskripta.eu/w/P%C5%99evodn%C3%AD_syst%C3%A9m_srde%C4%8Dn%C3%AD)