



**ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE**

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Delaminační pevnost aortální stěny

Delamination strength of aortic wall

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

MICHAELA BENEŠOVÁ

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: bez oboru

Vedoucí práce: doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Delaminační pevnost aortální stěny“ vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Lukáše Horného, Ph.D. a s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 04.08.2019

.....

Michaela Benešová

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velmi ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Lukáši Hornému, Ph.D. za odborný dohled, konzultace, vedení a čas, který mi věnoval, a které mi pomohly k vypracování této bakalářské práce. Také bych chtěla poděkovat Ing. Zdeňku Petřivému za pomoc při vykonávání delaminačních experimentů.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Michaela Benešová
Název BP:	Delaminační pevnost aortální stěny
Anglický název:	Delamination strength of aortic wall
Akademický rok:	2018/2019
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	bez oboru
Ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí BP:	doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran 35 Počet obrázků 28
Klíčová slova:	aorta, disekce, delaminace, tepenné stěna, peelingový test
Keywords:	aorta, dissection, delamination, arterial wall, peeling test
Anotace:	V této bakalářské práci je obecně popsána oběhová soustava a nemoci oběhové soustavy a závažný patologický stav zvaný disekce aorty. Dále jsou zde provedeny delaminační experimenty pomocí peelingového testu a jejich výsledky jsou zde porovnány s výsledky známými z literatury.
Abstract:	This bachelor thesis generally describes the circulatory system and diseases of the circulatory system and a serious pathological condition called aortic dissection. Furthermore, delamination experiments are performed by means of the peeling test and their results are compared with the results known in the literature.

OBSAH

Prohlášení	2
Poděkování	3
Anotační list	4
Obsah.....	5
Seznam symbolů, značek a zkratek	5
1. ÚVOD.....	7
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	9
2.1. Oběhová soustava	9
2.2. Tepny	11
2.2.1. Anatomická stavba tepenné stěny	12
2.2.2. Cévní onemocnění.....	13
2.3. Disekce aorty	15
2.4. Dosavadní provedené experimenty	18
3. DELAMINAČNÍ EXPERIMENT – ZJIŠTĚNÍ DELAMINAČNÍ PEVNOSTI	21
3.1. Cíle experimentů	21
3.2. Průběh experimentu	21
3.3. Vyhodnocení měření.....	26
3.4. Výsledky měření	27
3.5. Porovnání s již provedenými experimenty	31
4. ZÁVĚR.....	33
Seznam použité literatury	34

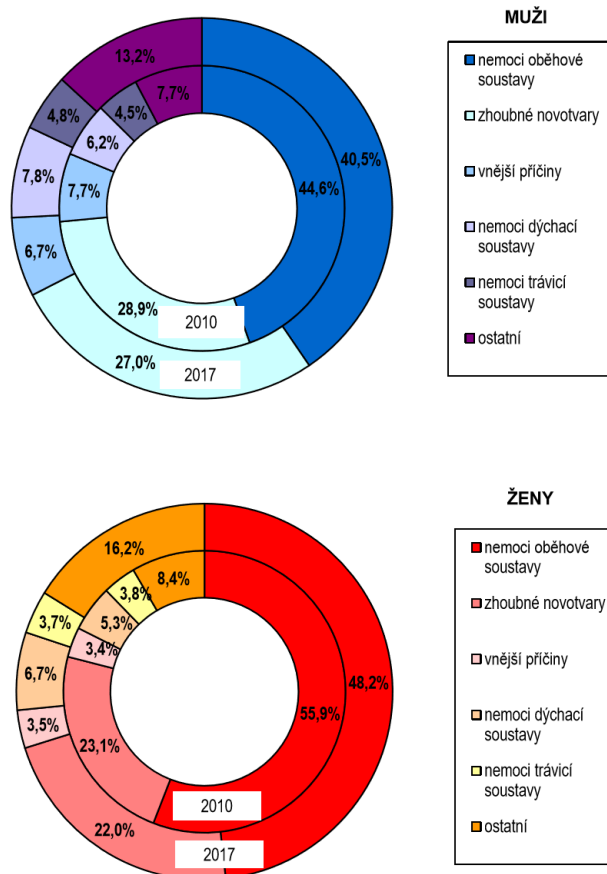


SEZNAM SYMBOLŮ, ZNAČEK A ZKRATEK

C_i	... i-tý obvodový vzorek
CO_2	... oxid uhličitý
F	... delaminační síla
L_i	... i-tý podélný vzorek
l_1	... počáteční délka
l_2	... délka na konci delaminace
Δl	... celková delaminovaná délka
O_2	... kyslík
w	... šířka vzorku
W	... hustota energie
\bar{W}	... měrná práce
A	... tunica adventitia
CT	... počítačová tomografie
EKG	... elektrokardiogram
EU	... Evropská unie
I	... tunica intima
IVUS	... intravaskulární ultrazvuk
M	... tunica media
MRI	... magnetická rezonance
RTG	... rentgenové záření
SD	... směrodatná odchylka
TTE	... transtorakální echokardiografické vyšetření
TEE	... transzofageální echokardiografické vyšetření
WHO	... World Health Organization

1. ÚVOD

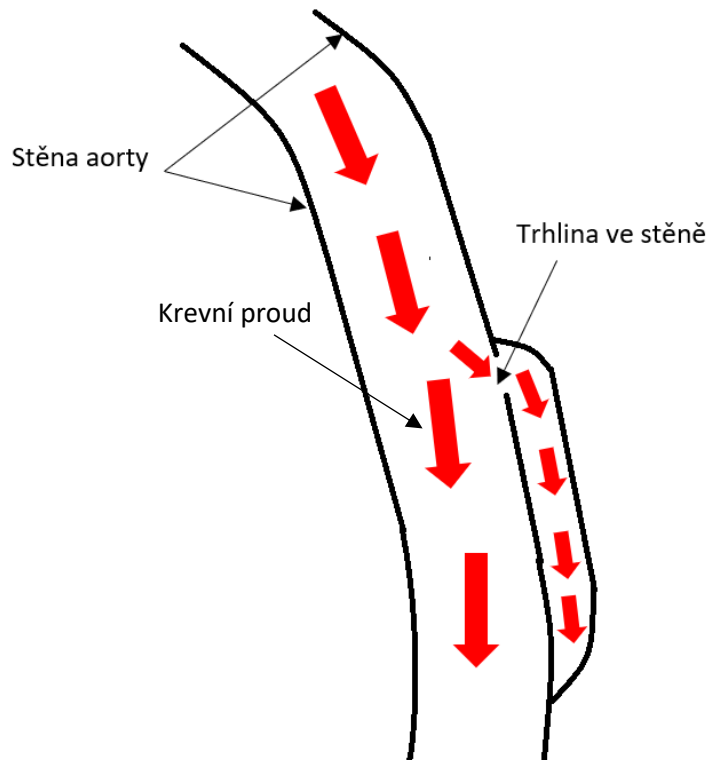
Mezi jednu z nečastějších příčin úmrtí v České republice patří nemoci oběhové soustavy. Díky pokroku nejen v medicíně, ale i ve všech oblastech s tímto spojené se počty úmrtí daří neustále snižovat. Od 90. let Česká republika podstupuje etapu tzv. „kardiovaskulární revoluce“, je to období, které můžeme charakterizovat klesající úmrtností na kardiovaskulární choroby (Zpráva o zdraví obyvatel České republiky, 2014).



Obrázek 1: Struktura zemřelých – porovnání v letech 2010 a 2017 - převzato ze Zemřelí (2017)

I přes neustálé snižování zůstává úmrtnost na nemoci oběhové soustavy u nás stále 2krát vyšší než v ostatních zemích bývalé EU 15. Mezi dominantní příčinu řadíme ischemickou chorobu srdeční, která spolu s cévními onemocněními mozku tvoří 71 % všech úmrtí na nemoci srdce a cév a poté co k tomu přičteme aterosklerózu dostaneme se na více než 77 % všech úmrtí. Velkou roli při tomto onemocnění hraje také životní styl, který má přímou souvislost s dalším rozvojem cévních onemocnění (Zpráva o zdraví obyvatel České republiky, 2014).

V této práci se budu zabývat jedním z velice závažných stavů, který se nazývá disekce aorty. Při tomto onemocnění se zjednodušeně řečeno dostává krev trhlinou do stěny aorty a dochází k delaminaci neboli k odštěpení jedné vrstvy tepny od druhé. Tato trhlina se šíří dál a postupem času může aorta tomuto náporu přestat odolávat a dojde k jejímu prasknutí. U tohoto onemocnění je obtížné určit správnou diagnózu.



Obrázek 2: Disekce aorty zjednodušené schéma

CÍLE PRÁCE:

- 1) Popsat obecně oběhovou soustavu a anatomickou stavbu tepenné stěny
- 2) Provést rešerši o experimentech již provedených
- 3) Provést delaminační experimenty
- 4) Porovnat výsledky s údaji známými z literatury

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Oběhová soustava

Krevní oběhová soustava má hlavní orgán – srdce (latinsky cor), které svými pravidelnými stahy rozvádí krev v cévách. Tepny (latinsky arteriae) – rozvádí krev ze srdce a postupně se větví ve *vlásečnice* (kapiláry) – jejich stěna je složena z jedné vrstvy buněk, díky tomu dokáže zajistit výměnu chemických látek mezi krví a ostatními tkáněmi, a žíly (latinsky venae) – které vedou krev směrem k srdci (Čihák, 2016).

Funkce

Oběhová soustava nepřetržitě rozvádí krev po celém těle a díky tomu je zajištěn přenos O₂ směrem z plic do tkání a CO₂ z tkání do plic. Také rozvádí živiny, hormony, vitamíny a minerální látky. Oběhová soustava má i funkci obrannou, kterou zajišťují bílé krvinky. Další funkcí oběhové soustavy je udržování stálosti prostředí, pH a tělesné teploty (Merkunová, Orel, 2008).

Krev

Krev je červená tekutina proudící v těle člověka uvnitř cév v objemu 5-6 litrů. Krev se skládá z pevné složky (krvinky) a z tekuté složky (krevní plazma) (Čihák, 2016).

Krevní plazma

Krevní plazma je roztok obsahující bílkoviny, organické sloučeniny a minerály. Skládá se z 92 % vody a 8 % zaujímají další organické látky a anorganické molekuly.

V krvi se také nachází dva druhy krvinek – červené (erytrocyty), bílé (leukocyty) a krevní destičky (trombocyty) (Čihák, 2016).

Červené krvinky

Červené krvinky slouží ke transportu kyslíku. Jsou bezjaderné tvaru bikonkávního disku – plochý kotouč, který je ve svém středu slabší než na okraji. Na obou stranách mají červené krvinky rezervní kapsičku, díky které se mohou pružně deformovat – zvětšovat či protáhnout (Merkunová, Orel, 2008.).

Bílé krvinky

Bílé krvinky mají narozdíl od červených krvinek jádro. Místem jejich vzniku je kostní dřeň. Jejich funkce v organismu je obranná. Rozlišujeme dva typy bílých krvinek: granulocyty a agranulocyty. Granulocyty obsahují granula a dělí se na: neutrofil, eozinofil a bazofil. Agranulocyty neobsahují granula a dělí se na: lymfocyt a monocyt. Vlastností

bílých krvinek je možnost prostupu stěnou kapiláry (diapadéza), dokáží ničit a pohlcovat cizí látky a mikroorganismy (fagocytóza) (Merkunová, Orel, 2008.).

Krevní destičky

Krevní destičky jsou útržky buněk, které se uvolňují do krve. Jejich úkolem je udržovat cévní stěny bez trhlin. To dokáží tak, že se přilepí na stěnu cévy a nahustí se i na sebe a tím se vytvoří strup (Čapek, Hájek, Henyš, 2018).

Srdce

Srdce je orgán velikosti sevřené pěsti, uložené v osrdečníku a umístěné mezi plícemi uprostřed hrudníku. Hmotnost srdce dospělého jedince je 230 až 500 gramů. Srdce savců dělí přepážka na levou a pravou část. V každé z této částí se nachází jedna předsíň a jedna komora. Srdce koná práci, kterou nazýváme srdeční cyklus. Tento cyklus má dvě fáze:

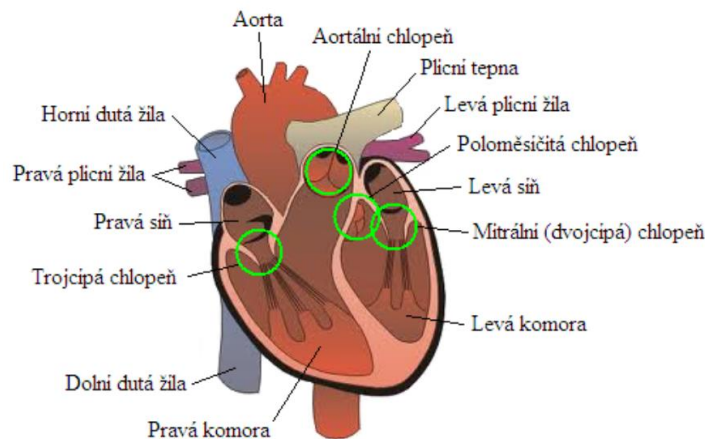
- 1) *Systola* – což je stah srdeční svaloviny.
- 2) *Diastola* – je uvolnění, ochabnutí stahu.

Stavba srdeční stěny:

Endokard - vnitřní vrstva, výstelka uvnitř srdce tvořená plochou endothelových buněk.

Myokard – nejmohutnější, tato část je tvořena příčně pruhovanou svalovinou srdeční.

Epikard - pod ním se nachází vrstvička elastického vaziva a přechází v osrdečník (Čihák, 2016).

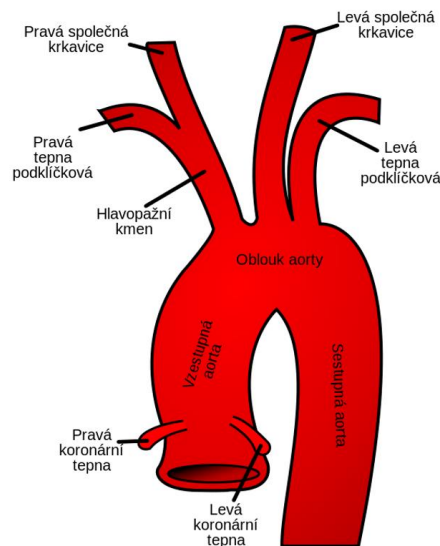


Obrázek 3: Stavba srdce – převzato z fsps.muni.cz.

2.2. Tepny

„Tepny mají pevné a pružné stěny, adaptované na pulsové nárazy krve rytmicky vypuzované ze srdce.“ (Čihák, 2016) V momentě, kdy probíhá systola je krev vržena z komor do cév a dochází ke vzniku tlakové vlny, která se dál šíří od levé komory aortou směrem k periférii a při šíření roztahuje cévní stěnu. Tento jev je vnímaný jako tep, který se šíří rychlostí 5-8 m/s. Kdybychom tepnu nařízly, tak díky šířící se tepové vlně z ní bude rytmicky vystřikovat krev. „Na mrtvole jsou tepny vlivem posmrtného stahu svaloviny stěn prázdné a zejí.“ (Čihák, 2016) Díky tomu si dříve anatomové mysleli, že tepny slouží k rozvodu vzduchu, a proto je pojmenovali arterie (řec. aer – vzduch) (Čihák, 2016).

Tepny vycházejí z aorty. Aorta je největší tepna v lidském těle vystupující z levé srdeční komory, která je složena ze čtyř částí: vzestupnou část, oblouk, hrudní část a poté plynule přechází v břišní část.



Obrázek 4: Stavba aorty - převzato z Horný (2016).

Vzestupná část aorty – ze vzestupné části aorty vystupují dvě věnčité tepny. Pravá věnčitá tepna a levá věnčitá tepna. Obě zásobují srdce krví (Merkunová, Orel, 2008).

Oblouk aorty – z této části aorty vystupují tepny pro krk, horní končetiny a hlavu. Hlavopažní tepna, která je rozdělena na pravou podklíčkovou tepnu a pravou společnou krkavici, poté z oblouku aorty vystupuje levá společná krkavice a levá podklíčková tepna (Merkunová, Orel, 2008).

Hrudní část aorty – zde vystupují tepny zásobující jícen, mezihrudí, osrdečník, hrudní stěnu (Merkunová, Orel, 2008).

Břišní část aorty – první vystupuje pravá a levá ledvinová tepna a poté tepny, které se liší u muže a ženy – pravá a levá tepna varlat, pravá a levá vaječnicková tepna. (Merkunová, Orel, 2008).

2.2.1. Anatomická stavba tepenné stěny

Tepny mají třívrstvou stěnou, která se skládá z vnitřní vrstvy tunica intima, střední tunica media a vnější tunica externa (adventitia) (Čihák, 2016).

Tunica intima

Nachází se na vnitřní straně tepenné stěny. Skládá se především z jedné vrstvy endotelových buněk, které jsou podloženy sítí kolagenních a elastických vláken (Čihák, 2016).

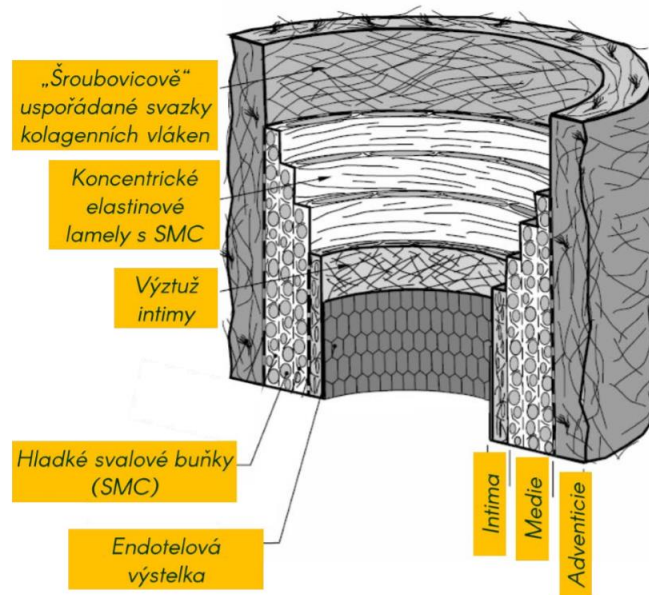
Tunica media

Je prostřední vrstva a nejsilnější vrstva stěny tepny. Je složena z hladké svaloviny a také z kolagenních a elastických vláken. Tepny označujeme buď jako tepny elastického typu nebo tepny svalového typu, a to kvůli tomu, zda v této vrstvě převažuje elastická nebo svalová část. Například aorta je typu elastického. Při systole se elastické tepny roztahují a při diastole jdou zpět do původního stavu (Čihák, 2016).

Tunica externa (adventitia)

Okrajová vrstva tepenné stěny, která se skládá z fibrilárního vaziva s kolagenními a elastickými vlákny. Tloušťka adventitie silně závisí na fyziologické funkci cévy a na jejím umístění (Gasser a kol., 2006).

Tepenné stěny jsou silné, a proto jim živiny a kyslík z protékající krve nestačí. Z toho důvodu pro ně tyto látky obstarávají slabé tepénky a odvádějí tenké žilky, které najdeme v cévních stěnách. „Souborně se označují jako vasa vasorum; pocházejí buď přímo z tepny, kterou zásobují, nebo z nejbližší sousední tepny.“ (Čihák, 2016).



Obrázek 5: Detailní stavba tepenné stěny – převzato z Horný (2016).

2.2.2. Cévní onemocnění

Ateroskleróza

Ateroskleróza je onemocnění cév, při kterém na vnitřním povrchu stěny cévy vznikají tukové aterosklerotické pláty, které ukládají vápník, tuky, vazivo. Kvůli tomu je omezen průtok krve a také dochází k nedostatečnému zásobení orgánů krví (ischemií) (Ústav lékařské biochemie a laboratorní diagnostiky, 2004).

Rizikové faktory ovlivnitelné pro vznik tohoto onemocnění jsou: Vysoký krevní tlak, vysoká hodnota cholesterolu, obezita, cukrovka, stres, kouření, nedostatek tělesné aktivity. Vedle toho máme i faktory, které nemůžeme ovlivnit a těmi jsou: věk – čím jsme starší tím je i větší riziko vzniku aterosklerózy, rodinná anamnéza – výskyt onemocnění u někoho

z rodiny (genetická predispozice), pohlaví – ateroskleróza častěji postihuje mužské pohlaví (Ústav lékařské biochemie a laboratorní diagnostiky, 2004).



Obrázek 6: Aterosklerotický plát - převzato z Horný (2016).

Arterioskleróza

Při arterioskleróze se ukládá vápník do střední vrstvy tepenné stěny zvané Tunica media, tepna tuhne a oslabuje se. Arterioskleróza má stejné příčiny jako ateroskleróza a předejít ji můžeme zdravým životním stylem (Arterioskleróza, anamneza.cz).

Aneurysma (výduť) hrudní aorty

Aneurysma neboli výduť je postižení, při kterém je aorta v určitém úseku abnormálně rozšířená. Pokud je rozšíření nad 55 mm měla by být provedena chirurgická léčba. Průměr 55 mm se proto udává jako hraniční. Rozšířením aorty se zvyšuje riziko natržení nebo úplného prasknutí aorty. Ke vzniku tohoto onemocnění přispívá především hypertenze, poškození stěny cévy vlivem aterosklerózy nebo různé dědičné syndromy jako je například Marfanův syndrom (Onemocnění hrudní aorty, IKEM).

Toto onemocnění může poměrně dlouho probíhat bez jakýchkoliv příznaků, později až objemnější výduť se projevují bolestí na hrudi, kašlem nebo zhoršeným polykáním. Při včasné diagnóze se operací odstraní výduť a nahradí se cévní protézou (Onemocnění hrudní aorty, IKEM).

Hypertenze

Pojem hypertenze znamená zvýšenou hodnotu arteriálního tlaku krve v oběhu. Postihuje okolo 20% populace. Světová zdravotnická organizace (WHO) utvořila přehled pro všechny věkové skupiny:

Tabulka 1: Přehled hypertenze

	Normální tlak	Hraniční hypertenze	hypertenze
Diastolický tlak (P_D [mm Hg])	< 90	90-95	> 95
Systolický tlak (P_S [mm Hg])	< 140	140-160	> 160

Délka života je při hypertenzi značně zkrácena (Silbernagl, Lang, 2001).

V České republice je hypertenze vysoce rozšířena u obyvatel ve věku 25-64 let postihuje až 35 %, a její výskyt se společně s rostoucím věkem zvyšuje.

Příčin hypertenze je několik. Například chronické onemocnění ledvin, díky kterému má pacient zvýšený krevní tlak, zúžení tepny, která vede krev do ledviny a také zúžení aorty, které způsobuje zvýšení tlaku na horní polovině těla (Arteriální hypertenze, IKEM).

Hypotenze

Hypotenze je nízký tlak, kdy tlak systolický klesne pod 100 mmHg a diastolický pod 65 mmHg. Při tomto stavu mohou být málo prokrveny důležité orgány například mozek nebo ledviny. Nízký tlak způsobuje mžítka před očima a závratě (tlakomery.cz).

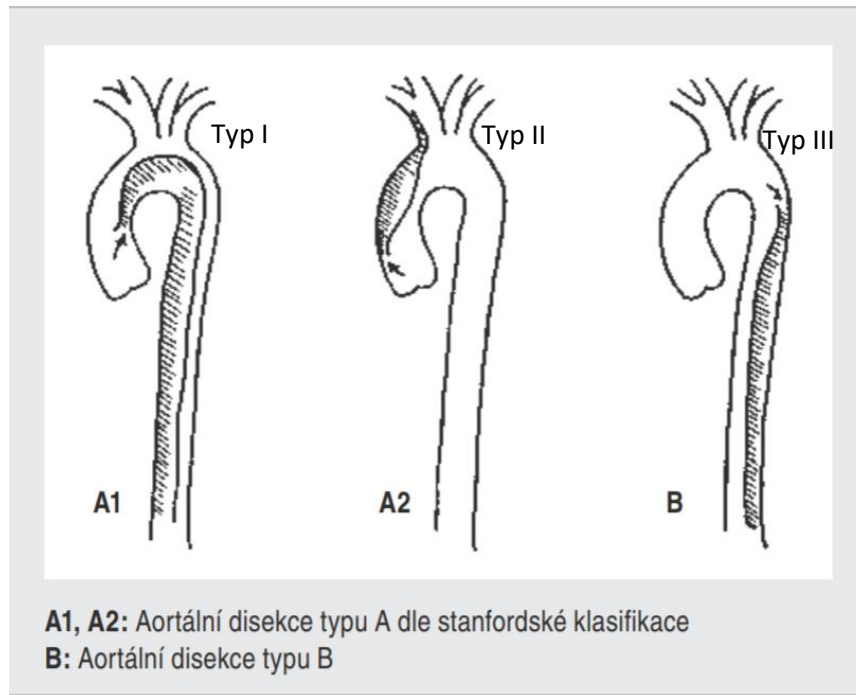
2.3. Disekce aorty

Disekce aorty je velmi závažné onemocnění, které má nejčastější výskyt u starších osob jako komplikace neléčené hypertenze nebo aterosklerózy. Vyskytuje se málo, průměrně se identifikuje 30 nemocných na milion obyvatel za rok. Takže můžeme říct, že toto onemocnění je celkem vzácné, ale vysoce nebezpečné, neboť většina nemocných v důsledku disekce umírá (Vejvoda a kol., 2005).

Při disekci aorty dochází k natržení vnitřní vrstvy tepny – tunica intima a následné vniknutí krve tímto vstupem pod vysokým tlakem do medie, která je poté roztržena a dochází k vytvoření tzv. falešného lumenu (Marek a kol., 2001).

Klasifikace

Existuje několik klasifikací disekce. Nejprve je to klasifikace časová, do dvou týdnů od svého vzniku je to disekce akutní poté už se jedná o disekci chronickou. Dále můžeme disekci rozdělit podle místa vzniku a rozsahu dle DeBakeyho, který disekci rozdělil na tři typy:



Obrázek 7: Klasifikace disekce aorty - převzato z Marek a kol. (2001).

Typ I – určuje, že postižení je v ascendentní (vzestupné) aortě, které jde do oblouku nebo dále.

Typ II – poškození pouze v ascendentní části nebo oblouk bez postižení descendentní (sestupné) aorty.

Typ III – poškození začíná v descendentní části aorty a pokračuje distálně.

V dnešní době se ale více využívá Standfordská klasifikace:

Typ A – označuje poškození ascendentní aorty (typy I a II dle DeBakeyho).

Typ B – pouze descendentní (typ III dle DeBakeyho) (Marek a kol., 2001).

Příčiny

Vyskytuje se nejvíce u starších osob s hypertenzí, ta je přítomna u 80 % pacientů s akutní aortální disekcí. Díky hypertenzi je cévní stěna mechanicky více namáhána. Disekce se ale vyskytuje i při jiných kardiovaskulárních onemocnění například u Marfanova syndromu, Turnerova syndromu a u arteritidy. Dalším rizikem pro vznik disekce je přítomnost onemocnění aortální chlopně a také těhotenství, u žen, které jsou mladší 40 let může dojít ke vzniku disekce právě v souvislosti s těhotenstvím (Marek a kol., 2001).

Další příčinou vzniku disekce aorty může být traumatické poškození například dopravní nehoda, pád z výšky, extrémní námaha u vzpěračů. (Petřivý Z., 2018).

Diagnostika

Diagnóza u disekce aorty musí být včasná a přesná a musí se správně odlišit akutní koronární syndrom, prostá aortální regurgitaci bez disekce, aortální hrudní či břišní aneurysma atd. Diagnózu disekce je možno provést pomocí elektrokardiogramu (EKG), rentgenu (RTG), transtorakální (TTE) a transzofageální (TEE) echokardiografické vyšetření, počítačovou tomografií (CT), magnetickou rezonancí (MRI) nebo aortografií a intravaskulární ultrazvuk (IVUS) (Vejvoda a kol.,2005).

Léčba

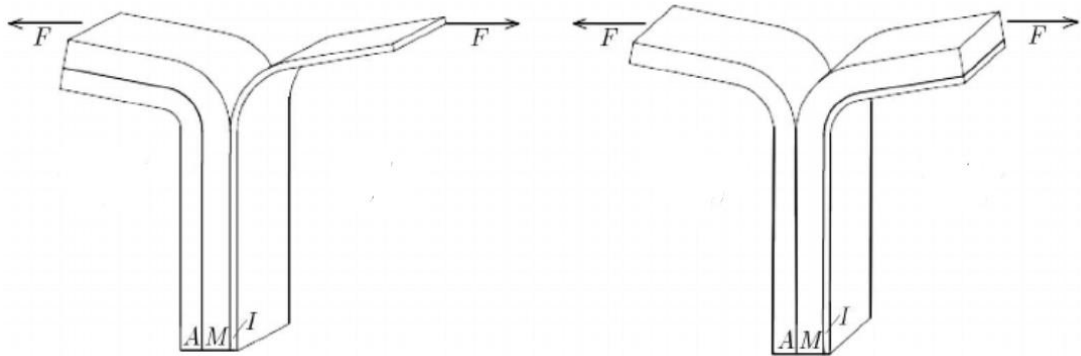
Prvotně musí být diagnostikován typ aortální disekce, typ A nebo typ B a poté může být aplikován správný léčebný postup. Mortalita u neléčené disekce typu A se zvyšuje o 1-2 %/hod. 25 % neléčených zemře do 24 hodin a okolo 50 % do jednoho týdne. U pacientů s disekcí typu B je 30denní mortalita okolo 10 %. Okamžitá léčba zahrnuje snížení tlaku a snížení rychlosti nárustu pulzní vlny (Vejvoda a kol.,2005).

2.4. Dosavadní provedené experimenty

Experimentů bylo již provedeno mnoho, jedním z nich je experiment, který provedla Marta Kozuń na Vratislavské technické univerzitě v Polsku. Pro své studie použila peelingový test, kterým byla zjištěna síla nutná pro šíření trhliny. Vzorky byly odebrány z hrudní aorty při pitvě během 24 hodin po smrti. Celkem 14 vzorků (muži, věk 29 ± 12 let) obsahovalo aterosklerotické léze. Vzorky byly vyříznuty ve dvou směrech. Ve směru podélném a obvodovém (Kozuń, 2016).

Vzorky byly zatíženy konstantní rychlostí 2 mm/min, při konstantní teplotě okolí. Výsledkem experimentu je, že ateroskleróza v raném stadiu nemá vliv na delaminační pevnost stěny aorty a získané hodnoty se shodují s hodnotami, které jsou uváděné v dostupné literatuře (Sommeret al., 2008; Tong et al., 2011). Na delaminační pevnost aortální stěny má ale vliv orientace vzorku, zda byl vzorek naříznut podélně nebo obvodově. Pokud je vzorek vyříznut obvodově je zapotřebí menší síla pro šíření trhliny, takže delaminační pevnost stěny je menší. Ve své práci také Marta Kozuń rozlišuje rozhraní při naříznutí stěny: adventitia → media + intima

adventitia + media → intima

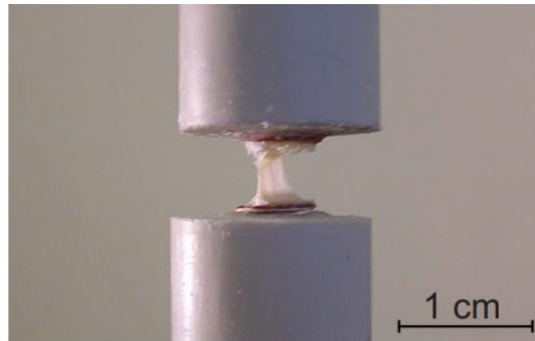


Obrázek 8: Schéma naříznutí tepenné stěny + jednotlivá rozhraní A – adventitia, M – media, I – intima - převzato z Kozuń (2016)

A provedené experimenty ukázaly, že rozhraní adventitia + media → intima je více náchylné k delaminaci (Kozuń, 2016).

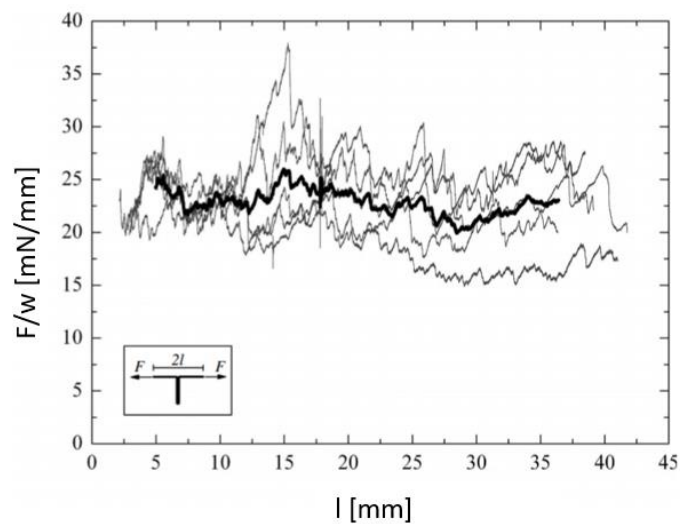
Celková studie prokazuje, že nižší energie pro disekci je potřeba ve směru obvodovém než ve směru podélném, což může být způsobeno strukturou cévní stěny a zarovnáním kolagenních a elastických vláken a buněk hladké svaloviny. Disekce se šíří lépe v obvodovém směru podél elastických lamel, ale ve směru podélném protíná elastické vrstvy. Navíc obvodové zarovnání buněk hladké svaloviny, kolagenních a elastických vláken vede k větší odolnosti vůči disekci při peelingovém testu v podélném směru (Kozuń, 2016).

Dalším experimentem je experiment z roku 2008 od Gerharda Sommera. Ten ve své práci mimo jiné uvádí více způsobů zkoušek – zkoušku tahem, „inflation test“, „tearing test“ a „direct tension test“ a také zkoušky s prasečí aortou. Například „direct tension test“, kterým získáme pevnost tepenné stěny v radiálním směru a při kterém je vzorek aorty podroben zkoušce tahem (Sommer a kol.,2008).

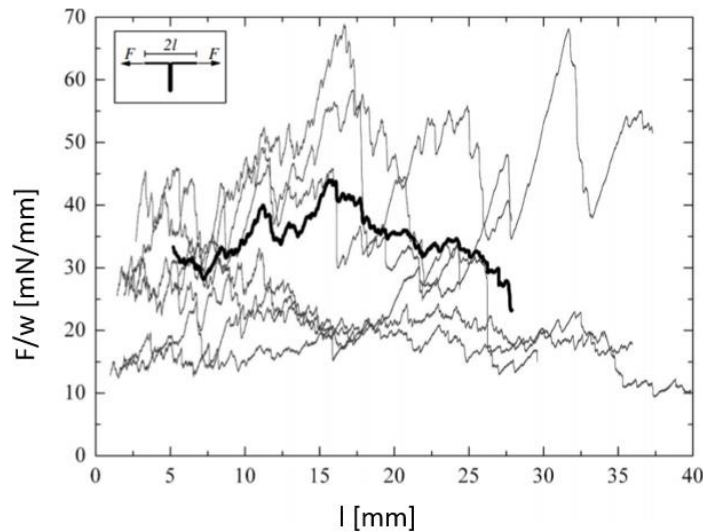


Obrázek 9: Direct tension test - převzato z Sommer a kol. (2008)

K dispozici bylo 19 vzorků břišní aorty (10 mužů a 9 žen, 36-75 let) z nichž žádný neobsahoval patologické změny, jako je například ateroskleróza. Všechny testy byly provedeny do 48 hodin od smrti. Vzorky také testoval v obou směrech, ve směru podélném a ve směru obvodovém.



Obrázek 10: Výsledek peelingového testu obvodových vzorků - převzato z Sommer a kol. (2008)



Obrázek 11: Výsledek peelingového testu podélných vzorků - převzato z Sommer a kol. (2008)

Dle výše uvedených grafů Sommer dospěl ke stejnému výsledku a to, že pokud je vzorek vyříznut ve směru obvodovém je potřeba menší síla pro šíření trhliny (Sommer a kol., 2008).

Poslední experiment, kterým se chci zabývat je experiment provedený v roce 2011 J. Tongem. Ve své práci pracoval s krční tepnou (krkavicí) též karotidou. Také rozlišuje rozhraní I+M (intima + media) a A+M (adventitia + media). K dispozici měl 31 vzorků mezi kterými byly zdravé vzorky, ale i takové, které obsahovaly aterosklerotické léze. Pro svůj test ale použil pouze ty zdravé bez viditelných aterosklerotických lézí. Testovány byly vzorky ve směru podélném a obvodovém při rychlosti posuvu 1 mm/min. Závěrem experimentu jsou stejné výsledky jako u výše zmíněných autorů a to, že menší sílu k šíření trhliny potřebujeme ve směru obvodovém, ale pro rozhraní A+M dospěl k jinému výsledku než M. Kozuň (Tong a kol., 2016).

3. DELAMINAČNÍ EXPERIMENT – ZJIŠTĚNÍ DELAMINAČNÍ PEVNOSTI

3.1. Cíle experimentů

Cílem experimentu, který byl proveden, bylo zjištění síly potřebné k šíření trhliny a dle výsledků, zjištění delaminační pevnosti stěny aorty.

3.2. Průběh experimentu

Experiment byl prováděn pomocí peelingového delaminačního testu, který byl zaveden v roce 2008 G. Sommerem. Celý proces a přípravu vzorků si nyní detailněji popíšeme.

Pro svůj experiment jsem měla k dispozici část hrudní aorty od dvou dárců. Prvním dárce byla žena (34 let, 44 hodin po smrti) a druhým byl muž (59 let, 144 hodin po smrti).

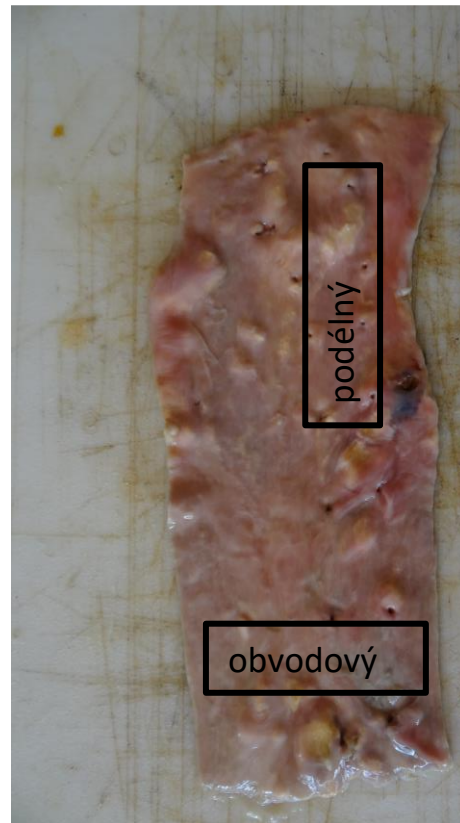
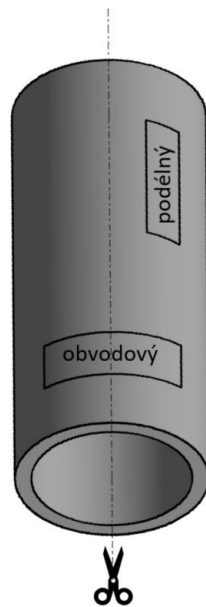


Obrázek 12: Plát pro přípravu vzorků dárce č. 2



Obrázek 13: Část hrudní aorty –plát pro přípravu vzorků dárce č. 1

Jako první jsme z připraveného plátu (viz. Obrázek 12 a Obrázek 13) nařezali celkem 6 vzorků. Tři ve směru podélném a další tři ve směru obvodovém (viz. Obrázek 14). Delaminační pevnost jsme tedy zjišťovali v obou těchto směrech.



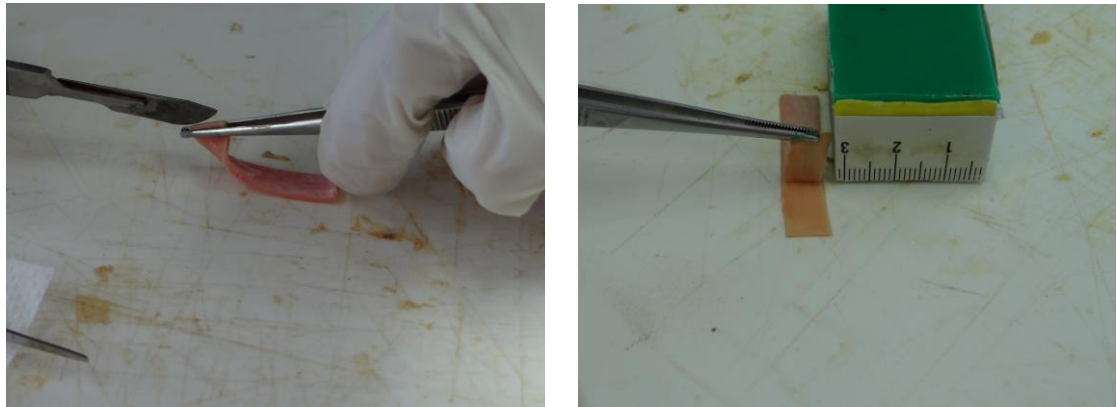
Obrázek 14: Postup přípravy vzorků - převzato z Petřivý Z. 2018

Vzorky jsme si po nařezání pro přehlednost označili C1, C2, C3 (obvodové) a L1, L2, L3 (podélné) a umístili do vodného roztoku, aby nevyschly.



Obrázek 15: Připravené a označené vzorky

Poté jsme mohli naříznout tepennou stěnu chirurgickým skalpelem a připravit si tak iniciační rozhraní pro šíření trhliny (Obrázek 16).



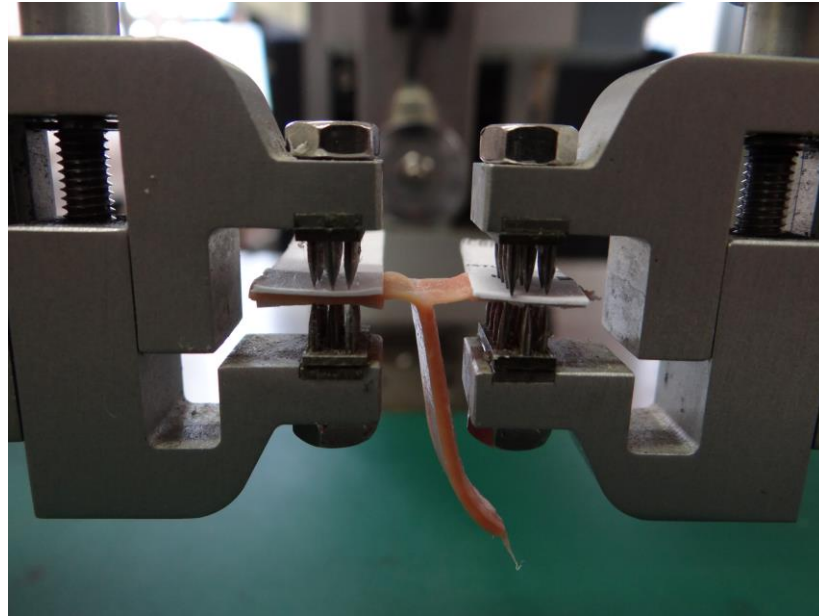
Obrázek 16: Naříznutí vzorku

Jako další krok jsme museli před upnutím vzorků do čelistí biaxiálního trhačího stroje nalepit na oba koncové „jazýčky“ kartonový papír, aby nedošlo k poškození vzorku a ke zkreslení výsledků měření (Obrázek 17).

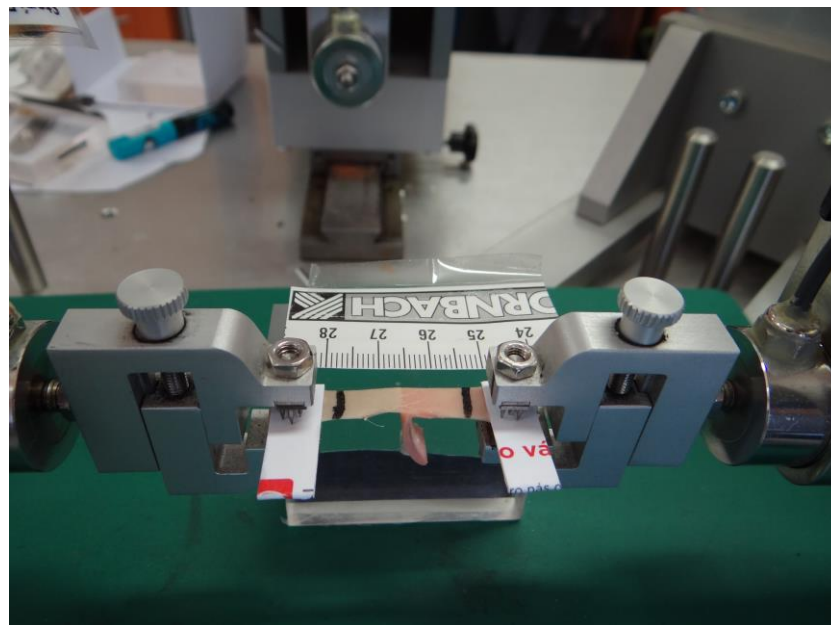


Obrázek 17: Polepené jazýčky vzorku

Po nalepení kartonového papíru jsme mohli vzorek bezpečně upnout do čelistí trhacího stroje (Obrázek 18) a také jsme na vzorek nakreslili oční tekutou linkou značky podle kterých videoextenzor snímal a my jsme tak mohli měřit delaminovanou délku vzorku.



Obrázek 18: Upnutý vzorek



Obrázek 19: Vzorek při delaminaci

Delaminační experiment probíhal za těchto parametrů:

- Rychlost posuvu: 0,1 mm/s
- Pohyb pouze jednoho aktuátoru stroje

3.3. Vyhodnocení měření

Při vyhodnocení měření jsme sílu potřebnou k šíření trhliny vztáhli k šířce vzorku w . Dále již budeme sílu vztaženou na šířku vzorku tedy F/w označovat jako pouze jako sílu F .

Tabulka 2: Šířky vzorků obou dárců

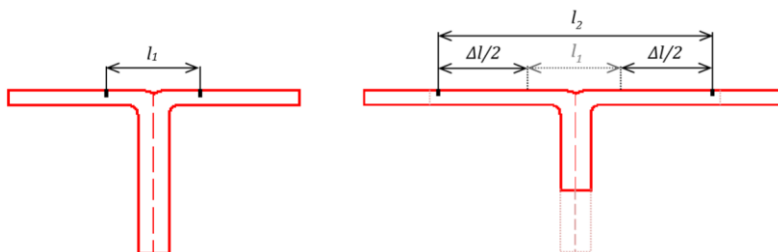
vzorek	šířka w	vzorek	šířka w
C1	7,94 mm	C1	8,13 mm
C2	8,29 mm	C2	7,86 mm
C3	7,88 mm	C3	8,30 mm
L1	8,32 mm	L1	8,04 mm
L2	8,14 mm	L2	7,81 mm
L3	8,32 mm	L3	8,08 mm

Měrná práce \bar{W} , která je potřebná k dalšímu šíření trhliny se dá vyjádřit takto:

$$\bar{W} = \int_{l_1}^{l_1+\Delta l} F dl, \quad (3.1)$$

kde F je síla vztažená na šířku vzorku, l_1 je počáteční délka (vzdálenost nakreslených značek tekutou oční linkou) a $(l_1 + \Delta l)$ je průběžný stav delaminace. Dále si musíme definovat Δl , pro které platí:

$$\Delta l = l_2 - l_1 \quad (3.2)$$



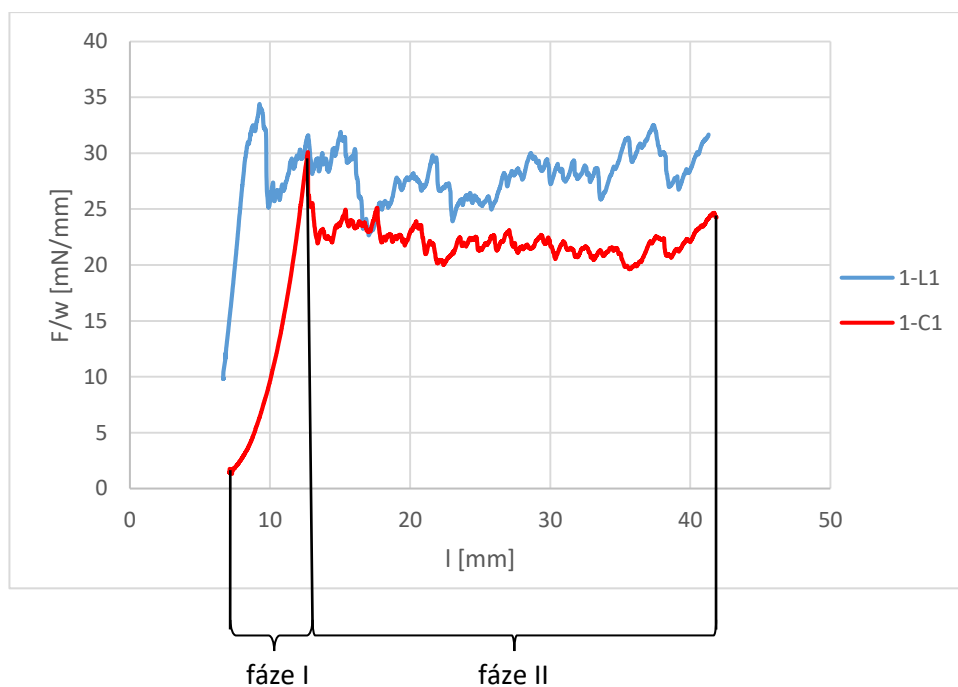
Obrázek 20: Schéma odečítání prodloužení - převzato z (Petřivý Z., 2018)

Disipovanou energii při delaminaci můžeme vyjádřit jako hustotu energie W :

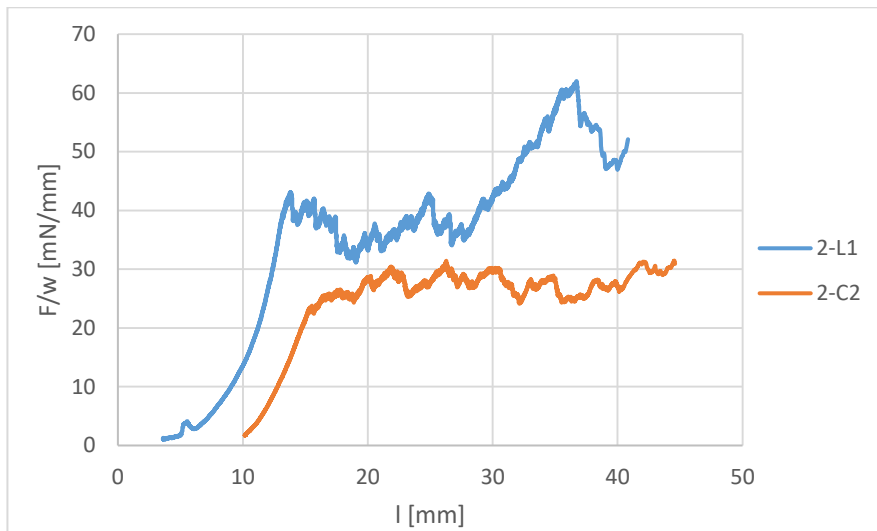
$$W = \frac{\bar{W}}{w \cdot \Delta l} \quad (3.3)$$

3.4. Výsledky měření

Níže zobrazené grafy nám ukazují průběh delaminačního testu pro jeden obvodový a jeden podélný vzorek od obou dárců.

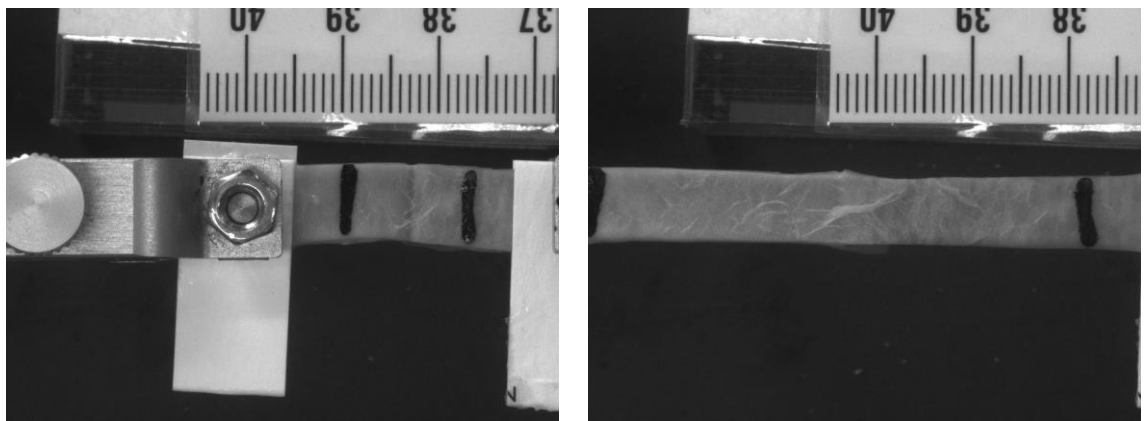


Obrázek 21: Průběhu peelingového testu pro vzorky 1-L1, 1-C1



Obrázek 22: Průběhy peelingového testu pro vzorky 2-L1, 2-C2

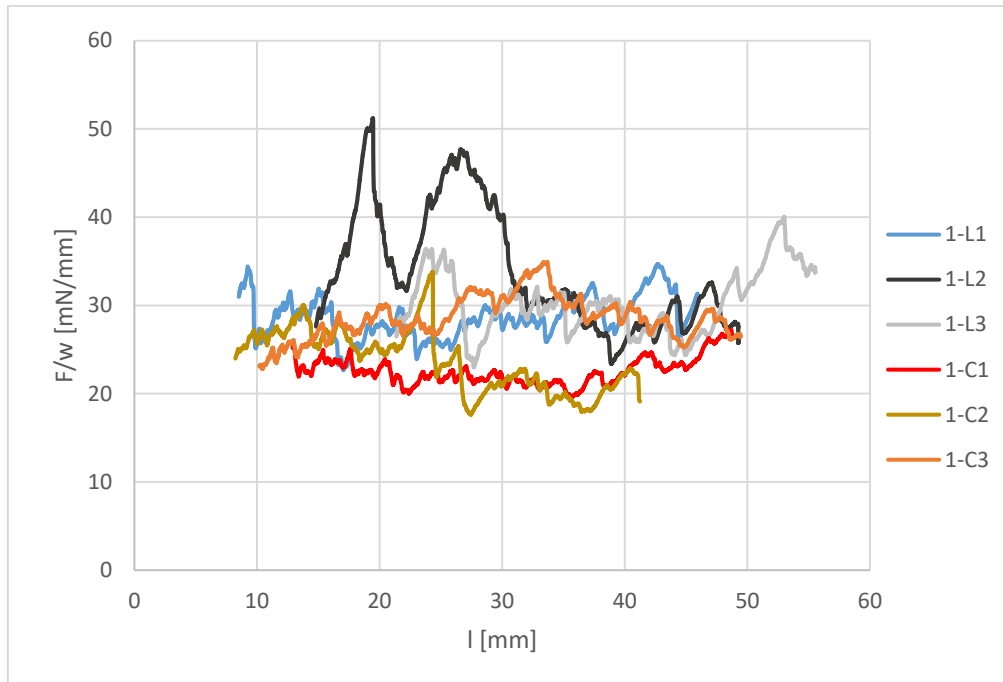
Z grafu na obrázku č. 21 můžeme vidět, že při testu probíhají dvě fáze. Fáze I je fáze elastická. V momentě, kdy je překročena pevnost testovaného vzorku, začíná druhá fáze a vzorek delaminuje. Při delaminační fázi se postupně přetrhávají jednotlivá vlákna elastinu a kolagenu, což dokazuje zvyšování a snižování síly. Tento jev se dá více identifikovat ze vzorků podélných, kde síla kmitá s větší amplitudou než u vzorků obvodových. Takže to znamená, že větší delaminační síly je právě potřeba u podélných vzorků.



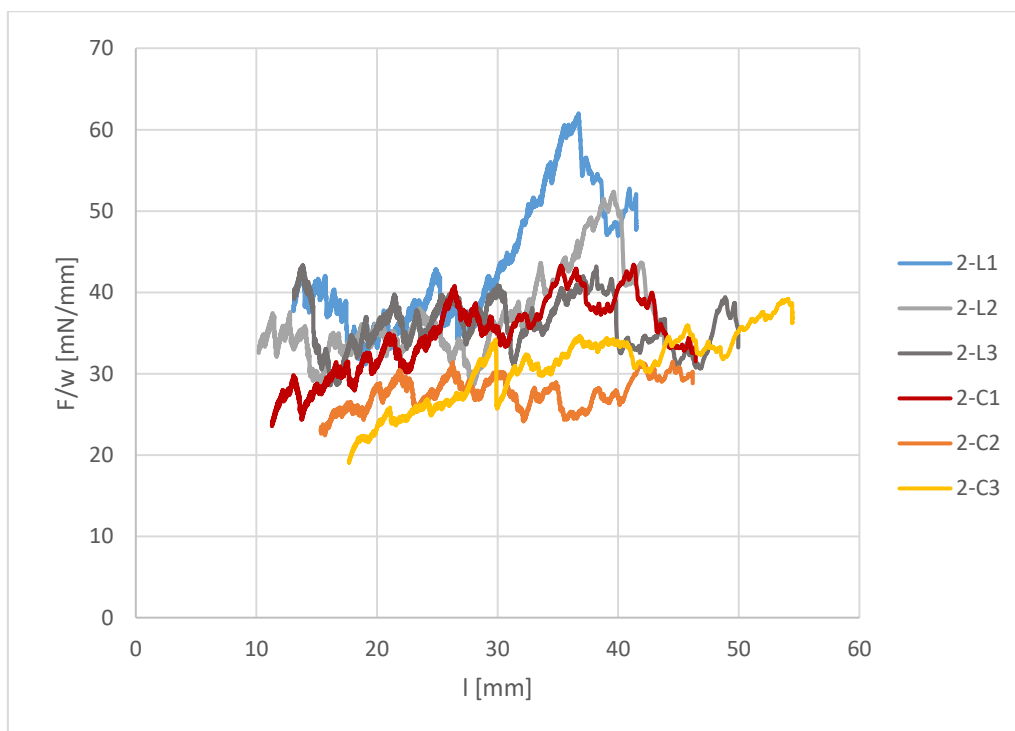
Obrázek 23: Viditelná kolagenní vlákna při delaminaci

V momentě, kdy dojde k překročení meze pevnosti vlákna prasknou a dochází k poklesu síly až do doby, než zatížení převezmou vlákna další (Petřivý Z.,2018)

Abychom mohli určit průměrnou hodnotu síly, která je potřebná k delaminaci, musíme oddělit v grafu elastickou fázi (Petřivý Z.,2018).



Obrázek 24: Průběh delaminace pro všechny vzorky od dárce 1



Obrázek 25: Průběh delaminace pro všechny vzorky od dárce 2

Síly potřebné k šíření trhliny jsem zprůměrovala a pro větší přehlednost zapsala do tabulky:

Tabulka 3: Průměrná síla F , která je potřeba k disekci

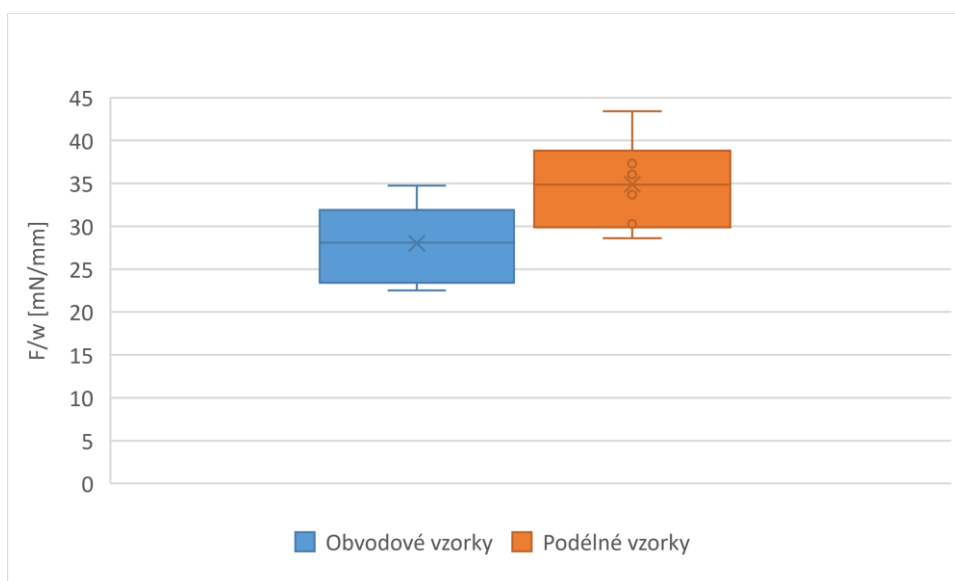
Vzorky	Podélné vzorky	Obvodové vzorky
	$\frac{F}{w} \left[\frac{mN}{mm} \right] \pm SD$	$\frac{F}{w} \left[\frac{mN}{mm} \right] \pm SD$
1	$30,86 \pm 6,65$	$24,94 \pm 5,93$
2	$38,91 \pm 12,64$	$31,10 \pm 8,72$

Poté jsem určila průměrné hodnoty práce (energie), která je potřeba k disekci tepenné stěny:

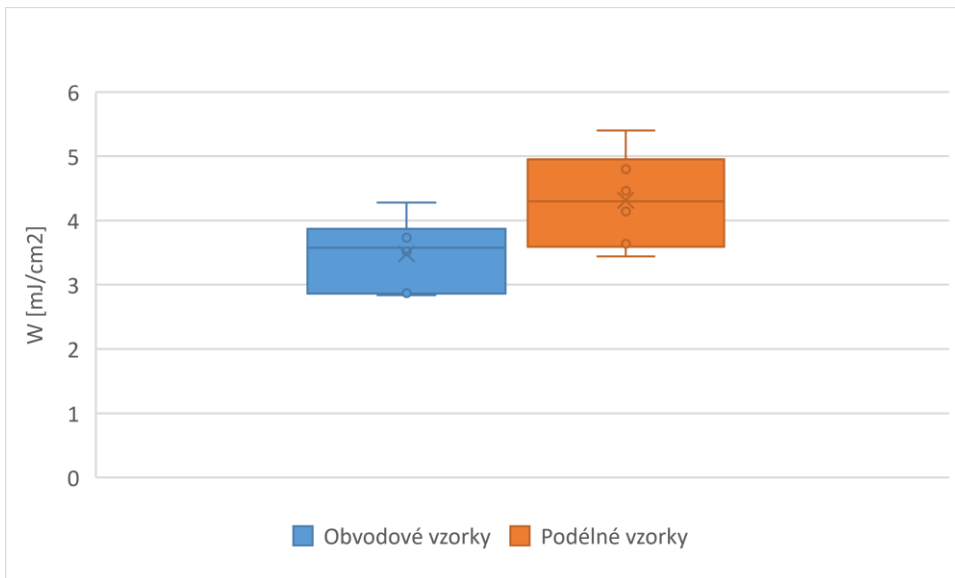
Tabulka 4: Průměrná práce W , která je potřeba k disekci

Vzorky	Podélné vzorky	Obvodové vzorky
	$W \left[\frac{mJ}{cm^2} \right] \pm SD$	$W \left[\frac{mJ}{cm^2} \right] \pm SD$
1	$3,74 \pm 0,36$	$3,11 \pm 0,45$
2	$4,89 \pm 0,48$	$3,84 \pm 0,39$

Dále jsem získané průměrné síly a práce zobrazila pomocí krabicových grafů:



Obrázek 26: Krabicový graf průměrných sil v závislosti na orientaci vzorku



Obrázek 27: Krabicový graf pro delaminační práci v závislosti na orientaci vzorku

3.5. Porovnání s již provedenými experimenty

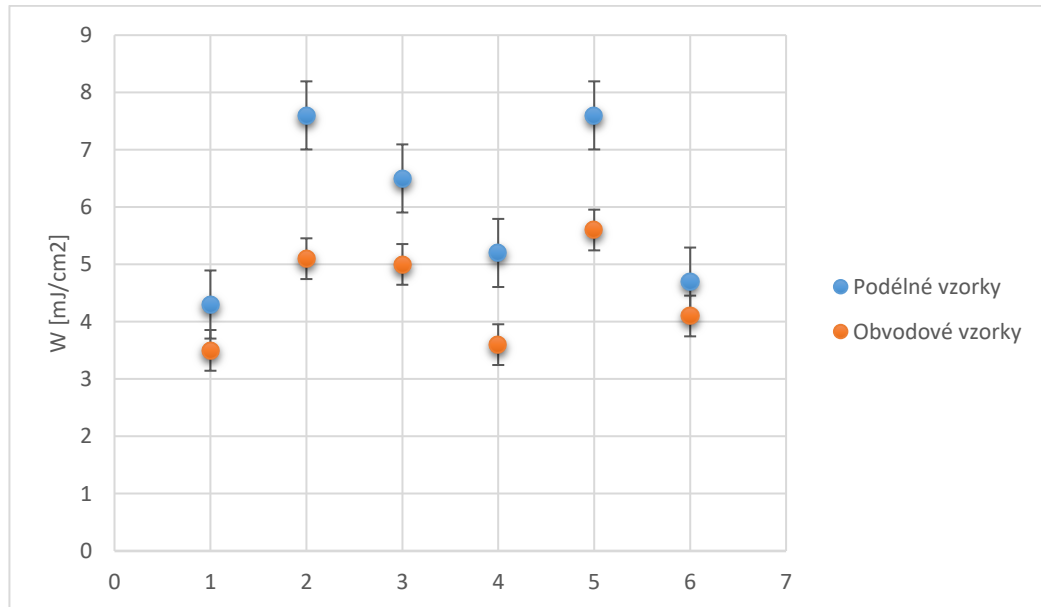
Zde jsem shrnula do tabulky pro porovnání výsledky svého experimentu a experimentů od G. Sommera, M. Kozuň a J. Tonga.

Tabulka 5: Porovnání výsledků s údaji z literatury

Práce	Artérie	Rozhraní	W [mJ/cm ²]	W [mJ/cm ²]
			Podélné ± SD	Obvodové ± SD
Tato práce	Hrudní aorta	Nespecifikované	4,3 ± 0,4	3,5 ± 0,4
G. Sommer	Břišní aorta	M-M	7,6 ± 2,7	5,1 ± 0,6
J. Tong	Krkavice	A-M	6,5 ± 2,7	5,0 ± 1,0
		I-M	5,2 ± 3,1	3,6 ± 0,7
M. Kozuň	Hrudní aorta	A-M	7,6 ± 1,7	5,6 ± 0,9
		I-M	4,7 ± 0,9	4,1 ± 1,0

Jak můžeme vidět z tabulky č. 5 mé hodnoty jsou nižší, než ostatní hodnoty. Při mém měření jsme nerozlišovali rozhraní jako ostatní autoři, což má na výsledky také vliv.

Výsledky jsem porovnávala v grafu s chybovými úsečkami:



Obrázek 28: Bodový graf s chybovými úsečkami

4. ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla popsána obecně oběhová soustava a nemoci oběhové soustavy a podrobněji disekce aorty.

Dále byly provedeny delaminační experimenty se vzorky z lidské hrudní aorty. Experimenty byly prováděny pomocí peelingového delaminačního testu. Výsledky námi provedených experimentů se shodují s výsledky známými z literatury, a to že delaminační pevnost závisí na orientaci vzorku, a tedy menší síla pro šíření trhliny je potřeba ve směru obvodovém. Získané výsledky experimentů mohou být užitečné pro další zkoumání disekce aorty a pomoci celkově zlepšit kardiovaskulární medicínu.

Seznam použité literatury

- [1] *Zpráva o zdraví obyvatel České republiky (2014)* [online]. [cit. 2019-07-20] Dostupné z: <https://www.mzcr.cz/>
- [2] *Zemřelí 2017* [online]. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.uzis.cz/publikace/zemreli-2017>
- [3] Čihák, R., 2016. *Anatomie 3*. Praha: Grada.
- [4] MERKUNOVÁ, Alena a Miroslav OREL. *Anatomie a fyziologie člověka pro humanitní obory*. Praha: Grada, 2008. Psyché (Grada). ISBN 978-80-247-1521-6.
- [5] ČAPEK, Lukáš, Petr HÁJEK a Petr HENYŠ. *Biomechanika člověka*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0367-6.
- [6] *Oběhový systém* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <http://www.fsps.muni.cz/emuni/data/reader/book-3/08.html>
- [7] Horný, L., 2016. *Biomechanika I - Krevní oběh a mechanika cév* [online]. [cit. 2019-07-13] Dostupné z : <http://users.fs.cvut.cz/~hornyluk/files/Biomechanika-krevniho-obehu-a-nahrada-aortalni-chlopne.pdf>
- [8] *Hyperelastic modelling of arterial layers with distributed collagen fibre orientations* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.biomech.tugraz.at/images/pdf/Gasser_et_al-J_R_Soc_Interface-2006.pdf
- [9] *Ústav lékařské biochemie a laboratorní diagnostiky* [online]. [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://ulbld.lf1.cuni.cz/file/394/Atero.pdf>
- [10] *Arterioskleróza – Anamnéza.cz. Portál o zdraví* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://www.anamneza.cz/nemoc/Arterioskleroza-163>
- [11] *Onemocnění hrudní aorty* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.ikem.cz/cs/kardiocentrum/klinika-kardiovaskularni-chirurgie/o-nas/co-u-nas-lecime/onemocneni-hrudni-aorty/a-2428/>
- [12] SILBERNAGL, Stefan a Florian LANG. *Atlas patofyziologie člověka*. Vyd. 1. české. Praha: Grada, 2001. ISBN 80-7169-968-3.
- [13] *Arteriální hypertenze* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.ikem.cz/cs/arterialni-hypertenze/a-435/>
- [14] *Hypotenze (nízký krevní tlak)* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.tlakomery.cz/encyklopedie-krevniho-tlaku/hypotenze>
- [15] *Vejvoda, J., Alan, D., Ošťádal, P., 2005. Disekce aorty* [online]. [cit. 2019-07-02] Dostupné z: <https://www.iakardiologie.cz/pdfs/kar/2005/03/07.pdf>

- [16] Marek, D. a další, 2001. *Aortální disekce. Interní medicína pro praxi [online].*
[cit. 2019-07-02]. Dostupné z:
<https://www.internimedica.cz/pdfs/int/2001/07/06.pdf>
- [17] Petřivý Zdeněk. *Delaminační vlastnosti tepenné stěny. [online].* [cit. 2019-07-03]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/77598?show=full> ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce: doc. Ing Lukáš Horný Ph.D.
- [18] Kozuň, Marta. (2016). *Delamination properties of the human thoracic arterial wall with early stage of atherosclerosis lesions. Journal of Theoretical and Applied Mechanics.* 54. 229-238. 10.15632/jtam-pl.54.1.229. [online]. [cit. 2019-07-11].
- [19] Sommer, Gerhard & Gasser, Thomas & Regitnig, Peter & Auer, Martin & Holzapfel, Gerhard. (2008). *Dissection Properties of the Human Aortic Media: An Experimental Study. Journal of biomechanical engineering.* 130. 021007. 10.1115/1.2898733. [online]. [cit. 2019-07-11]
- [20] Tong, Jianhua & Sommer, Gerhard & Regitnig, Peter & Holzapfel, Gerhard. (2011). *Dissection Properties and Mechanical Strength of Tissue Components in Human Carotid Bifurcations. Annals of biomedical engineering.* 39. 1703-19. 10.1007/s10439-011-0264-y. [online]. [cit. 2019-07-13].