



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ NAPĚTÍ A DEFORMACE
LIDSKÝCH HLASIVEK PŘI NASTAVOVÁNÍ DO
FONAČNÍHO POSTAVENÍ**

COMPUTATIONAL MODELLING OF STRESS AND STRAIN OF THE HUMAN VOCAL FOLDS DURING
SETTING UP TO PHONATION POSITION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Terézia Sádovská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Švancara, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka:	Bc. Terézia Sádovská
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Švancara, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výpočtové modelování napětí a deformace lidských hlasivek při nastavování do fonačního postavení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při nastavování hlasivek do fonačního postavení dochází účinkem pohybu hrtanových chrupavek aktivovaným svalstvem hrtanu k přitažení hlasivek do kontaktu a jejich prodloužení. Analýza tohoto mechanismu je důležitá pro následné modelování samobuzeného kmitání hlasivek a pro pochopení biomechaniky tvorby hlasu pacientů trpících hlasovými poruchami. Cílem práce je vytvořit prostorový výpočtový model hrtanových chrupavek a měkké tkáně hlasivek pro výpočet posuvů a napjatosti hlasivek při nastavování do fonačního postavení.

Cíle diplomové práce:

- 1) Uveďte stručný přehled současných výpočtových modelů funkce lidských hlasivek publikovaných v literatuře.
- 2) Úprava geometrického modelu hrtanových chrupavek (prstencová, štítná a hlasivkové) a měkké tkáně hlasivek a vytvoření sítě konečných prvků.
- 3) Výpočet napjatosti a posuvů tkáně hlasivek při nastavování do fonačního postavení.
- 4) Analýza vlivu vybraných parametrů modelu na pohyb a napjatost hlasivek.

Seznam doporučené literatury:

TITZE, I. R. The Myoelastic-Aerodynamic Theory of Phonation. Denver and Iowa City: National Centre for Voice and Speech, 2006. ISBN 0874141567.

ZIENKIEWICZ, O.C. a R.L. TAYLOR. The Finite Element Method. Oxford: Butterwoth-Heineman, 2011. ISBN 1856176304.

HUNTER, E., I.R. TITZE a F. ALIPOUR. A three-dimensional model of vocal fold abduction/adduction. Journal of the Acoustical Society of America. 2004, roč. 115, č. 4, s. 1747-1759. ISSN 00014966.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Predložená diplomová práca sa zaoberá výpočtovým modelovaním ľudských hlasiviek pri nastavení do fonačného postavenia pomocou metódy konečných prvkov. V práci je stručne popísaná anatómia hrtanu, teórie objasňujúce princíp tvorby hlasu a prehľad doposiaľ publikovaných výpočtových modelov hlasiviek. Súčasťou práce je úprava geometrie hrtanových chrupaviek a mäkkého tkaniva hlasiviek, vytvorenie siete konečných prvkov a implementácia aktívneho napätia hlasivkového svalu. Úloha bola riešená pomocou softvéru Ansys 19.2. Výpočet napätosti a posuvov tkaniva hlasiviek pri nastavení do fonačného postavenia bol prevedený pre 7 variantov, v ktorých boli zapojené hrtanové chrupavky a aktívne napätie svalu v rôznych kombináciach. Nakoniec bol vyhodnotený vplyv jednotlivých chrupaviek a aktívneho napätia svalu na výslednú napätosť a deformácie mäkkých tkanív hlasiviek.

Kľúčové slová

hlasivky, fonačné postavenie, aktivácia svalom, metóda konečných prvkov

Abstract

This master's thesis deals with computational modelling of human vocal folds in phonation position using finite element method. There are described larynx anatomy, voice generation theories and overview of so far published computational models of vocal folds. Next part of the paper deals with a redesign of vocal folds and soft tissues' geometry, creation of finite element mesh and implementation of active stress in thyroarytenoid muscle. The problem was solved using Ansys 19.2 software. Computation of stress and deformation of soft tissues in phonation position has been made for 7 variations with different combination of active cartilages and muscles. Lastly, there was evaluated an effect of different cartilages and active muscle stress to final stress and deformation of soft tissues of vocal folds.

Keywords

vocal folds, phonation position, muscle activation, finite element method

Bibliografická citácia

SÁDOVSKÁ, Terézia. *Výpočtové modelování napětí a deformace lidských hlasivek při nastavování do fonačního postavení* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132759>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Pavel Švancara.

Čestné vyhlásenie

Prehlasujem, že táto práca je mojim dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením pána Ing. Pavla Švancary, PhD. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne 21. mája 2021

.....

Meno a priezvisko

Pod'akovanie

Srdečne ďakujem pánovi Ing. Pavlovi Švancarovi, PhD. za užitočné pripomienky, odborné rady, ochotu a prívetivý prístup pri písaní diplomovej práce.

Obsah

Abstrakt	4
Kľúčové slová	4
Abstract	4
Keywords.....	4
Bibliografická citácia	5
Čestné vyhlásenie	6
Podakovanie.....	7
Úvod	10
Problémová situácia	11
Formulácia problému.....	11
Ciele riešenia problému	11
1 Anatomia hlasového ústrojenstva.....	12
2 Hrtan.....	13
Funkcie hrtanu	13
2.1 Anatomia hrtanu	13
2.2 Hlasivky	15
2.3 Priečne pruhované svalstvo	17
3 Generovanie hlasu	18
3.1 Myo-elasto aerodynamická teória.....	18
3.2 Teória bublín tlakového vzduchu.....	19
4 Prehľad doposiaľ publikovaných modelov hlasiviek	20
5 Výpočtové modelovanie nastavenia hlasiviek do fonačného postavenia.....	25
5.1 Zjednodušený model svalu.....	26
5.1.1 Zaťaženie posuvom plochy	26
5.1.2 Zaťaženie posuvmi v jednotlivých uzloch.....	27
5.1.3 Zaťaženie predpätím.....	28
5.1.4 Izometrická kontrakcia	29
5.2 Model hrtanových chrupaviek a hlasiviek	30
5.2.1 Model geometrie	31
5.2.2 Model materiálu	32
5.2.3 Model kontaktov.....	35
5.2.4 Model siete konečných prvkov	36
5.2.5 Model okrajových podmienok.....	37
5.2.6 Varianty.....	38

5.2.7	Ladenie parametrov	41
6	Výsledky	45
6.1	Variant 1	47
6.2	Variant 2	51
6.3	Variant 3	55
6.4	Variant 4	59
6.5	Variant 5	63
6.6	Variant 6	67
6.7	Variant 7	71
7	Porovnanie výsledkov.....	75
7.1	Deformácie	75
7.2	Napätia	78
8	Záver	81
9	Citované diela.....	83
10	Zoznam použitých symbolov a skratiek	86

Úvod

Neodmysliteľnou súčasťou života človeka je jeho komunikácia. Úlohou komunikácie je výmena informácií, názorov, či pocitov. Najbežnejším prostriedkom komunikácie je hlas. Hlas sa tvorí a formuje v hrtanovej, ústnej a nosnej dutine. Prípadná patológia časti hlasového ústrojenstva, môže spôsobiť zníženie kvality hlasu, prípadne úplnú stratu hlasu a tým aj zmenu schopnosti komunikovať na požadovanej úrovni. To má samozrejme vplyv na úroveň kvality života človeka. Pre posúdenie a liečbu týchto porúch je potrebné poznať mechaniku tvorby hlasu. Pre lepšie pochopenie mechaniky tvorby hlasu a kvantifikáciu jednotlivých charakteristík sa používajú výpočtové modely rôznych častí hlasového ústrojenstva.

Vplyvom pohybu hrtanových chrupaviek pri nastavení do fonačného postavenia sa hlasivky predlžujú, čím vzniká v hlasivkách pasívne napätie. Kontrakcia hlasivkového svalu je realizovaná pôsobením aktívneho napätia (svalového tonusu). Bežne dochádza ku kombinácii týchto dvoch napätí. Výsledná napätosť, deformácia a kontaktný tlak jednotlivých vrstiev hlasiviek sú teda ovplyvňované pohybom chrupaviek, veľkosťou aktívneho napätia a materiálovými parametrami mäkkých tkanív hlasiviek. Napätosť hlasiviek má potom vo vokálnom trakte vplyv na veľkosť základnej frekvencie (výšku tónu) a je dôležitým vstupom do ďalších výpočtových modelov simulujúcich interakciu prúdiaceho vzduchu s kmitaním hlasiviek.

Mojou snahou je vytvoriť výpočtový model, ktorý by čo najviac zodpovedal reálnemu chovaniu hlasiviek. Anatómia hrtanu, štruktúra hlasiviek a princíp generovania ľudského hlasu podľa rôznych teórií je popísaný v úvodnej, rešeršnej časti. Výpočtové modelovanie biologických štruktúr a ich správania je komplexný proces, ktorý zahŕňa veľa typov nelinearit – kontaktné, materiálové, či veľké deformácie. Tieto aspekty výrazne ovplyvňujú konvergenciu úlohy, ale sú aj nevyhnutné pre správne modelovanie biomechaniky tvorby hlasu. Materiálová nelinearita výpočtového modelu spočíva v hyperelastickej a viskoelastickej odozve jednotlivých mäkkých tkanív hlasiviek. Veľké deformácie hlasiviek sú badateľné vo fonačnom postavení, do ktorého sa hlasivky dostávajú vplyvom pohybu hrtanových chrupaviek. Pre čo najhodnovernejší popis napätosti hlasiviek je nutné zohľadniť aj vplyv aktívneho napätia hlasivkového svalu, ktorý predchádzajúci výpočtový model nezahrňuje. Implementácia aktívneho napätia by mala byť jednoduchá a deformácia svalu pod jeho vplyvom by mala zodpovedať reálnej deformácii.

V poslednej časti práce sa venujem analýze výsledných deformácií a napätí pri rôznych variantoch zapojenia určitých hlasiviek, či hlasivkového svalu. Tiež pojednáva o vplyve pohybu daných chrupaviek na výslednú napätosť. Súčasne definuje ako veľmi je napätosť ovplyvnená pri uvážení aktívneho napätia svalu nachádzajúceho sa v tele hlasivky.

Problémová situácia

V predchádzajúcich prácach bol vytvorený výpočtový konečnoprvkový model mäkkého tkaniva hlasiviek a hrtanových chrupaviek pri nastavení do fonačného postavenia pre určenie napätosti a deformácie hlasiviek. V modeli sa neuvažuje s aktívnym napätím v svale (svalovým tonusom), neberie do úvahy hyperelasticitu materiálov mäkkých tkanív, a pri jeho riešení model neumožňoval spočítať deformáciu a napätosť s veľkými deformáciami, čo zanáša do výpočtu určitú chybu.

V tejto práci sa preto budeme zaoberať skvalitnením súčasného modelu a odstránení jeho nedostatkov.

Formulácia problému

Vytvoriť výpočtový model mäkkého tkaniva hlasiviek a hrtanových chrupaviek pre určenie deformácie, napätosti a kontaktného tlaku hlasiviek pri nastavení do fonačného postavenia a analyzovať vplyv aktívneho napätia (svalového tonusu), materiálových parametrov a pohybu jednotlivých chrupaviek na napätosť hlasiviek.

Ciele riešenia problému

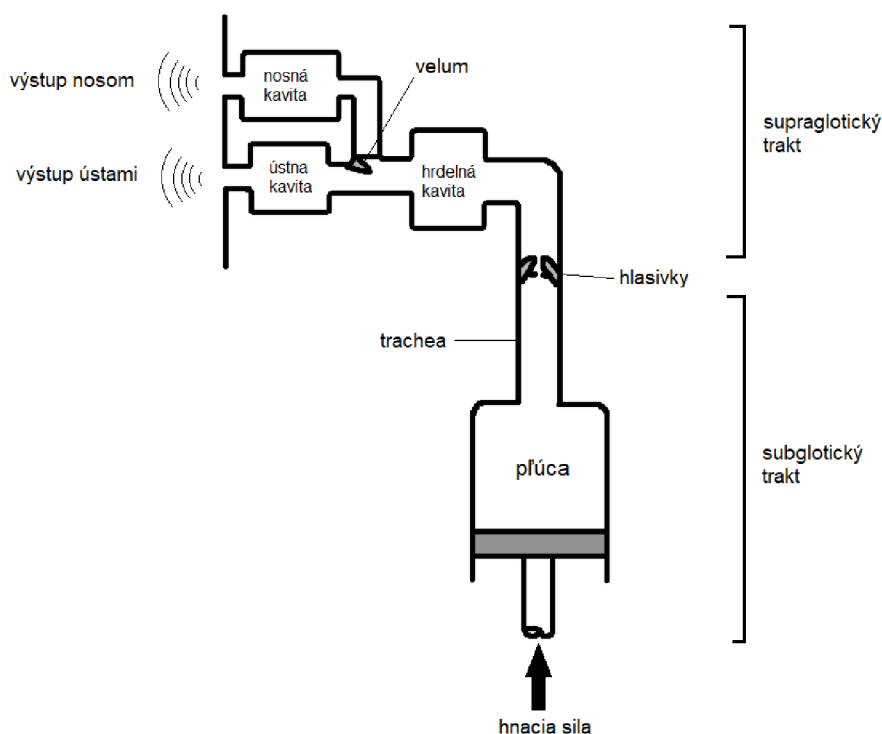
1. Uvedte stručný prehľad súčasných výpočtových modelov funkcie ľudských hlasiviek publikovaných v literatúre.
2. Úprava modelu geometrie hrtanových chrupaviek (prstencová, štítna a hlasivkové) a mäkkého tkaniva hlasiviek a vytvorenie siete konečných prvkov.
3. Výpočet napätosti a posuvov tkaniva hlasiviek pri nastavení do fonačného postavenia.
4. Analýza vplyvu vybraných parametrov modelu na pohyb a napätosť hlasiviek.

1 Anatómia hlasového ústrojenstva

Generovaním hlasu a zvukov z hľadiska anatómie hlasového ústrojenstva sa zaoberá artikulačná fonetika. Súčasťou hlasového ústrojenstva sú vokálne orgány, v ktorých sa generuje ľudský hlas prechodom vdýchnutého alebo vydýchnutého vzduchu. Vzduch počas prúdenia naráža na rôzne prekážky hlasového ústrojenstva, čím sa modifikujú generované zvuky. Hlasové ústrojenstvo sa nachádza v dýchacom trakte, ktorý delia hlasivky na dve časti

1. subglotický trakt,
2. supraglotický trakt,

podľa toho, či je trakt nad alebo pod hlasivkami. V subglotickom trakte sa nachádza zdroj tlaku – pľúca. Pľúca dodávajú vzduch a energiu. Supraglotický trakt býva označovaný aj ako vokálny trakt. Začína hlasivkami na výstupe z hrtanu a končí perami. Na formovaní hlasu sa podieľa aj nosná dutina (Obr. 1). Vibráciami hlasiviek sa v hrtane generuje zdrojový hlas, ktorý sa postupne prechodom celého vokálneho traktu modeluje na ľudský (Mišun, 2010).



Obr. 1 Schéma hlasového ústrojenstva, prevzaté a upravené z (Mišun, 2010)

2 Hrtan

Hrtan („*Larynx*“) je súčasťou dýchacej sústavy človeka. Zastáva viacero funkcií – vytvára priestor pre prúdenie dýchacích plynov, bráni vniknutiu potravy do dýchacieho systému a zároveň sa podieľa na generovaní zdrojového hlasu.

Informácie v tomto odseku sú prevzaté z (Mišun, 2010) a (Štefanička, 2018).

Funkcie hrtanu

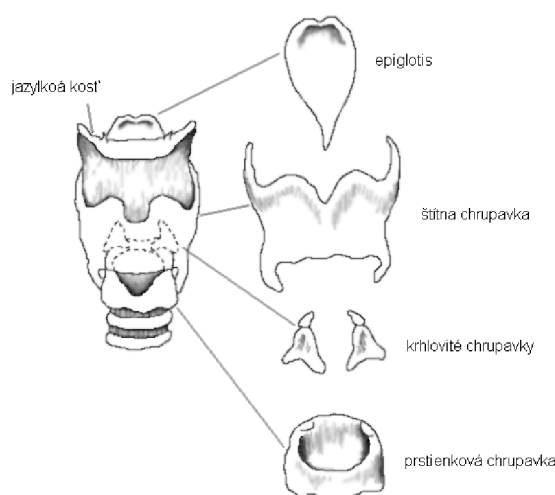
- fonačná,
- respiračná,
- hltacia.

2.1 Anatómia hrtanu

Anatómia hrtanu je prispôbená jeho funkciám. Má trubicovitý, mierne lievikový tvar so svalovo-chrupavkovou štruktúrou. Je dlhý 5 – 8 cm, zavesený na jazyčke, čo umožňuje jeho pohyblivosť zvislo, ale aj vodorovne. Tvorí ho 9 chrupaviek, 3 párové, 3 nepárové (Obr. 2), navzájom prepojené kĺbmi, šlachami a svalmi. Pohyblivé spojenie chrupaviek umožňuje ich vysoko špecifický pohyb potrebný pri fonácii. Jediná kosť v hrtane je jazyčka. Prehľad jednotlivých chrupaviek je zapísaný v Tabuľke 1

Tabuľka 1 Chrupavky hrtana, prevzaté z (Štefanička, 2018)

	SLOVENSKÝ NÁZOV	LATINSKÝ NÁZOV
NEPÁROVÉ	Štítna chrupavka	Cartilago thyroidea
	Prstienková chrupavka	Cartilago cricoidea
	Hrtanová príchlopka	Cartilago epiglottica
PÁROVÉ	Krhlovité chrupavky	Cartilago arytaenoida
	d ďalšie menšie chrupavky	napr. cartilago corniculata, cartilago cuneiformis



Obr. 2 Hrtan s príslušnými chrupavkami, prevzaté a upravené z (Mišun, 2010)

Štítna chrupavka je najväčšia. Na prednej strane krku tvorí vyvýšeninu, nápadnejšiu u mužov, nazývanú ohryzok alebo Adamovo jablko. Na zadnom okraji vystupujú horné a dolné rohy. Na dolných rohoch sa kĺbovo pripája na prstienkovú chrupavku.

Základnou chrupavkou hrtanu je prstienková chrupavka, ktorá je pomenovaná podľa svojho tvaru pečatného prsteňa smerujúceho obručou dopredu. Na zadnej strane sa nachádzajú kĺbové plochy pre spojenie s krhlovitými chrupavkami. Ich spojenie umožňuje zložité pohyby v troch smeroch.

Krhlovité chrupavky sú párové chrupavky v tvare trojbokého ihlanu, s ktorého základňou sú spojené s prstienkovou chrupavkou.

Hrtanová príchlopka „*Epiglottis*“, je jediná elastická chrupavka na rozdiel od zvyšných hyalinných. Je tvorená listom a stopkou sa upína na vnútornú časť štítnej chrupavky.

Pohyby jednotlivých chrupaviek sú ovládané svalmi, ktoré sa delia na vonkajšie a vnútorné. Vonkajšie svaly upevňujú polohu hrtanu jeho spojením k jazykovej a hrudnej kosti. Otváranie a zatváranie hlasivkovej štrbiny „*Glottis*“ zabezpečujú vnútorné fonačné svaly, ktoré sa podľa ich činnosti delia do troch skupín

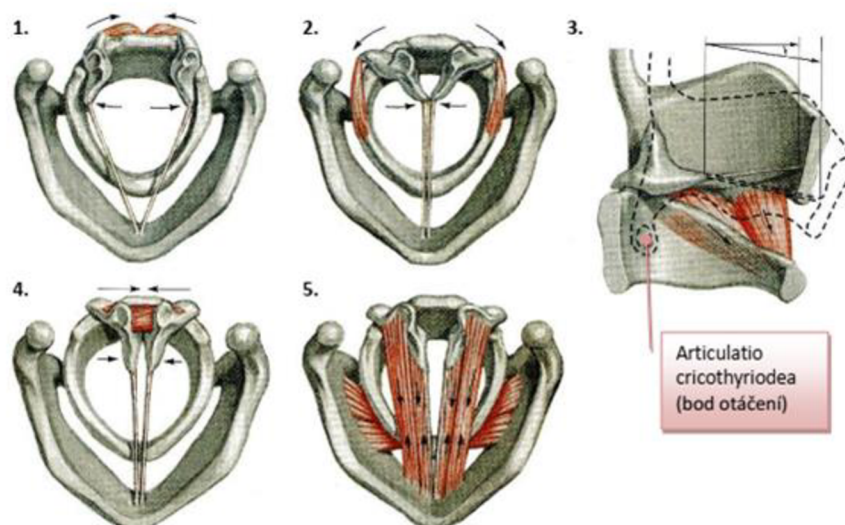
- Adduktory – zužujú hlasivkovú štrbinu; LCA, TA, IA,
- Abduktory – rozširujú hlasivkovú štrbinu; PCA,
- Napínače hlasiviek – CT.

V Tabuľke 2 je prehľad jednotlivých svalov.

Tabuľka 2 Svaly hrtana, prevzaté z (Štefanička, 2018)

SLOVENSKÝ NÁZOV	LATINSKÝ NÁZOV	OZNAČENIE	SPOJENIE
Vonkajší prstecovo-hlasivkový sval	Musculus cricoarytenoideus lateralis	LCA	Horný okraj prstienkovej chrupavky a svalové výbežky hlasivkových chrupaviek
Štítno-hlasivkový sval	Musculus thyroarytenoideus	TA	Štítna chrupavka a hlasivková
Vnútorný hlasivkový sval	musculus interarytaenoideus	IA	Hlasivkové chrupavky
Zadný prestencovo-hlasivkový sval	Musculus cricoarytenoideus posterior	PCA	Prstienková chrupavka a hlasivková na zadnej strane
Prstencovo-štítny sval	Musculus cricothyroideus	CT	Prstienková chrupavka a štítna

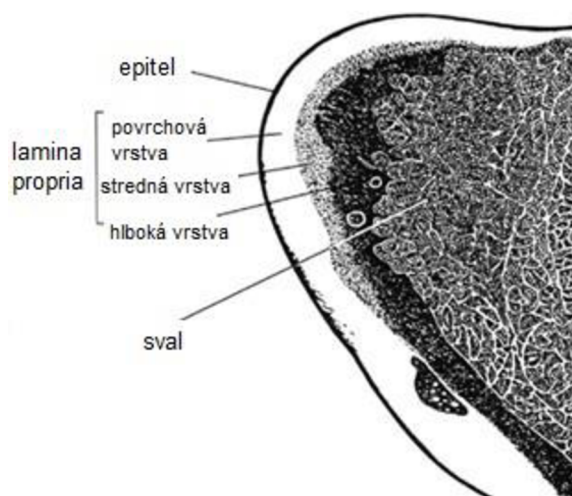
Na Obr. 3 sú zobrazené tvary a polohy jednotlivých svalov.



Obr. 3 Funkcie hrtanových svalov; 1. funkcia PCA, abdukcia hlasiviek; 2. funkcia LCA, addukcia hlasiviek; 3. funkcia CT, predĺženie hlasiviek; 4. funkcia TA, addukcia hlasiviek, 5. funkcia TA, skrátenie hlasiviek. Prevzaté z (Netter, 2005)

2.2 Hlasivky

Zdrojom ľudského hlasu sú spolu s hrtanom aj hlasivky. Nachádzajú sa v najužšej časti vzduchovej cesty pod falošnými hlasivkami. Hlasivky sú tvorené celkovo piatimi vrstvami (Obr. 4). Na povrchu sa nachádza vrstva tvorená plochými epitelovými bunkami, hrubá asi 0,05 až 0,1 mm. Táto vrstva obaluje jemné, takmer tekutinové tkanivo, podobne ako balón naplnený vodou. Medzi epitelom a svalstvom sa nachádza neväzivové tkanivo - lamina propria, ktoré sa rozdeľuje na tri časti. Horná vrstva je tvorená elastínovými vláknami obklopenými intersticiálnou kvapalinou. Strednú vrstvu tvoria elastínové a kolagénové vlákna. Tretia, hlboká vrstva hlasiviek je spolu so strednou vrstvou hrubá 1 až 2 mm. Najobjemnejšou časťou hlasiviek je hlasivkovo-štitný sval (Mišun, 2010).



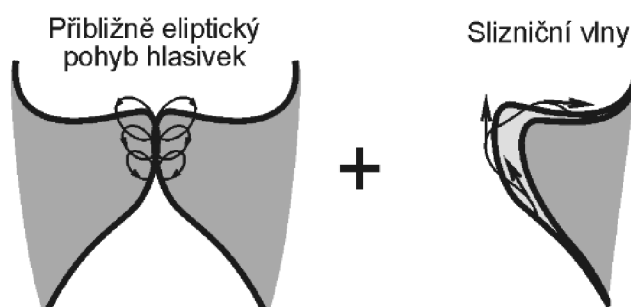
Obr. 4 Štruktúra hlasiviek, prevzaté a upravené z (Hirano, 1986)

Pri modelovaní hlasiviek sa zvyknú hlasivky zjednodušovať a niektoré vrstvy zlučovať (Tabuľka 3).

Tabuľka 3 Používané zjednodušené schémy vrstiev hlasiviek (Švec, 1996)

TROJVRSTVOVÁ SCHÉMA	PÄŤVRSTVOVÁ SCHÉMA	DVOJVRSTVOVÁ SCHÉMA
Sliznica	Epitel Povrchová vrstva laminy propria	Obal
Väz	Stredná vrstva laminy propria Hlboká vrstva laminy propria	Telo
Sval	Sval	

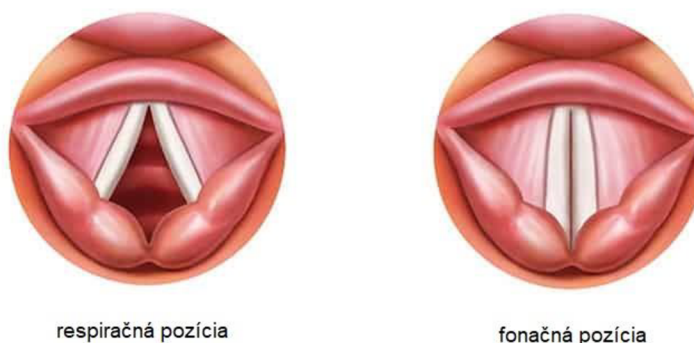
Tvar, rozloženie hmotnosti a pružnosť tkaniva hlasiviek sú dané evolučným vývojom, kedy sa z nich postupne stal autonómny mechanický systém na generovanie pulzov zdrojového hlasu. Pre ich správnu funkciu je potrebné zaistiť rezonančné frekvencie podľa vôle človeka a vhodné štruktúrne módy. Hlasivky konajú dva základné pohyby (Obr. 5) – eliptický pohyb, podľa približnej trajektórie pohybu hlasiviek pri kmitaní a prechádza nimi slizničná vlna, ktorá je významná pre udržanie kmitania hlasiviek. Slizničná vlna vzniká vplyvom interakcie so vzduchom a pohybuje sa po hlasivkách odspodu nahor (Mišun, 2010).



Obr. 5 Rozloženie celkového pohybu hlasiviek, švec 1996

Hlasivky zastávajú dve základné pozície (Obr. 6)

- Fonačnú – pri rozprávaní, hlasivky sú pri sebe a kmitajú – fonačné nastavenia,
- Respiračnú – pri dýchaní, hlasivky sú široko od seba.



Obr. 6 Základné polohy hlasiviek, prevzaté a upravené z (Woo)

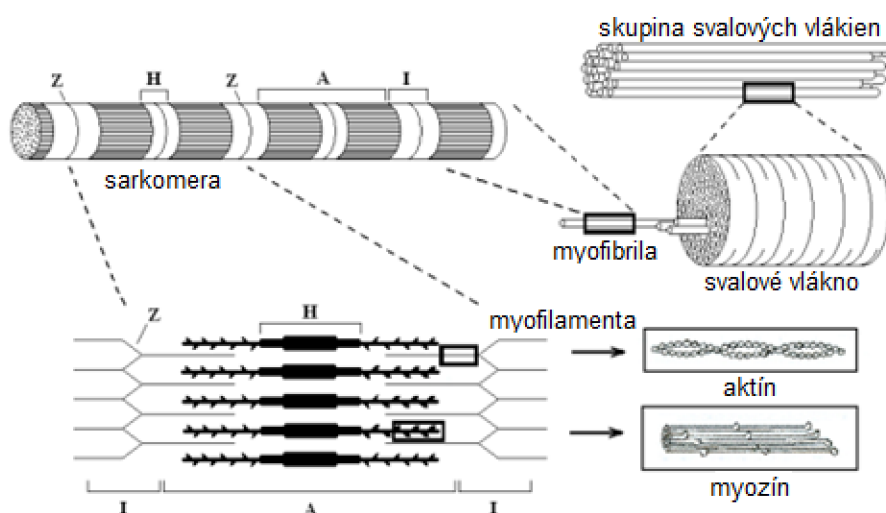
Hlasivky prechádzajú z respiračnej pozície do fonačnej pôsobením svalov a vo výslednom fonačnom postavení v nich vzniká dvojaké napätie:

- *Aktívne napätie hlasiviek* je spôsobené aktívnym napätím (svalovým tonusom) hlasivkového svalu (TA) a spôsobuje skrátenie hlasivky.
- *Pasívne napätie hlasiviek* spôsobuje predĺženie hlasiviek rotáciou štítnej chrupavky a posuvom hlasivkových chrupaviek. Pasívne napätie hlasiviek je napätie bez aktivity hlasivkového svalu (Švec, 1996).

2.3 Priečne pruhované svalstvo

Štruktúru hlasiviek tvorí z veľkej časti svalstvo a jeho aktivita má významný vplyv na napätosť a pohyb hlasiviek, preto si priblížime jeho štruktúru a princíp fungovania.

Základnou jednotkou priečne pruhovaného svalstva sú kontraktilné vlákna (myofilamenty) – aktín a myozín, ktoré svojím usporiadaním do opakujúcich sa podjednotiek tvoria sarkoméry. Sarkoméry sú funkčné jednotky a sú od seba oddelené „Z“ líniami. Zväzok aktínového a myozínového vlákna sa nazýva myofibrila. Myofibrily sa spájajú do svalových vlákien, ktoré sa združujú do svalových snopcov (Obr. 7). Svalové vlákna sú mnohoadrové svalové bunky (Polák, 2020).



Obr. 7 Štruktúra svalu, prevzaté a upravené z (Karas, 1990)

Základnou vlastnosťou svalu je jeho zmrštenie – kontrakcia, vyvolaná nervovými vzruchmi z centrálného nervového systému končiacimi na motorických platničkách. Motorické platničky sú úseky neurónov vytvárajúce členité spojenie nervov so svalom. Keď sa nervový vzruch dostane k svalu, dôjde k depolarizácii sarkomery, čo vyvolá kĺzavý pohyb aktínových vlákien a ich zasunutie medzi myozínové vlákna. Tým sa sarkomera skráti a následne sa skráti celý sval (Polák, 2020).

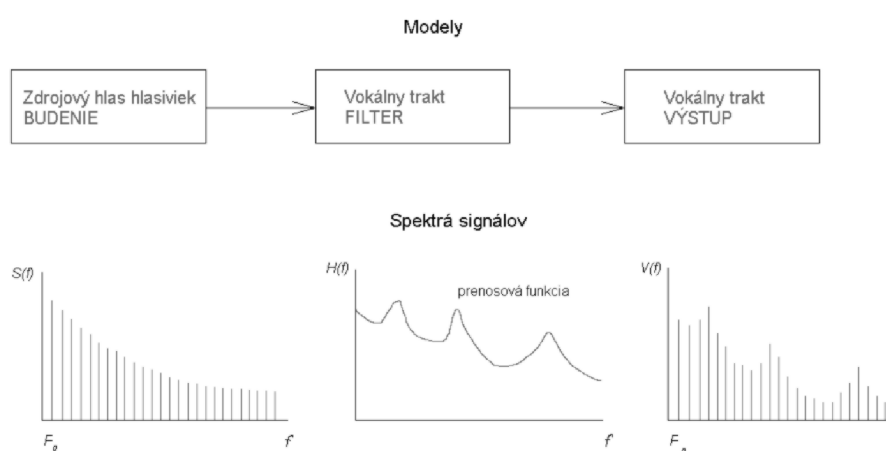
Svaly sú aj v klude udržiavané v miernej kontrakcii. Príčinou je svalové napätie – tonus. Tonus má dve zložky

1. Napätie spôsobené elasticitou, resp. tuhosťou nekontraktálnych zložiek.
2. Aktívne svalové napätie – mierna izometrická kontrakcia svalu riadená reflexne (Fyziológia svalstva, 2018).

3 Generovanie hlasu

Ľudský hlas sa generuje v troch fyziologických procesoch – dýchanie, fonácia a artikulácia. Dýchanie je zdrojom výkonu a tlaku vzduchu z pľúc. Pri fonácii vzniká zdrojový hlas so základným tónom – základnou frekvenciou f_0 . Fonácia prebieha v hrtane pôsobením hlasiviek. Ak hlasivky pri fonácii vibrujú, vzniká znelý zvuk, naopak ak nevibrujú vzniká neznelý zvuk, šepot (Mišun, 2010).

Najrozšírenejšia teória vzniku hlasu je teória zdroj-filter (Obr. 8). Ako prvý ju spomenul Muller v roku 1848 a neskôr ju Fant v roku 1960 rozšíril o kompletný matematický aparát. Táto teória kombinuje spektrum zdrojového hlasu a jeho filtráciu prenosovej funkcie vokálneho traktu. Výstupom je spektrum pôvodného zdrojového hlasu upravené na spektrum príslušnej samohlásky (Mišun, 2010).



Obr. 8 Model zdroj-filter pre generovanie samohlások, prevzaté a upravené z (Mišun, 2010)

3.1 Myo-elasto aerodynamická teória

Túto teóriu ako prví naznačili Helmholtz a Muller už v 19. storočí, neskôr ju Berg v roku 1950 upravil. Vychádza z toho, že aerodynamika vzduchu prúdiaceho cez hlasivky vyvolá vybudenie pohybu hlasiviek, tvorbu akustických vln a tým aj vznik zdrojového hlasu. Z tejto teórie vyplýva, že vibračný proces sa skladá zo vzájomného pôsobenia dvoch síl, subglotického tlaku, ktorý spôsobuje oddialenie hlasiviek – abdukciu a pôsobenie Bernoulliho efektu, ktorý má sací charakter a hlasivky sa k sebe približujú – addukcia.

Teória má dve časti myo-elastickú a aerodynamickú. Myo-elastická časť popisuje vplyv zmeny pružnosti a napätia hlasiviek na zmenu frekvencie. Keď sa hlasivky skrátia, majú teda nižšiu tuhosť a kmitajú nižšou frekvenciou. Naopak pri ich predĺžení majú vyššiu tuhosť a kmitajú vyššou frekvenciou. Predlžovanie a skracovanie hlasiviek, ako aj napätie v nich, sú regulované svalmi. Napnuté hlasivky kmitajú rýchlejšie ako uvoľnené. Oscilácie sa vybudia, ak je subglotický tlak vzduchu väčší ako pružný odpor hlasiviek. Vybudenými osciláciami sa následne generujú akustické vlny, ktoré sa prechodom cez glotis dostávajú do supraglotického traktu. Tieto akustické vlny sú pôvodcom zdrojového hlasu.

Aerodynamická časť hovorí, že prúdiaci vzduch z pľúc je hnacou silou vibrácií hlasiviek a nie svalovina (podstata pohybu hlasiviek bola objasnená až neskôr). Ďalšia sila pôsobiaca pri vzniku reči vzniká vzájomným odrážaním sa hlasiviek pri ich vzájomnom dotyku. Pri zvýšení intenzity hlasu sa zvyšuje aj prúd vzduchu a odpor hlasiviek. Na popis prúdenia vzduchu sa používa Bernoulliho rovnica, prípadne Navier-Stokesove rovnice. Základnou charakteristikou je hlasivkový prúd, ktorý vyjadruje množstvo vzduchu, ktoré prejde medzerou glottis v čase počas každej periódy fonácie.

Proces fonácie podľa myo-elastickej teórie prebieha z fonačnej polohy. Hlasivky uzatvárajú hlasivkovú štrbinu, zvýšením subglotického tlaku pod nimi dochádza k ich oddialeniu a prechodu vzduchu zo subglotického priestoru do supraglotického. Vzduch prechádzajúci štrbinou vyvolá nasávací Bernoulliho efekt, ktorý spôsobí vrátenie hlasiviek do fonačnej polohy od seba. Celý cyklus sa následne opakuje (Mišun, 2010).

3.2 Teória bublín tlakového vzduchu

Keďže iné teórie sú plné nejasností, napríklad vznik Bernoulliho podtlaku, na ÚMTMB FSI VUT v Brne je vyvíjaná nová teória na ich objasnenie, ktorá je pomenovaná podľa jej podstaty generovania zdrojového hlasu – princíp bublín tlakového vzduchu. Akustické vlny vznikajú expanziou vzduchových bublín.

Budiaca sila hlasiviek je daná vyšším subglotickým tlakom vzduchu, ktorý sa mení podľa zmeny hlasivkovej štrbiny. Vibrujúce hlasivky prepúšťajú bubliny tlakového vzduchu do supraglotického priestoru, kde expandujú a tým vzniká zdrojový hlas. Posun vzduchovej bubliny umožňuje časovo nesynchronné otváranie a zatváranie spodnej, resp. hornej časti hlasiviek, čím sa prúd vzduchu delí na tlakové bubliny. Pri fonácií pôsobí na hlasivky subglotický tlak, pružné sily svalov a zotrvačné sily hlasiviek. Hnacou silou hlasiviek pri fonácií je tlakový vzduch v subglotickom priestore, ktorý je vždy vyšší ako v supraglotickom. Zdrojový hlas je definovaný dvomi parametrami – strednou hodnotou subglotického tlaku a výškou základného tónu. Oba parametre vie človek vedome ovládať.

Proces fonácie podľa teórie bublín tlakového vzduchu začína vo fonačnom postavení, kedy sú hlasivky pri sebe. Tlaková bublina v subglotickom priestore sa tlačí medzi hlasivky, tým sa začne rozvíjať spodná časť hlasiviek. Bublina tak postupuje smerom nahor a otvára hornú časť hlasiviek a je vytlačená do supraglotického priestoru, kde expanduje a generuje sa zdrojový hlas. Ďalej dochádza k postupnému uzatváraniu hlasivkovej štrbiny odspodu nahor a hlasivky sa dostávajú do pôvodného fonačného postavenia.

Nad hlasivkami dostávame periodický priebeh tlakového vzduchu so spojitým spektrom bez náhodných porúch. Pri fonácií nahlas tak dochádza k zmene subglotického tlaku na akustický tlak v supraglotickej oblasti a jeho amplitúda je daná rozdielmi tlakov nad a pod hlasivkami. Ak sa počas fonácie medzera glottis nezatvára, je amplitúda akustického tlaku nižšia. Generovanie zdrojového hlasu pomocou bublín tlakového vzduchu bolo overené aj experimentálne (Mišun, 2010).

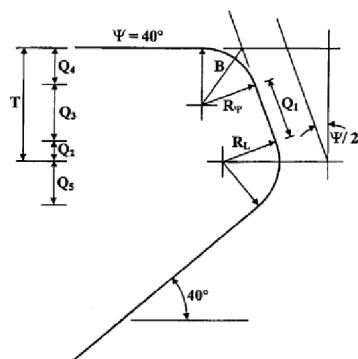
4 Prehľad doposiaľ publikovaných modelov hlasiviek

Pri riešení statických a dynamických vlastností hlasiviek pri fonačnom postavení je potrebné hlasivky modelovať tak, aby sa model čo najviac zhodoval s reálnou odozvou a zároveň ponúkol zjednodušenie komplikovaných mäkkých tkanív. Autori modelujú hlasivky buď ako konečno-prvkové, alebo ako spojité modely, prípadne matematicky. Definujú pohyb jednotlivých hrtanových chrupaviek, ktorým sa hlasivky dostávajú do fonačného postavenia a zavádzajú rôzne konštitutívne vzťahy pre simuláciu aktivácie príslušných svalov. V tejto kapitole sú ďalej uvedené kľúčové štúdie pre túto prácu.

V jednej z najnovších štúdií z tejto problematiky sa Palaparthi (Palaparthi, 2019) zaoberá deformáciou a napätím pôsobiacim v hlasivkách pri fonačnom postavení. Hlasivky modeluje troj-vrstvovým konečnoprvkovým modelom s vláknovo-gélovitou štruktúrou a do fonačného postavenia sa dostávajú aktiváciou príslušných svalov. Veľkú rolu zohrávajú najmä CT a TA svaly, ktoré svojou aktiváciou ovplyvňujú frekvenciu kmitania hlasiviek a tlak pôsobiaci medzi hlasivkami. Špeciálny vláknovo-gélový model kombinuje viskoelastický modifikovaný Kelvinov model ako základnú gélovú hmotu a smerové vlákna zat'azené ťahom medzi jednotlivými vrstvami – lamina propria, ligament a sval. Hlasivku rozdeľuje na 15 rezov rovnobežných s frontálnou rovinou tvorených sieťou trojuholníkových prvkov. Prvkom bol pridelený nestlačiteľný priečne izotropný materiál, vlastnosti gélu sú vyjadrené priečnym modulom v šmyku a viskozitou, vlastnosti vlákien sú určené ekvivalentným modulom v šmyku, ktorý vychádza z pasívneho napätia pôsobiaceho v hlasivke. Záver štúdie sumarizuje závislosti medzi aktiváciou svalov a parametrami postavenia – pri vzrastajúcej aktivácii CT svalu, narastá aj dĺžka hlasivky a napätia vo všetkých vrstvách, pri rastúcej TA aktivácii rastie napätie pôsobiace v svale, ale napätia v lamine propria a ligamente klesajú, ako aj dĺžka hlasivky.

Alipour a kol. v svojej štúdií (Alipour, 2011) ponúka prehľad vtedy aktuálneho stavu matematických modelov simulujúcich proces tvorby ľudskej reči a ich kritickú rozpravu. Popisuje matematické modely, ktoré rozdeľujú tkanivo hlasivky na menšie časti hmotných bodov spojené pružinkami. Podľa toho, na koľko častí je hlasivka rozdelená, vznikajú modely s jedno, dvoj alebo viac stupňami voľnosti. Ďalej popisuje modely založené na parciálnych diferenciálnych rovniciach, ktoré určujú proces tvorby hlasu v priestore a aj v čase. Tiež popisuje simuláciu prúdenia na dvoj a trojrozmerných modeloch, z akustického a štruktúrneho hľadiska. Nakoniec porovnáva 19 štúdií z hľadiska použitej geometrie (najčastejšie Titze alebo M5), okrajových podmienok, zaťaženia a materiálov.

Scherer a kol. v rámci štúdie (Scherer, 2001), ktorá sa zaoberá prúdením vzduchu vnútri hrtanu, pri prechode hlasivkovou štrbinou, vytvorili model hrtanu z plexiskla. V tomto modeli sú hlasivky vymodelované podľa geometrie modelu M5 (Obr. 9).



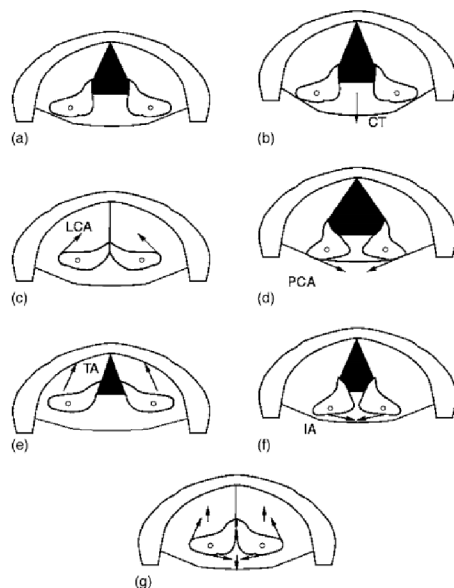
General vocal fold surface design equations :

$$\begin{aligned}
 R_o &= 0.0987 \text{ cm} & T &= 0.3 \text{ cm} & -40^\circ \leq \Psi \leq 40^\circ \\
 R_\Psi &= R_o / (1 - \sin(\Psi/2)) & R_L &= R_{40} = T/2 \\
 B &= \sqrt{2} R_\Psi / \sqrt{1 + \sin(\Psi/2)} \\
 &= R_o \sec(\Psi/2) / \sqrt{(1 - \sin(\Psi/2)) / 2} \\
 Q_1 &= (T - R_\Psi) \sec(\Psi/2) + (R_\Psi - R_L) \tan(\Psi/2) \\
 &= (T - R_o - R_L \sin(\Psi/2)) \sec(\Psi/2) \\
 Q_2 &= R_L \sin(\Psi/2) & Q_3 &= Q_1 \cos(\Psi/2) \\
 Q_4 &= R_o & Q_5 &= R_L \sin 50^\circ
 \end{aligned}$$

Obr. 9 Schematický náčrt hlasivky pre model M5, prevzaté z (Scherer, 2001)

Tlak vzduchu sa na povrchu hlasivky správa ako vonkajšia budiaca sila hlasiviek počas fonácie. Tlak pôsobiaci na povrch hlasivky má významný vplyv na jej pohyb. Tlaky pozdĺž hlasivkovej štrbiny boli nerovnomerné pre oba prípady – symetrický aj nesymetrický. Výsledky pre symetrický prípad poukazujú, že počas fonácie môžu vzniknúť asymetrické tlaky prispievajúce k normálnym hodnotám chvenia. V prípade šikmej štrbiny môžu asymetrické tlaky prispievať k fázovým rozdielom medzi hlasivkami.

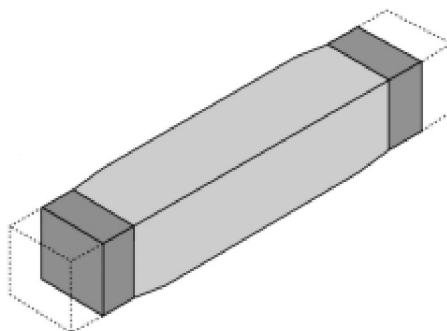
Titze a kol. sa v článku (Titze, 2007) zaoberajú určením síl a momentov, potrebných na popisovanie komplexného trojrozmerného pohybu hlasiviek do efektívneho dvojrozmerného pomocou posuvu a rotácie hrtanových chrupaviek. Práve pohyby medzi chrupavkami definujú postavenie hlasiviek. Postavenie hlasiviek bolo modelované aktiváciou piatich hrtanových svalov – cricothyroid (CT), thyroarytenoid (TA), lateral cricoarytenoid (LCA), posterior cricoarytenoid (PCA) a interarytenoid (IA) a to izolovane aj kombinovane. Následne bolo špecifikovaných 7 základných postavení hlasiviek (Obr. 10).



Obr. 10 Dvojrozmerné postavenie hlasivkovej chrupavky so špecifikovanou svalovou aktiváciou. a) posmrtné, b) 100% CT, c) 100% LCA, d) 100% PCA, e) 100% TA, f) 100% IA a g) 20% CT, 50% LCA, 0% PCA, 20% TA, 90% IA. Prevzaté z (Titze, 2007)

Pre určenie správneho fonačného postavenia bol biomechanický model porovnaný so skutočnými hlasivkami psa aj človeka. Táto štúdia viedla k prvému úspešnému pokusu simulovať reč pomocou EMG signálov ako vstup do biomechanického modelu hlasivky a záveru, že je možné použiť 2D model postavenia hlasiviek, založený iba na mechanike „efektívnej rotácie a posuvu“ prstencovej chrupavky a kĺbu (CAJ) a kontrakcie 5 hrtanových svalov na simuláciu reči.

Cieľom práce (Hunter, 2004) Huntera a kol. bolo vytvoriť trojrozmerný model na simuláciu dynamiky hlasivky pri abdukcii a addukcii. Model je tvorený konečnými prvkami s takmer nestlačiteľným materiálom (Poissonov pomer $\mu = 0,47$). Materiál svalových vlákien ligamentu a TA svalu je uvažovaný ako vláknito-gélový kompozit, vytvorený superpozíciou vláknových charakteristík na izotropné konečné prvky. Vlákna svalu pri zaťažení vyvolajú nelineárnu napäťovo-deformačnú odozvu. Sval bol najskôr vymodelovaný ako malý kváder pozostávajúci z dvoch rôznych materiálov – chrupaviek a svalového tkaniva. Do uzlov tohto kvádra boli aplikované sily, ktoré simulovali kontrakciu svalu a dochádzalo k vydutiu poddajnejšieho materiálu (Obr. 11).



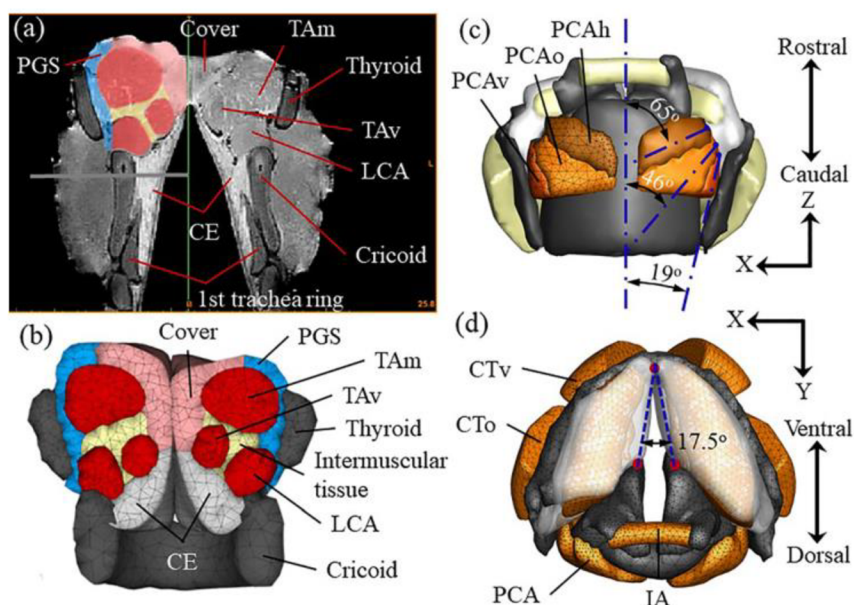
Obr. 11 Kontrakcia modelu TA svalu s chrupavkami na koncoch, východisková pozícia zobrazená bodkovanou čiarou. Prevzaté z (Hunter, 2004)

Následne boli tieto poznatky aplikované do globálneho pohybu hlasiviek. Autori tiež, pre presnejšie popísanie kontrakcie svalu, doplnili výpočet o ďalšie konštitutívne vzťahy zahrňujúce nové veličiny, napr. aktívne napätie v svale, axiálne pasívne napätie.

Štúdia (Storck, 2011) demonštruje možnú analýzu pohybu hlasivkových chrupaviek pomocou vektorovej analýzy a vizualizáciu určitej pozície hlasivkových chrupaviek v rôznych fázach pohybu obrazovou analýzou. Vzorky hrtanov mŕtvych ľudí s chrupavkami v dvoch rôznych pozíciách – respiračnej a fonačnej boli naskenované počítačovou tomografiou s vysokým rozlíšením. Fonačná pozícia predstavuje uzavretú hlasivkovú štrbinu a bola simulovaná kontrakciou laterálnej časti TA a CA svalu, respiračná predstavuje otvorenú štrbinu a vzniká kontrakciou posterior časti CA svalu. Vzniknuté 2D obrázky v oboch pozíciách boli zložené do 3D obrazu, ktorý bol integrovaný do súradnicového systému. Na takto pripravenom obraze sa spravila vektorová analýza priestorovej trajektórie. Výsledkom bolo, že pohyb z respiračnej

pozície má tri zložky – kolísanie dnu okolo CAJ, kĺzanie vpred pozdĺž CAJ a rotáciu dnu okolo virtuálnej osi kolmej na osu CAJ.

V štúdií Genga a kol. (Geng, 2020) autori vytvorili veľmi presný trojrozmerný spojitý model hrdla psa pre simuláciu postavenia hlasiviek. Realistickú anatómiu dosiahli vytvorením každého svalu a chrupavky zo snímkov magnetickej rezonancie a mechaniku svalov modelovali použitím konečných prvkov. Výsledky ukázali, že ide o realizovateľný komplexný realistický model hrtanu (Obr. 12). Nepohyblivým telesom je prstencová chrupavka. Pohyb CAJ je uvažovaný ako kolísavo-kĺzavý a svaly sú tvorené vláknovo-gélovitým materiálom. TA sval bol tvorený konečnými prvkami, zatiaľ čo ostatné svaly - LCA, IA, PCA, boli aplikované ako bodové sily. Vo svalovom tkanive vystupuje ako pasívne napätie, tak aj aktívne. Pasívne materiálové charakteristiky boli modelované použitím materiálov s vláknovou výstužou a aktívne napätie použitím prvkov založených na 1D Hillovom modeli.

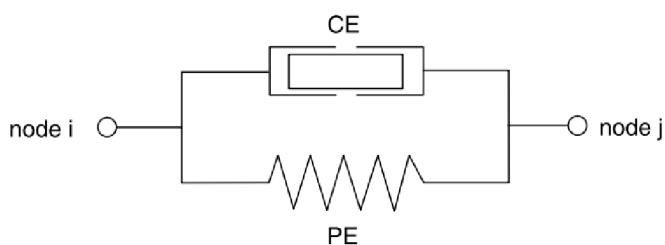


Obr. 12 rekonštrukcia geometrie psieho hrtanu z MRI snímkov; a) MRI snímok, b) vnútorná štruktúra rekonštruovaného modelu so sieťou, c) pohľad posterior, d) pohľad zhora. Prevzaté z (Geng, 2020)

Glen (Farley, 1996) vytvoril zjednodušený matematický model hlasiviek založený na biomechanických princípoch. Model obsahuje štyri chrupavky, šesť svalov a väzy. Výstupom je poloha jednotlivých chrupaviek v statickej rovnováhe a vybudená frekvencia hlasiviek f_0 . Pohyb jednotlivých chrupaviek modeluje aktiváciou príslušných svalov. Prstienkovú chrupavku uvažuje ako referenčnú – všetky jej posuvy a rotácie sú nulové. Ďalej uvádza kompletné riešenie pre určenie konečnej polohy chrupavky po aktivácii svalu vrátane vzťahov pre aktívne a pasívne napätie, síl pôsobiacich na chrupavky, reakčných síl a výslednej frekvencii f_0 . V tejto štúdií autor zistil, že otváranie hlasivkovej štrbiny spôsobuje PCA (posterior cricoarytenoid) otáčaním hlasivkových chrupaviek v laterálnej rovine, zatváranie

štrbiny umožňuje TrA (transverse arytenoid) dorzomediálnym posuvom a rotáciou v mediálnej rovine hlasivkových chrupaviek.

V štúdií (Gömmel, 2007) Gömmel a kol. vytvorili trojrozmerný konečno-prvkový model simulujúci pohyb hlasiviek pri fonačnom postavení pôsobením svalov. Model obsahuje prstencovú chrupavku, hlasivkové chrupavky, príslušné svaly a hlasivky. Vychádza z jednorozmernej Hillovej teórie a idealizuje aktívne a pasívne vlastnosti svalu, kde je riadiacou vstupnou hodnotou časovo závislý stupeň stimulácie. Vyvinutý model umožňuje analyzovať rozloženie síl medzi hrtanovými svalmi počas fonácie. V tomto modeli vystupuje špeciálny dvoj-uzlový prvok s dvoma komponentmi – CE (sťahujúci sa element) a PE (paralelný element), ktoré reprezentujú aktívne a pasívne správanie svalu (Obr. 13). Prvok spolupracuje s komerčným softwarom Ansys a má 10 vstupných parametrov.



Obr. 13 Schéma dvoj-uzlového konečného prvku s dvoma komponentmi.
Prevzaté z (Gömmel, 2007)

Yin a kol. vytvorili (Yin, 2014) konečno-prvkový trojrozmerný model slúžiaci na skúmanie zmien tuhosti a vlastných frekvencií hlasiviek spôsobených interakciou hrtanových svalov – TA a LCA. Aktivácia LCA svalu vedie na kolísavý pohyb hlasivkových chrupaviek v koronálnej rovine a uzavretie hlasivkovej štrbiny v rovine posterior, ale nemá významný vplyv na vlastné frekvencie. Naopak, aktivácia TA svalu, vyvolá rotáciu hlasiviek smerom k hlasivkovej strednici a uzatvára štrbinu v rovine anterior a má značný vplyv na vlastnú frekvenciu. Model obsahuje hlasivky, TA, LCA svaly, hlasivkovú a prstencovú chrupavku, získané zo snímkov magnetickej rezonancie človeka. Hlasivky a svaly boli modelované z hyperelastického materiálu, ich deformačná energia bola určená súčtom aktívnej a pasívnej deformačnej energie. Ďalej autor uvádza vzťahy pre výpočet aktívneho napätia a sily implementované do modelu svalov.

5 Výpočtové modelovanie nastavenia hlasiviek do fonačného postavenia

Experimentálne meranie napätosti a deformácie hlasiviek priamo v hrdle človeka pri fonácií by bolo veľmi náročné a nebolo by možné určiť vplyv pohybu jednotlivých chrupaviek alebo aktívneho napätia svalu na celkovú napätosť. Jednou z možností ako daný problém riešiť je použitie výpočtového modelovania.

Výpočtový model je špecifickým prípadom teoretického modelu, ktorý sa skladá z viacerých čiastočných modelov. Modelovým objektom je pomocný objekt, ktorý je prostriedkom k riešeniu problému. Pri výpočtovom modeli je ním matematická teória.

Riešenie výpočtového modelovania napätia a deformácie ľudských hlasiviek pri nastavovaní do fonačného postavenia budeme realizovať metódou konečných prvkov (MKP) v prostredí Ansys, pomocou ktorého vieme modelovať a simulovať množstvo fyzikálnych problémov. Pre riešenie daného problému bude kľúčová štruktúrna nelineárna analýza, ktorá rieši základnú rovnicu pomocou Lagrangeovho variačného princípu. Základná rovnica MKP je

$$K \cdot U = F \quad (5.1)$$

kde K [N/m] je matica tuhosti, U [m] matica posuvov a F [N] je matica zaťaženia.

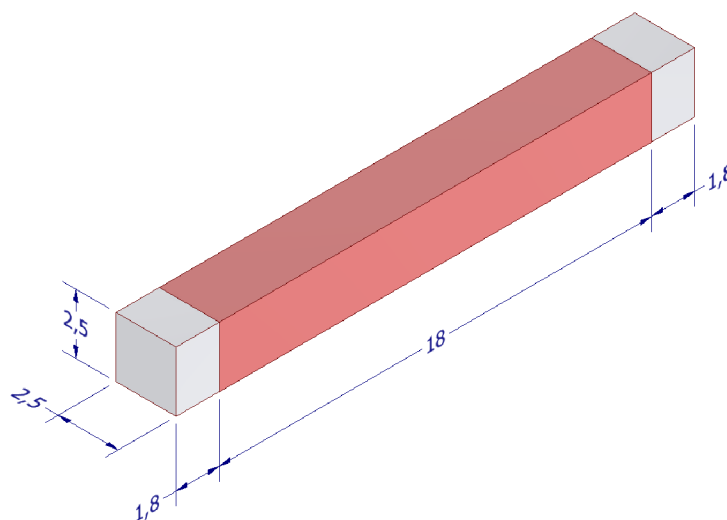
Riešený konečno-prvkový model vychádza z modelu Ing. Michala Šíbla (Šíbl, 2014) a je doplnený o hyperelastické materiály a aktívne napätie hlasivkového svalu (TA).

Pre správne pochopenie princípu kontrakcie svalu, sme sekundárny problém vytvorenia aktívneho napätia hlasivkového svalu riešili na samostatnom zjednodušenom modeli svalu a následne ho implementovali do globálneho modelu, ktorý obsahuje potrebné hrtanové chrupavky a jednotlivé vrstvy mäkkých tkanív hlasiviek.

5.1 Zjednodušený model svalu

Aby sme mohli správne určiť napätie vzniknuté v mäkkom tkanive hlasiviek pri fonačnom postavení, je potrebné brať do úvahy kontrakciu svalu TA vo vnútri hlasiviek, ktorý spája hlasivkovú a štítnu chrupavku. Kontrakciu svalu sme najskôr modelovali na zjednodušenom priestorovom geometrickom modeli kvádra, tromi rôznymi spôsobmi.

Rozmery kvádra boli uvažované podľa Titze (Titze, 2007) a Hunter (Hunter, 2004) vid' Obr. 14.



Obr. 14 Geometria modelu svalu (ružová) a chrupaviek (biela) na zjednodušenom kvádri

Pre materiál svalu sme použili konštitutívny model Neo Hook, materiál s rovnakými materiálovými charakteristikami, aké budú použité ďalej v globálnom modeli.

$$\mu = 21\,812 \text{ Pa}$$

$$d = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$$

Materiál chrupaviek sme modelovali ako lineárne elastický, keďže v globálnom modeli sú chrupavky uvažované ako tuhé telesá, ich deformácia je nepodstatná.

$$E = 30\,000 \text{ kPa}$$

$$\mu = 0,47$$

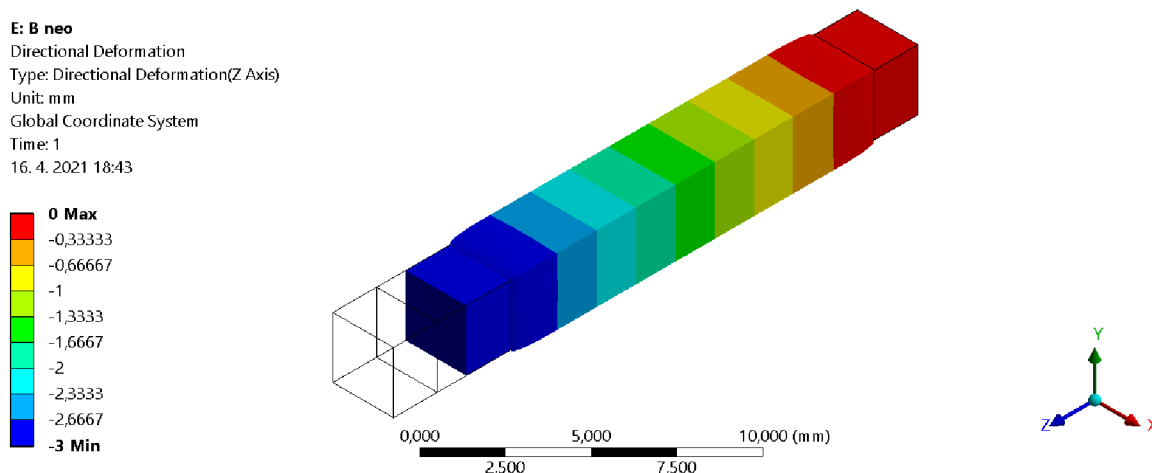
Keďže je model svalu v tvare pravidelného kvádra, bol tvorený mapovanou sieťou hexaedrických konečných prvkov SOLID186 s kvadratickou aproximáciou posuvu.

5.1.1 Zaťaženie posuvom plochy

V prvom kroku sme spočítali aké veľké napätie vzniká v svale hlasivky pri jeho skrátaní o 3 mm, čo je približne hodnota používaná vo výpočtovom modeli interakcie prúdiaceho vzduchu s kmitaním hlasiviek (Švancara, 2011). Tento posuv je predpísaný na čelnej ploche jednej chrupavky v smere osy z

$$u_z = 3 \text{ mm}$$

Na vonkajšej ploche druhej chrupavky sme zamedzili posuvy vo všetkých osiach. Vplyvom deformačného zaťaženia sa kváder skrátil a vydul (Obr. 15).



Obr. 15 Deformácia telesa v smere osi z pre prvú modelovú situáciu

Výsledné napätie v pozdĺžnom smere malo v strede telesa svalu hodnotu približne

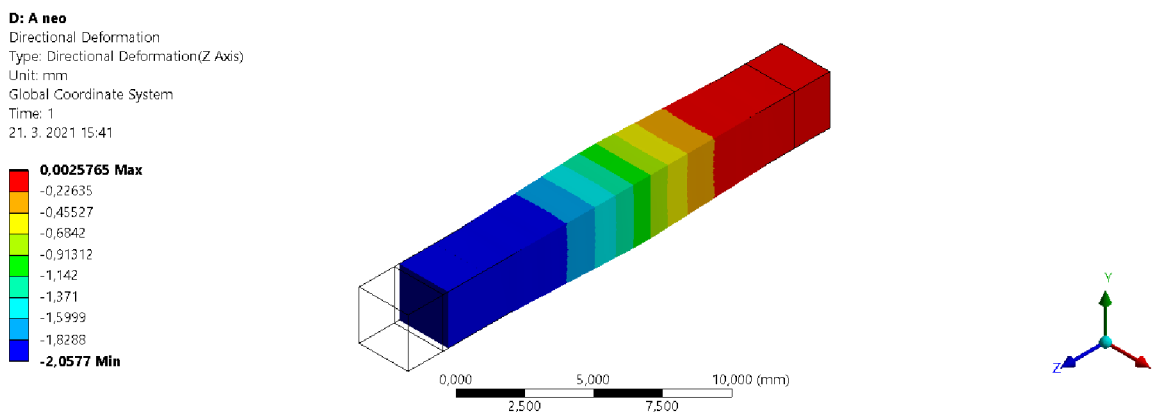
$$\sigma_z \sim -12\,000 \text{ Pa}$$

Okolo tejto hodnoty sa budeme snažiť modelovať vnútorné napätie svalu.

Tento prístup nám síce prináša správnu deformáciu svalu, ale nie je vhodný pre modelovanie podstaty aktívneho napätia. Preto budeme ďalej hľadať lepší prístup.

5.1.2 Zaťaženie posuvmi v jednotlivých uzloch

V ďalšej modelovej situácii sme zadávali posuvy postupne do jednotlivých uzlov proti sebe. Veľkosť posuvov sme postupne prispôbovali tak, aby sa výsledné napätie σ_z pohybovalo v okolí danej hodnoty, ktorú sme získali z prvej situácie. Výsledná deformácia je na Obr. 16.



Obr. 16 Deformácia telesa v smere osi z pre druhú modelovú situáciu

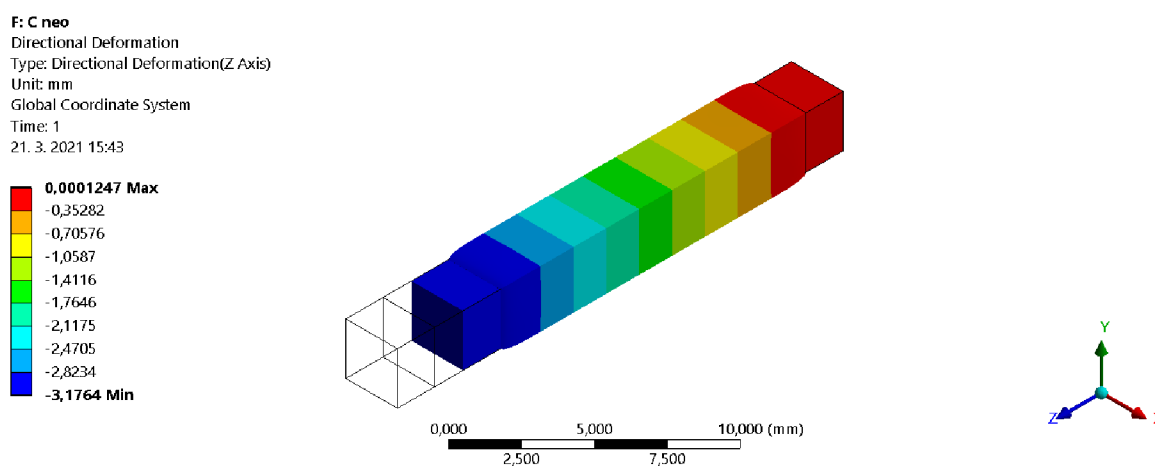
Sval sa pri takomto zaťažení deformoval nerovnomerne, na rozdiel od prvého prípadu a nezodpovedá deformovanému tvaru, ktorý hľadáme. Aby sme docielili rovnomerné vydutie, museli by sme veľkosť síl postupne meniť v každej vrstve, čo by bolo zdĺhavejšie a komplikovanejšie. Preto ani tento spôsob nie je vhodný.

5.1.3 Zaťaženie predpätím

V tretej modelovej situácii sme pomocou príkazu INISTATE z prostredia APDL predpísali tlakové predpätie vo veľkosti

$$\sigma_z = 12\,000 \text{ Pa}$$

Deformovaný tvar kvádrov vykazoval požadovaný tvar, ktorý sa prejavuje skrátením svalu a jeho vydutím (Obr. 17).



Obr. 17 Deformácia v smere osi z pre tretiu modelovú situáciu

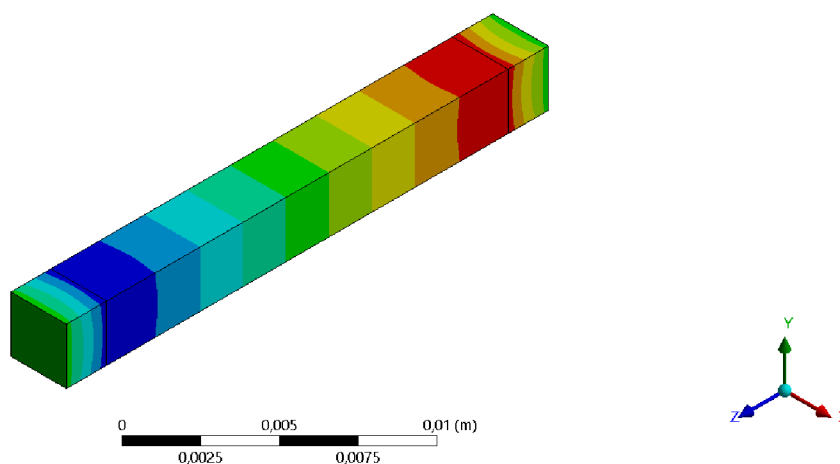
5.1.4 Izometrická kontrakcia

Izometrická kontrakcia je svalová činnosť, pri ktorej sa nevykonáva pohyb – vzdialenosť začiatku od úponu svalu sa nemení. Pri tejto činnosti sa nemení dĺžka svalu, ale mení sa napätie.

Túto činnosť svalu sme nasimulovali vo výpočtovom modeli tak, že na oboch krajných plochách chrupaviek bol zamedzený pohyb vo všetkých osiach a v svale bolo predpísané napätia pomocou príkazu INISTATE. Výsledok deformácie na Obr. 18 je zobrazený v reálnej mierke („*True Scale*“).

H: izomet. kontrakcia
Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: m
Global Coordinate System
Time: 1
14. 5. 2021 16:36

7,2792e-13 Max
5,6616e-13
4,044e-13
2,4264e-13
8,0877e-14
-8,0885e-14
-2,4265e-13
-4,0441e-13
-5,6617e-13
-7,2793e-13 Min

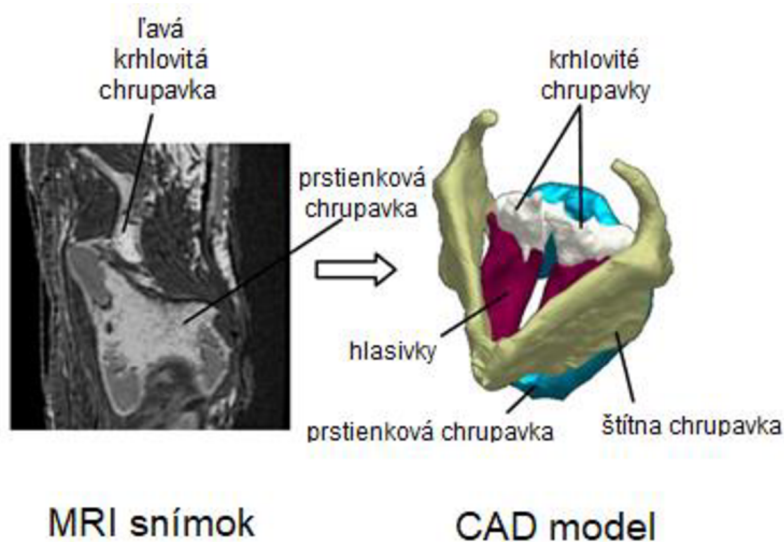


Obr. 18 Izometrická kontrakcia svalu

Vďaka jednoduchému a priamemu predpisu vnútorného napätia pôsobiaceho v svale a správnej deformácií svalu budeme v globálnom modeli zadávať hodnoty aktívneho napätia hlasivkového svalu pomocou príkazu INISTATE.

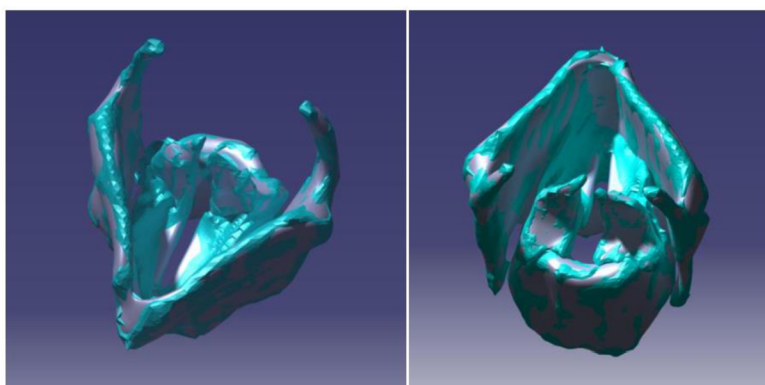
5.2 Model hrtanových chrupaviek a hlasiviek

Globálny model hrtanu je tvorený hlasivkami a príslušnými chrupavkami, získanými pomocou magnetickej rezonancie (MRI) hrtanu 75 ročného zomrelého muža (Obr. 19). Snímky boli vytvorené Dr. W. Scott Selbie na 2.0 T zariadení GE-NMR Instruments s rozlíšením 256 x 256 pixelov so 128 rezmi na oblasti 90 x 90 x 45 mm (Selbie, 2002). Dáta boli získané z úložiska National Respiratory for Laryngeal Data (Hunter, 2012) a ďalej boli upravované Šíblom (Šíbl, 2014).



Obr. 19 MRI snímok hrtanu a CAD model, prevzaté a upravené z (Hunter, 2012)

Šíbl zjednodušil geometriu vyhladením plôch, uzatvorením nežiadúcich otvorov, vyplnením chýbajúcich objemov a zaoblením ostrých hrán. Tým poskytol dobrý základ modelu geometrie hrtanu, ktorý je zobrazený na Obr. 20.

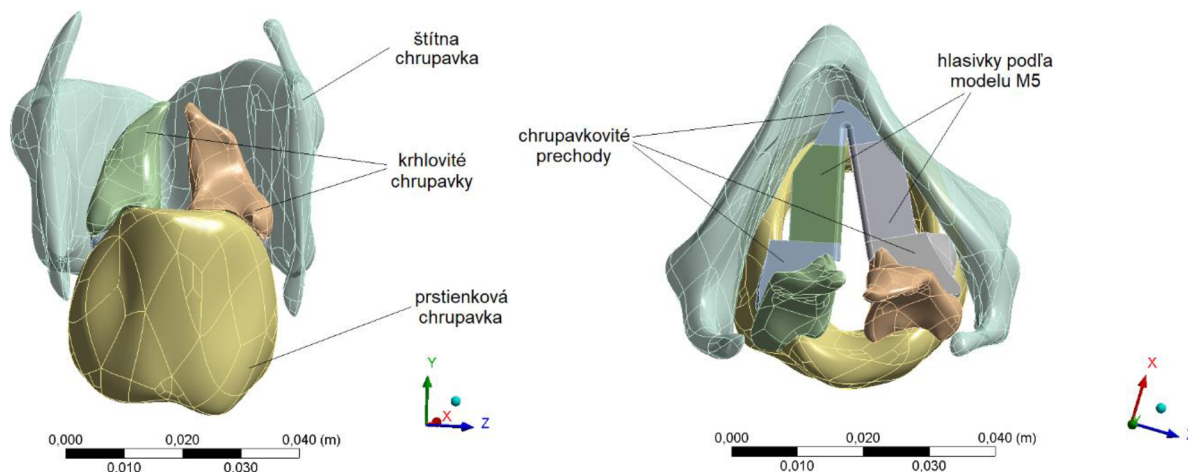


Obr. 20 pôvodná geometria (modrá) a upravená geometria hrtanu (šedá), prevzaté z (Šíbl, 2014)

5.2.1 Model geometrie

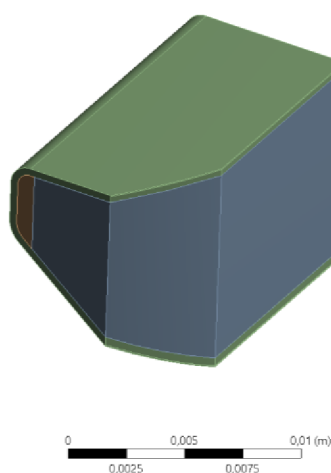
Model geometrie hrtanu (Obr. 21) tvoria

- Štítna chrupavka (thyroid, T)
- Prstienková chrupavka (cricoid, C)
- Krhlovité chrupavky (arythenoid, A)
- Chrupavkovité prechody medzi krhlovitými chrupavkami a hlasivkami
- Hlasivky podľa Schererovho modelu M5



Obr. 21 Model geometrie hrtanu

Model geometrie hlasiviek je tvorený podľa Schererovho modelu M5 (Scherer, 2001) Obr. 22 a modifikovaný zúžením a zaoblením tak, aby neprenikal do štítnej chrupavky. Model M5 sme vybrali spomedzi iné modely geometrie hlasiviek, lebo je jeden z najpoužívanejších.

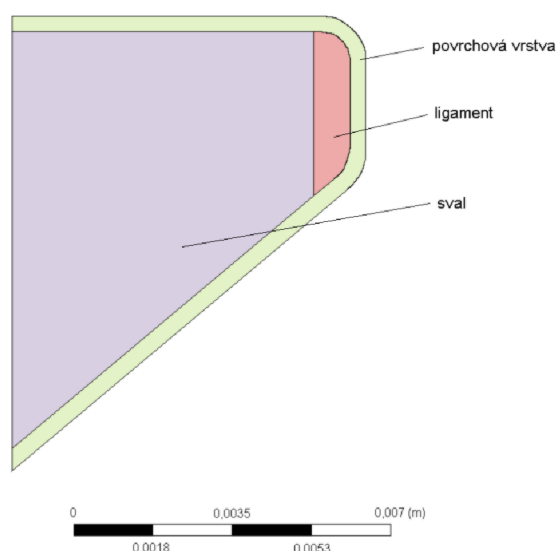


Obr. 22 Model geometrie hlasivky

Táto geometria je importovaná do celej zostavy tak, aby hlasivky medzi sebou zvierali uhol 12° .

V modeli geometrie hlasiviek sme uvažovali trojvrstvový model (Obr. 23), ktorý tvoria vrstvy

- Povrchová vrstva – hrubá 0,35 mm, vytvorená spojením vrstvy epitelu a laminy proprii z pôvodného modelu Šíbla
- Ligament – maximálna hrúbka 0,8 mm
- Svalová vrstva



Obr. 23 Vrstvy modelu geometrie hlasivky

5.2.2 Model materiálu

Určenie materiálových parametrov biologických tkanív je zložitý a komplikovaný proces. Odozvu na zaťaženie tkaniva získavame z mechanických skúšok, ktoré môžeme realizovať buď vnútri ľudského tela (in vivo) alebo mimo neho (in vitro). Určenie materiálových parametrov z mechanických skúšok realizovaných in vitro je jednoduchšie ako in vivo, ale prináša viacero problémov so zmrazením tkaniva a následným rozmrazením. Nakoniec dostávame výsledné hodnoty, ktoré majú veľký rozptyl a nemusia zodpovedať skutočným. Veľké rozptyly spôsobuje rozdielnosť jedincov, vek, životospráva, či pohlavie.

Model hrtanu tvoria chrupavky a hlasivky sú tvorené vrstvami mäkkých tkanív. Chrupavky sú tvorené tuhším materiálom ako hlasivky a ich pohyb ako tuhých telies vplýva na deformáciu a kontakt hlasiviek. Chrupavky sú vo výpočte uvažované ako tuhé telesá.

Materiály jednotlivých mäkkých tkanív hlasiviek modelujeme tiež ako izotropné a homogénne, ale keďže v skutočnosti vykazujú hyperelastické chovanie, sú teda schopné veľkých elastických pretvorení, použijeme ako materiálový model konštitutívny model Neo Hook.

Konštitutívny model Neo Hook

Model Neo Hook patrí medzi hyperelastické konštitutívne modely. Zohľadňuje štruktúru materiálu, teda berie do úvahy entropické chovanie polymérnych reťazcov. Merná energia napätosti W [Pa] pre tento model je definovaná vzťahom

$$W = \frac{1}{2}G(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (5.2)$$

kde

\bar{I}_1 [-] je modifikovaný prvý invariant pravého Cauchy-Greenovho tenzoru deformácie

J [-] je tretí invariant tenzoru deformačného gradientu

G [Pa] je modul pružnosti v šmyku

d [Pa^{-1}] je parameter stlačiteľnosti materiálu

Modul pružnosti v šmyku G [Pa] môže byť vyjadrený v tvare

$$G = nkT \quad (5.3)$$

kde

n [-] je počet reťazcov na jednotku objemu,

k [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$] je Boltzmanova konštanta, ($k = 1,380649 \cdot 10^{23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$)

T [$^{\circ}\text{K}$] je absolútna teplota

Parameter stlačiteľnosti d [Pa^{-1}] materiálu môžeme vypočítať

$$d = \frac{2}{K} \quad (5.4)$$

kde

K [Pa] je objemový modul pružnosti.

Tento model je popísaný dvomi parametrami – modulom pružnosti v šmyku G [Pa] a parametrom stlačiteľnosti d [Pa^{-1}]. Môžeme ním popísať hyperelastické chovanie materiálu do 30% pretvorenia. Jeho nevýhodou je, že nedokáže modelovať inflexný bod záťažnej krivky ani spevňovanie materiálu (Burša, 2020).

Model Neo Hook bol vybraný aj z dôvodu jednoduchého prepočtu jednoduchému prepočtu parametrov z lineárne elastického materiálového modelu, ktorý je popísaný parametrami: modulom pružnosti v ťahu E [Pa] a Poissonovým pomerom μ [-].

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (5.5)$$

$$d = \frac{2}{K} = \frac{2}{\frac{E}{3(1 - 2\mu)}} = \frac{6(1 - 2\mu)}{E} \quad (5.6)$$

Chrupavky

Pre chrupavkovité prechody sme použili izotropný, homogénny, lineárne elastický model materiálu (Tabuľka 4). Materiálové parametre sú prevzaté z práce (Hunter, 2004). Chrupavky boli modelované ako tuhé telesá.

Tabuľka 4 Materiálové parametre chrupavky

Materiál	E [Pa]	μ [-]
chrupavka	30 000 000	0,47

Hlasivky

Lineárne elastické materiálové parametre (Tabuľka 5) pre jednotlivé mäkké tkanivá sú prevzaté z (Hájek, 2019).

Tabuľka 5 Materiálové parametre lineárne elastických materiálov mäkkých tkanív

Materiál	E [Pa]	μ [-]
Epitel	25 000	0,49
Lamina propria	2 000	0,49
Ligament	8 000	0,49
Sval	65 000	0,49

Pre použitie trojvrstvého modelu sme vrstvy epitelu a laminy proprii zlúčili a ich materiálový parameter spočítali podľa aritmetického priemeru.

$$E_{povrch} = \frac{E_{epitel} + E_{lamina\ propria}}{2}$$

$$E_{povrch} = 13\,500 \text{ Pa}$$

Lineárne elastické materiálové parametre sme následne prepočítali podľa vzťahov (5.5) a (5.6) na parametre modelu Neo Hook (Tabuľka 6).

Tabuľka 6 Materiálové parametre pre model Neo Hook mäkkých tkanív hlasiviek

materiál	G [Pa]	d [Pa ⁻¹]
Povrchová vrstva	4 530,2	$9 \cdot 10^{-6}$
Ligament	2 684,6	$2 \cdot 10^{-5}$
Sval	21 812	$2 \cdot 10^{-6}$

Je známe, že pri biologických materiáloch je významný rozptyl materiálových charakteristík, preto tieto hodnoty nie sú jediné správne hodnoty. Môžeme ich teda

v určitom rozsahu meniť a tým ladit' celý výpočtový model, čo nám umožňuje optimalizáciu výsledkov.

Pletivo vyplňajúce prázdne miesta medzi hlasivkami a okolitými chrupavkami sme nemodelovali ako vlastné teleso s príslušnými materiálovými parametrami, ale zadali sme jeho vlastnosti do analýzy ako okrajovú podmienku „*Elastic Support*“ s predpísanou hodnotou tuhosti (Yin, 2014)

$$k_{elastic\ support} = 1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^3$$

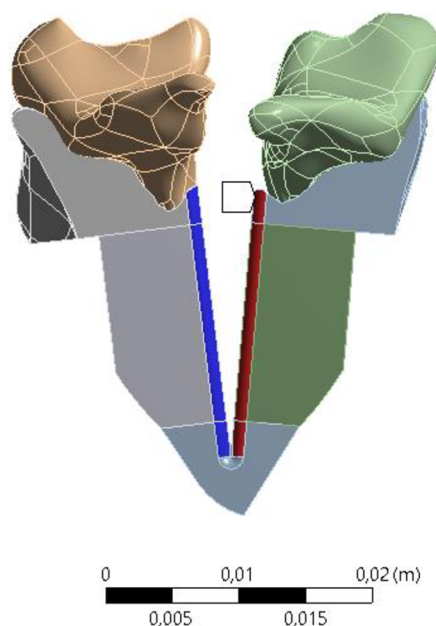
5.2.3 Model kontaktov

Typu Flexible-flexible

Telesá hlasiviek podľa modelu M5 sú spojené s prechodovými kusmi hlasiviek získanými MRI snímkami. Navzájom sú spojené pomocou špeciálneho typu kontaktu „*Bonded*“, pri ktorom sú telesá „prilepené“.

Pohybom hlasivkových chrupaviek sa hlasivky postupne spájajú a dostávajú do kontaktu. Na plochách, kde predpokladáme kontakt (Obr. 24) je predpísaný „*Frictional Contact Region*“ s trecím koeficientom podľa (Prinz, 2007) a (Ranc, 2006)

$$k_{trecí} = 0,2$$



Obr. 24 Kontaktné plochy hlasiviek

Riešenie kontaktu prebieha pomocou numerickej metódy „*Augmented Lagrange*“, ktorá je kombináciou pokutového prístupu („*Penalty Algorithm*“) a metódy Lagrangeových multiplikátorov („*Lagrange Multipliers*“). Metóda „*Augmented Lagrange*“ pripúšťa danú hodnotu penetrácie kontaktných telies a pritom iteratívne mení ich tuhosť, aby hodnota penetrácie neprekročila zadanú hodnotu (Petruška, 2011).

Typu Rigid-flexible

Ďalšie kontakty spájajú tuhé telesá chrupaviek („*Rigid*“) s poddajnými hlasivkami („*Flexible*“) a sú definované ako spojenie „*Bonded*“. Nachádzajú sa medzi prechodovými kusmi mäkkých tkanív hlasiviek a krhlovitými chrupavkami a štítnou chrupavkou.

5.2.4 Model siete konečných prvkov

Pri riešení úlohy pomocou metódy konečných prvkov (MKP) musíme vytvoriť sieť konečných prvkov, teda rozdeliť poddajné telesá na menšie časti – prvky konečnej veľkosti. Čím hustejšiu sieť konečných prvkov vytvoríme, tým presnejší výsledok dostávame. Hustejšia sieť je spojená s vyšším počtom prvkov a teda väčším počtom neznámych, ktoré je potrebné vyriešiť, čím ale narastá výpočtový čas. Je preto dôležité nájsť optimálnu veľkosť prvku, aby sme dostali uspokojivú presnosť riešenia a dĺžku výpočtového času.

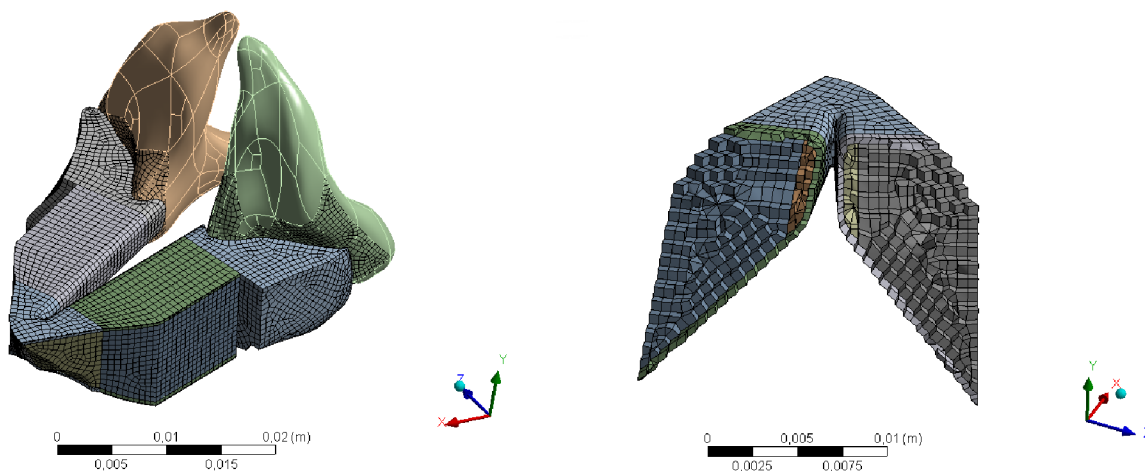
Analýza vplyvu veľkosti prvku

Aby sme vedeli posúdiť, či máme správnu hustotu siete musíme zanalyzovať vplyv veľkosti prvku na výsledné hodnoty. Vytvoríme si tri rôzne siete s odlišnou veľkosťou konečných prvkov a budeme sledovať výslednú hodnotu kontaktného tlaku a určíme ako moc sa výsledky menia (Tabuľka 7). Úloha bola počítaná na počítači FME-6A8MQILNV4J s pamäťou RAM 16 GB a procesorom AMD Ryzen 5 1500X Quad-Core s frekvenciou 3,5 GHz.

Tabuľka 7 Vplyv siete na výsledné hodnoty kontaktného tlaku

Veľkosť prvku na hlasivkách [m]	Počet prvkov [–]	Počet uzlov [–]	Výpočtový čas [min]	Maximálna hodnota kontaktného tlaku [Pa]
$6 \cdot 10^{-4}$	32 637	107 563	132	2 415
$5,5 \cdot 10^{-4}$	35 918	119 265	208	2 711
$5 \cdot 10^{-4}$	40 471	136 291	202	2 745
$4 \cdot 10^{-4}$	58 086	201 227	riešenie neskonvergovalo	

Výsledná sieť tvorená prvkami s veľkosťou $5 \cdot 10^{-4}$ m je zobrazená na Obr. 25.


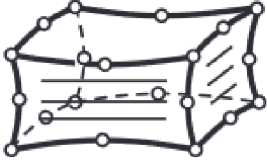
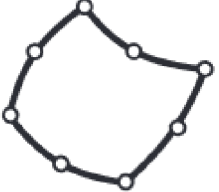



Obr. 25 Výsledná sieť konečných prvkov

Použité typy konečných prvkov

Sieť konečných prvkov je tvorená rôznymi typmi prvkov, ktoré majú svoje špecifické vlastnosti. Telesá hlasiviek podľa modelu M5 sú tvorené prevažne mapovanou sieťou kvadratických hexaedrických priestorových prvkov SOLID186. Prechodové časti hlasiviek nepravidelného tvaru sú tvorené voľnou sieťou kvadratických tetraedrických priestorových prvkov SOLID187. Pre kontaktné plochy musia byť použité špeciálne typy kontaktných prvkov. Dva kontaktné povrchy sú pokryté odlišnými, navzájom sa dopĺňujúcimi typmi prvkov – prvý povrch je označený ako cieľový a sú na ňom použité prvky typu TARGE170, druhý sa nazýva kontaktný a je pokrytý prvkami typu CONTA174. Tým je vytvorený kontaktný pár, ktorý je spolu prepojený zdieľaným identifikátoru kontaktných vlastností – reálnych konštánt. Zoznam všetkých použitých prvkov je v Tabuľke 8 (Petruška, 2011).

Tabuľka 8 Použité prvky siete (ANSYS Advanced Analysis TechniquesGuide, 2005)

Názov prvku v Ansyse	Prvok	Počet uzlov	Stupne voľnosti	Náčrt
SOLID187	Priestorový tetraeder	10	UX, UY, UZ	
SOLID186	Priestorový hexaeder	20	UX, UY, UZ	
CONTA174	Kontaktný povrchový prvok	8	UX, UY, UZ	
TARGE170	Cieľový povrchový prvok	8	UX, UY, UZ	

5.2.5 Model okrajových podmienok

Pri výpočtoch budeme pracovať so siedmimi variantami, kedy sa postupne budú zapájať pohyby jednotlivých chrupaviek a aktívne napätie svalu. Všetky prípady však majú spoločné niektoré základné okrajové podmienky.

Jediná vo všetkých variantoch nepohyblivá prstienková chrupavka je upevnená pomocou „Jointu“ pevne k zemi, čím zaisťuje fixovanie celého modelu v priestore, aby

nedochádzalo k jeho celkovému pohybu ako tuhého telesa. V jednotlivých variantoch sú nepohyblivé chrupavky zafixované rovnakým spôsobom.

Ako bolo spomenuté už v predchádzajúcom odseku, pletivo, ktoré sa nachádza medzi hlasivkami a chrupavkami nebolo modelované ako vlastné teleso, ale bolo nahradené elastickou podporou („*Elastic Support*“) s tuhosťou (Yin, 2014)

$$k_{elastic\ support} = 1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^3$$

Ďalšie okrajové podmienky sa líšia podľa jednotlivých variantov.

5.2.6 Varianty

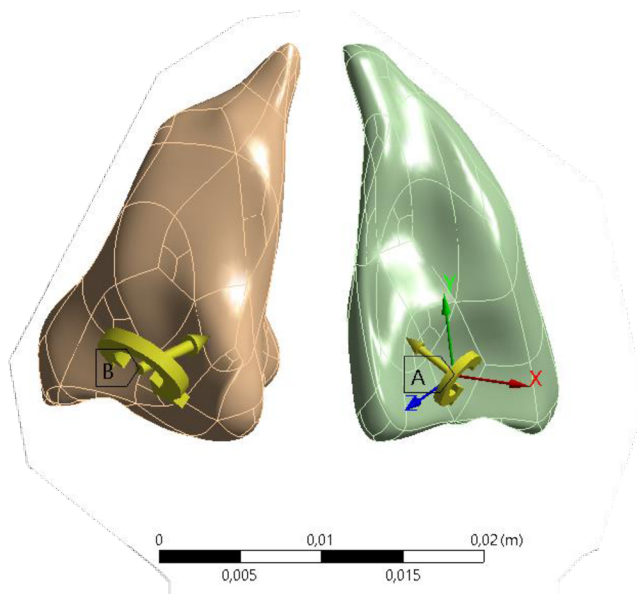
Postupne vyriešime sedem rôznych prípadov, kedy budeme zapájať pohyby jednotlivých chrupaviek a aktívneho napätia svalu najskôr osamote a následne ich kombinácie (Tabuľka 9).

Tabuľka 9 Varianty výpočtového modelu

ČÍSLO VARIANTY	ZAPOJENIE CHRUPAVIEK A SVALOV
1	Krhlovité chrupavky
2	Štítina chrupavka
3	Aktívne napätie hlasivkového svalu
4	Krhlovité chrupavky + štítina chrupavka
5	Krhlovité chrupavky + aktívne napätie hlasivkového svalu
6	Štítina chrupavka + aktívne napätie hlasivkového svalu
7	Krhlovité chrupavky + štítina chrupavka + aktívne napätie hlasivkového svalu

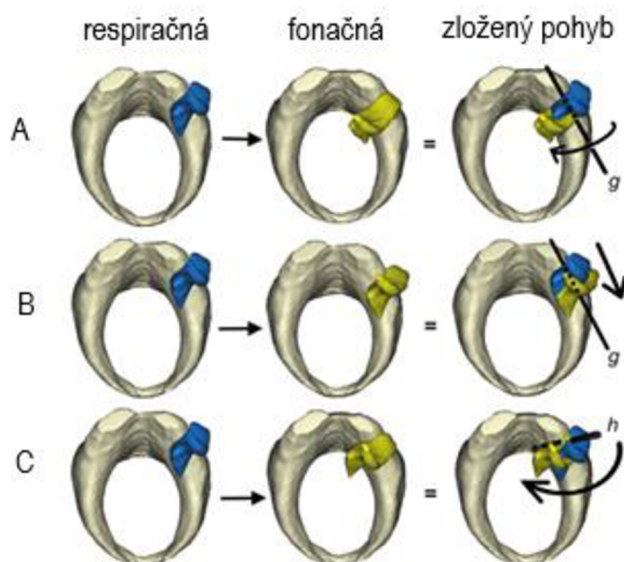
Pohyb krhlovitých chrupaviek

Pohyb párových krhlovitých chrupaviek bol v programe zadaný ako („*Remote Displacement*“), pomocou ktorého môžeme definovať posuvy a rotácie. Pre každú chrupavku sme vytvorili samostatný súradnicový systém podľa (Hunter, 2004), v ktorom sú definované tieto pohyby (Obr. 26).



Obr. 26 Okrajové podmienky a súradnicové systémy krhlovitých chrupaviek

Definícia pohybu vychádzala z práce Storcka (Storck, 2011), v ktorej určil pohyb ako kombináciu posuvu a rotácie pozdĺž osy g a rotácie pozdĺž osy h podľa Obr. 27.



Obr. 27 Prstencová chrupavka s hlasivkovou chrupavkou v respiračnej pozícii (modrá) a fonačnej (žltá); A kolísanie hlasivkovej chrupavky okolo osi kĺbu, B šmýkanie hlasivkovej chrupavky pozdĺž osi, C rotácia hlasivkovej chrupavky v CA kĺbe okolo virtuálnej osi, (upravené). Prevzaté a upravené z (Storck, 2011)

Namerané veľkosti posuvov a rotácií Storckom boli prepočítané Šíblom (Šíbl, 2014) do zadaných súradnicových systémov.

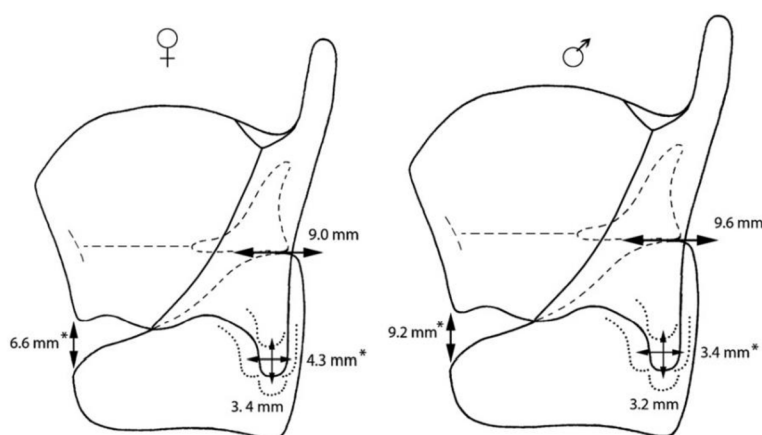
Hodnoty posuvov a rotácií sú rozdielne pre ľavú a pravú chrupavku, kvôli vyrovnaníu asymetrie modelu. Miernym upravením pohybu ľavej chrupavky sme dostali vo výslednom deformovanom tvare kontakt hornej plochy hlasiviek v jednej rovine. Jednotlivé hodnoty v súradnicovom systéme zobrazenom na Obr. 26 sú zapísané v Tabuľke 10.

Tabuľka 10 Posuvy a rotácie krhlovitých chrupaviek

Chrupavka	u_x [m]	u_y [m]	u_z [m]	r_x [°]	r_y [°]	r_z [°]
Ľavá	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0	3,24	-2,1	0
Pravá	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	0	0	-3,24	2,1	0

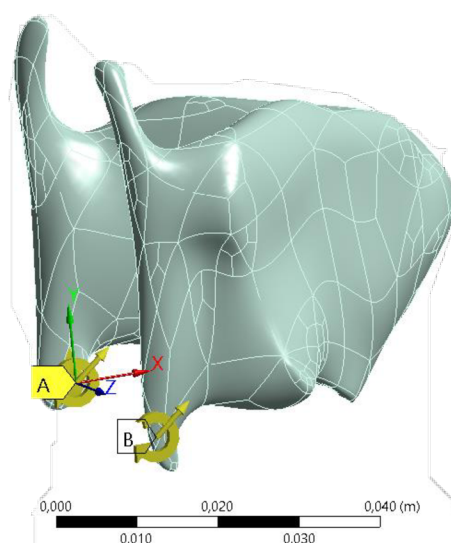
Pohyb štítnej chrupavky vzhľadom k prstienkovej

Pohyb štítnej chrupavky voči prstienkovej zadefinoval (Hammer, 2010). Jednotlivé posuvy a ich hodnoty sú zobrazené na Obr. 28.



Obr. 28 Stredné hodnoty posuvov štítnej chrupavky pre ženy a mužov, prevzaté z (Hammer, 2010)

Vo výpočtovom modeli sme použili kombináciu pohybov podľa (Hammer, 2010) a podľa (Titze, 2006). Pohyb štítnej chrupavky bol definovaný rovnako pomocou „Remote Displacement“ na dvoch plochách (Obr. 29)



Obr. 29 Súradnicové systémy a predpísané pohyby štítnej chrupavky

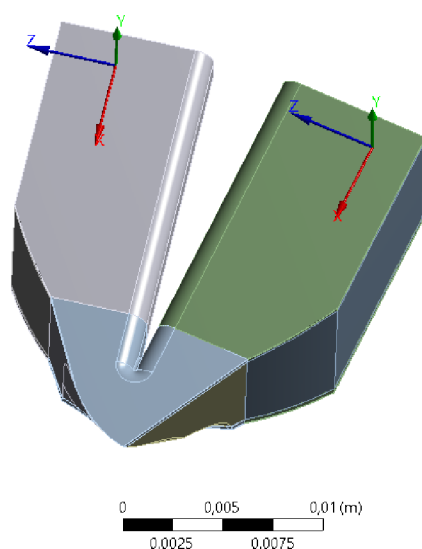
Hodnoty jednotlivých posuvov v súradnicovom systéme zobrazenom na Obr. 26 sú v Tabuľke 11

Tabuľka 11 Hodnoty posuvov a rotácií štítnej chrupavky

Plocha	u_x [m]	u_y [m]	u_z [m]	r_x [°]	r_y [°]	r_z [°]
Ľavá	$1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	-2,5
Pravá	$1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	-2,5

Aktivácia hlasivkového svalu (TA)

Aktiváciu hlasivkového svalu sme realizovali pomocou príkazu INISTATE, ako bolo ukázané v predchádzajúcej kapitole na zjednodušenom modeli svalu. Pre každé teleso hlasivky sme vytvorili vlastný súradnicový systém s jednou osou smerujúcou pozdĺž nej (Obr. 30).



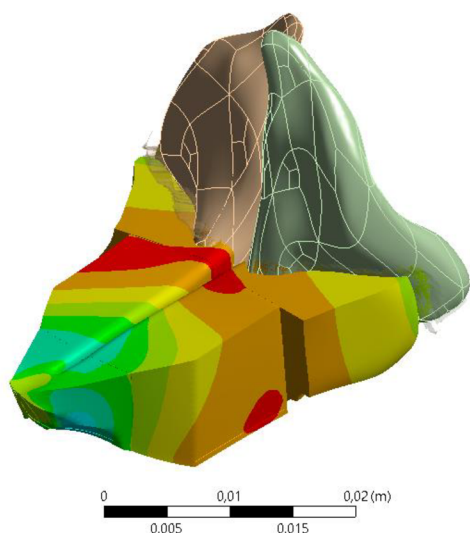
Obr. 30 Súradnicové systémy hlasiviek

V tejto ose sme prvotne predpísali napätie

$$\sigma_x = 5\,000 \text{ Pa}$$

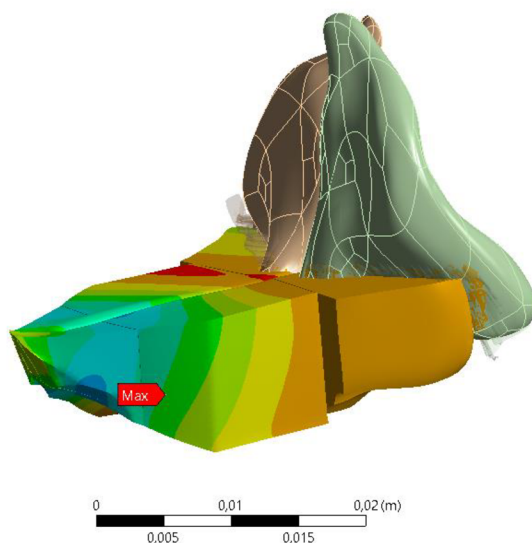
5.2.7 Ladenie parametrov

Ako je všeobecne známe, biologické materiály jedincov sa od seba môžu výrazne líšiť. Napríklad materiálové parametre mäkkých tkanív sú rozdielne v závislosti od veku, trébovanosti, či životosprávy. Podobne aj tvar a poloha jednotlivých chrupaviek je u každého z nás trochu iná. Môžeme to vidieť aj pri predpísaní pohybov chrupaviek podľa literatúry do modelu s geometriou získanou z MRI snímok skutočného človeka, kedy sa hlasivky síce dostanú do kontaktu, ale ich horné plochy nie sú v jednej rovine (Obr. 31). Preto je potrebné model naladiť tak, aby sa výsledné hodnoty, čo najviac približovali realite.



Obr. 31 Kontakt hlasiviek, ktorý nedolieha v jednej rovine

Najskôr bolo potrebné zaistiť kontakt hornej plochy hlasiviek v jednej rovine ako je zobrazené na Obr. 32. To sme zaistili pridaním posuvu ľavej krhlovitej chrupavky nahor a miernym pootočením súradnicových systémov hlasiviek, v ktorých je predpísané aktívne napätie.



Obr. 32 Kontakt hlasiviek v správnom fonačnom postavení

Ďalej sme ladili parametre svalu – modul pružnosti a hodnotu aktívneho napätia. Tieto parametre najviac vplyvajú na kvalitu hlasu a základnú frekvenciu. Z literatúry vieme v akých hodnotách by sa výsledné napätie hlasiviek malo pohybovať. Titze v svojej knihe (Titze, 2006) uvádza priebehy aktívneho a pasívneho napätia v hlasivkách v závislosti na pretvorení. Hodnoty aktívneho napätia sa výrazne nemenia, ale hodnoty pasívneho napätia prudko rastú z desiatok kPa až na viac ako 150 kPa. V experimentoch Horáčka (Tokuda, 2008) bola nameraná sila v hlasivkách pri prechodoch medzi registrami najviac 3 N, čo pre model M5 zodpovedá napätiu 20 kPa.

V práci Šíbla (Šíbl, 2014), z ktorej táto práca vychádza boli hodnoty v rozmedzí 3 – 9 kPa pre rôzne postavenia.

Pre správne naladenie modelu budeme postupne zvyšovať hodnoty modulu pružnosti svalu a aktívneho napätia svalu tak, aby sme sa s hodnotou redukovaného napätia v tkanivách hlasiviek dostali blízko hodnote 20 kPa, uvádzaných Horáčkom (Tokuda, 2008), prípadne na vyššie hodnoty. Najväčším obmedzením hornej hranice je konvergencia riešenia. Zo všetkých možných parametrov preto vyberieme také, ktoré spôsobia najvyššie redukované napätie a zároveň skonvergujú pre všetky varianty. Konečný čas analýzy bol nastavený na hodnotu 1 s. V prípadoch, že riešenie neskonverguje, uvádzame aj čas $t_{konverg}$ [s], do ktorého riešenie ešte konvergovalo.

Najskôr nájdeme vhodné parametre pre variantu s pohybom krhlovitých chrupaviek a aktívnym napätím (Variant 5), potom ich aplikujeme na variantu s pohybom krhlovitých, štítnej chrupavky a aktívnym napätím (Variant 7) a ak riešenie skonverguje postúpime na ďalšie, ak nie budeme hľadať ďalšie vhodné parametre. Riešenia pre rôzne parametre sú zapísané v Tabuľke 12

Tabuľka 12 Výsledky ladenia

Variant	E_{sval} [Pa]	G_{sval} [Pa]	σ_x [Pa]	$t_{konverg}$ [s]	σ_{HMH}^{max} [Pa]
5	30 000	10 067	5 000	0	-
5	50 000	16 778	5 000	0	-
5	100 000	33 557	5 000	0,98	19 850
5	100 000	33 557	4 500	0,99	18 720
5	100 000	33 557	4 000	0,99	18 002
5	150 000	50 335	5 000	0,93	22 300
5	150 000	50 335	4 500	0,94	21 500
5	150 000	50 335	4 000	0,94	20 450
5	200 000	67 114	4 000	0,67	14 500
5	80 000	26 845	5 000	1	18 400
5	90 000	30 201	5 000	1	19 660
5	90 000	30 201	4 500	1	18 499
7	100 000	33 557	4 000	1	22 870
7	80 000	26 845	4 000	1	20 507
7	90 000	30 201	5 000	1	23 370
7	90 000	30 201	4 500	1	21 654
7	90 000	30 201	4 000	1	20 448
1	90 000	30 201	4 500	1	7 689
2	90 000	30 201	4 500	1	7 973
3	90 000	30 201	4 500	1	6 488
4	90 000	30 201	4 500	1	12 904
6	90 000	30 201	4 500	1	12 576

Na základe predchádzajúcich výpočtov sme vybrali hodnoty modulu pružnosti

$$E_{sval} = 90\,000 \text{ Pa,}$$

čo pre model Neo Hook podľa rovnice (5.5) zodpovedá

$$G_{sval} = 30\,201 \text{ Pa}$$

a hodnota počiatočného napätia, zodpovedajúcemu aktívnemu napätiu je

$$\sigma_x = 4\,500 \text{ Pa.}$$

S týmito parametrami budeme ďalej počítať vo všetkých variantoch a analyzovať výsledky v ďalšej kapitole.

6 Výsledky

Riešenie výpočtového modelu bolo prevedené pomocou softvéru Ansys 19.2. Výsledné hodnoty deformácií a napätí pre jednotlivé varianty (Tabuľka 9) sú graficky prezentované v tejto kapitole. Všetky výsledky sú zobrazované v pravej mierke („True Scale“).

Postupne budú prezentované výsledné hodnoty

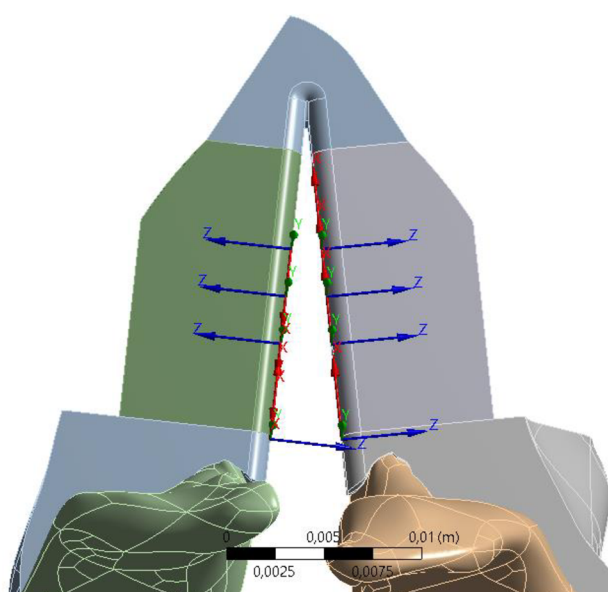
- Celkovej deformácie mäkkých tkanív hlasiviek
- Celkové deformácie pozdĺž čela hlasiviek
- Smerové deformácia v osách x , y a z pozdĺž čela hlasiviek
- Redukované napätia podľa podmienky HMM (σ_{HMM}) pre jednotlivé mäkké tkanivá hlasiviek
- Redukované napätie podľa podmienky HMM (σ_{HMM}) naprieč jednotlivými vrstvami v $1/2$ dĺžky hlasiviek
- Redukované napätie podľa podmienky HMM (σ_{HMM}) na rezoch v $1/3$, $2/3$ dĺžky hlasiviek

Výsledky redukovaného napätia naprieč jednotlivými vrstvami sú vykreslené ako priemerované („Averaged“), ale s vylúčením priemerovania medzi jednotlivými telesami. Tým predchádzame skresleniu výsledkov.

Pre varianty, kde dochádza aj ku kontaktu hlasiviek bude zobrazený aj

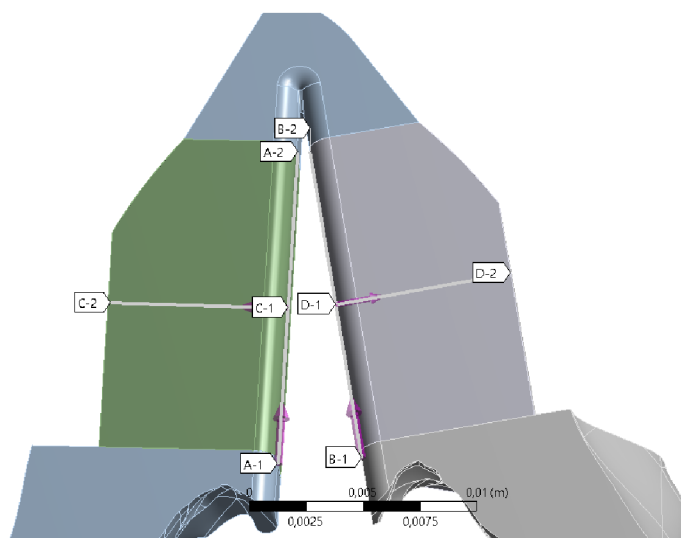
- Kontaktný tlak (p_{kont})

Aby bolo možné zobraziť výsledné hodnoty v presných miestach a rezoch hlasiviek, zadefinovali sme nové súradnicové systémy (Obr. 33).



Obr. 33 Zobrazenie jednotlivých súradnicových systémov

Niektoré výsledky sú vykreslené na konštrukčnej geometrii – cesta („Path“). Pre každú hlasivku sme vytvorili dve cesty, jedna pozdĺž čela a druhá kolmo na ňu v $1/2$ dĺžky hlasivky (Obr. 34).



Obr. 34 Zobrazenie jednotlivých ciest

Pre vykreslenie výsledkov v daných rezoch hlasiviek sme vytvorili plochy („Surface“) ako konštrukčné geometrie.

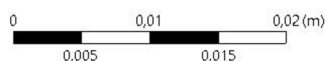
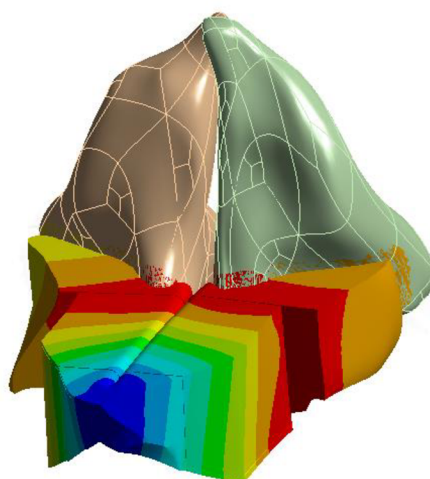
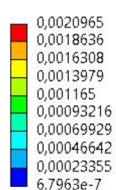
6.1 Variant 1

V prípade variantu 1 boli predpísané len pohyby krhlovitých chrupaviek. Zvyšné chrupavky boli nepohyblivé a pevne pripojené k zemi.

Vplyvom pohybu krhlovitých chrupaviek sa hlasivky k sebe približujú a postupne sa dostávajú do kontaktu. Na Obr. 35 je zobrazená celková deformácia mäkkých tkanív hlasiviek. Maximálna hodnota celkovej deformácie je

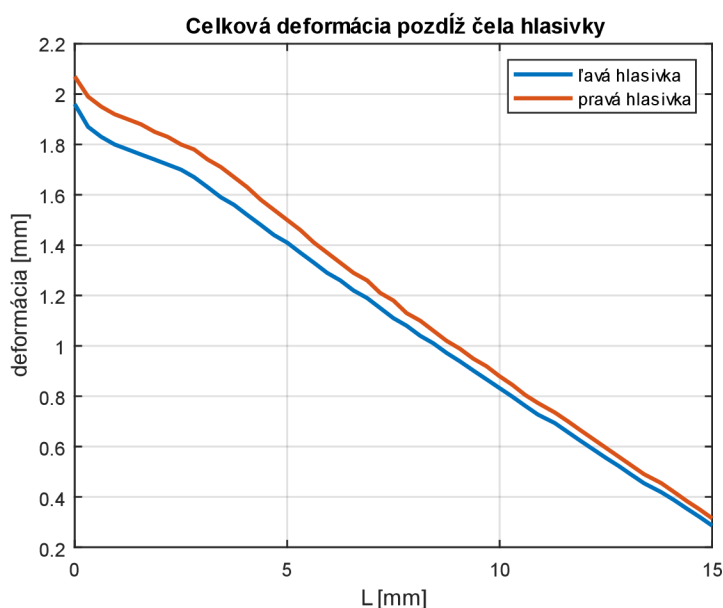
$$u_{max}^1 = 2,097 \text{ mm}$$

G: A
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
Custom
Max: 0,0020965
Min: 0
17.05.2021 16:54



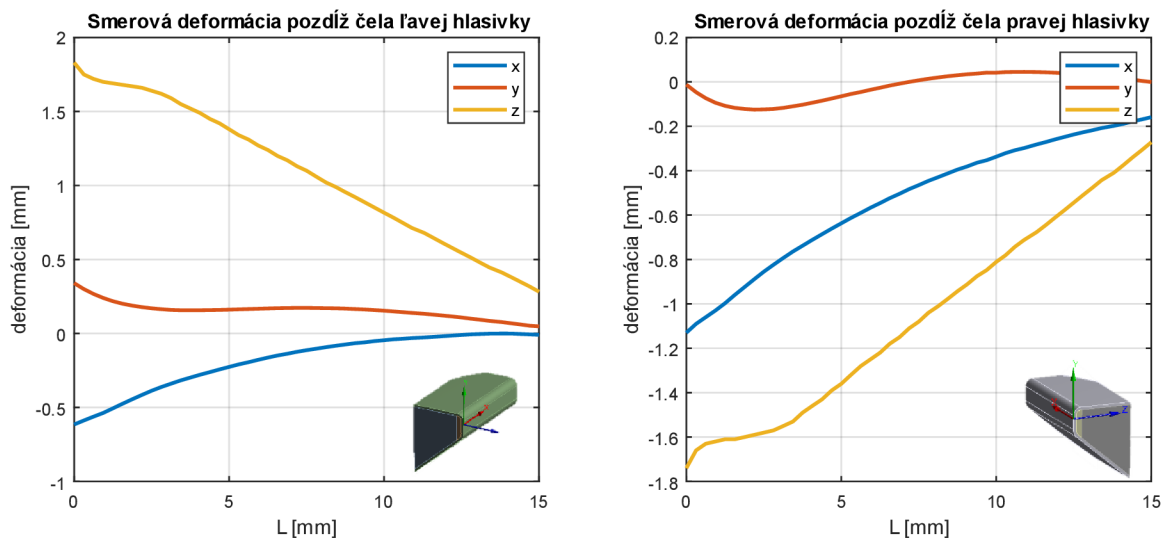
Obr. 35 Celková deformácia mäkkých tkanív, variant 1

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 36) je priebeh celkovej deformácie pozdĺž čela oboch hlasiviek. Z grafu je vidno, že posuvy hlasiviek boli symetrické a líšia sa len málo.



Obr. 36 Celková deformácia pozdĺž čela hlasiviek, variant 1

Obr. 37 zobrazuje posuvy v osiach x, y, z pre ľavú aj pravú hlasivku v príslušných súradnicových systémoch definovaných na začiatku každej hlasivky s osou x rovnobežnou s čelom. Z výsledkov vidno, že pretiahnutie hlasiviek (deformácia v ose x) je pre pravú hlasivku približne dvakrát väčšie. Treba brať na vedomie, že osa z v súradnicových systémoch, v ktorých bola definovaná cesta pozdĺž čela hlasivky, smeruje von z ľavej hlasivky a dovnútra pravej. Preto sú priebehy presne naopak.



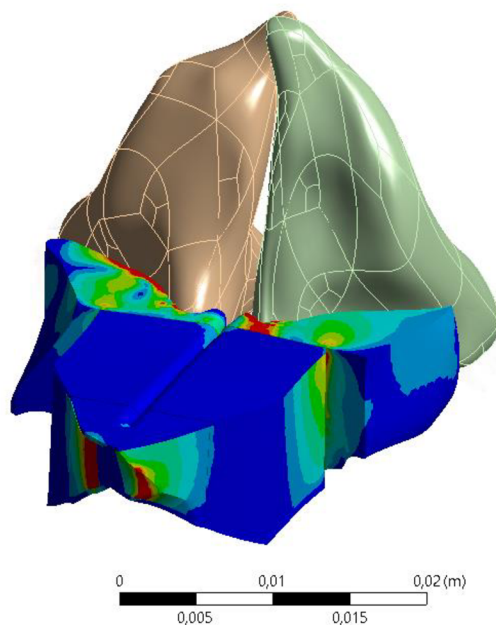
Obr. 37 Smerové deformácie pozdĺž čela hlasiviek; vľavo ľavá hlasivka, vpravo pravá hlasivka; variant 1

Na Obr. 38 je vykreslený priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM na hlasivkách. Najvyššie hodnoty napätia sa nachádzajú v prechodových chrupkovitých častiach hlasiviek. Maximálna veľkosť napätia pre mäkké tkanivá sa nachádza v svale pravej hlasivky a jej hodnota je

$$\sigma_{HMH}^{max,1} = 11\,194 \text{ Pa}$$

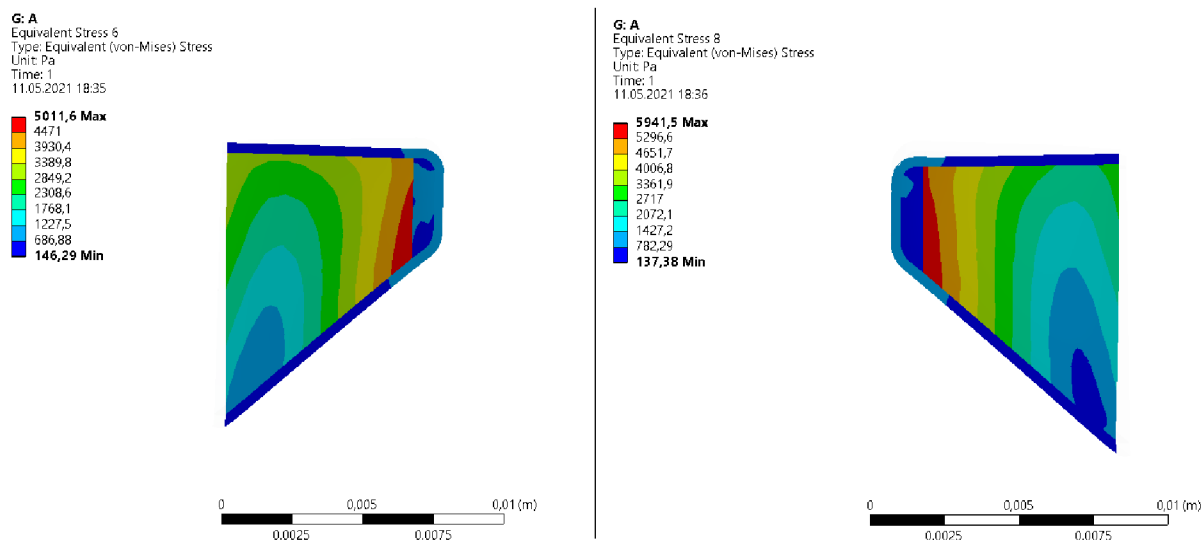
G: A
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 10:04

1,1316e5 Max
9000
7876,4
6752,8
5629,2
4505,7
3382,1
2258,5
1134,9
11,331 Min



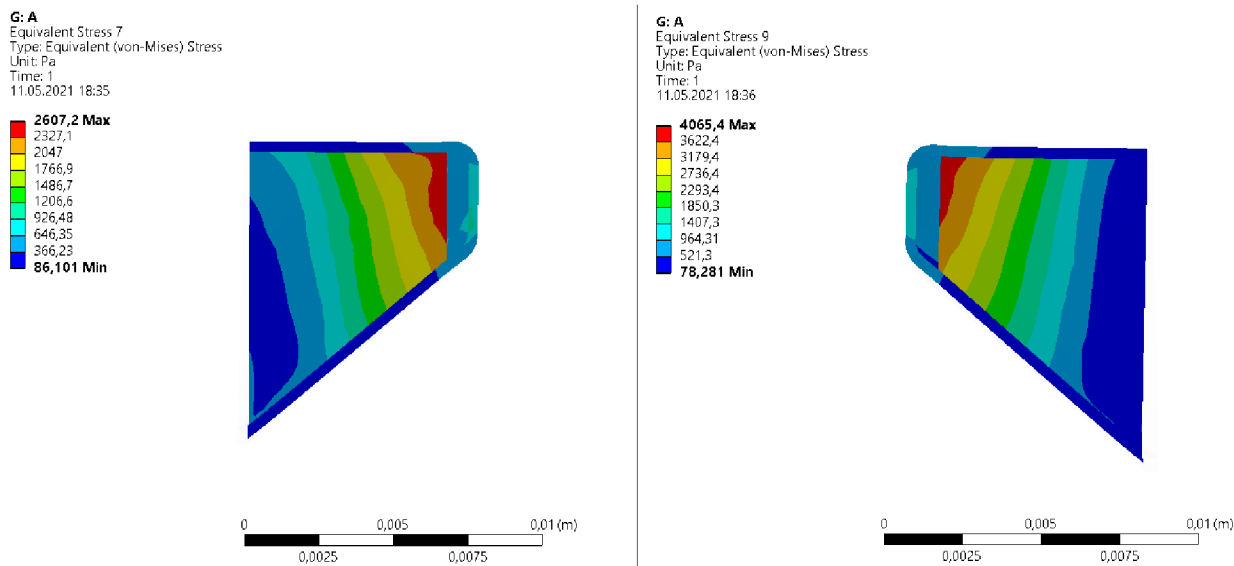
Obr. 38 Priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM, variant 1

Rozloženie redukovaného napätia podľa HMM v reze v $1/3$ hlasiviek je zobrazené na Obrázku 39. Maximálne hodnoty napätí sa vyskytujú v svalu, tesne pod ligamentom. V pravej hlasivke sú napätia vyššie ako v ľavej.



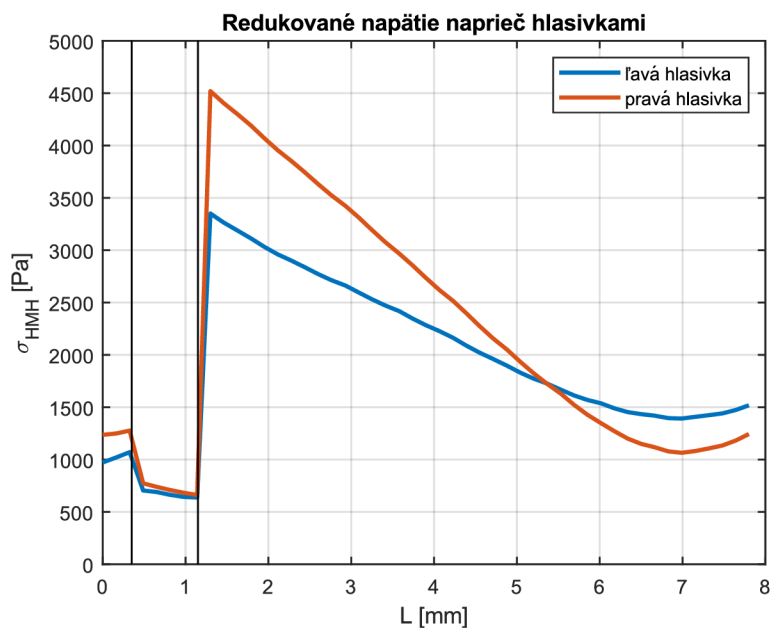
Obr. 39 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $1/3$ dĺžky hlasiviek, variant 1

Rozloženie redukovaného napätia podľa podmienky HMM v reze v $2/3$ hlasiviek je zobrazené na Obr. 40. Maximálne hodnoty napätia sa opäť nachádzajú pod vrstvou ligamentu v svalu. Hodnoty v pravej hlasivke sú značne vyššie ako v ľavej.



Obr. 40 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $2/3$ dĺžky hlasiviek, variant 1

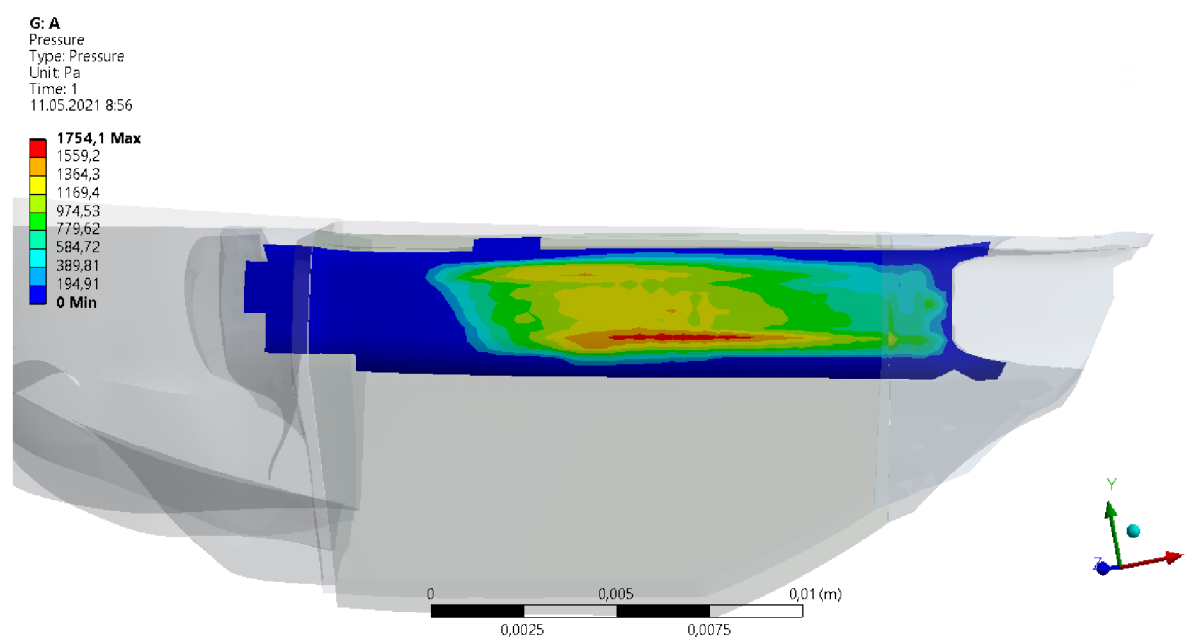
Na nasledujúcom obrázku (Obr. 41) je zobrazený priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM naprieč jednotlivými vrstvami v $1/2$ dĺžky pre obe hlasivky. Ako aj v skôr uvedených výsledkoch, aj tu dosahujú napätia v pravej hlasivke vyššie hodnoty napätia ako v ľavej. Tiež si možno všimnúť mierny pokles napätí pri prechode do vrstvy ligamentu a prudký nárast pri prechode do svalu. Napätie v svalu ďalej klesá a na konci jemne stúpane.



Obr. 41 Redukované napätie naprieč hlasivkami, variant 1

Obr. 42 zobrazuje rozloženie kontaktného tlaku medzi hlasivkami. Maximálna hodnota tlaku je

$$p_{kon,1} = 1\,754\text{ Pa}$$



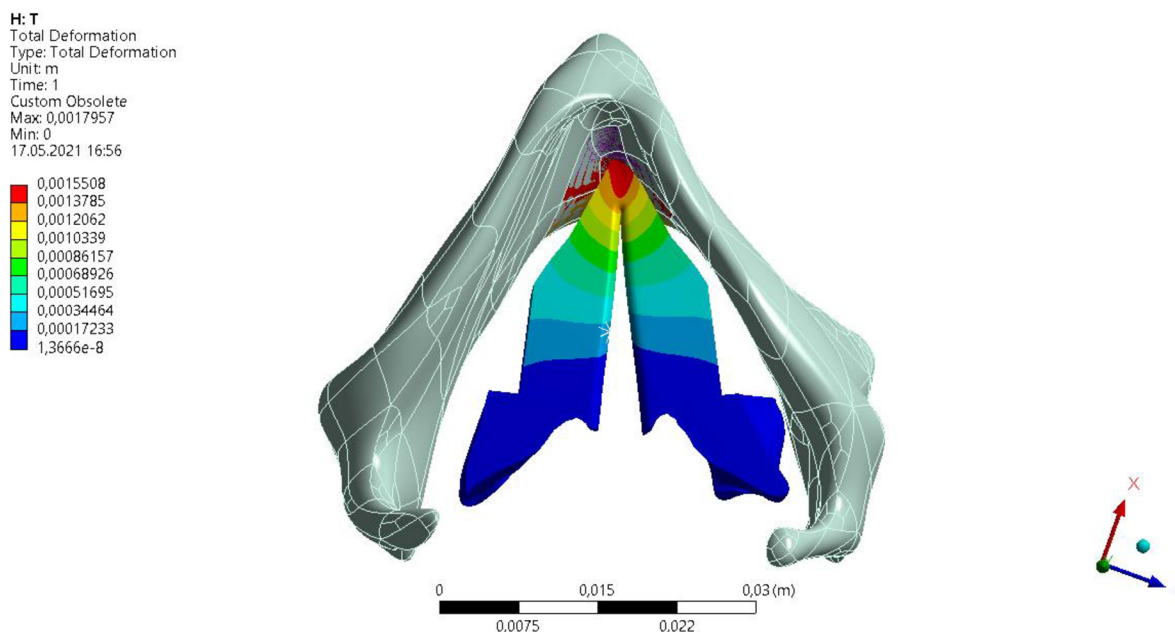
Obr. 42 Kontaktný tlak, variant 1

6.2 Variant 2

V prípade variantu 2 bol predpísaný pohyb štítnej chrupavky. Zvyšné chrupavky boli nepohyblivé a pevne pripojené k zemi.

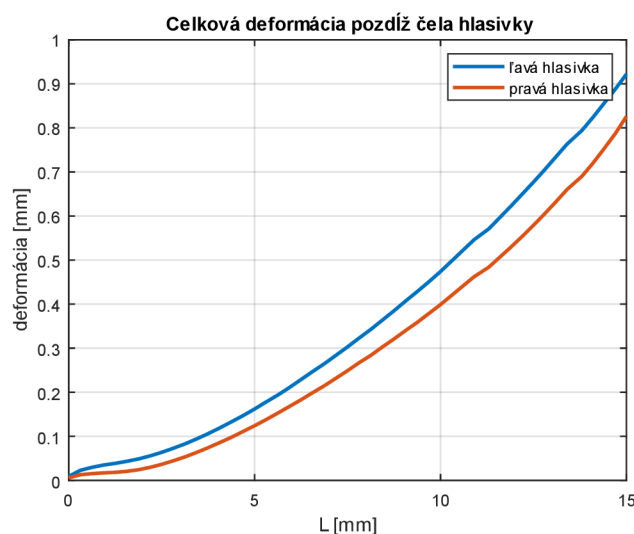
Hlasivky sa vplyvom pohybu štítnej chrupavky mierne natiahli, ale keďže sa hlasivky k sebe nepriblížili, nedošlo ani ku kontaktu. Na Obr. 43 je zobrazená celková deformácia mäkkých tkanív hlasiviek pri daných okrajových podmienkach. Maximálna hodnota celkovej deformácie je

$$u_{max}^2 = 1,551 \text{ mm}$$



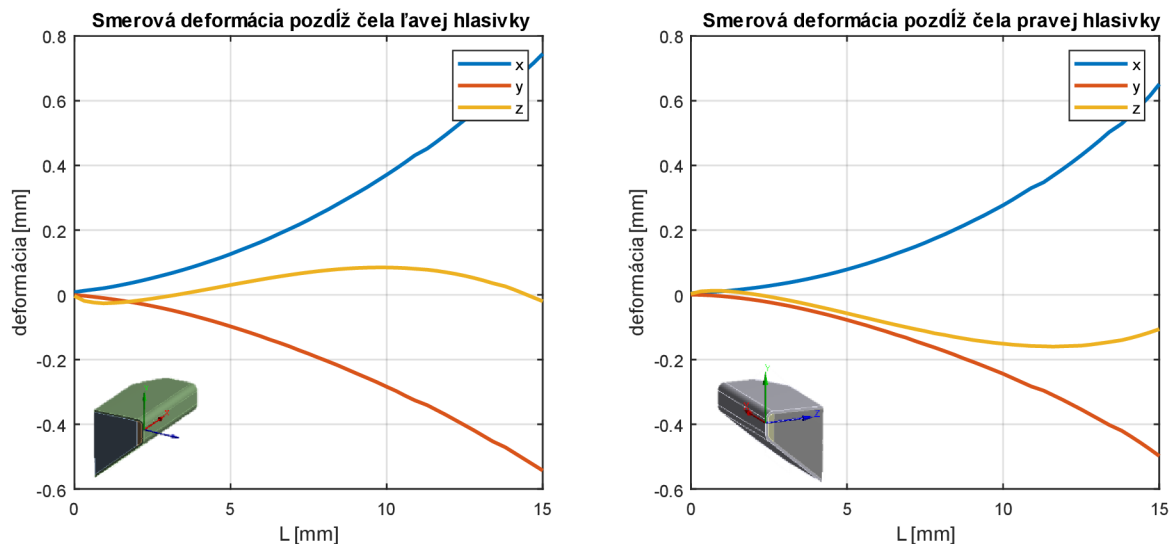
Obr. 43 Celková deformácia mäkkých tkanív, variant 2

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 44) je priebeh celkovej deformácie pozdĺž čela hlasiviek, kde vidno, že obe hlasivky sa deformujú veľmi podobne.



Obr. 44 Celková deformácia pozdĺž čela hlasiviek, variant 2

Obr. 45 zobrazuje smerové deformácie v osiach x, y, z pre ľavú aj pravú hlasivku v príslušných súradnicových systémoch definovaných na začiatku každej hlasivky s osou x rovnobežnou s čelom. Z výsledkov vyplýva, že účinkom pohybu štítnej chrupavky dochádza hlavne k natiahnutiu hlasiviek po ich dĺžke (deformácia v ose x), vydutiu smerom dovnútra (osa z) a poklesu konca hlasiviek prichyteného ku štítnej chrupavke (osa y).

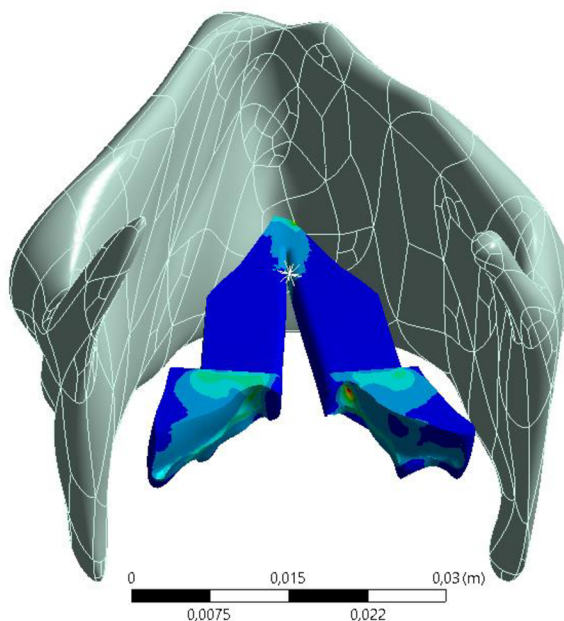
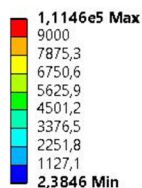


Obr. 45 Smerové deformácie pozdĺž čela hlasiviek; vľavo ľavá hlasivka, vpravo pravá hlasivka; variant 2

Na Obr. 46 je zobrazený priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM na mäkkých tkanivách hlasiviek. Najvyššie hodnoty sa nachádzajú v prechodových telesách. Maximálna veľkosť napätia pre telesá hlasiviek modelu M5 sa nachádza v svale pravej hlasivky a jej hodnota je

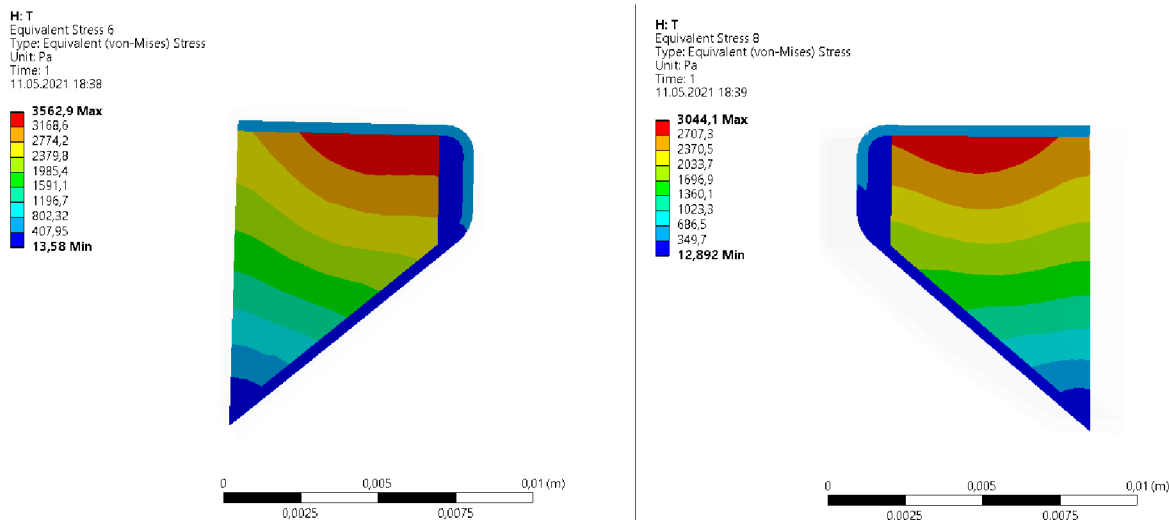
$$\sigma_{HMM}^{max,2} = 7\,974 \text{ Pa}$$

H: T
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 10:06



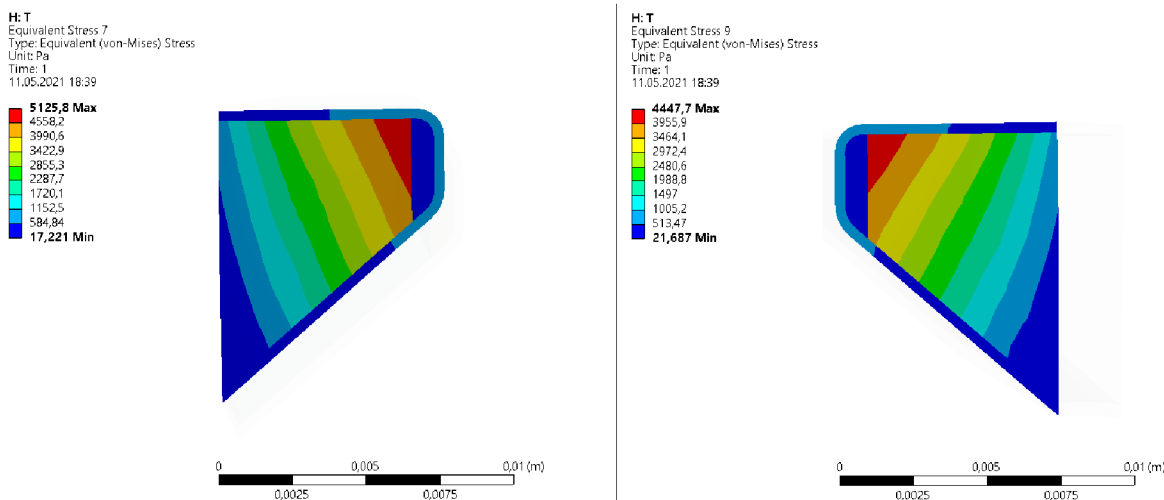
Obr. 46 redukované napätie mäkkých tkanív, variant 2

Rozloženie redukovaného napätia podľa HMH v reze v $1/3$ hlasiviek je zobrazené na Obr. 47. Maximálne hodnoty napätí sa nachádzajú v hornej časti svalu, najmä pod povrchovou vrstvou a dosahujú vyššie hodnoty v ľavej hlasivke.



Obr. 47 Redukované napätie podľa podmienky HMH v reze v $1/3$ dĺžky hlasiviek, variant 2

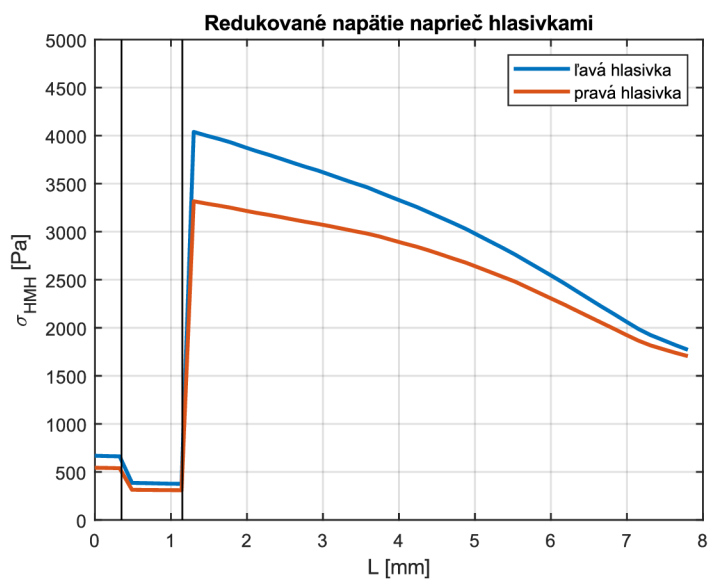
Rozloženie redukovaného napätia podľa HMH v reze v $2/3$ hlasiviek je zobrazené na Obr. 48. Najvyššia hodnota napätia sa nachádza u oboch hlasiviek v hornom rozhraní ligamentu a povrchovej vrstvy. Vyššie hodnoty dosahuje napätie v ľavej hlasivke.



Obr. 48 Redukované napätie podľa podmienky HMH v reze v $2/3$ dĺžky hlasiviek, variant 2

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 49) je priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMH naprieč jednotlivými vrstvami v $1/2$ pre obe hlasivky. Tak, ako v predchádzajúcich rezoch, aj tu je redukované napätie v ľavej hlasivke vyššie. Jeho

priebeh je podobný ako vo variante 1, najmenšie hodnoty sa nachádzajú vo vrstve ligamentu a najvyššie v svale, tesne pod ligamentom a postupne klesajú.



Obr. 49 Redukované napätie naprieč hlasivkami, variant 2

Pri tomto variante nedošlo ku kontaktu hlasiviek, preto nie je zobrazený priebeh kontaktného tlaku.

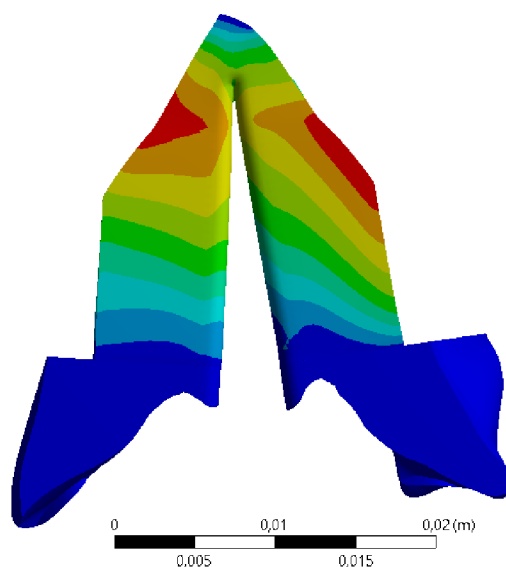
6.3 Variant 3

V prípade variantu 3 bolo predpísané vnútorné napätie svalu pomocou príkazu INISTATE a chrupavky boli nepohyblivé a pevne pripojené k zemi.

Predpísanie aktívneho napätia svalu v telesách modelu M5 spôsobuje miernu kontrakciu a vydutie hlasiviek. Na Obr. 50 je zobrazená celková deformácia mäkkých tkanív hlasiviek pri daných okrajových podmienkach. Maximálna hodnota celkovej deformácie je

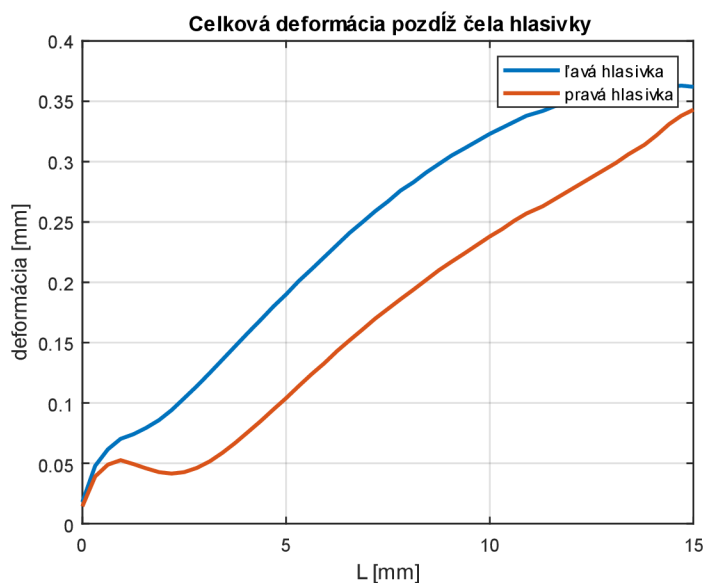
$$u_{max}^3 = 0,507 \text{ mm}$$

F: IS
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
Custom Obsolete
12.05.2021 9:39
0,00050732
0,00050732 Max
0,00045095
0,00039458
0,00033821
0,00028184
0,00022547
0,00016911
0,00011274
5,6369e-5
0 Min



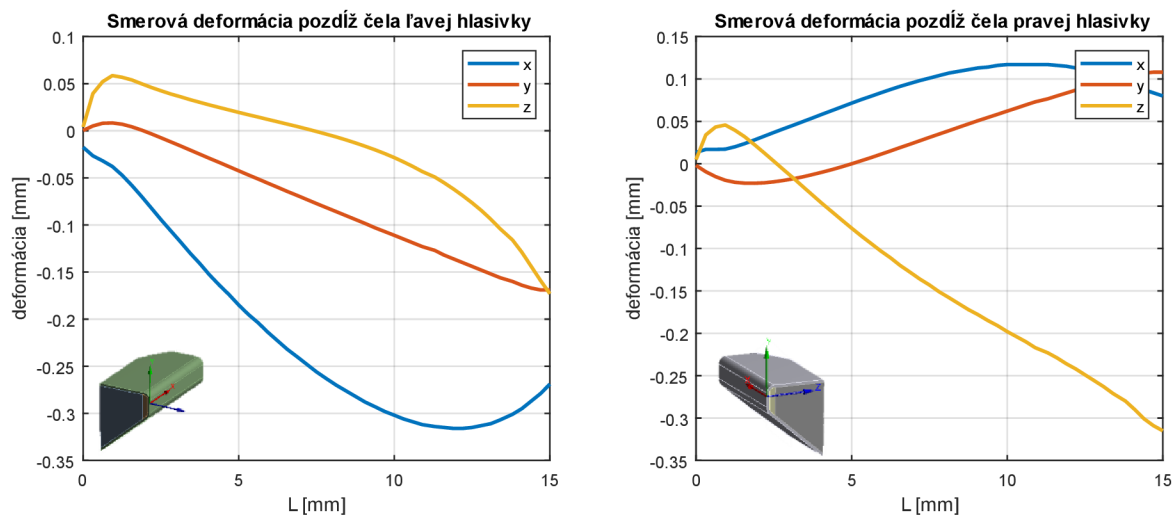
Obr. 50 Celková deformácia mäkkých tkanív, variant 3

Na Obr. 51 je priebeh celkovej deformácie pozdĺž čela hlasiviek.



Obr. 51 Celková deformácia pozdĺž čela hlasiviek, variant 3

Ďalší obrázok (Obr. 52) zobrazuje smerové deformácie v osiach x, y, z pre ľavú aj pravú hlasivku v príslušných súradnicových systémoch definovaných na začiatku každej hlasivky s osou x rovnobežnou s čelom. Z výsledkov vyplýva, že účinkom predpísaného napätia vnútri svalu hlasiviek sa ľavá a pravá hlasivka deformujú mierne odlišne. Zatiaľ, čo sa ľavá hlasivka po celej dĺžke skracuje a približne do polovice dĺžky hlasivky sa vydúva smerom dnu, pravá hlasivka sa po ceste na jej čele mierne natáhuje a vydúva smerom dnu na menšej dĺžke hlasivky. To bolo zjavne spôsobené tým, že hlasivky nie sú symetrické a aj keď bol pre pravú hlasivku menený smer súradnicového systému, v ktorom pôsobí aktívne napätie v svale, bolo by treba tento smer ešte ďalej upravovať.



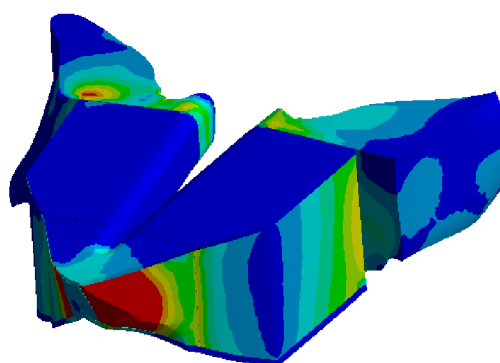
Obr. 52 Smerové deformácie pozdĺž čela hlasiviek; vľavo ľavá hlasivka, vpravo pravá hlasivka; variant 3

Na Obr. 53 je priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM na mäkkých tkanivách hlasiviek. Najvyššie hodnoty boli opäť dosiahnuté v prechodových telesách. Na telesách modelu M5 boli najvyššie hodnoty v svale pravej hlasivky a to

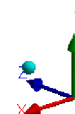
$$\sigma_{HMM}^{max,3} = 6\,488 \text{ Pa}$$

F: IS
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 9:41

44753 Max
4500
3937,7
3375,5
2813,2
2251
1688,7
1126,5
564,23
1,9773 Min

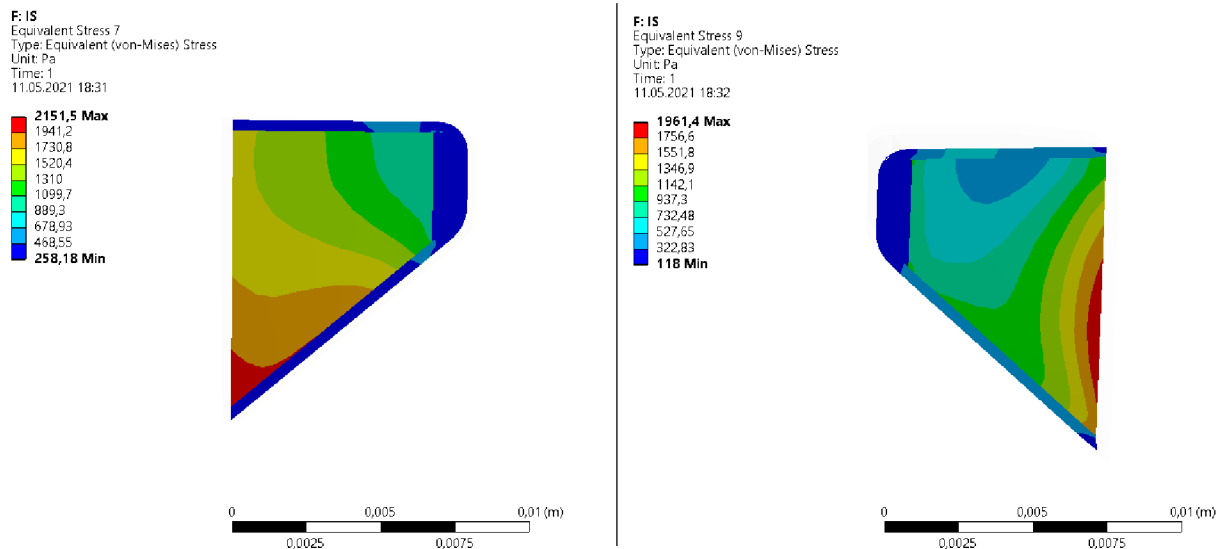


0 0,005 0,01 0,015 0,02 (m)



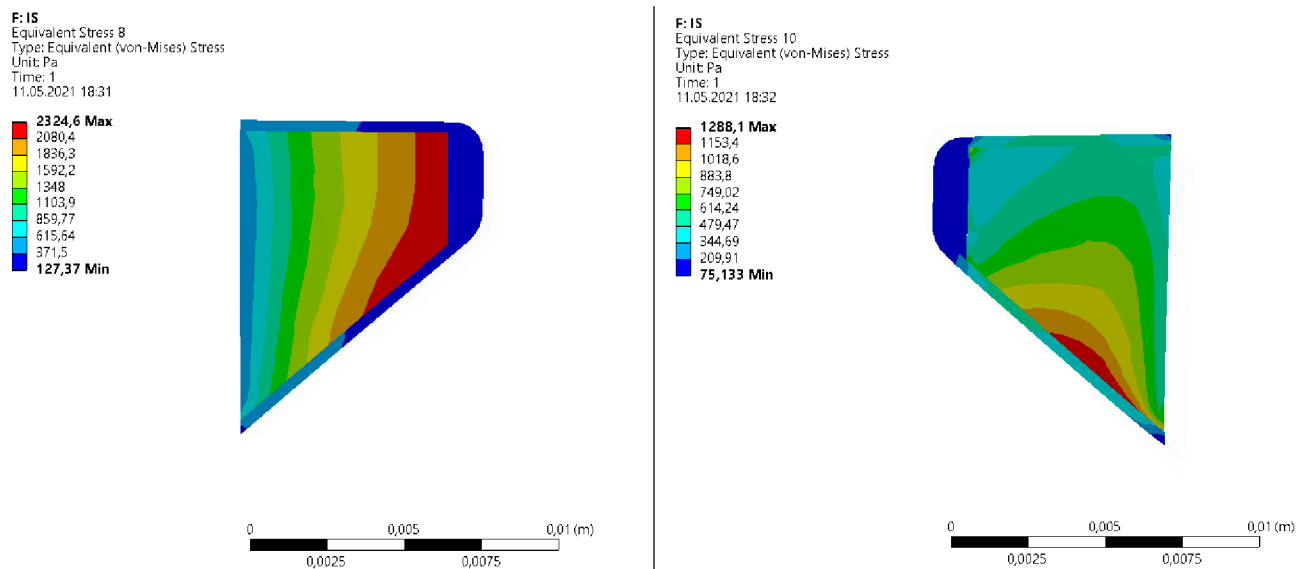
Obr. 53 Priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM, variant 3

Na Obr. 54 je priebeh redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $1/3$ dĺžky hlasiviek. Rozloženie napätia medzi pravou a ľavou hlasivkou je rôzne. Maximálne hodnoty sa vyskytujú v spodných častiach hlasiviek, vyššie je v ľavej hlasivke.



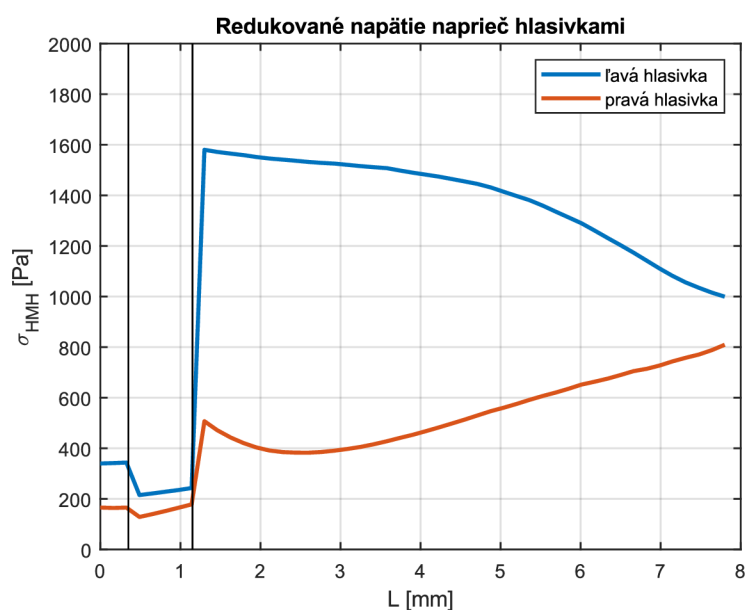
Obr. 54 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $1/3$ dĺžky hlasiviek, variant 3

Na Obr. 55 je zobrazený priebeh redukovaného napätia v reze v $2/3$ dĺžky hlasiviek. Rozloženie napätia v pravej hlasivke sa líši od rozloženia v ľavej hlasivke. Vyššie hodnoty sú opäť dosiahnuté v ľavej hlasivke.



Obr. 55 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $2/3$ dĺžky hlasiviek, variant 3

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 56) je zobrazený priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM naprieč jednotlivými vrstvami v $1/2$ pre obe hlasivky. Priebeh napätia v ľavej hlasivke je podobný ako v predchádzajúcich variantoch a dosahuje vyššie hodnoty. Priebeh napätia v pravej hlasivke je rozdielny. Síce dosahuje najnižšie hodnoty v ligamente a tesne za ním v svali prudko rastie, ale po miernom poklese znova stúpa a maximum má na konci svalu.



Obr. 56 Redukované napätie naprieč hlasivkami, variant 3

V tomto variante nedošlo ku kontaktu.

6.4 Variant 4

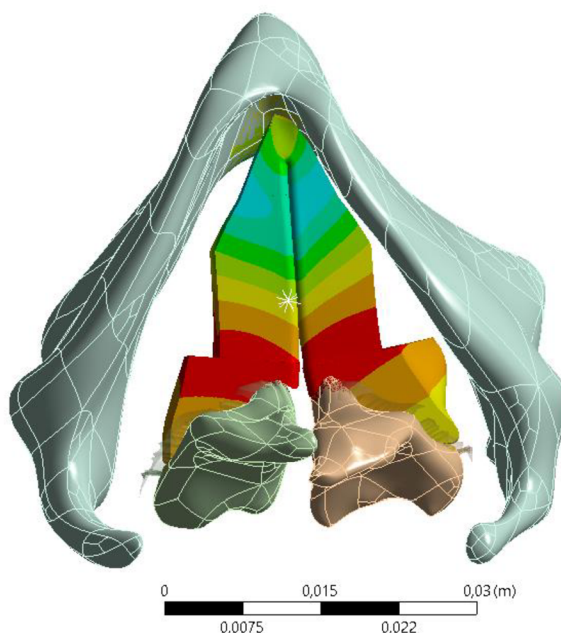
Pre variant 4 boli predpísané pohyby krhlovitých chrupaviek a štítnej chrupavky.

Vplyvom pohybu štítnej chrupavky dochádza k natihnutiu hlasiviek a vplyvom pohybu krhlovitých chrupaviek k ich priblíženiu a kontaktu. Na Obr. 73 je zobrazená celková deformácia mäkkých tkanív hlasiviek pri daných okrajových podmienkach. Maximálna hodnota celkovej deformácie je

$$u_{max}^4 = 2,096 \text{ mm}$$

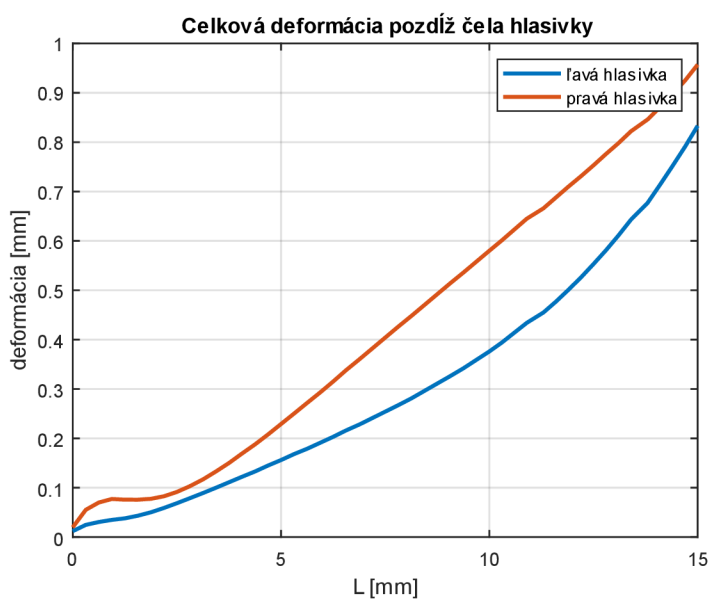
C: A+T
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
10.05.2021 11:27

0,0020961 Max
0,0018632
0,0016303
0,0013974
0,0011645
0,00093162
0,00069871
0,00046581
0,0002329
0 Min



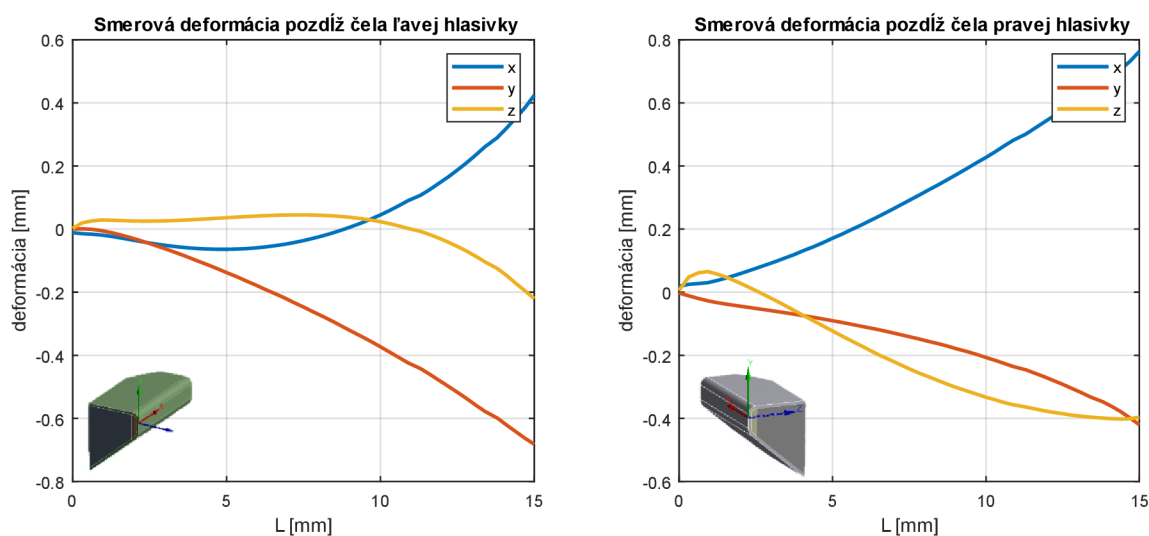
Obr. 57 Celková deformácia mäkkých tkanív, variant 4

Na Obr. 58 je priebeh celkovej deformácie pozdĺž čela hlasiviek.



Obr. 58 Celková deformácia pozdĺž čela hlasiviek, variant 4

Obr. 59 zobrazuje smerové deformácie v osiach x, y, z pre ľavú aj pravú hlasivku v príslušných súradnicových systémoch definovaných na začiatku každej hlasivky s osou x rovnobežnou s čelom. Z týchto výsledkov možno vidieť, že pri tomto variante dochádza hlavne k natiahnutiu hlasiviek po ich dĺžke (deformácia v ose x) a k poklesu ku koncu hlasiviek prichyteného k štítnej chrupavke (os y). Ľavá hlasivka sa približne do dvoch tretín dĺžky hlasivky vydúva smerom dnu (os z). Pravá hlasivka sa po ceste na čele hlasivky vydúva smerom dovnútra na menšej dĺžke hlasivky a potom sa vydúva smerom von.

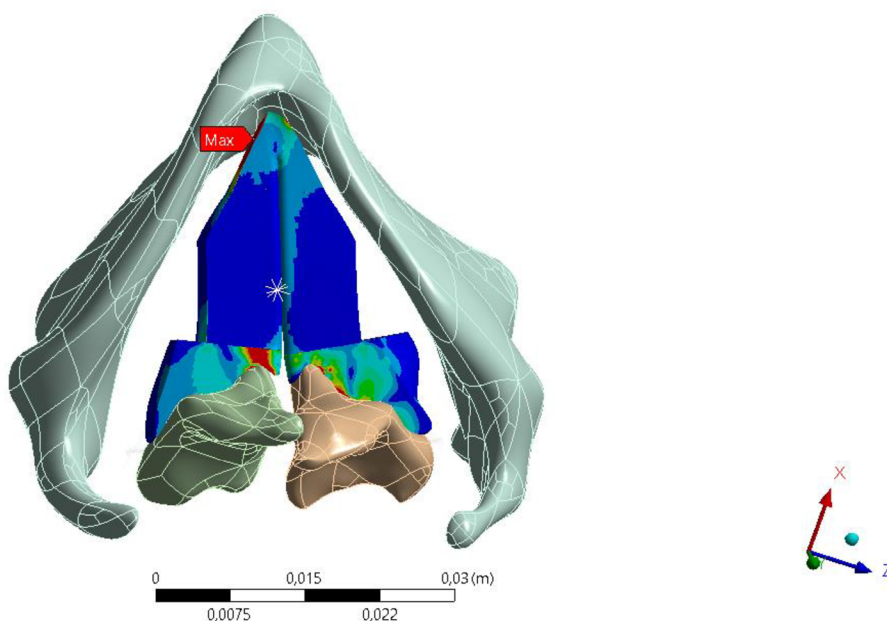
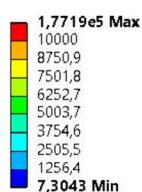


Obr. 59 Smerové deformácie pozdĺž čela hlasiviek; vľavo ľavá hlasivka, vpravo pravá hlasivka; variant 4

Na Obr. 60 je vykreslený priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM na mäkkých tkanivách hlasiviek. Maximálna hodnota bola dosiahnutá na prechodovom telese v miesta napojenia hlasiviek na štítnu chrupavku. Najvyššia hodnota napätia na časti modelu M5 sa nachádza na pravej hlasivke a je rovná

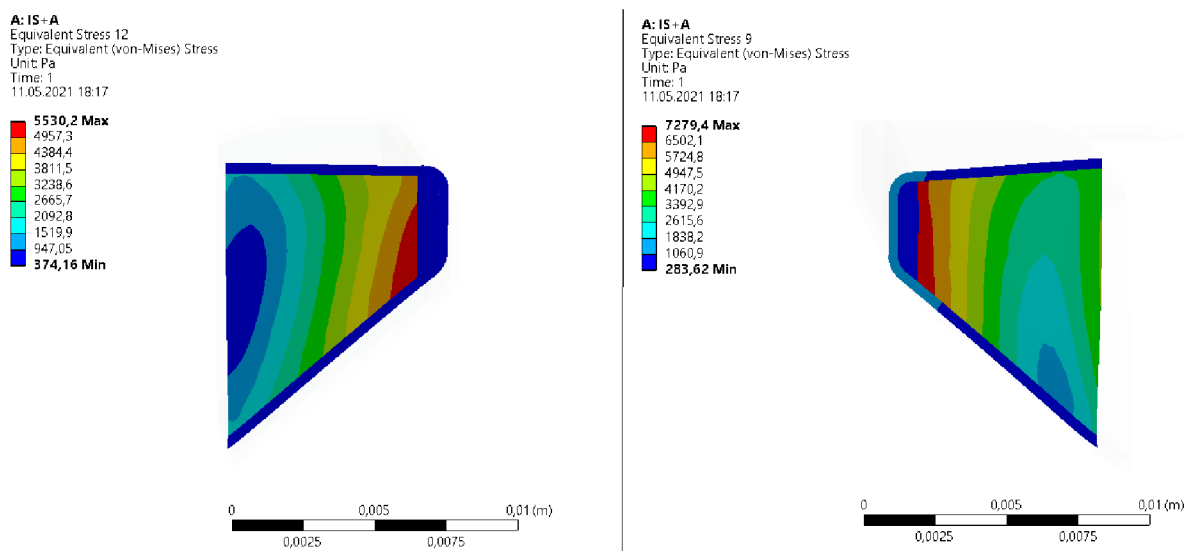
$$\sigma_{HMH}^{max,4} = 12\,904 \text{ Pa}$$

C: A+T
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 9:56



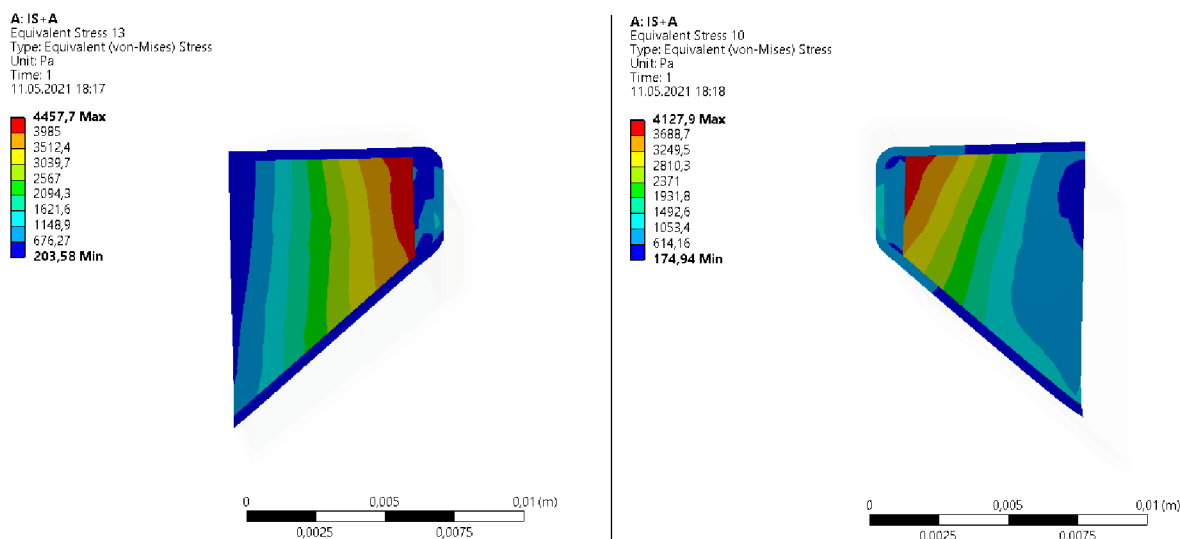
Obr. 60 Redukované napätie mäkkých tkanív podľa podmienky HMM, variant 6

Na Obr. 61 je priebeh redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $1/3$ dĺžky hlasiviek. Rozloženie napätia je medzi pravou a ľavou hlasivkou mierne rozdielne, ale obe dosahujú maximálne hodnoty v svale, tesne pod ligamentom. V pravej hlasivke je hodnota maximálneho redukovaného napätia vyššia.



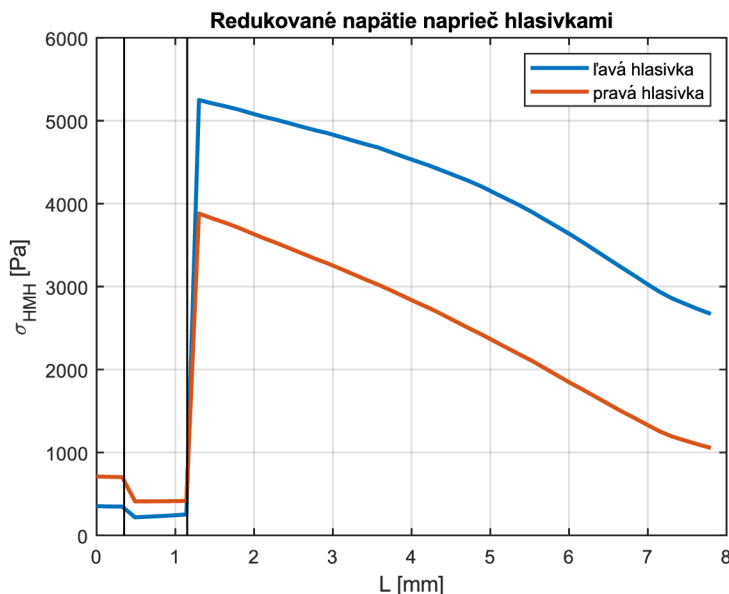
Obr. 61 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $1/3$ dĺžky hlasiviek, variant 6

Na Obr. 78 je priebeh redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $2/3$ dĺžky hlasiviek. Rozloženie napätí sa medzi hlasivkami mierne líši, ale pri oboch sa maximálna hodnota vyskytuje pod ligamentom. Maximálne hodnoty redukovaného napätia sú v obidvoch hlasivkách porovnateľné.



Obr. 62 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $2/3$ dĺžky hlasiviek, variant 6

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 63) je priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM naprieč jednotlivými vrstvami pre pravú a ľavú hlasivku. V oboch hlasivkách je priebeh podobný. V ľavej, v povrchovej vrstve a vo svalce, dosahuje napätie trochu nižšie hodnoty, ale v ligamente sú prakticky rovnaké.



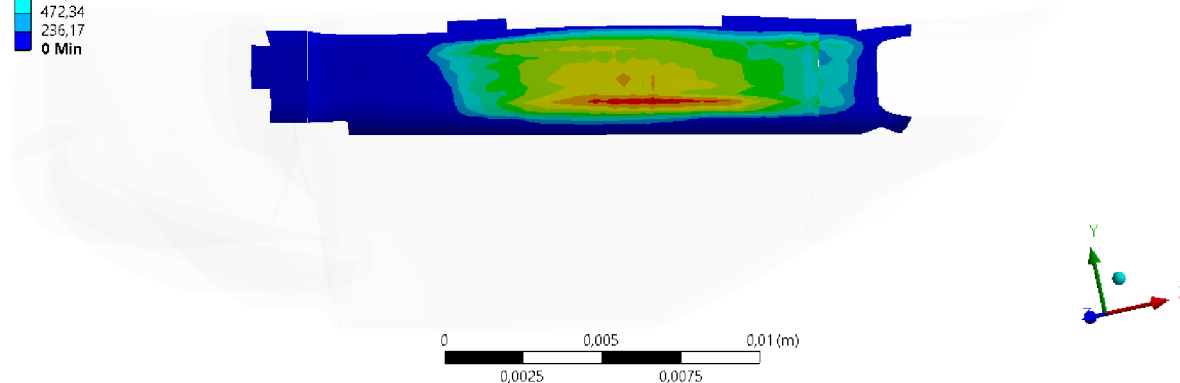
Obr. 63 Redukované napätie naprieč hlasivkami, variant 4

Obr. 64 zobrazuje rozloženie kontaktného tlaku medzi hlasivkami. Maximálna hodnota tlaku je

$$p_{kon,4} = 2\,126 \text{ Pa}$$

C: A+T
Pressure
Type: Pressure
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 9:57

2125,5 Max
1889,4
1653,2
1417
1180,8
944,68
708,51
472,34
236,17
0 Min



Obr. 64 Kontaktný tlak, variant 4

6.5 Variant 5

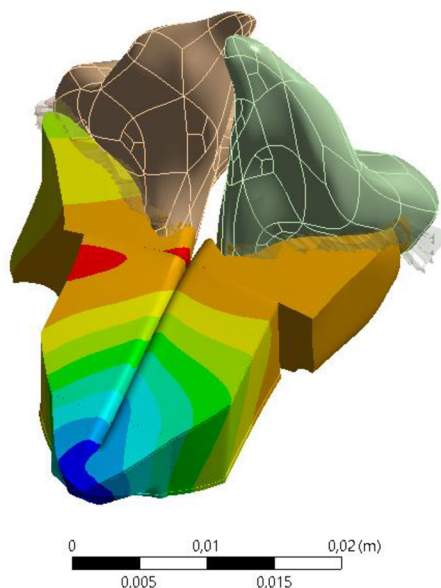
V prípade variantu 5 boli predpísané pohyby krhlovitých chrupaviek a aktívne napätie svalu. Zvyšné chrupavky boli nepohyblivé a pevne pripojené k zemi.

Pohybom krhlovitých chrupaviek sa hlasivky k sebe približujú a vplyvom aktívneho napätia svalu sa mierne skracujú. Na Obr. 65 je zobrazená celková deformácia mäkkých tkanív hlasiviek. Maximálna hodnota celkovej deformácie je

$$u_{max}^5 = 2,292 \text{ mm}$$

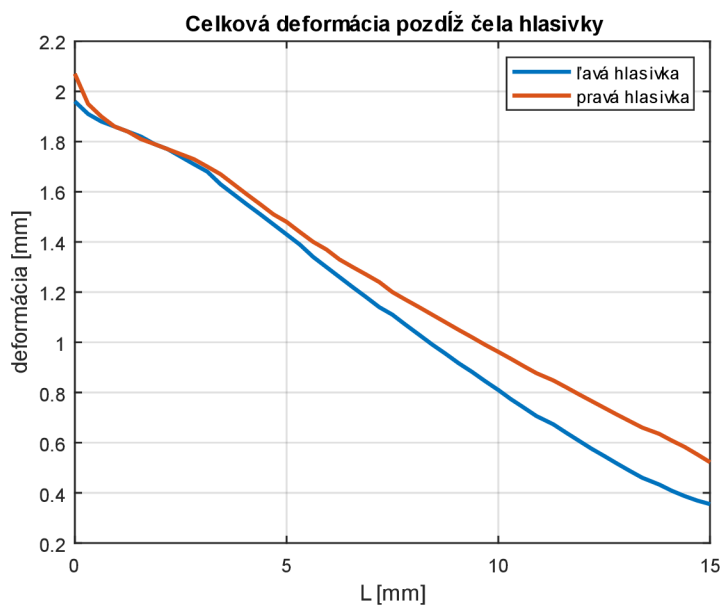
A: IS+A
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
10.05.2021 10:40

0,0022917 Max
0,0020371
0,0017825
0,0015278
0,0012732
0,0010186
0,00076391
0,00050928
0,00025464
0 Min



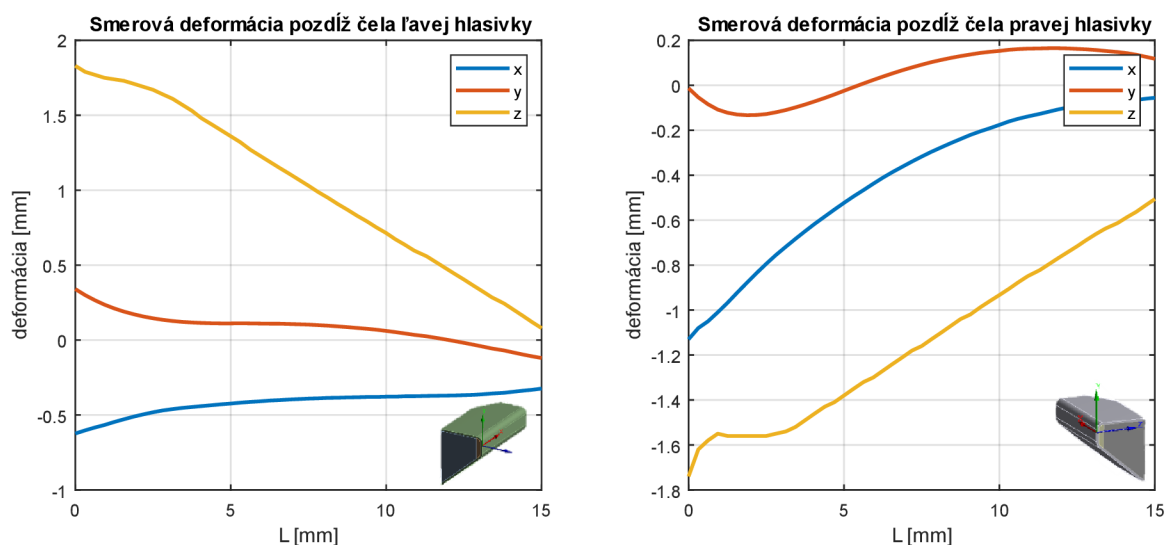
Obr. 65 Celkové deformácie mäkkých tkanív, variant 5

Na Obr. 66 je priebeh celkovej deformácie pozdĺž čela hlasiviek.



Obr. 66 Celková deformácia pozdĺž čela hlasiviek, variant 5

Ďalší obrázok (Obr. 67) zobrazuje smerové deformácie v osiach x, y, z pre ľavú aj pravú hlasivku v príslušných súradnicových systémoch definovaných na začiatku každej hlasivky s osou x rovnobežnou s čelom.

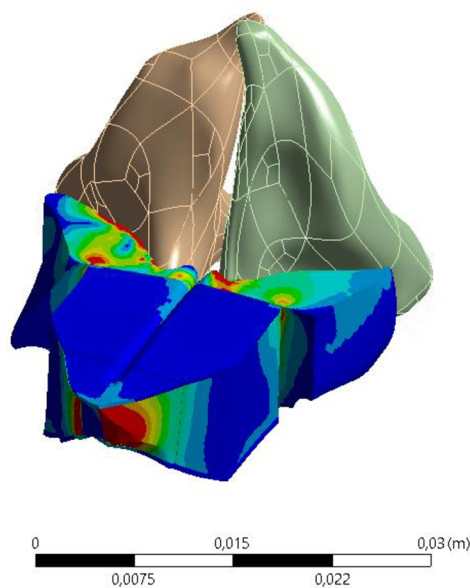
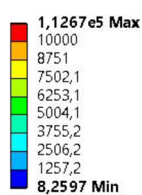


Obr. 67 Smerové deformácie pozdĺž čela hlasiviek; vľavo ľavá hlasivka, vpravo pravá hlasivka; variant 5

Na Obr. 68 je rozloženie redukovaného napätia podľa podmienky HMM na mäkkých tkanivách hlasiviek. Najvyššie hodnoty napätia sa vyskytujú v prechodových telesách. Na telese modelu M5 sa maximálna hodnota nachádza v svale pravej hlasivky

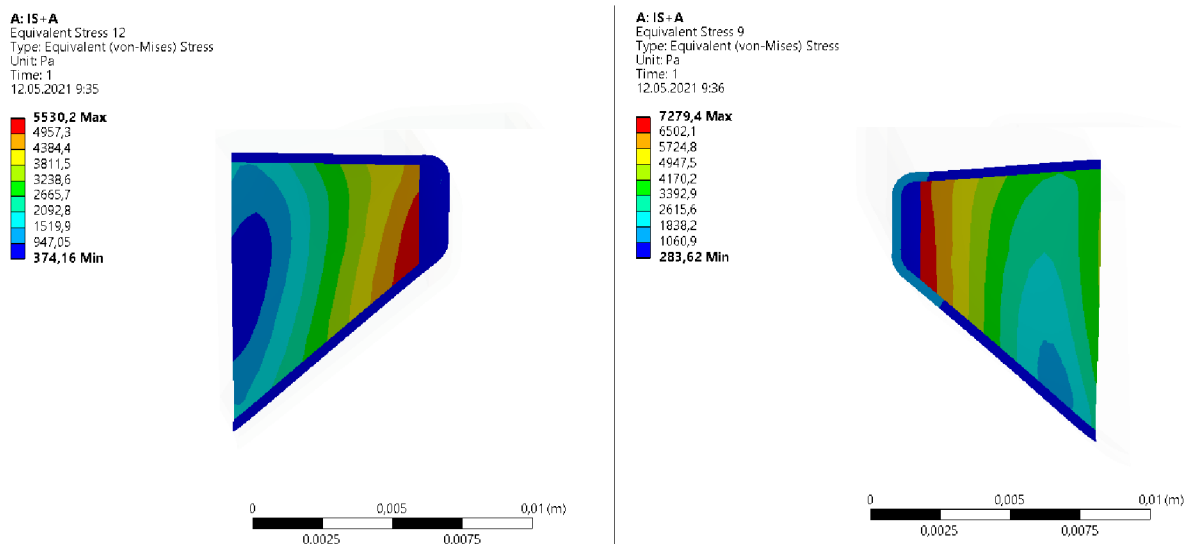
$$\sigma_{HMM}^{max,5} = 18\,499 \text{ Pa}$$

A: IS+A
Equivalent Stress 11
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 9:43



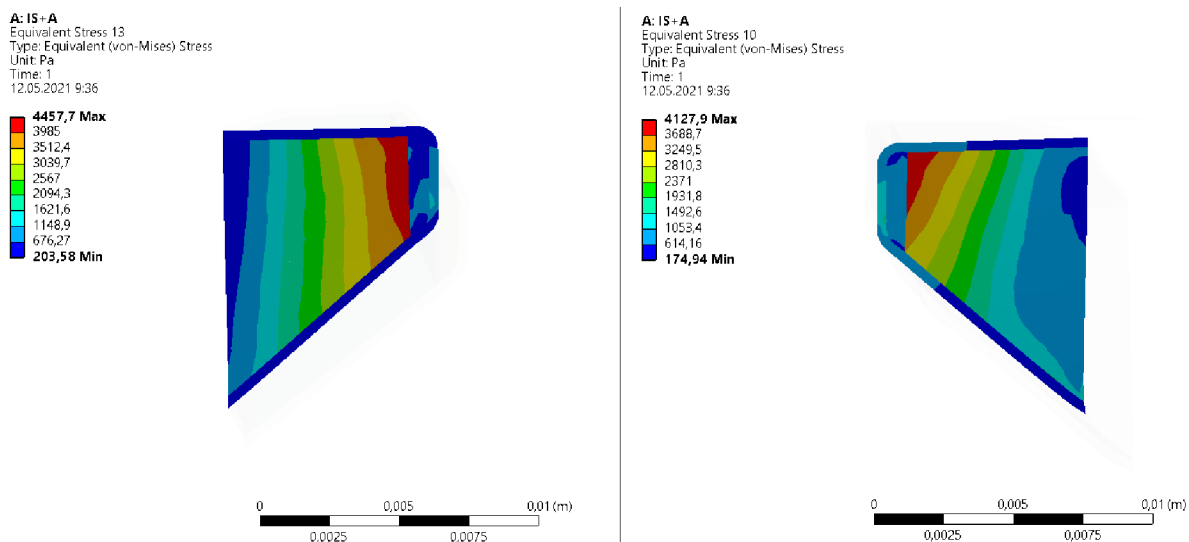
Obr. 68 Redukované napätie mäkkých tkanív podľa podmienky HMM, variant 5

Na Obr. 69 je priebeh redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $1/3$ dĺžky hlasiviek. Rozloženia napätia je medzi pravou a ľavou hlasivkou mierne rozdielne, ale obe dosahujú maximálne hodnoty v svale, tesne pod ligamentom. V pravej hlasivke je hodnota maximálneho redukovaného napätia značne vyššia.



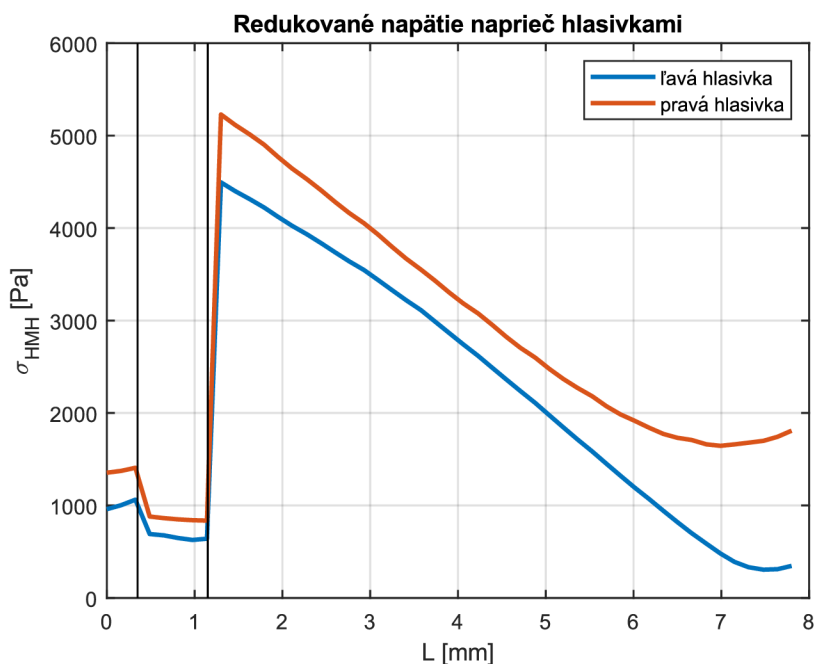
Obr. 69 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $1/3$ dĺžky hlasiviek, variant 5

Na Obr. 70 je rozloženie redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $2/3$ dĺžky hlasiviek. Rozloženie napätí sa medzi hlasivkami mierne líši, ale pri oboch sa maximálna hodnota vyskytuje pod ligamentom. Maximálne hodnoty redukovaného napätia sú v oboch hlasivkách porovnateľné.



Obr. 70 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $2/3$ dĺžky hlasiviek, variant 5

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 71) je priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM naprieč jednotlivými vrstvami pre obe hlasivky. V pravej hlasivke sú po celej dĺžke hodnoty mierne vyššie, ale v oboch majú v podstate rovnaký priebeh.

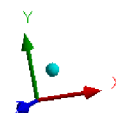
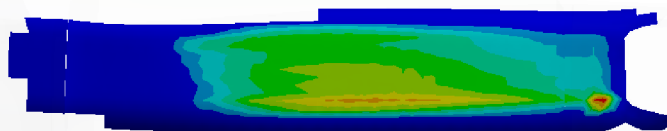
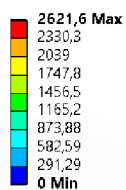


Obr. 71 Redukované napätie naprieč hlasivkami, variant 5

Obr. 72 zobrazuje rozloženie kontaktného tlaku medzi hlasivkami. Maximálna hodnota tlaku je

$$p_{kon,5} = 2\,622 \text{ Pa}$$

A: IS+A
Pressure
Type: Pressure
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 9:44



Obr. 72 Kontaktný tlak, variant 5

6.6 Variant 6

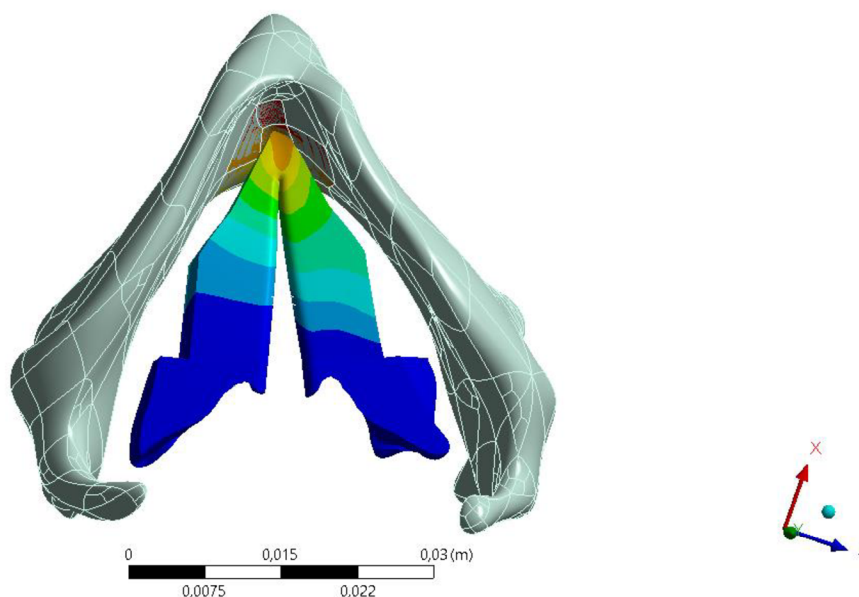
V prípade varianty 6 bol predpísaný pohyb štítnej chrupavky a hodnota aktívneho napätia svalu. Ostatné chrupavky boli nepohyblivé a pevne pripojené k zemi.

Vplyvom pohybu štítnej chrupavky a aktívneho napätia svalu dochádza k súčasnému natiahnutiu a kontrakcii hlasiviek. Na Obr. 73 je zobrazená celková deformácia mäkkých tkanív hlasiviek pri daných okrajových podmienkach. Maximálna hodnota celkovej deformácie je

$$u_{max}^6 = 1,782 \text{ mm}$$

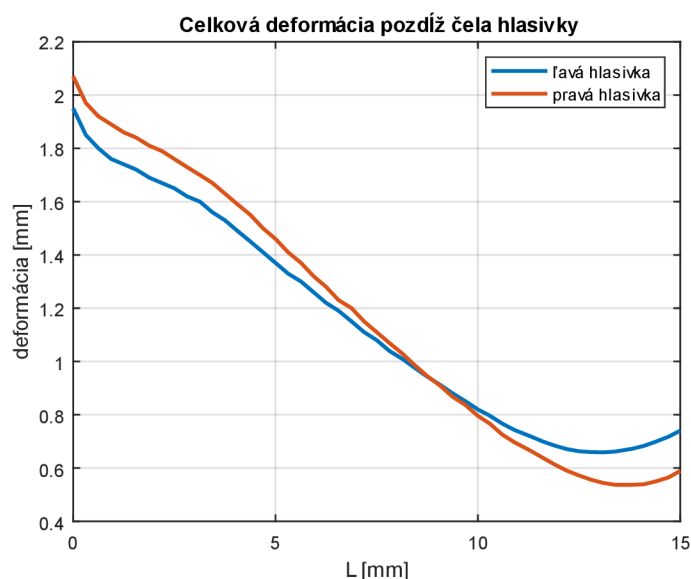
E: IS+T
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
Custom
Max: 0,0017957
Min: 0
17.05.2021 16:53

0,0017821
0,0015841
0,0013861
0,0011881
0,00099011
0,00079212
0,00059413
0,00039614
0,00019814
1,5079e-7



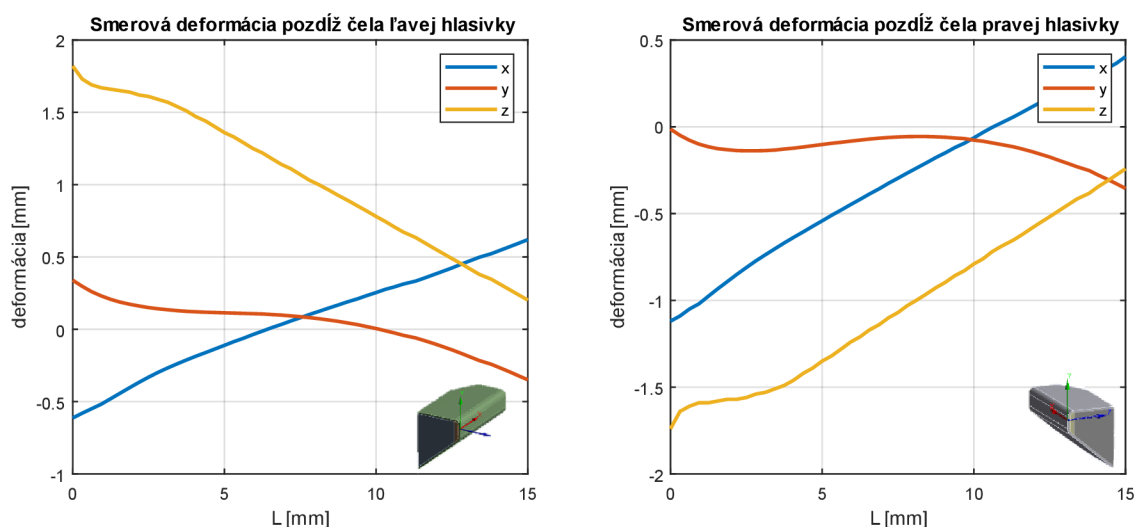
Obr. 73 Celkové deformácie mäkkých tkanív, variant 4

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 74) je priebeh celkovej deformácie pozdĺž čela hlasiviek.



Obr. 74 Celková deformácia pozdĺž čela hlasiviek, variant 6

Obr. 75 zobrazuje smerové deformácie v osiach x, y, z pre ľavú aj pravú hlasivku v príslušných súradnicových systémoch definovaných na začiatku každej hlasivky s osou x rovnobežnou s čelom.



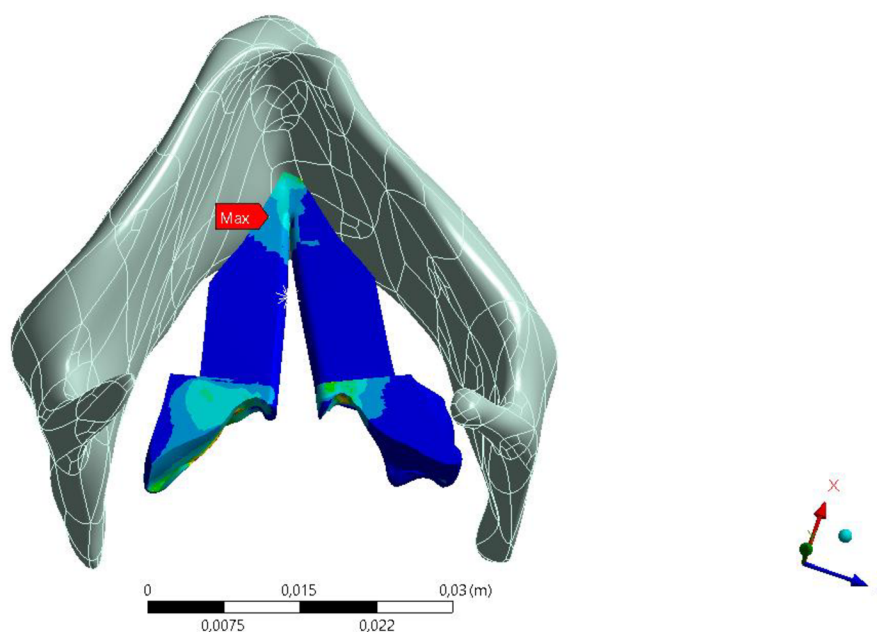
Obr. 75 Smerové deformácie pozdĺž čela hlasiviek; vľavo ľavá hlasivka, vpravo pravá hlasivka; variant 6

Na Obr. 76 je priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM na mäkkých tkanivách hlasiviek. Maximálna hodnota napätia bola dosiahnutá na prechodovom telese v miesta napojenia hlasiviek na štítnu chrupavku. Najvyššia hodnota napätia na časti modelu M5 sa nachádza na ľavej hlasivke a je rovná

$$\sigma_{HMM}^{max,6} = 12\,576 \text{ Pa}$$

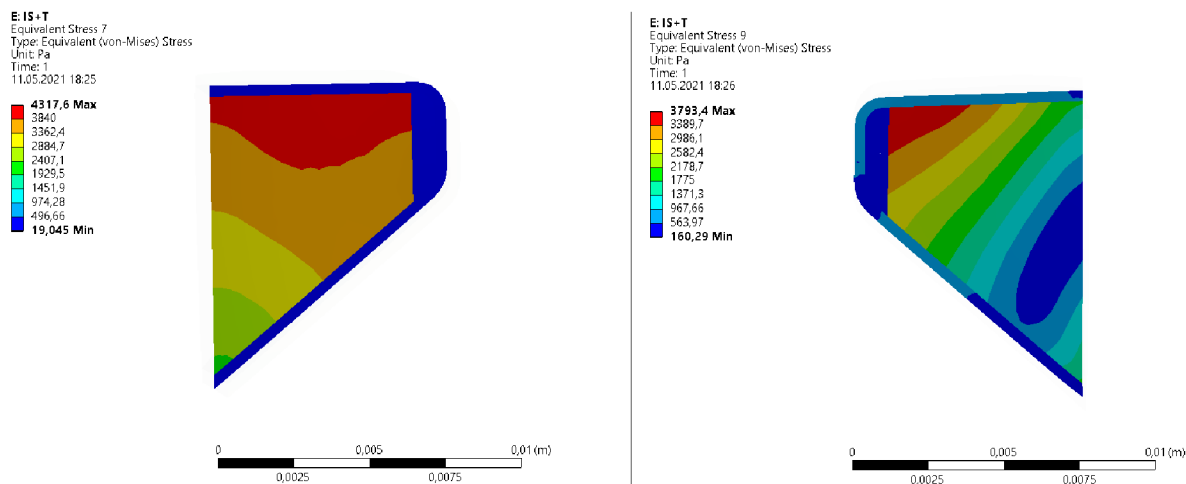
E: IS+T
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 10:02

2,2037e5 Max
9000
7875,5
6751
5626,5
4502
3377,5
2253
1128,5
4,0005 Min



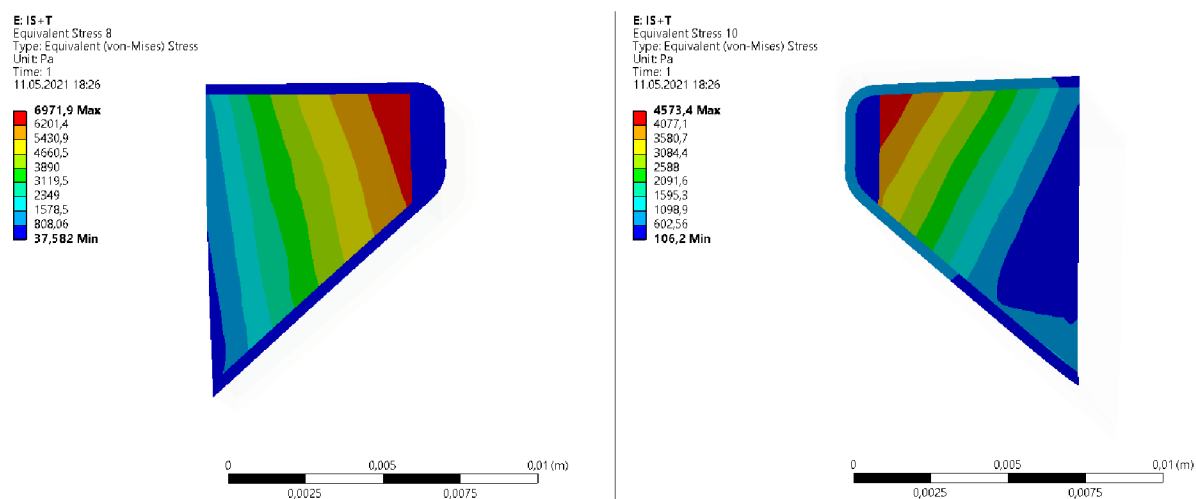
Obr. 76 redukované napätie podľa podmienky HMM, variant 4

Na Obr. 77 je rozloženie redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $1/3$ dĺžky hlasiviek. Prebieh napätia je medzi pravou a ľavou hlasivkou rozdielne. Obe dosahujú maximálne hodnoty v hornej časti svalu, pod povrchovou vrstvou. Redukované napätie dosahuje vyššie hodnoty v ľavej hlasivke.



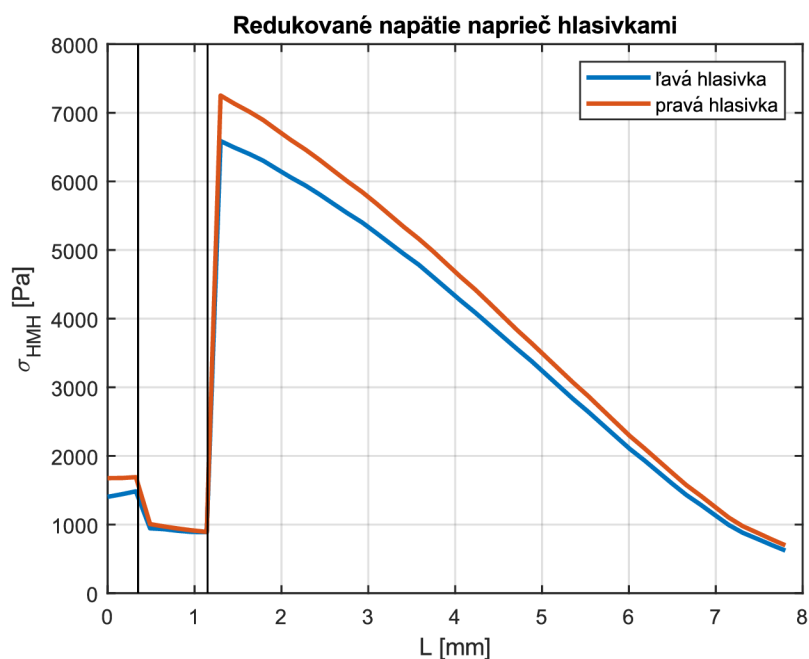
Obr. 77 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $1/3$ dĺžky hlasiviek, variant 4

Obr. 78 zobrazuje priebeh redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $2/3$ dĺžky hlasiviek. Rozloženie napätí sa medzi hlasivkami mierne líši, ale pri oboch sa maximálna hodnota vyskytuje v svale na rozmedzí ligamentu a povrchovej vrstvy. Maximálne hodnoty redukovaného napätia sú v značne vyššie v ľavej hlasivke.



Obr. 78 Redukované napätie podľa podmienky HMM v reze v $2/3$ dĺžky hlasiviek, variant 4

Na nasledujúcom obrázku (Obr. 79) je priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM naprieč jednotlivými vrstvami pre obe hlasivky. V oboch hlasivkách je priebeh takmer rovnaký, líši sa len hodnotami. V ľavej hlasivke sú napätia vyššie vo všetkých vrstvách.



Obr. 79 Redukované napätie naprieč hlasivkami, variant 6

Pri tomto variante nedošlo ku kontaktu.

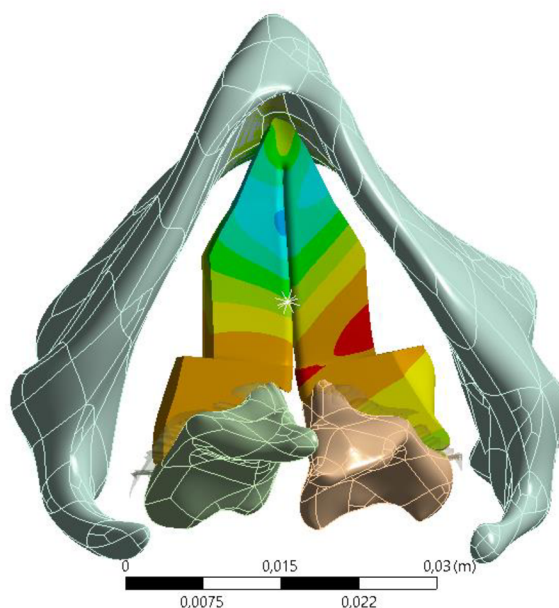
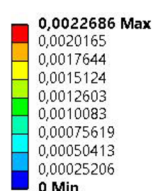
6.7 Variant 7

Pre variant 7 boli predpísané pohyby krhlovitých chrupaviek, pohyb štítnej chrupavky a hodnota aktívneho napätia svalu.

Kombináciou všetkých zapojených entít dochádza k približovaniu hlasiviek až do kontaktu a súčasnému natihnutiu a kontrakcii hlasiviek vplyvom štítnej chrupavky a aktívneho napätia svalu. Na Obr. 80 je zobrazená celková deformácia mäkkých tkanív hlasiviek pri daných okrajových podmienkach. Maximálna hodnota celkovej deformácie je

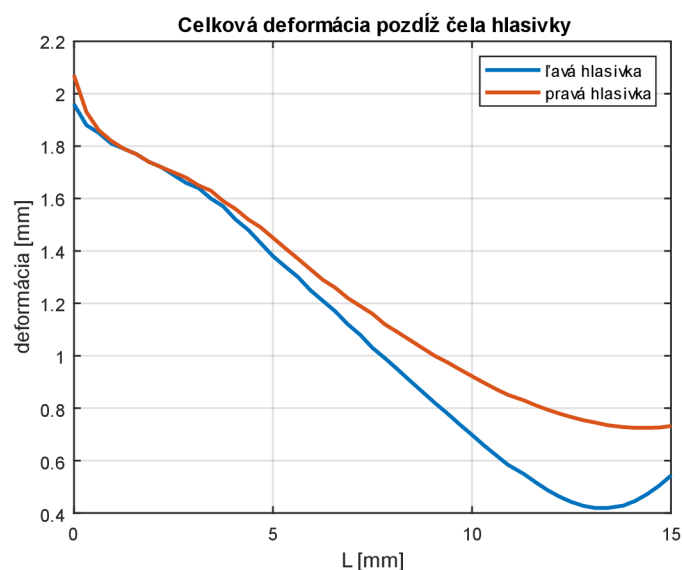
$$u_{max}^7 = 2,269 \text{ mm}$$

D: IS+A+T+pohyb hore
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
10.05.2021 11:50



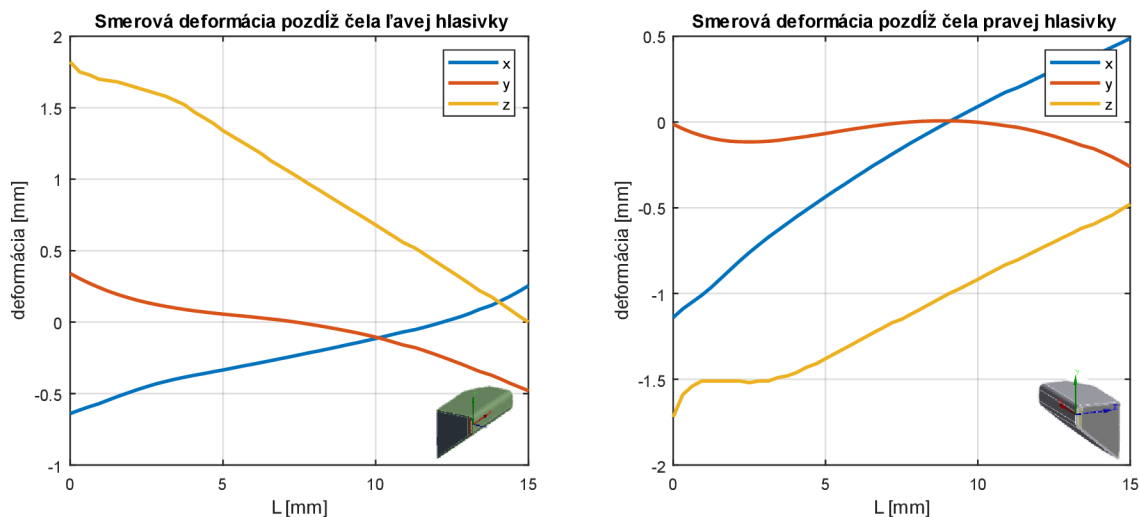
Obr. 80 Celková deformácia mäkkých tkanív, variant 7

Na Obr. 81 je zobrazený priebeh celkovej deformácie pozdĺž čela hlasiviek.



Obr. 81 Celková deformácia pozdĺž čela hlasiviek, variant 7

Obr. 82 zobrazuje smerové deformácie v osiach x, y, z pre ľavú aj pravú hlasivku v príslušných súradnicových systémoch definovaných na začiatku každej hlasivky s osou x rovnobežnou s čelom. Môžeme pozorovať, že približne v prvých dvoch tretinách dĺžky dochádza ku skráteniu hlasiviek (deformácia v smere osy x) a v poslednej tretine naopak k natiahnutiu hlasiviek. Pre pravú hlasivku je toto skrátenie a natiahnutie väčšie.



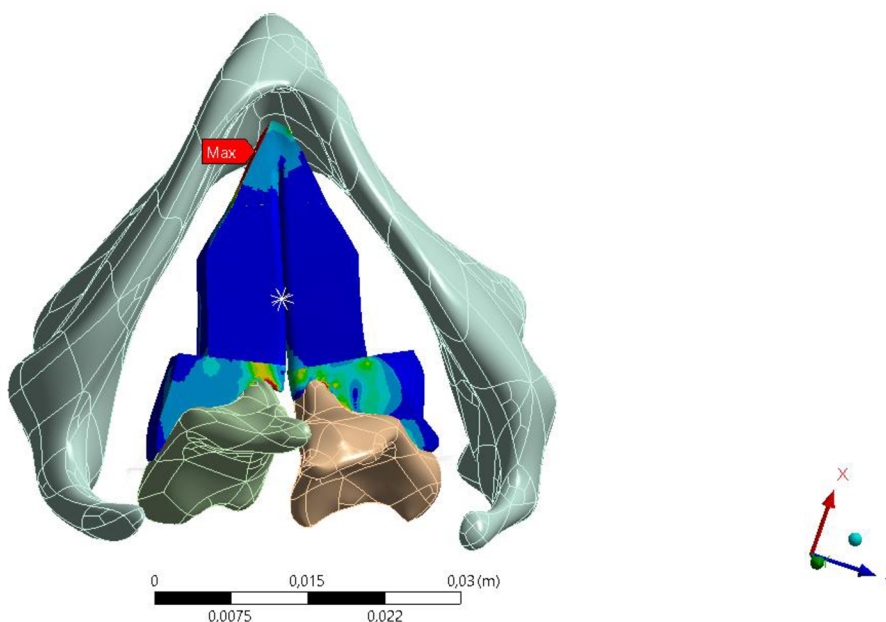
Obr. 82 Smerové deformácie pozdĺž čela hlasiviek; vľavo ľavá hlasivka, vpravo pravá hlasivka; variant 7

Na Obr. 83 je priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM na mäkkých tkanivách hlasiviek. Maximálna hodnota napätia je v prechodovom telese, v mieste napojenia tkanív na štítnu chrupavku. V modeli M5 sa maximálna hodnota napätia nachádza v svalu pravej chrupavky

$$\sigma_{HMM}^{max,7} = 21\,654 \text{ Pa}$$

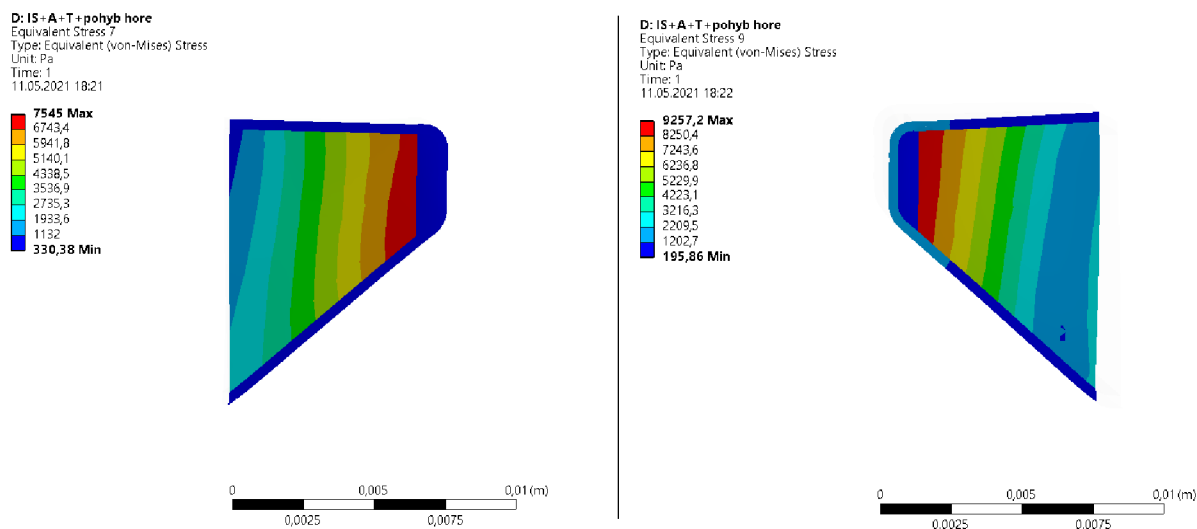
D: IS+A+T+pohyb hore
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
12.05.2021 10:00

3,0082e5 Max
15000
13127
11254
9381
7508
5635
3762
1889
16,005 Min



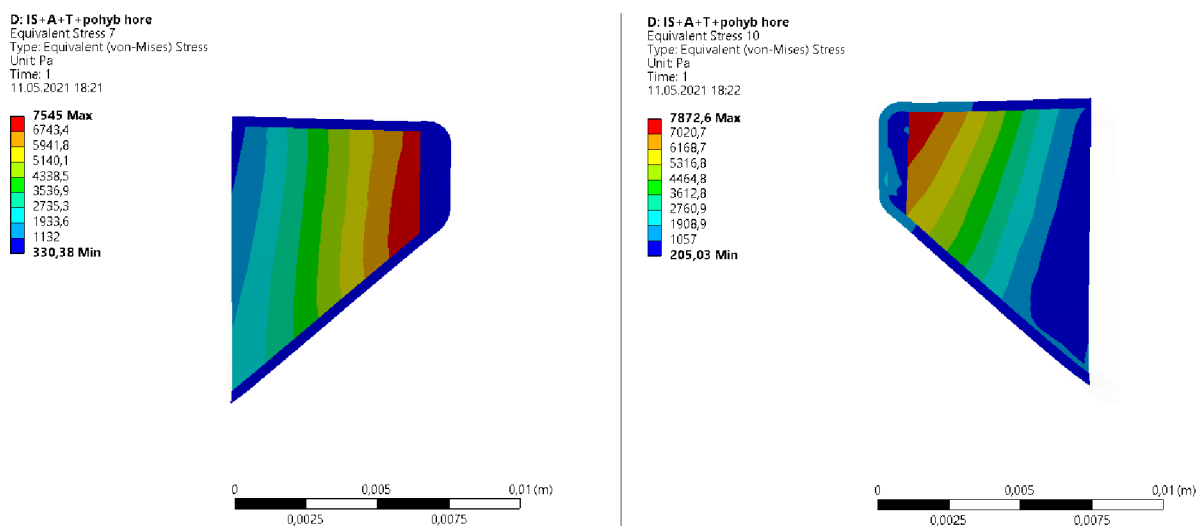
Obr. 83 redukované napätie mäkkých tkanív podľa podmienky HMM, variant 7

Obr. 84 zobrazuje priebeh redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $1/3$ dĺžky hlasiviek. Rozloženie napätia medzi pravou a ľavou hlasivkou je veľmi podobné. Obe dosahujú maximálne hodnoty v svale, pod ligamentom. Redukované napätie dosahuje značne vyššie hodnoty v pravej hlasivke.



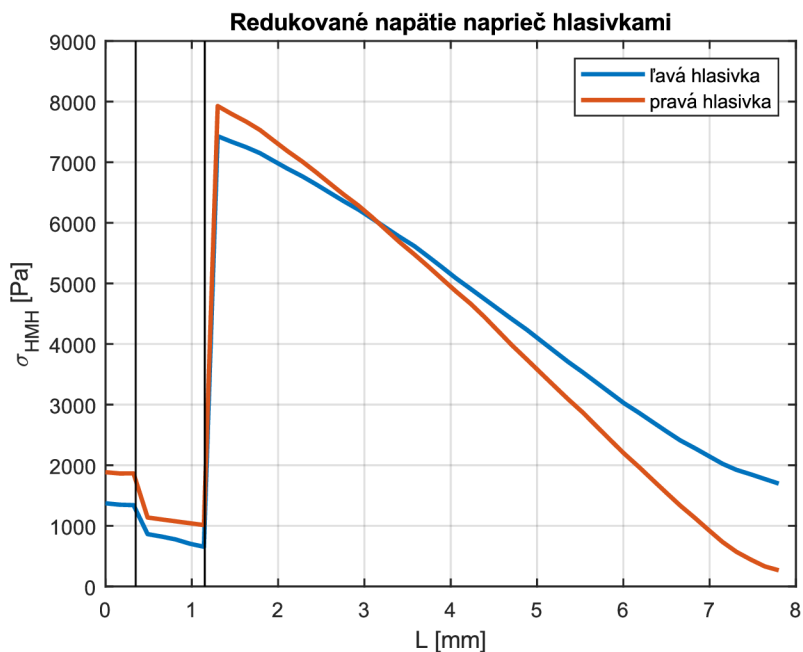
Obr. 84 Redukované napätie podľa podmienky HMH v reze v $1/3$ dĺžky hlasiviek, variant 7

Na Obr. 85 je rozloženie redukovaného napätia v reze, ktorý sa nachádza v $2/3$ dĺžky hlasiviek. Priebeh napätia medzi pravou a ľavou hlasivkou je iba mierne rozdielne. Obe dosahujú maximálne hodnoty v svale, ľavá hlasivka pod ligamentom, pravá v hornej časti na rozhraní ligamentu a povrchovej vrstvy. Hodnota maximálneho napätia je v oboch hlasivkách porovnateľná.



Obr. 85 Redukované napätie podľa podmienky HMH v reze v $2/3$ dĺžky hlasiviek, variant 7

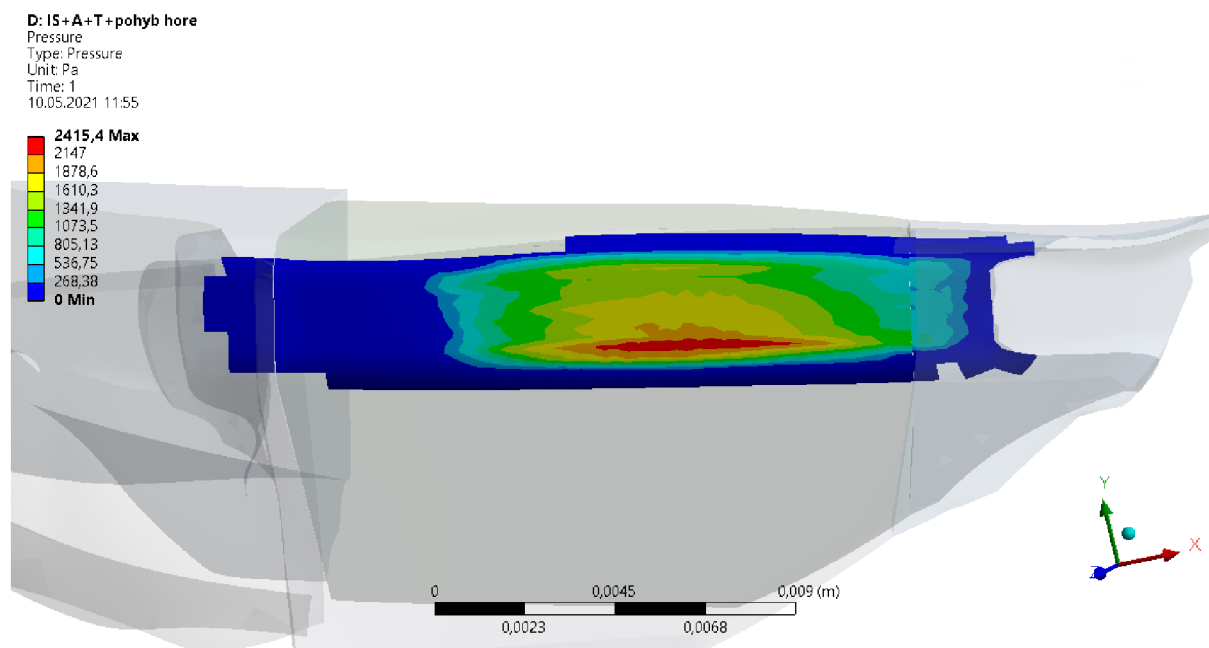
Na nasledujúcom obrázku (Obr. 86) je priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMM naprieč jednotlivými vrstvami pre hlasivky. Oba priebehy kopírujú podobný stav ako v predchádzajúcich prípadoch. Pokles napätia v svale v pravej hlasivke je prudší ako pokles v ľavej hlasivke.



Obr. 86 Redukované napätie naprieč hlasivkami, variant 7

Obr. 87 zobrazuje rozloženie kontaktného tlaku medzi hlasivkami. Maximálna hodnota je

$$p_{kon,7} = 2\,415 \text{ Pa}$$



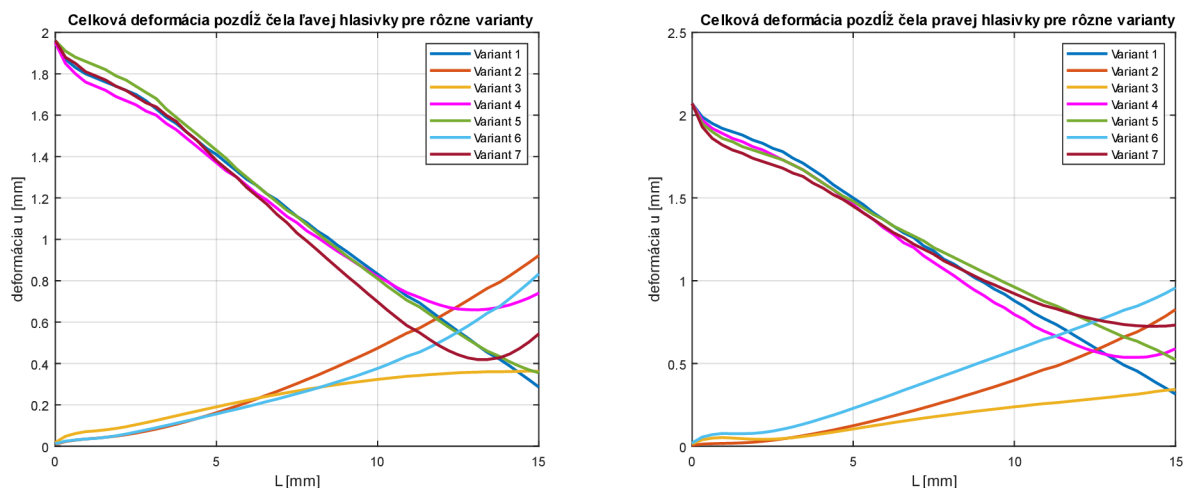
Obr. 87 Kontaktný tlak, variant 7

7 Porovnanie výsledkov

Ďalej budeme porovnávať výsledné hodnoty deformácií a napätí medzi jednotlivými variantmi a tak určíme aký vplyv má zapojenie jednotlivých chrupaviek a svalov.

7.1 Deformácie

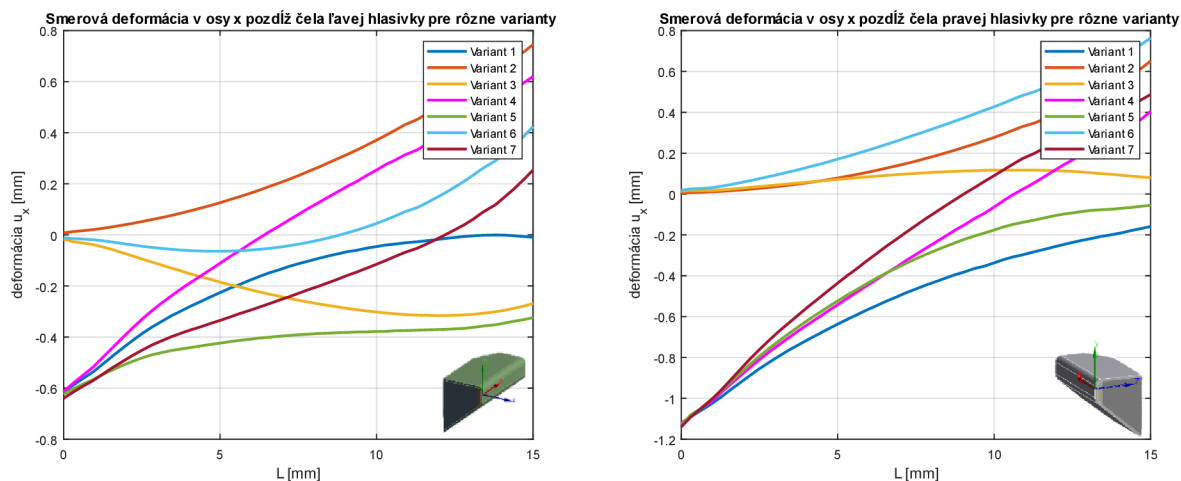
Na Obr. 88 je priebeh celkovej deformácie po ceste na čela hlasiviek pri rôznych variantoch. Pre prípady 2, 3 a 6 sa celkové deformácie po dĺžke hlasivky postupne zvyšujú z východzej nulovej hodnoty. Išlo o zapojenie buď iba štítnej chrupavky (2), alebo hlasivkového svalu (3), alebo ich kombináciu (6). Pri týchto variantoch nedochádza ku kontaktu. Vo zvyšných prípadoch (1, 4, 5 a 7), kde dochádza ku kontaktu, sú celkové deformácie najvyššie na začiatku hlasiviek a ďalej po dĺžke klesajú a významne sa od seba nelíšia. Taktiež, ak porovnáme celkové deformácie pre ľavú a pravú hlasivku tak sú ich priebehy pre jednotlivé varianty podobné.



Obr. 88 Porovnanie celkovej deformácie pozdĺž čela hlasiviek

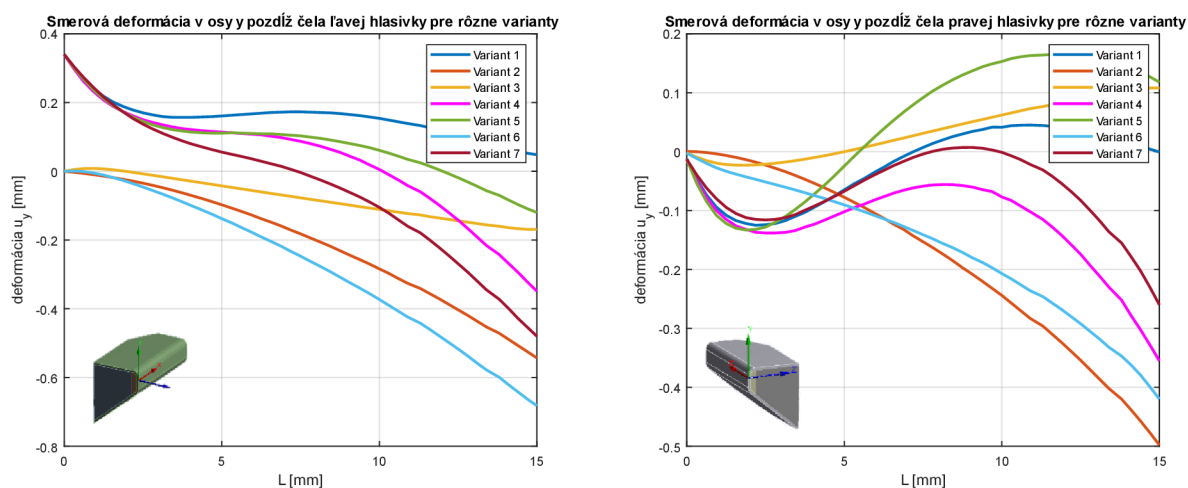
Nasledujúce grafy zobrazujú celkovú deformáciu rozdelenú v 3 osiach x, y, z . Vo všetkých grafoch si môžeme všimnúť podobné správanie prípadov, kedy ku kontaktu nedochádza (2, 3 a 6) a kedy k nemu dochádza (1, 4, 5 a 7).

V smere osy x môžeme pozorovať (Obr. 89) ako sa jednotlivé hlasivky naťahujú, prípadne skracujú. Najvýraznejšie skrútenie možno pozorovať pri variante 3, kedy bolo predpísané len aktívne napätie hlasivkového svalu. Zmrštenie je výraznejšie v ľavej hlasivke. Pravá hlasivka sa po ceste na čela hlasivky mierne naťahuje. Pre variant 7, teda zahrnutie pohybu všetkých chrupaviek a aktívneho napätia v svale hlasivky ako sa hlasivky chovajú pri skutočnom nastavovaní do fonačného postavenia v ľudskom tele, môžeme pozorovať, že približne v prvých dvoch tretinách dĺžky dochádza ku skrúteniu hlasiviek a v poslednej tretine naopak k ich pretiahnutiu.



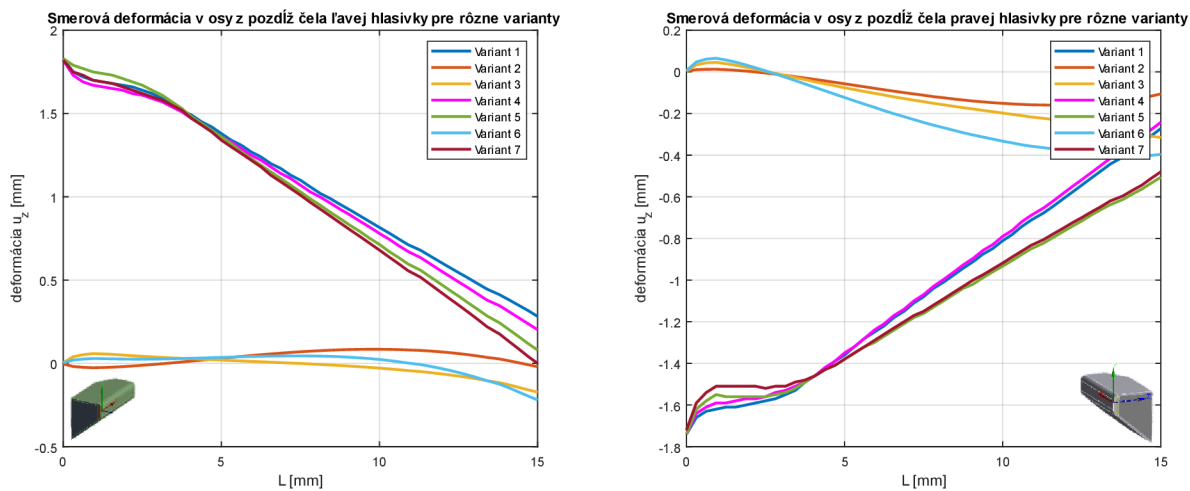
Obr. 89 Porovnanie smerovej deformácie v osy x pozdĺž čela hlasiviek

Pri porovnaní priebehu deformácie v smere osy y (Obr. 90) medzi ľavou a pravou hlasivkou sa ukazuje výrazná asymetria. Model všetkých chrupaviek je získaný z ľudského tela, ktoré nikdy nie je dokonale symetrické. Jemné asymetrie v kontaktoch boli odstránené pridaním malých posuvov krhlovitých chrupaviek. To sa vo výsledku prejavuje tak, že priebeh deformácie v smere osy y je nápadne rozdielny pri variantoch, kde sa zapájajú krhlovité chrupavky (1, 4, 5 a 7). Rozdielny priebeh deformácie je možno vidno aj pri variante 3, kde je predpísané iba aktívne napätie hlasivkového svalstva. To bolo zrejme spôsobené tým, že hlasivky nie sú symetrické a aj keď sme pre pravú hlasivku menili smer súradnicového systému, v ktorom pôsobí aktívne napätie, bolo by treba tento smer ešte ďalej upravovať.



Obr. 90 Porovnanie smerovej deformácie v osy y pozdĺž čela hlasiviek

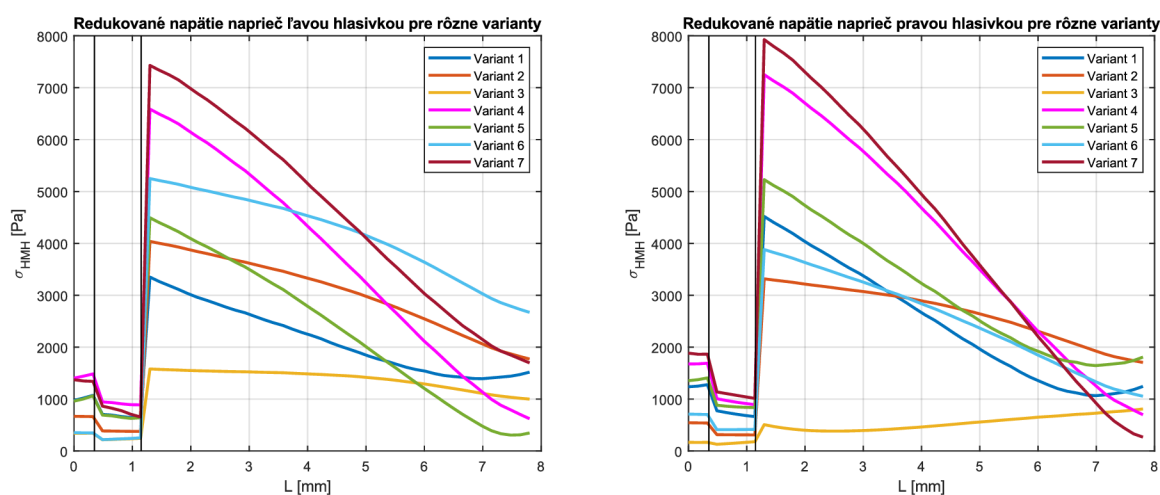
Priebeh deformácie v ose z (Obr. 91) má minimálne rozdiely medzi variantami, ktorých došlo ku kontaktu a v ktorých nedošlo. Treba brať na vedomie, že osa z v súradnicových systémoch, v ktorých bola definovaná cesta pozdĺž čela hlasivky, smeruje von z ľavej hlasivky a dovnútra pravej. Preto sú priebehy presne naopak.



Obr. 91 Porovnanie smerovej deformácie v osy z pozdĺž čela hlasiviek

7.2 Napätia

Na Obr. 92 vidíme priebeh redukovaného napätia podľa podmienky HMH cez všetky vrstvy hlasiviek v $1/2$ ich dĺžky. Napätie dosahuje najnižšie hodnoty vtedy, keď je predpísané len aktívne napätie hlasivkového svalu (3) a jeho priebeh je v jednotlivých telesách takmer konštantný v porovnaní s ostatnými prípadmi. Druhé najvyššie hodnoty napätia dostávame pri zapojení krhlovitých chrupaviek a štítnej chrupavky (4) a najvyššie, ak sa k nim pridá aj hlasivkový sval (7). Vo zvyšných prípadoch sa napätia pohybujú rôzne, medzi spomínanými extrémami. V každom variante platí, že veľkosť napätia je najnižšia vo vrstve ligamentu, tesne za ňou, v svale, prudko rastie na maximum a potom postupne klesá. Ak porovnáme varianty len s pohybom chrupaviek a varianty, kde je k nim pridané aj aktívne napätie v svale (1 a 5, 2 a 6, 4 a 7) vidíme, že pridanie aktívneho napätia viedlo ku zvýšeniu maximálneho redukovaného napätia o hodnotu približne 1000 Pa.



Obr. 92 Porovnanie redukovaného napätia podľa podmienky HMH naprieč hlasivkami

Presné hodnoty maximálnych napätí sú v Tabuľke 13. Je dôležité si všimnúť hodnoty maximálneho napätia v celom telese modelu M5. Tieto hodnoty boli dosiahnuté vo svale. V ľavej hlasivke dosahuje maximálne napätie hodnoty viac ako 13 000 Pa a v pravej viac ako 21 500 Pa, čo splňuje náš zámer dosiahnuť napätia okolo 20 000 Pa.

Tabuľka 13 Maximálne redukované napätia podľa podmienky HMM v svalе hlasivky v daných miestach

Ľavá hlasivka				
Variant	$\sigma_{red,max}^{HMM}$ [Pa]			
	Na reze v $1/3$	Na reze v $1/2$	Na reze v $2/3$	v celom telese
1	5 012	3 350	2 607	9 209
2	3 563	4 039	5 126	7 974
3	2 152	1 580	2 325	5 529
4	7 202	6 588	6 983	9 860
5	5 530	4 494	4 458	6 351
6	4 318	5 249	6 972	12 576
7	7 545	7 430	8 551	13 362
Pravá hlasivka				
Variant	$\sigma_{red,max}^{HMM}$ [Pa]			
	Na reze v $1/3$	Na reze v $1/2$	Na reze v $2/3$	v celom telese
1	5 942	4 519	4 065	11 194
2	3 044	3 317	4 448	7 088
3	1 961	809	1 288	6 488
4	7 725	7 251	7 813	11 279
5	7 280	5 228	4 128	10 746
6	3 793	3 881	4 573	9 012
7	9 257	7 927	7 873	21 654

Hoci najvyššie napätia dostávame pri kombinácii pohybu štítnej chrupavky, krhlovitých chrupaviek a funkcie hlasivkového svalu, pri porovnaní kontaktných tlakov sú najvyššie hodnoty práve pre variant 5, krhlovité chrupavky a aktívne napätie hlasivkového svalu, teda keď nie je zapojená štítna chrupavka (Tabuľka 14; pre varianty, kde nedošlo ku kontaktu hlasiviek nie je uvedená hodnota).

Tabuľka 14 Kontaktný tlak

Variant	p_{kon} [Pa]
1	1 754
2	-
3	-
4	2 126
5	2 622
6	-
7	2 415

Podľa toho môžeme povedať, že síce pohyby všetkých uvažovaných chrupaviek a súčasná funkcia hlasivkového svalu vyvolávajú v svale najvyššie napätia, ale pohyb štítnej chrupavky mierne znižuje kontaktný tlak hlasiviek.

8 Záver

V prvej kapitole mojej diplomovej práce som popísala časti vokálneho traktu, v ktorom sa generuje ľudský hlas a súčasne som uviedla rôzne teórie vysvetľujúce jeho tvorbu. Teoretický základ vykonanej analýzy som doplnila o rozbor výpočtových modelov hlasiviek, ktoré boli doteraz publikované v odbornej literatúre. Pochopenie princípov tvorby ľudského hlasu bolo potrebné pre správnu tvorbu výpočtového modelu hrtana s využitím metódy konečných prvkov.

Model geometrie hrtanových chrupaviek a mäkkých tkanív hlasiviek bol zostrojený na základe snímok získaných pomocou magnetickej rezonancie. Tieto snímky boli spracované v CAD programe a doplnené o geometriu hlasiviek modelu M5 podľa Scherera. Model M5 je v dostupnej literatúre veľmi rozšírený a tvorí základ mnohých ďalších výpočtových modelov. Model hlasiviek som pre lepšiu konvergenciu úlohy modelovala ako trojvrstvový.

Keďže materiály mäkkých tkanív sa vyznačujú hyperelasticitou a viskozitou, pôvodný lineárny model materiálu som nahradila hyperelastickým konštitutívnym modelom Neo Hook. Materiálové charakteristiky som získala prepočtom z pôvodného modelu. Pre charakteristiky biologických materiálov je typický ich veľký rozptyl. S ohľadom na uvedenú skutočnosť som previedla ladenie parametrov, aby sme v hlasivkách dostali hodnoty napätí, ktoré zodpovedajú literatúre.

Podstatnou časťou tvorby výpočtového modelu bolo zavedenie aktívneho napätia svalu. Pre riešenie tohto problému som vytvorila zjednodušený model svalu v podobe kvádra, na ktorom som skúšala rôzne spôsoby implementácie aktívneho napätia do telesa hlasivkového svalu. Nakoniec sme ako najvhodnejší spôsob vybrali predpísanie aktívneho napätia určitou hodnotou pomocou jedného príkazu z prostredia APDL.

Nastavenie hlasiviek do fonačného postavenia bolo prevedené pohybom hrtanových chrupaviek pohybujúcich sa po určitej trajektórii rešpektujúc anatómiu hrtanu.

Pri výpočte som najskôr predpísala posuvy jednotlivých chrupaviek a aktiváciu svalu zvlášť. Z výsledných hodnôt možno konštatovať, že pohybom štítnej chrupavky sa hlasivky naťahujú. Vplyvom pohybu krhlovitých chrupaviek sa hlasivky k sebe približujú a dostávajú sa do kontaktu. Aktívne napätie svalu spôsobuje miernu kontrakciu a vydutie hlasiviek. Ďalej som postupne kombinovala pohyby chrupaviek navzájom, prípadne s pôsobením aktívneho napätia, až nakoniec som určila napätie a deformáciu mäkkých tkanív hlasiviek pri zapojení všetkých hrtanových chrupaviek a aj aktívneho napätia.

Posledná časť mojej diplomovej práce je venovaná porovnaniu deformácií a napätí mäkkých tkanív pri pôsobení rôznych chrupaviek a svalu. V každom variante sú najvyššie hodnoty napätia dosiahnuté v svale tesne pod vrstvou ligamentu. Najnižšie hodnoty napätia sa naopak vyskytujú v ligamente. Najvyššie hodnoty napätia v svale dostávame práve vtedy, keď sa pri nastavení do fonačného postavenia zapoja všetky chrupavky a aj hlasivkový sval. Pri porovnaní jednotlivých variantov, kde nebolo uvažované aktívne napätie a variantov, kde bolo uvažované aktívne napätie si môžeme všimnúť nárast redukovaného napätia v hlasivkách. Preto je dôležité vo

výpočtových modeloch hlasiviek brať do úvahy aj aktívne napätie hlasivkového svalu, ktoré ovplyvňuje celkovú napätosť telesa.

Daný model je možné vylepšiť doplnením o konštitutívne modely materiálu, ktoré zahrňujú priamo v svojej definícii zložky aktívneho a pasívneho napätia svalu. Takýto komplexný model materiálu je však potrebné doprogramovať do výpočtového softvéru.

Výpočtový model, ktorý je výsledkom tejto práce zahrňuje vplyv aktívneho napätia, ktoré je doň implementované jednoduchým a zrozumiteľným spôsobom. Tým sme získali vhodný prostriedok pre porovnanie a určenie počiatočného stavu napätia v hlasivkách, ktoré vplýva na základnú frekvenciu zdrojového hlasu. Navrhnutý výpočtový model možno využiť aj pre ďalšie modely simulujúce interakciu prúdiaceho vzduchu s kmitaním hlasiviek alebo pre určenie deformácie a napätosti pri použití iných modelov geometrie hlasiviek, prípadne pre porovnanie výsledkov na experimentálnom zariadení.

9 Citované diela

ALIPOUR, Fariborz, 2011. Mathematical models and numerical schemes for the simulation of human phonation. *Current Bioinformatics*. (6), 323-343.

ANSYS Advanced Analysis Techniques Guide, 2005. 10. Canonsburg: ANSYS, Inc.

BURŠA, Jiří, 2020. Konstitutivní vztahy materiálu. In: *Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky* [online]. Brno [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <http://www.old.umt.fme.vutbr.cz/~jburসা/>

FARLEY, Glen, 1996. A biomechanical laryngeal model of voice F0 and glottal. *Acoustical Society of America*. **100**(6), 3794-3812.

Fyziológia svalstva, 2018. In: *Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave* [online]. Bratislava [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: https://fns.uniba.sk/fileadmin/prif/biol/kzf/pedagogovia_fyziologia/7_sval.pdf

GENG, Biao, 2020. A three-dimensional vocal fold posturing model based on muscle. *Acoustical Society of America*. 2597–2608.

GÖMMEL, Andreas, 2007. A muscle controlled finite-element model of. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. **10**(5), 377-388.

HÁJEK, Petr, P. ŠVANCARA, J. HORÁČEK a J. ŠVEC, 2019. Influence of Tissue Changes in Superficial Lamina Propria on Production of Czech Vowels. In: *Engineering Mechanics 2019*. Praha: Institute of Thermomechanics of the Czech Academy of Sciences, s. 141-144. ISBN 978-80-87012-71-0. ISSN 1805- 8248.

HAMMER, Georg, Gunther WINDISCH, Peter PRODINGER, Friedrich ANDERHUBER a Gerhard FRIEDRICH, 2010. The Cricothyroid Joint—Functional Aspects With Regard to Different Types of Its Structure. *Journal of voice* [online]. Mosby, Inc, **24**(2), 140-145 [cit. 2021-05-06]. ISSN 0892-1997. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvoice.2008.07.001

HIRANO, Minoru a Karen MCCORMICK, 1986. Clinical Examination of Voice by Minoru Hirano. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. **80**(4), 1273-1273 [cit. 2021-05-04]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.393788

HUNTER, Eric, Scott THOMSON, Marshall SMITH a Susan THIBEAULT, 2012. National Repository for Laryngeal Data. In: *National Repository for Laryngeal Data* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <http://www.nrl.org>

HUNTER, Eric, Ingo TITZE a Fariborz ALIPOUR, 2004. A three-dimensional model of vocal fold abduction/adduction. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. **115**(4), 1747 [cit. 2021-02-17]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1652033

KARAS, Vladimír, Stanislav OTÁHAL a Petr SUŠANKA, 1990. *Biomechanika tělesných cvičení: vysokošk. učebnice pro posl. Fak. tělesné výchovy a sportu Univ. Karlovy v Praze a pro pedagog. fak. vys. škol v ČR pro učitelství 5.-12. roč. aprobační předmět tělesná výchova*. 1. vyd. Ilustroval Danuše PLAJNEROVÁ. Praha: Státní

pedagogické nakladatelství. Učebnice pro vysoké školy (Státní pedagogické nakladatelství). ISBN 80-04-20554-2.

MIŠUN, Vojtěch, 2010. *Tajemství lidského hlasu*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 391 s. : il. (některé bar.). ISBN 978-80-214-3499-8.

NETTER, Frank H, John T. HANSEN, Libor PÁČ a Petr DUBOVÝ, 2005. *Anatomický atlas člověka: překlad 3. vydání*. 2., rozš. vyd. Praha: Grada. ISBN 80-247-1153-2.

PALAPARTHI, Anil a Simeon SMITH, 2019. Mapping Thyroarytenoid and Cricothyroid Activations to Postural and Acoustic Features in a Fiber-Gel Model of the Vocal Folds. *Applied sciences* [online]. MDPI AG, **9**(21), 4671 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: doi:10.3390/app9214671

PETRUŠKA, Jindřich, 2011. Nelineární úlohy mechaniky v MKP. In: *Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky* [online]. Brno [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/cs/studium/studijni-materialy.html>

POLÁK, Štefan, 2020. Svalové tkanivo. In: *Lekárska fakulta Univerzity Komenského v Bratislave* [online]. Bratislava [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: https://www.fmed.uniba.sk/uploads/media/Svalove_tkanivo_predn_prof_Polak.pdf

PRINZ, J.F, R.A DE WIJK a L HUNTJENS, 2007. Load dependency of the coefficient of friction of oral mucosa. *Food hydrocolloids* [online]. Elsevier Ltd, **21**(3), 402-408 [cit. 2021-05-04]. ISSN 0268-005X. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodhyd.2006.05.005

RANC, H, A ELKHYAT, C SERVAIS, S MAC-MARY, B LAUNAY a Ph HUMBERT, 2006. Friction coefficient and wettability of oral mucosal tissue: Changes induced by a salivary layer. *Colloids and surfaces. A, Physicochemical and engineering aspects* [online]. Elsevier B.V, **276**(1), 155-161 [cit. 2021-05-06]. ISSN 0927-7757. Dostupné z: doi:10.1016/j.colsurfa.2005.10.033

SELBIE, W, Sally GEWALT, Christy LUDLOW a W SELBIE, 2002. Developing an anatomical model of the human laryngeal cartilages from magnetic resonance imaging. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. **112**(31), 1077-1090 [cit. 2021-05-04]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1501586

SCHERER, Ronald, 2001. Intraglottal pressure profiles for a symmetric and oblique glottis. *Acoustical Society of America*. **109**(4), 1616-1630.

STORCK, Claudio, Philipp JUERGENS, Claude FISCHER, Markus WOLFENSBERGER, Flurin HONEGGER, Erich SORANTIN, Gerhard FRIEDRICH a Markus GUGATSCHKA, 2011. Biomechanics of the Cricoarytenoid Joint: Three-Dimensional Imaging and Vector Analysis. *Journal of voice* [online]. Mosby, Inc, **25**(4), 406-410 [cit. 2021-02-17]. ISSN 0892-1997. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvoice.2010.03.005

ŠÍBL, Michal, 2014. *Využití metody konečných prvků pro modelování pohybu a napjatosti hlasivek při nastavování do fonačního postavení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 130 listů + 1 CD-ROM. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Pavel Švancara.

ŠTEFANIČKA, Patrik, 2018. *Kapitoly z otorinolaryngológie: dutina ústna, hltan, hrtan, krk* [online]. 1. vydanie. Bratislava: Vydavateľstvo UK [cit. 2021-03-20]. ISBN 978-80-223-4653-5. Dostupné z:

https://www.fmed.uniba.sk/fileadmin/lf/sluzby/akademicka_kniznica/PDF/Elektronicke_knihy_LF_UK/STEFANICKA_Kapitoly_z_otorinolaryngologie_Dutina_ustna_a_hltan__hrtan__k....pdf

ŠVANCARA, Pavel, J. HORÁČEK a V. HRŮZA, 2011. FE modelling of the fluid-structure-acoustic interaction for the vocal folds self-oscillation. HORÁČEK, Jaromír. *Vibration Problems ICOVP 2011: Springer Proceedings in Physics*. Berlin, Germany: Springer, s. 801-807. ISBN 978-94-007-2068- 8. ISSN: 0930- 8989.

ŠVEC, Jan, 1996. *Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu*. Olomouc. Dizertečná práca. Univerzita Palackého v Olomouci.

TITZE, Ingo a Fariborz ALIPOUR, 2006. *The myoelastic aerodynamic theory of phonation*. Iowa: National center for voice and speech, 424 s. : il., tabulky, grafy. ISBN 0-87414-156-7.

TITZE, Ingo a Eric HUNTER, 2007. A two-dimensional biomechanical model of vocal fold posturing. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. **121**(4), 2254 [cit. 2021-02-17]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.2697573

TOKUDA, Isao, Jaromir HORÁČEK, Jan ŠVEC a Hanspeter HERZEL, 2008. Bifurcations and chaos in register transitions of excised larynx experiments. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* [online]. American Institute of Physics, **18**(1), 013102-01-013102-12 [cit. 2021-05-06]. ISSN 1054-1500. Dostupné z: doi:10.1063/1.2825295

WOO, Peak. Understanding Vocal Cord Paralysis, Paresis, and Vocal Fold Immobility: Vocal Cord Paralysis. In: *Dysphonia* [online]. Itasca [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://dysphonia.org/wp-content/uploads/2019/07/Understanding-Vocal-Cord-Paralysis-reviewed-Version.pdf>

YIN, Jun a Zhaoyan ZHANG, 2014. Interaction between the thyroarytenoid and lateral cricoarytenoid muscles in the control of vocal fold adduction and eigenfrequencies. *Journal of Biomechanical Engineering* [online]. American Society of Mechanical Engineers, **136**(11), 111006 [cit. 2021-02-17]. ISSN 0148-0731. Dostupné z: doi:10.1115/1.4028428

10 Zoznam použitých symbolov a skratiek

Symbol, skratka	Jednotka	Význam
1D		Jednorozmerný
2D		Dvojrozmerný
3D		Trojrozmerný
A		Krhloité chrupavky, z ang. arythenoid
C		Prstienková chrupavka, z ang. Cricoid
CAJ		Kíbové spojenie prstienkovej chrupavky s krhlovitými, z ang. Cricoarythenoid joint
CT		Prstencovo-štitny sval, z lat. Musculus cricothyroideus
FSI		Fakulta strojného inžinýrství
HMH		Huber, von Mises, Hencky; označenie podmienky pre napätie
IA		Vnútorý hlasivkový sval, z lat. musculus interarytaenoideus
kol.		kolektív
LCA		Vonkajší prstecovo-hlasivkový sval, z lat. musculus cricoarytenoideus lateralis
MKP		Metóda konečných prvkov
MRI		Magnetická rezonancia, z ang. magnetic resonance imaging
Obr.		Obrázok
PCA		Zadný prstencovo-hlasivkový sval, z lat. Musculus cricoarytenoideus posterior
T		Štitna chrupavka, z ang. Thyroid
TA		Štitno-hlasivkový sval, z lat. Musculus thyroarytenoideus
TrA		transverse arytenoid
ÚMTMB		Ústav mechaniky telies, mechatroniky a biomechaniky
VUT		Vysoké učení technické v Brne
E	[Pa]	Modul pružnosti v ťahu
E_{epitel}	[Pa]	Modul pružnosti v ťahu epitelu

$E_{lamina\ propria}$	[Pa]	Modul pružnosti v ťahu laminy proprii
E_{povrch}	[Pa]	Modul pružnosti v ťahu povrchovej vrstvy
E_{sval}	[Pa]	Modul pružnosti v ťahu svalu
f_0	[Hz]	Základná frekvencia
G_{sval}	[Pa]	Modul pružnosti v šmyku svalu
\bar{I}_1	[–]	Modifikovaný prvý invariant pravého Cauchy-Greenovho tenzoru deformácie
$k_{elaastic\ support}$	[–]	Tuhosť „Elastic Support“
$k_{trečí}$	[–]	Koeficient trenia
K	[N/m]	Matica tuhosti
K	[Pa]	Objemový modul pružnosti
$p_{kont,1...7}$	[Pa]	Kontaktný tlak pre varianty 1 až 7
p_{kont}	[Pa]	Kontaktný tlak
r_x, r_y, r_z	[°]	Rotácie okolo osy x, y, z
T	[°K]	Termodynamická teplota
$t_{konverg}$	[s]	Čas, do ktorého úloha konverguje
U	[m]	Matica posuvov
$u_{max}^{1...7}$	[m]	Maximálne posuvy pre varianty 1 až 7
u_x, u_y, u_z	[m]	Posuv v smere osy x, y, z
W	[Pa]	Hustota deformačnej energie
d	[Pa ⁻¹]	Parameter stlačiteľnosti
k	[J·K ⁻¹]	Boltzmanova konštanta
n	[–]	Počet reťazcov na jednotku objemu
μ	[–]	Poissonov pomer
σ_{HMH}	[Pa]	Redukované napätie podľa podmienky HMM

$\sigma_{HMH}^{max,1...7}$	[Pa]	Maximálne redukované napätie podľa podmienky HMH pre varianty 1 až 7
σ_{red}^{max}	[Pa]	Maximálne redukované napätie podľa podmienky HMH
σ_x	[Pa]	Napätie v smere osy x
σ_z	[Pa]	Napätie v smere osy y