



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

ANALÝZA VLASTNÍCH FREKVENCÍ A VLASTNÍCH TVARŮ SKUTEČNĚ TVAROVANÉ LIDSKÉ HLASIVKY

ANALYSIS OF MODAL SHAPES AND NATURAL FREQUENCIES OF REAL-SHAPED VOCAL FOLD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Horčic

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hájek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Václav Horčic
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Hájek, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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 bakalářské práce:

Analýza vlastních frekvencí a vlastních tvarů skutečně tvarované lidské hlasivky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přestože se v experimentech a výpočtech většinou používá idealizovaná geometrie hlasivek, v současnosti umíme vytvořit geometrie skutečně tvarovaných lidských hlasivek při různých fonačních postaveních. Cílem práce bude tvorba geometrie z dat optického skeneru a provedení modální analýzy tohoto modelu.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedte rešerši používaných modelů geometrie hlasivek.
- 2) Stručně popište anatomii a fyziologii hlasivek a vznik lidského hlasu.
- 3) Rekonstruuje geometrii hlasivky z dat optického skeneru.
- 4) Provedte modální analýzu této hlasivky a analyzujte obdržené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

TITZE, Ingo R., 1994. Principles of Voice Production. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-717893-X.

TITZE, Ingo R., 2006. The Myoelastic Aerodynamic Theory of Phonation. Denver and Iowa City: National Centre for Voice and Speech. ISBN 978-0-87414-156-6.

ŠVEC, Jan G., 1996. Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu. B.m. Univerzita Palackého v Olomouci.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá modální analýzou modelu vytvořeného na základě 3D skenu lidských hlasivek. Jedná se o model řešený metodou konečných prvků, kde hodnota první vlastní frekvence zhruba odpovídá hodnotě základní frekvence ženských hlasivek. Rešeršní část práce se věnuje přehledu modelů geometrie hlasivek, na který navazuje stručný popis anatomie a fyziologie lidského mluvního ústrojí společně s teorií vzniku lidského hlasu.

Konečnoprvkový model je vytvořen s využitím skenu 3D hlasivek v komerčním programu ANSYS Workbench ve kterém je i řešen metodou konečných prvků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lidské hlasivky, modální analýza, vlastní frekvence, metoda konečných prvků, biomechanika lidského hlasu.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the modal analysis of a model based on a 3D scan of the human vocal cords. This is a model solved by the finite element method, where the value of the first natural frequency roughly corresponds to the value of the fundamental frequency of female vocal folds. The research part of the thesis is devoted to an overview of finite element models of the geometry of the vocal cords, which is followed by a brief description of the anatomy and physiology of the human speech system together with the theory of the formation of the human voice.

The finite element model is created using a 3D scan of the vocal folds in the commercial program ANSYS Workbench, in which it is solved by the finite element method.

KEYWORDS

Vocal folds, modal analysis, natural frequency, finite element method, biomechanics of human voice,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORČIC, Václav. *Analýza vlastních frekvencí a vlastních tvarů skutečně tvarované lidské hlasivky* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154215>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Hájek.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Petru Hájkovi, Ph.D. za trpělivost a cenné rady při tvorbě této práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Petra Hájka, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	REŠERŠE MODELŮ GEOMETRIE HLASIVEK	12
2.1	Modely se zjednodušenou geometrií	12
2.2	Parametrické modely	13
2.3	Modely s fyziologickou geometrií	14
3	ANATOMIE A FYZIOLOGIE HLASIVEK	16
3.1	Anatomie hrtanu	16
3.2	Anatomie hlasivek	20
3.3	Fyziologie hlasivek a tvorba lidského hlasu	21
3.3.1	Postavení hlasivek	21
3.3.2	Teorie tvorby hlasu	22
4	MODÁLNÍ ANALÝZA LIDSKÉ HLASIVKY	24
4.1	Model geometrie	24
4.2	Model materiálu	27
4.3	Model uložení	27
4.4	Sít' konečných prvků	28
4.5	Modální analýza	29
5	VÝSLEDKY A JEJICH ZHODNOCENÍ	30
5.1	Vlastní frekvence	30
5.2	Vlastní tvary	30
6	ZÁVĚR	33
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35

1 ÚVOD

Člověk je od přírody tvor společenský, a tak se již od narození setkává s potřebou komunikovat například pomocí hlasu. Novorozenec komunikuje nonverbálně, pomocí žvatlání, s přibývajícím roky se ale jeho komunikační schopnosti postupně rozvíjí a v dospělosti může disponovat aktivní slovní zásobou v řádu tisíců slov.

Schopnost komplexně komunikovat pravděpodobně stála u zrodu společnosti tak jak ji dnes známe. Umožnila lidem předávat myšlenky, informace a znalosti a pomohla snadné organizaci větších skupin. Mohli bychom říci, že před vynálezem písma byla hlavní nositelkou pokroku právě řeč.

Vynález písma ale řeči v žádném případě na důležitosti neubral, pořád má své důležité místo například ve vzdělávání, politice, kultuře a v neposlední řadě v sociální interakci.

Základním pilířem tvorby řeči jsou hlasivky, párový orgán složený ze svalů, sliznice a vazů uložený v hrtanu. Průchodem vzduchu přes hrtan jsou hlasivky rozkmitány. V rozkmitaných hlasivkách poté dochází ke vzniku základního hlasu.

První úspěšné snahy modelovat toto kmitání jsou spojeny se jménem Ernsta Julia Richarda Ewalda, který na přelomu 19. a 20. století publikuje první hmotový model, Ewaldovu píšťalu [1]. Hmotové modely, sestavené ze soustav pružin a tlumičů jsou v průběhu 20. století dále rozvíjeny, a i dnes jsou stále relevantní, s rozvojem výpočetních technologií se ale od 70. let 20. století objevují modely alternativní, pracující přímo s reálnou geometrií a materiálem hlasivek [2]. Jedná se modely řešené pomocí rovnic mechaniky kontinua.

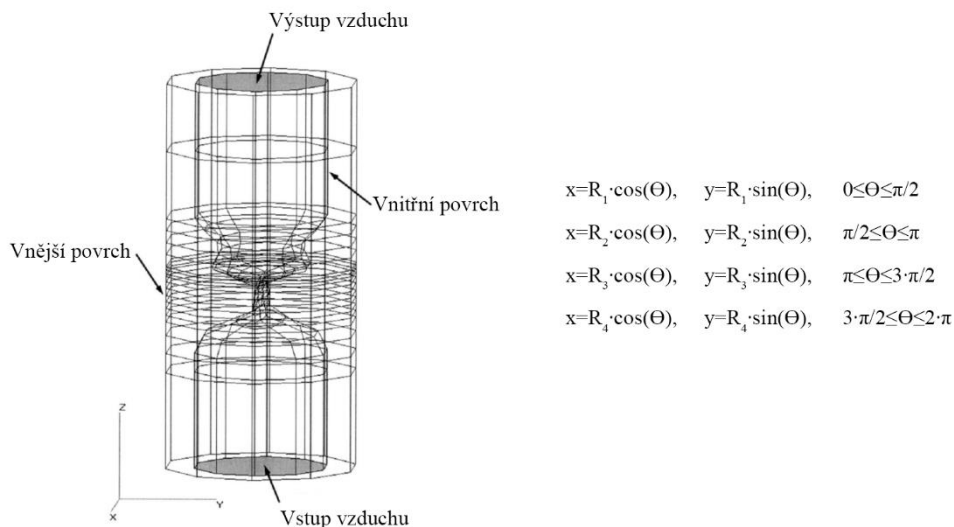
A právě těmto modelům se věnuje tato práce. V první části je provedena rešerše modelů geometrie hlasivek, v druhé je stručně shrnuta anatomie a fyziologie hlasivek ze které tyto modely vychází, třetí částí se zabývá tvorbou 3D modelu hlasivek na základě skenu jejich reálné geometrie a jeho následnou modální analýzou.

2 REŠERŠE MODELŮ GEOMETRIE HLASIVEK

Modely geometrie hlasivek jsou tvořeny na základě znalosti jejich anatomie, fyziologie a znalosti procesů tvorby lidského hlasu.

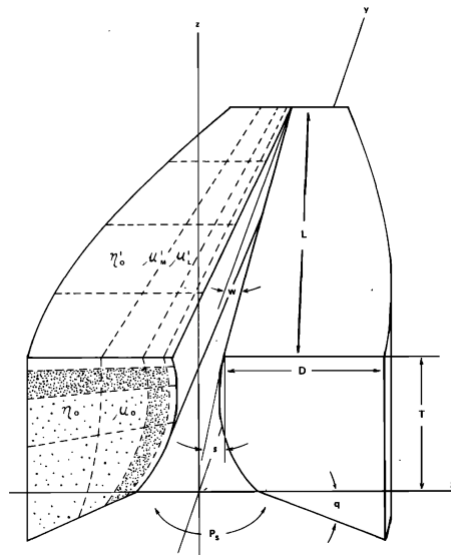
2.1 Modely se zjednodušenou geometrií

Model Rosa, je 3D model hrtanu definovaný ve studii [3], jehož vnitřní a vnější rozměry jsou určeny soustavou hyper-elips (Obrázek 1). Materiál je rozdělen do tří vrstev, obalu, vazy a svalů. Obal a vaz jsou dané konstantní tloušťkou 0,5 mm, sval vyplňuje zbytek prostoru mezi vazem a vnějším povrchem modelu. Model materiálu byl stanoven jako transversálně izotropní.



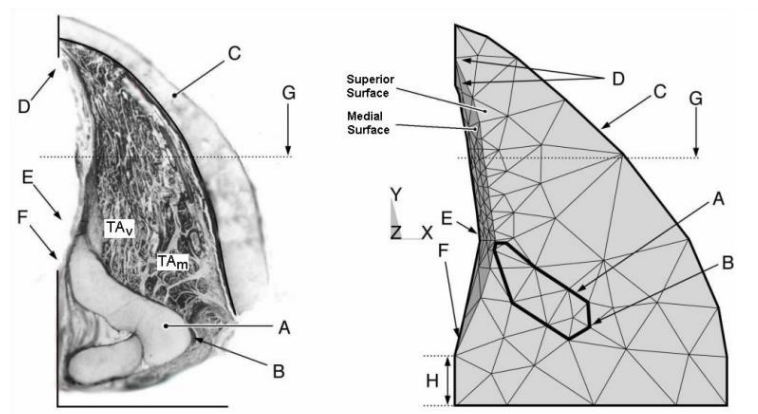
Obrázek 1 Model Rosa a rovnice hyper-elips, převzato a upraveno z [3]

Model Titze, Talkin (Obrázek 2) je 3D model hlasivek, který sice může být parametrický, ale tato práce vychází ze studie [4] která jeho rozměry pevně definuje. Délka modelu L odpovídá 14 mm, nominální hodnota jeho tloušťky T je 5 mm a šířka jedné hlasivky D klesá od 10 do 5 mm podle funkce $f = 1 - 5 \cdot y^2 / L^2$. Šířka *glottis* je poté určena vztahem $g(y, z) = 2 \cdot \omega \cdot (L - y) + 2 \cdot [-s \cdot (T - z) + (T - z)^2] \cdot f$, kde ω je úhlová odchylka pro abdukcii hlasivek o nominální hodnotě 0,0 rad a s je tvarový faktor ovlivňující tvar střední plochy o nominální hodnotě 0,05 rad. Tyto rozměry zhruba odpovídají reálné velikosti mužských hlasivek. Materiál je v souladu s třívrstevným schématem rozdělen do tří vrstev, sliznice, vazy a svalů a jeho model byl stanoven jako transversálně izotropní.



Obrázek 2 Model Titze, Talkin, převzato z [4]

Model Hunter et al. (Obrázek 3) definovaný studií [5] je 3D model hlasivky doplněný o svaly ji ovládající a *articulatio cricoarytaenoidea* (kloub mezi prstencovou a hlasivkovou chrupavkou). Při modelování materiálu je kladen důraz na zachování vnitřních vláken ve svalech i hlasivce.



Obrázek 3 Model Hunter et al, převzato z [5]

2.2 Parametrické modely

Schererův model M5 (Obrázek 4) je 2D parametrický model rozměrů hlasivky definovaný ve studii [6]. Jeho výhodou je možnost úpravy rozměrů pomocí změny jeho geometrických parametrů. Díky těmto vlastnostem je hojně využíván v dalších studiích.

General vocal fold surface design equations :

$$R_o = 0.0987 \text{ cm} \quad T = 0.3 \text{ cm} \quad -40^\circ \leq \Psi \leq 40^\circ$$

$$R_\Psi = R_o / (1 - \sin(\Psi/2)) \quad R_L = R_{40} = T/2$$

$$B = \sqrt{2} R_\Psi / \sqrt{1 + \sin(\Psi/2)}$$

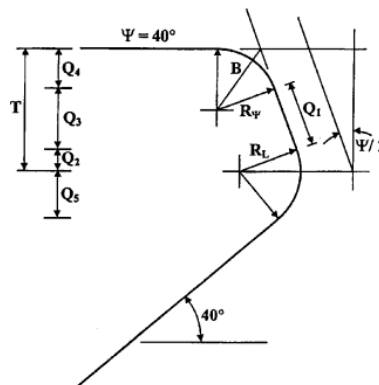
$$= R_o \sec(\Psi/2) / \sqrt{(1 - \sin(\Psi/2)) / 2}$$

$$Q_1 = (T - R_\Psi) \sec(\Psi/2) + (R_\Psi - R_L) \tan(\Psi/2)$$

$$= (T - R_o - R_L \sin(\Psi/2)) \sec(\Psi/2)$$

$$Q_2 = R_L \sin(\Psi/2) \quad Q_3 = Q_1 \cos(\Psi/2)$$

$$Q_4 = R_o \quad Q_5 = R_L \sin 50^\circ$$



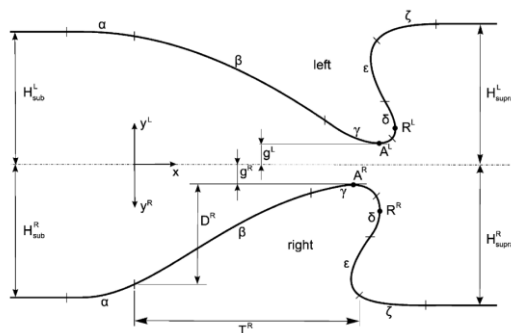
Obrázek 4 Model M5 a jeho parametry, převzato a upraveno z [6]

Parametrický model Xue, Zheng et al. je 3D model navržený ve studii [7], založený na tvaru Schererova modelu M5. Vrstvy hlasivek jsou modelovány dle třívrstvého schématu, tedy sliznice, vaz a sval.

2.3 Modely s fyziologickou geometrií

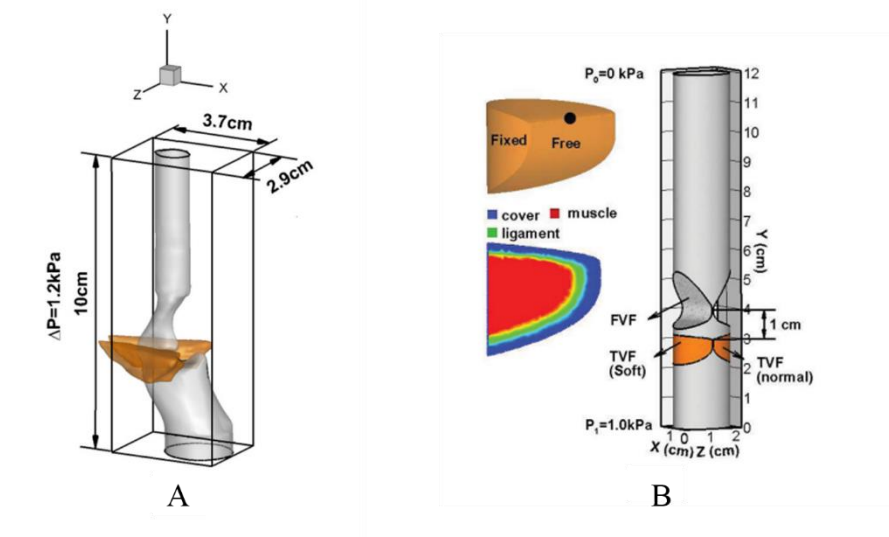
Do této kategorie jsou řazeny modely, jejichž geometrie odpovídá reálné geometrii hlasivek. Takové modely mohou být tvořeny například s využitím 3D skenů, nebo výpočetní tomografie.

Model Šidlof et al. (Obrázek 5) je 2D model, popsáný ve studii [8]. Je založen na geometrii odlitku dutiny ženského hrtanu, jež byla digitalizována pomocí 3D souřadnicového měřicího stroje. Z vygenerované 3D geometrie byl vytvořen koronární řez hlasivkami, který byl proložen kubickými funkcemi.



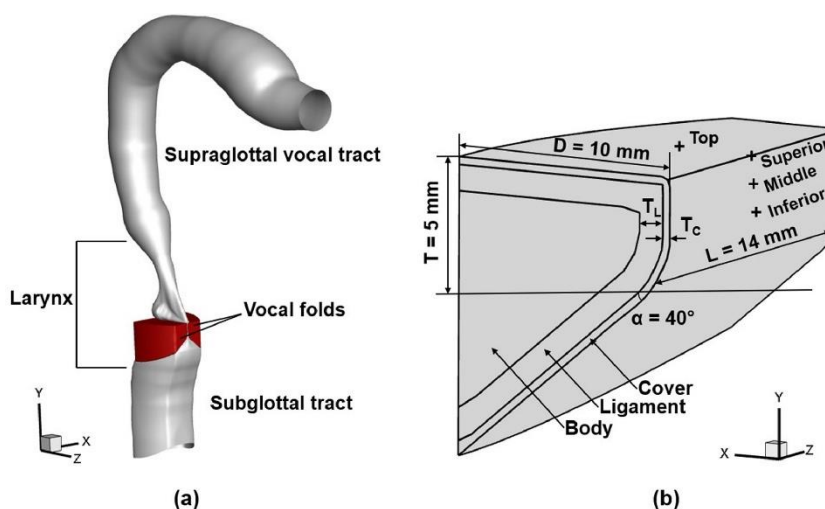
Obrázek 5 Model Šidlof, přejato z [8]

Model Xue, Zheng et al. (Obrázek 6-B) je 3D model hrtanu navržený ve studii [9]. Skládá se z hlasivek, nepravých hlasivek a eliptického válce simulujícího vokální trakt. Řez hlasivek vychází z CT skenu provedeného na zdravém muži. Vrstvy hlasivek, sliznice, vaz a sval, odpovídají třívrstvému schématu. Dalším modelem vytvořeným tímto výzkumným týmem je model složený z dutiny hrtanu a hlasivek založený na jejich CT skenu (Obrázek 6-A) [10].



Obrázek 6 Modely Xue, Zheng et al., přejato a upraveno z [9]

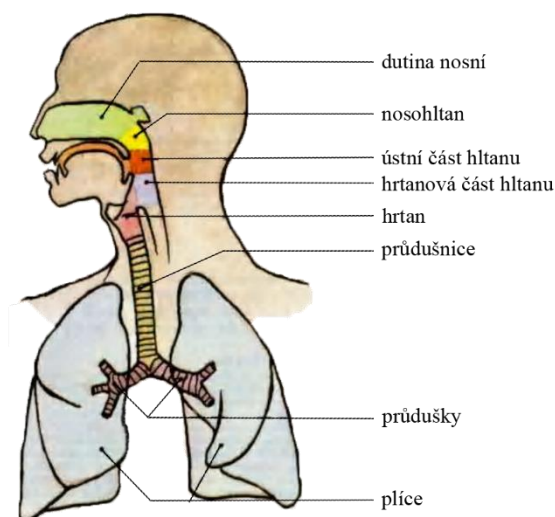
Model Wang et al. navržený ve studii [11] je 3D model kombinující geometrii dutiny hrtanu získanou CT skenem s geometrií hlasivek založenou na modelu Titze, Talkin [11]. Vrstvy, sliznice, vaz a sval odpovídají třívrstvému schématu a model materiálu je transverzálně izotropní.



Obrázek 7 Model Wang et al, převzato z [11]

3 ANATOMIE A FYZIOLOGIE HLASIVEK

Jako mluvní orgány, popřípadě mluvidla (Obrázek 8), souhrnně označujeme všechny orgány podílející se na tvorbě lidského hlasu. Mluvidla dělíme na tři skupiny: ústrojí dýchací, hlasové a modifikační [12]. Z hlediska této práce je největší důraz kladen právě na ústrojí hlasové. To je uloženo v hrtanu a jeho primární funkcí je tvorba základního hlasu. Základním hlasem je rozuměn prvotní zvuk generovaný hlasivkami. Základem hlasového ústrojí jsou dva hlasové valy pokryté sliznicí, takzvané hlasivky [12].



Obrázek 8 Mluvní orgány člověka, převzato a upraveno z [13]

3.1 Anatomie hrtanu

Jedná se o nepárový dutý orgán sloužící k respiraci a fonaci. Skelet hrtanu je tvořen souborem chrupavek pohyblivě spojených pomocí kloubů, vazů a svalů, dutina je vystlána sliznicí [13].

Skelet hrtanu

Nejvýznamnější součástí skeletu jsou čtyři velké chrupavky (Obrázek 9), jedná se o chrupavku štítnou, prstencovou, hlasivkovou a chrupavku příklopky hrtanové.

Chrupavka štítná, *cartilago thyroidea*, je nepárová hyalinní chrupavka tvořená dvěma ploténkami *laminou dextra* a *laminou sinistra*, ve předu spojenými. Přední oblá hrana spojení *prominentia laryngea* je u mužů vyčnívající a hmatná (v hovorové řeči nazývána ohryzkiem). Ze zadních okrajů plotének vyvstávají rohy štítné chrupavky. Horní rohy, *cornua superiora*, jsou pomocí vazů spojeny s rohy jazyčky, dolní rohy, *cornua inferiora*, jsou skloubeny s chrupavkou prstencovou. Toto kloubní spojení umožňuje měnit frekvenci hlasivek pomocí jejich napínání [13].

Chrupavka prstencová, *cartilago cricoidea*, je nepárová hyalinní chrupavka s typickým tvarem vodorovně položeného pečetního prstenu skloubená s chrupavkou prstencovou pomocí párových kloubních plošek *facies articularis thyroidea* a oběma chrupavkami hlasivkovými pomocí párových kloubních plošek *facies articularis arytenoidea* [13].

Chrupavka hlasivková, *cartilago arytaenoidea*, je párová, většinou hmoty hyalinní, chrupavka tvaru trojbokého jehlanu bází skloubeného s chrupavkou prstencovou [13].

Chrupavka příklopky hrtanové, *cartilago epiglottica*, je nepárová elastická chrupavka tvaru rostlinného listu, jehož stopka je připojená ke štítné chrupavce. Slouží jako podklad hrtanové příklopky *epiglottis* [13].

Drobné chrupavky hrtanu jsou vazivem připojeny k hlavním chrupavkám, popřípadě vloženy ve vazech. Řadíme mezi ně párovou chrupavku *cartilago corniculata*, párovou chrupavku *cartilago cuneiformis*, párovou chrupavku *cartilago triticea* a chrupavky *cartilagine sesamoideae*. Tyto chrupavky jsou hyalinní s okrsky chrupavky elastické [14].



Obrázek 9 Chrupavky hrtanu, zleva příklopky hrtanové, štítná, hlasivková a prstencová, převzato a upraveno z [13]

Dutina hrtanu

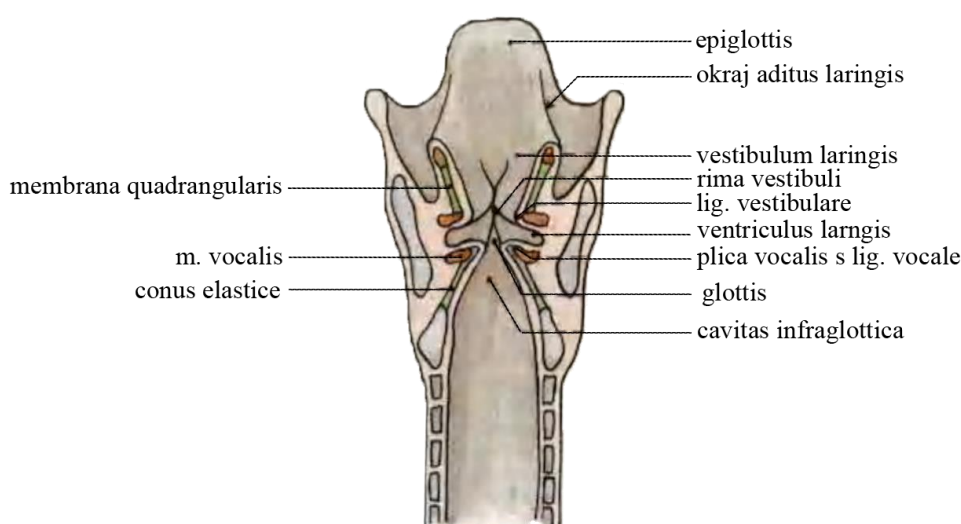
Dutina hrtanu (Obrázek 10) je vystlána sliznicí krytou víceřadým cylindrickým řasinkovým epitelem. Začíná z přední kaudální části hltanu jako vchod hrtanu a končí kaudální částí, na niž volně navazuje průdušnice. Vlastní dutina je poté slizničními řasami rozdělena na tři oddíly, předsíň, hlasivku a kaudální část [13].

Vchod hrtanu, *aditus laryngis*, je ohraničen kranálně epiglottis a kaudálně sliznicí krytým zářezem mezi hlasivkovými chrupavkami *incisura interarytenoidea* [13].

Předsíň hrtanová, *vestibulum laryngis*, je nálevkovitě se zužující úsek hrtanu, jenž sahá od vchodu po zúženou *rima vestibuli*, sagitální štěrbinu mezi *plicae vestibulares* [13].

Kaudální část, *cavitas infraglottica*, má tvar obrácené nálevky a rozšiřuje se kaudálně od *rima glottidis* k vnitřnímu obvodu prstencové chrupavky. Od prstencové hlasivky na hrtan navazuje průdušnice [13].

Hlasivková štěrbina, *glottis*, je zúžené místo uprostřed hrtanu, kaudálně pod *plicae vestibulares*. Jedná se o sagitální štěrbinu ohraničenou párovými *plicae vocales*, hlasivkami. Dělíme ji na dvě části. Přední, *pars intermembranacea*, dlouhou část mezi vlastními hlasovými vazy a zadní, *pars intercartilaginea*, krátký úsek mezi *cartilagine arytenoidae* [13].



Obrázek 10 Dutina hrtanu, převzato a upraveno z [13]

Svaly hrtanu

Napětí hlasových vazů a šířka *glottis* jsou závislé na pohybech hrtanových chrupavek. Ty jsou ovládány pomocí příčně pruhovaných párových svalů hrtanu. Tyto svaly jsou děleny na vnější a vnitřní. Vnější svaly hrtanu připojují hrtan k okolním strukturám a ovlivňují jeho polohu. Vnitřní svaly hrtanu spojují chrupavky hrtanu, kontrolují napětí hlasivek během fonace a dýchání a také uzavírají epiglottis při polykání. Svaly ovládající tvar hlasové štěrbině dále dělíme na adduktory a abduktory, adduktory hlasovou štěrbinu uzavírají, abduktory rozšiřují. Dalším způsobem dělení vnitřních svalů je rozdělení na tři skupiny podle uložení, v takovém případě se užívá označení svaly přední, postranní a zadní skupiny [14].

Svaly přední skupiny

Musculus cricothyroideus (Obrázek 11-1a) se vějířovitě rozepíná od přední strany chrupavky prstencové k dolnímu okraji chrupavky štítné. Dělí se na dvě části, *pars recta* (Obrázek 11-2a) a *pars obliqua* (Obrázek 11-3a). Jeho funkcí je sklánění štítné chrupavky dopředu, tímto pohybem dochází k napínání hlasivkových vazů [13].

Svaly postranní skupiny

Musculus cricothyroideus lateralis (Obrázek 11-3b) jde od horního okraje prstencové chrupavky k *processus muscularis* chrupavky hlasivkové. Tento sval ovládá vnitřní rotaci hlasivkové chrupavky, a tím sblíží hlasové vazy *ligamentum vocale* [13].

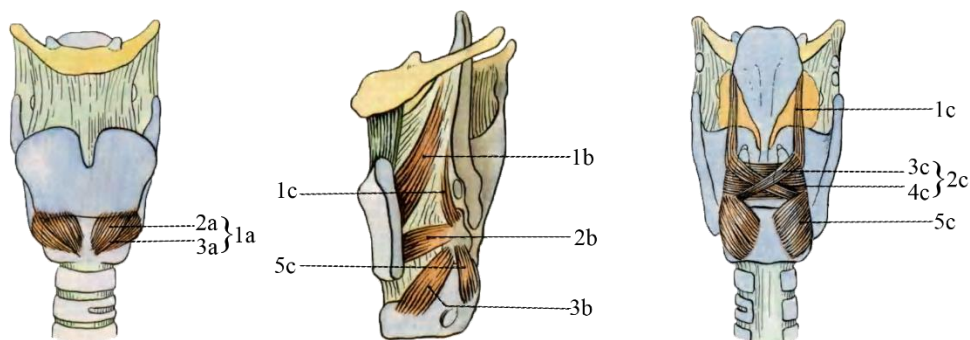
Musculus thyroarytenoideus (Obrázek 11-2b) se rozepíná po vnitřní straně *ligamentum vocale* od štítné chrupavky po anterolaterální plochu hlasivkové chrupavky. Vnitřní část svalu doléhající na *ligamentum vocale* se nazývá *musculus vocalis*. Tento sval spolupůsobí při sevření hlasových vazů, mediálně rotuje hlasivkovou chrupavku [13].

Musculus thyroepiglotticus (Obrázek 11-1b) kranálně navazuje na *m. thyroarytenoideus* a probíhá od štítné chrupavky dozadu vzhůru k laterálnímu okraji *epiglottis*. Tento sval odklání *epiglottis* a rozšiřuje vstup do hrtanu [13].

Svaly zadní skupiny

Musculus cricoarytenoideus posterior (Obrázek 11-5c) probíhá kraniolaterálně od zadní plochy chrupavky prstencové na zadní plochu chrupavky hlasivkové. Tento sval laterálně rotuje a táhne vzad hlasivkovou chrupavku, tímto jako jediný rozšiřuje hlasivkovou štěrbinu [14].

Musculus arytenoideus (Obrázek 11-2c) na zadní straně spojuje hlasivkové chrupavky. Dělí se na *musculus arytenoideus transversus* (Obrázek 11-4c), což je hlubší složka probíhající příčně mezi hlasivkovými chrupavkami, a *musculus arytenoideus obliquus* (Obrázek 4-3c), složku povrchovou spojující hlasivkové chrupavky mediokranálně (snopce svalu se ve střední čáře kříží). Jeho funkcí je zužování štěrbin mezi hlasovými vazy, jedná se o nejsilnější adduktor. Na *musculus arytenoideus obliquus* navazuje jeho *pars aryepiglottica* (Obrázek 11-1c), který probíhá po zevní straně chrupavky vzhůru na okraj *epiglottis*. Její funkcí je sklápění *epiglottis* ke vchodu do hrtanu, tím jej zmenšuje [13].



Obrázek 11 Svaly hrtanu, zleva svaly přední, postranní a zadní skupiny, převzato a upraveno z [13]

3.2 Anatomie hlasivek

Hlasivky jsou párovým orgánem umístěným v nejužší části hrtanu mezi chrupavkou štítnou a chrupavkami hlasivkovými. Hirano [15] definoval, že jsou složeny z pěti vrstev (Obrázek 12) a každá z těchto vrstev má odlišné elastické vlastnosti. Povrch je krytý vrstevnatým šupinovým epitelem o tloušťce 0,05 až 0,1 mm. Pod epitelem se nachází nesvalový vrstevnatý systém lamina propria, lamina propria se dále dělí na povrchovou, střední a hloubkovou vrstvu [16].

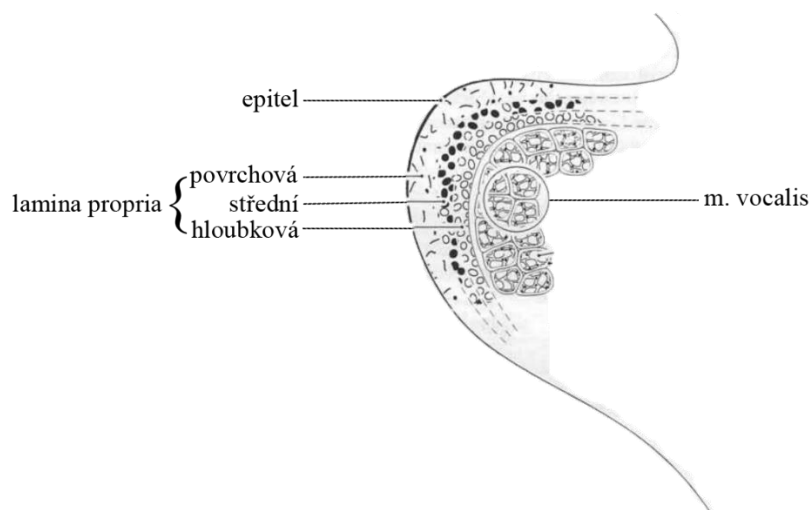
Povrchová vrstva má uprostřed hlasivek tloušťku kolem 0,3 mm a je utvořena z neorganizovaně uspořádaných elastinových vláken obklopených tkáňovou tekutinou [16].

Elastinová vlákna obsahuje i vrstva střední, v této vrstvě jsou ale uspořádána v anteriorně-posteriorním směru. Na rozdíl od povrchové vrstvy se zde ale vyskytuje i menší množství kolagenních vláken [16].

Hloubková vrstva poté obsahuje primárně kolagenní vlákna, ta jsou oproti elastinovým vláknům téměř nepoddajná. Střední a hloubková vrstva mají dohromady tloušťku okolo 1 mm [16].

Pod hloubkovou vrstvou se nachází sval m. vocalis.

Délka hlasivek se poté liší v závislosti na pohlaví, literaturou je udávána jako 16 mm pro mužské a 10 mm pro ženské [17].



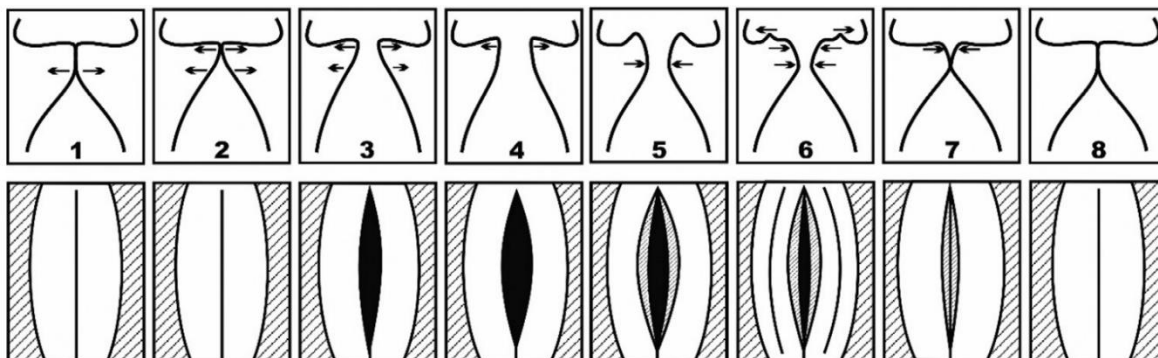
Obrázek 12 Schéma vrstev hlasivek, převzato a upraveno z [17]

3.3 Fyziologie hlasivek a tvorba lidského hlasu

3.3.1 Postavení hlasivek

Jak již bylo zmíněno, hrtan primárně figuruje v dějích spojených s dýcháním a tvorbou hlasu, mezi jeho další funkce ale patří i vykašlávání a polykání [13]. V závislosti na funkci, ke které je využíván, se mění i postavení hlasivek. Při tvorbě hlasu se *pars intermembranacea* a *pars intercartilaginea* svírají (Obrázek 13-A). Toto postavení se označuje jako fonační poloha [13]. Napjaté hlasové vazy se při úzké štěrbině rozechvívají proudem vydechovaného vzduchu, tím vzniká základní hlas, který je posléze v rezonančním ústrojí formován do barvy lidského hlasu [16]. Při dýchání se hlasivková štěrbina, *glottis*, rozevívá. Míra rozevření závisí na intenzitě dýchání, při klidovém dýchání a při šepotu je uzavřená v *pars intermembranacea* a mírně otevřená v *pars intercartilaginea* (Obrázek 13-B). Při středně intenzivním dýchání se obě části štěrbiny rozevívají rovnoměrně (Obrázek 13-C) a při usilovném dýchání se štěrbina otevírá doširoka (Obrázek 13-D) [13].

Při výdechu během fonace dochází ke zvýšení subglotického tlaku nad úroveň tlaku supraglotického. Subglotickým tlakem je rozuměn tlak v dolních cestách dýchacích, supraglotickým tlak v horních cestách dýchacích. Pomyslnou dělicí čáru mezi oblastmi těchto tlaků tvoří *glottis*. Subglotický tlak postupně rozevívá *glottis* zdola nahoru v konvergentním tvaru (Typický tvar na obrázku 15-3). V určité chvíli ale začne nad působením subglotického tlaku převažovat působení elastických vlastností hlasivek. Toto působení *glottis* zavírá zdola nahoru v divergentním tvaru (Typický tvar na obrázku 15-6). Divergentní tvar v *glottis* dále snižuje tlak, a tím ji uzavírá [20]. Změny tvaru *glottis* během kmitání jsou zobrazeny na obrázku 15.

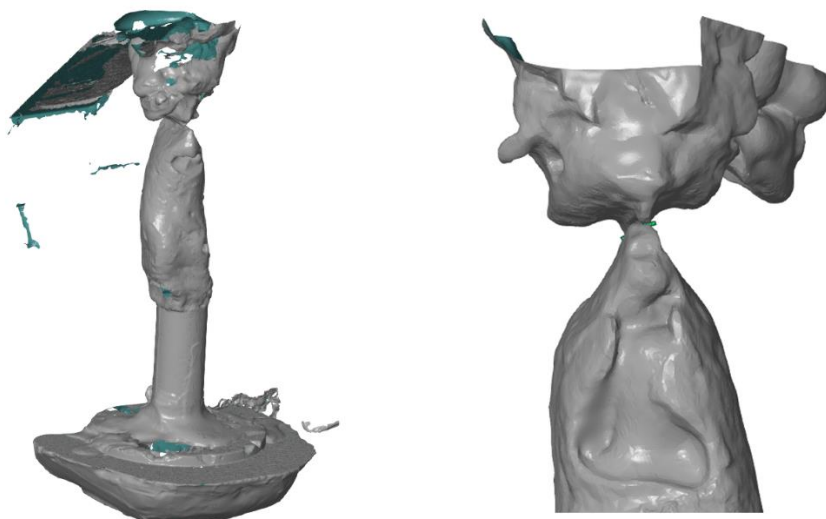


Obrázek 15 Tvary *glottis* při fonaci, převzato z [20]

4 MODÁLNÍ ANALÝZA LIDSKÉ HLASIVKY

4.1 Model geometrie

Model geometrie je založen na sádrovém odlitku dutiny hrtanu 72 let staré ženy ve fonačním postavení o frekvenci 304 Hz zapůjčeného autory studie [8]. Geometrie tohoto odlitku byla naskenována za pomoci stolního skeneru SHINING 3D EinScan-SE disponujícího snímačem o rozlišení 1,3 MPix a přesností pod 0,1 mm.

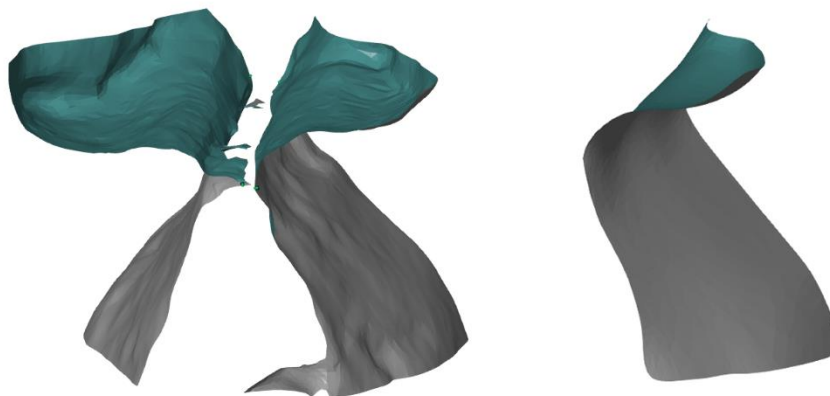


Obrázek 16 Sken odlitku dutiny hrtanu s detailem hlasivek

Naskenovaná geometrie (Obrázek 16) byla ve formátu STL importována do programu ZEISS Inspect, kde probíhaly prvotní úpravy. V prvním kroku byl z geometrie odřezán stojan odlitku. Ve zbytku geometrie, tvořeném čistě skenem dutiny hrtanu (Obrázek 16), byly posléze opraveny díry vzniklé při skenování. Nakonec byly z geometrie vyříznuty plošky hlasivek (Obrázek 17).

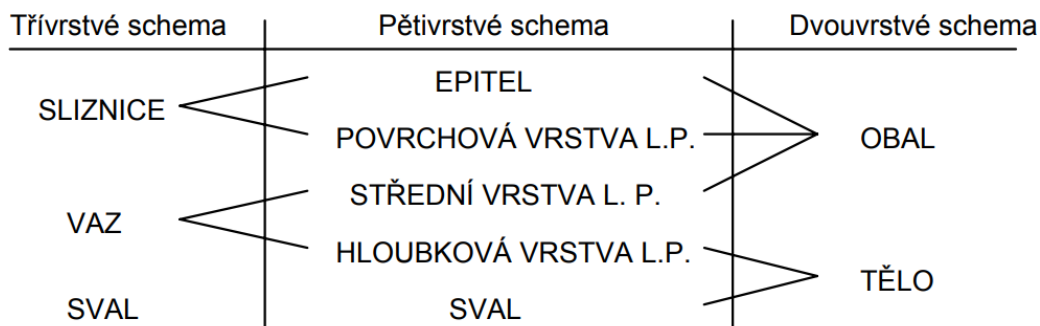
Pro potřebu modální analýzy byla vyžadována pouze jedna hlasivka, tudíž byla pro další práci vybrána ploška hlasivky levé (Obrázek 17), a to z důvodu větší úplnosti její naskenované geometrie. STL síť této plošky byla vyhlazena a zjednodušena v programu Autodesk Meshmixer a následně za použití programu ZEISS Reverse Engineering převedena na plochy.

Tyto plochy byly importovány do programu Autodesk Inventor, kde bylo na jejich základě vytvořeno uzavřené těleso hlasivky (obr. 19) o délce 10 mm, maximální tloušťce 7,5 mm a výšce 10,2 mm.



Obrázek 17 Plošky hlasivek před a po úpravě

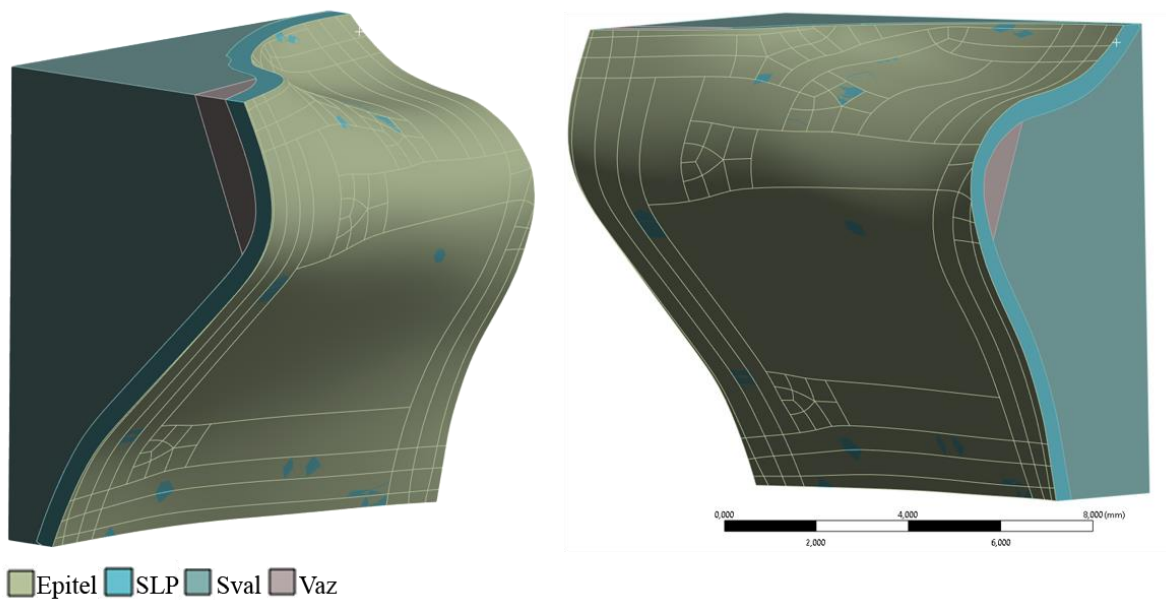
Jak již bylo řečeno, anatomicky jsou hlasivky složeny z pěti vrstev [16], ale pro potřeby modelování bývají některé vrstvy shlukovány do skupin (Obrázek 18). Například třívrstvé schéma rozlišuje sliznici, vaz a sval [15], zatímco dvouvrstvé schéma rozlišuje pouze obal a tělo[21].



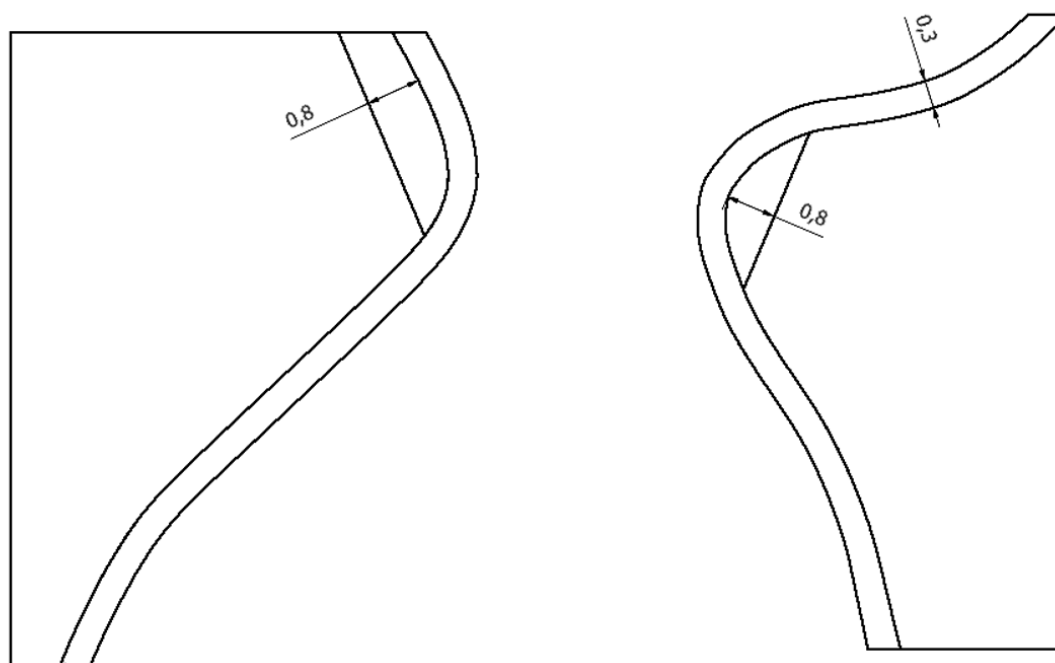
Obrázek 18 Schémata označující vrstvy hlasivek, převzato z [16]

Model v této práci využívá modifikovaného třívrstvého schématu, kde je sliznice rozdělena zpátky na epitel a svrchní (povrchovou) vrstvu laminy propria, dále SLP.

Vrstva epitelu je modelována jako plocha odpovídající naskenované plošce hlasivky, tloušťka je jí dodána až s využitím prvků SHELL v rámci modální analýzy. Vrstva SLP kopíruje epitel s konstantní tloušťkou 0,3 mm a rozhraní vaz/sval je modelováno rovnoběžně s čelem hlasivky v pohledu zepředu, s největší tloušťkou 0,8 mm. Všechny rozměry jsou převzaty z [22].



Obrázek 19 Model geometrie, pohledy zepředu a zezadu



Obrázek 20 Model geometrie, přední a zadní pohled s rozměry

4.2 Model materiálu

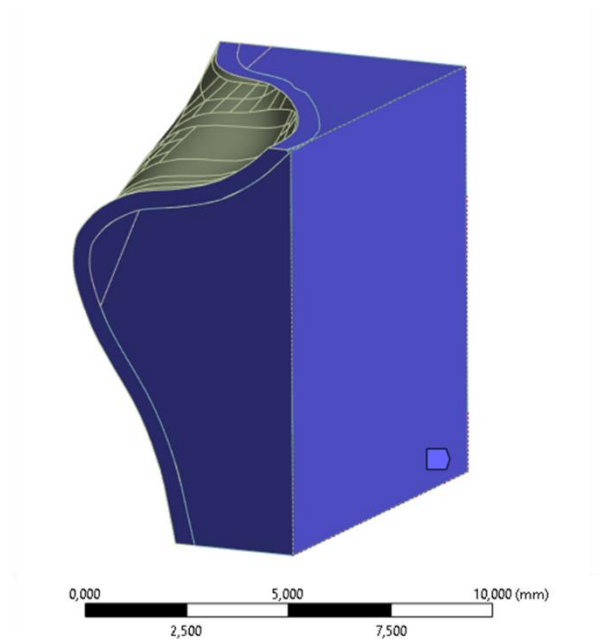
Materiál skutečných hlasivek se nejvíce blíží transversálně izotropnímu nelineárně-pružnému materiálu [23], ale pro potřebu této práce byl využit homogenní izotropní lineárně-pružný model materiálu. Ten je využit primárně z důvodu jeho snadného popsání. Lze jej popsat pomocí dvou parametrů, Youngova modulu pružnosti E a Poissonova poměru μ . Tyto parametry (Tabulka 1) se pro jednotlivé vrstvy tkáně liší a byly převzaty z [24]. Tlumení tkáně hlasivek je v této práci zanedbáno.

Vrstva	Youngův modul pružnosti E [Pa]	Poissonův poměr μ [-]	Hustota ρ_s [$kg \cdot m^{-3}$]
Epitel	25000	0,49	1040
SLP	2000	0,49	1040
Vaz	8000	0,49	1040
Sval	65000	0,40	1040

Tabulka 1 Parametry materiálu

4.3 Model uložení

Hlasivka je uložena pomocí vetknutí, to je analogické k jejímu uložení v hrtanu [17]. Vetknuté plochy jsou na obrázku 21 označeny modře.



Obrázek 21 Vetknuté plochy

4.4 Síť konečných prvků

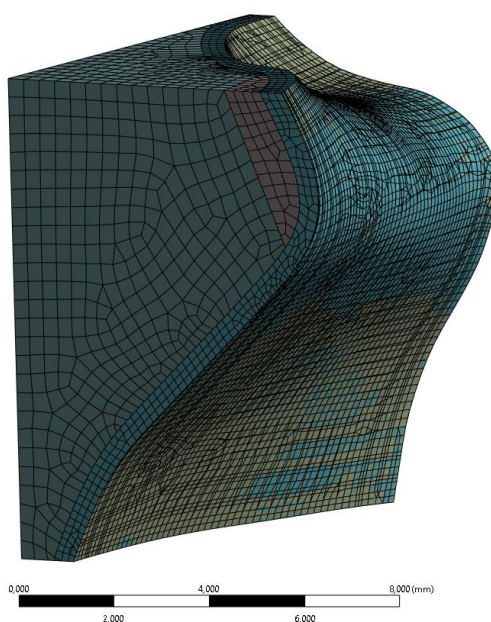
Síť (Obrázek 22) je tvořena 124628 uzly, 31246 prvky typu SOLID, 1349 prvky typu SHELL a 25206 prvky styku CONTA174 a TARGE170.

V rámci prvků SOLID převažují z 90 % kvadratické prvky o 20 uzlech SOLID186, ty jsou z důvodu organického tvaru modelu doplněné kvadratickými prvky o 10 uzlech SOLID187. Uzly těchto prvků mají tři stupně volnosti, posuvy v osách x , y a z .

Prvky typu SHELL jsou blíže specifikovány jako SHELL 181, prvky o čtyřech uzlech s šesti stupni volnosti, posuvy a rotacemi v osách x , y a z v každém z nich. Jejich tloušťka odpovídá tloušťce epitelu 0,05 mm.

Jelikož byly vrstvy modelu modelovány jako samostatná tělesa, bylo je nutné spojit. Proto byl typ kontaktu pro všechny stykové plochy nastaven jako bonded, tedy tělesa jsou pevně spojená a v místech kontaktu nedochází k rozpojení, ani ke skluzu.

Velikost prvků byla pro celý model hlasivky nastavena jako 0,4 mm a funkcí sizing dále upravena na 0,28 mm pro vaz a 0,2 mm pro epitel.



Obrázek 22 Použitá síť konečných prvků

4.5 Modální analýza

Modální analýza je jedním z nejčastěji prováděných typů dynamického výpočtu s využitím MKP. Jedná se o úlohu vlastního, v případě této práce netlumeného, kmitání, jejímž výstupem jsou vlastní tvary a vlastní frekvence zkoumaného objektu [25].

Pohybová rovnice diskretizovaná MKP pro dynamickou úlohu bez tlumení má tvar

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t). \quad (1)$$

Pro úlohu, ve které není uvažováno buzení, platí

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{0} . \quad (2)$$

Předpokládáme-li homogenní řešení harmonického kmitání ve tvaru $\mathbf{U} = \bar{\mathbf{U}} \cdot e^{i\Omega t}$, po dvojitou derivaci, dosazením do vztahu (2) a úpravě dostaneme

$$(\mathbf{K} - \Omega^2 \cdot \mathbf{M}) \cdot \bar{\mathbf{U}} = \mathbf{0}, \quad (3)$$

kde \mathbf{K} je matice tuhosti, \mathbf{M} celková matice hmotnosti, $\bar{\mathbf{U}}$ sloupcová matice vlastního vektoru kmitání (vlastního tvaru) a Ω úhlová frekvence kmitání. Rovnice (3) má netriviální řešení pouze pro rovnici (4) pro diskrétní hodnoty vlastních frekvencí Ω_i , $i = \langle 1, n \rangle$, kde n je řád matic \mathbf{K} , \mathbf{M} . Vlastní frekvence plynou z této podmínky nulového determinantu

$$\det|\mathbf{K} - \Omega^2 \cdot \mathbf{M}| = 0. \quad (4)$$

Každé vlastní frekvenci Ω_i náleží vlastní tvar kmitání $\bar{\mathbf{U}}_i$.

5 VÝSLEDKY A JEJICH ZHODNOCENÍ

5.1 Vlastní frekvence

Modální analýzou bylo zjištěno prvních 6 vlastních frekvencí modelu, ty jsou shrnuty v tabulce 2. První vlastní frekvence modelu byla určena jako 241,49 Hz a měla by zhruba odpovídat vlastní frekvenci lidského hlasu [26]. Tu určuje studie [27] na základě analýzy s využitím laryngotopografie jako $145,2 \pm 54,9$ Hz pro muže a $236,3 \pm 23,2$ pro ženu ve věku okolo 30 let. Základní frekvence hlasu se s věkem mění, pro věkovou kategorii okolo 70 let u mužů stoupla na $138,6 \pm 24,4$ Hz a u žen klesla na $204,5 \pm 45,5$ Hz. Na základě těchto dat je možné říci, že první vlastní frekvence modelu spadá do intervalu pro základní frekvenci hlasu staré ženy, což odpovídá předloze.

Samotný model je postaven na 3D skenu hlasivky ženy ve věku 72 let ve fonačním postavení o frekvenci kmitání 304 Hz. Této frekvenci nejvíce odpovídá třetí vlastní frekvence modelu 308,55 Hz, třetí vlastní tvar kmitání modelu bude tedy reálnému tvaru kmitání naskenované hlasivky nejbližší.

První [Hz]	Druhá [Hz]	Třetí [Hz]	Čtvrtá [Hz]	Pátá [Hz]	Šestá [Hz]
241,49	289,22	308,52	338,42	350,41	376,96

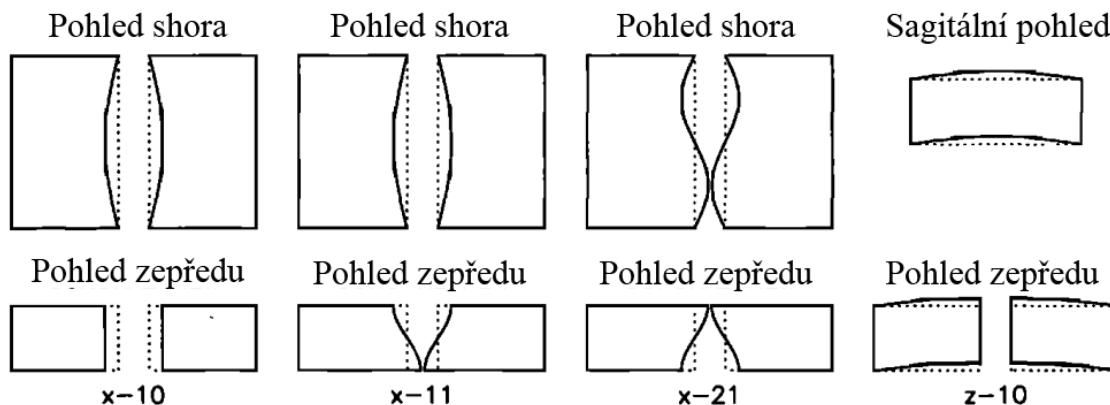
Tabulka 2 Vlastní frekvence hlasivek

5.2 Vlastní tvary

Pomocí vlastních tvarů lze popsat jen lineární systém, to však kmitání hlasivek není. V praxi lze ale aproximovat nelineární systémy jako lineární, pokud kmitají s malou amplitudou. Určitá část kmitání hlasivek tuto podmínku splňuje [28], a může být tedy popsána nekonečně velkým množstvím vlastních tvarů. Pro potřeby popisu běžné fonace by však mělo stačit malé množství nejnižších. Na základě tohoto předpokladu byly v [28] určeny teoretické vlastní tvary hlasivek (obrázek 23) jejichž kombinací lze kmitání reálných hlasivek popsat.

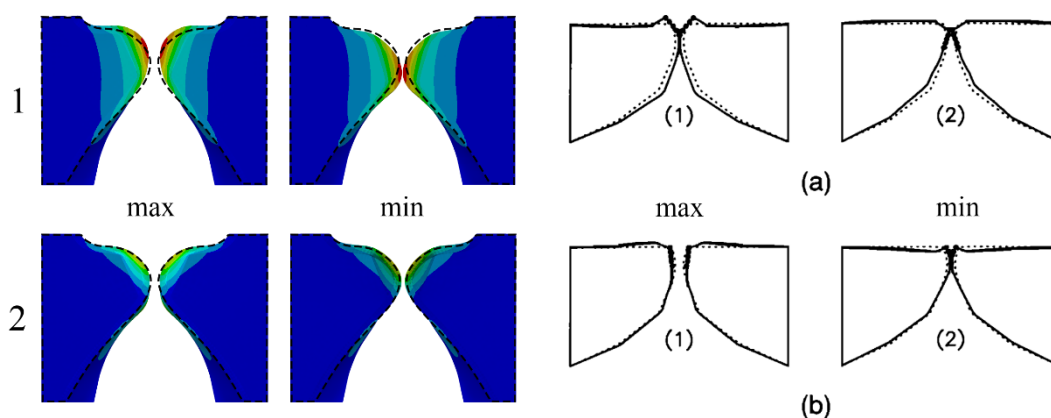
Modální analýzou bylo v této práci získáno prvních šest vlastních tvarů (obrázek 26), které byly následně s těmi teoretickými z [28] porovnány. Z tohoto porovnání vyplývá, že v prvním vlastním tvaru modelu může být pozorována kombinace teoretických vlastních tvarů x-11 a z-10, v druhém vlastním tvaru modelu lze nejvýrazněji pozorovat teoretický vlastní tvar x-21 a ve třetím vlastním tvaru modelu lze nejvýrazněji pozorovat teoretický vlastní tvar x-10 v kombinaci s z-10.

Jak již bylo řečeno, kmitání hlasivek je jako lineární pouze aproximováno, a ačkoliv se vlastní tvary získané modální analýzou tvarům reálného kmitání blíží, přesně jim neodpovídají. Tento problém je řešen zavedením empirických vlastních funkcí (Empiric eigenfunction, dále EEF), jež nejsou závislé na linearitě/nelinearitě systému. Na základě prvních několika EEF lze pak kmitání hlasivek poměrně přesně popsat, již první dvě popisují toto kmitání z 98 % [28]. I v EEF lze nalézt určitou podobnost s teoretickými vlastními tvary, přesněji kombinaci x-11 a z-10 v první EEF a x-10 v druhé EEF [28].

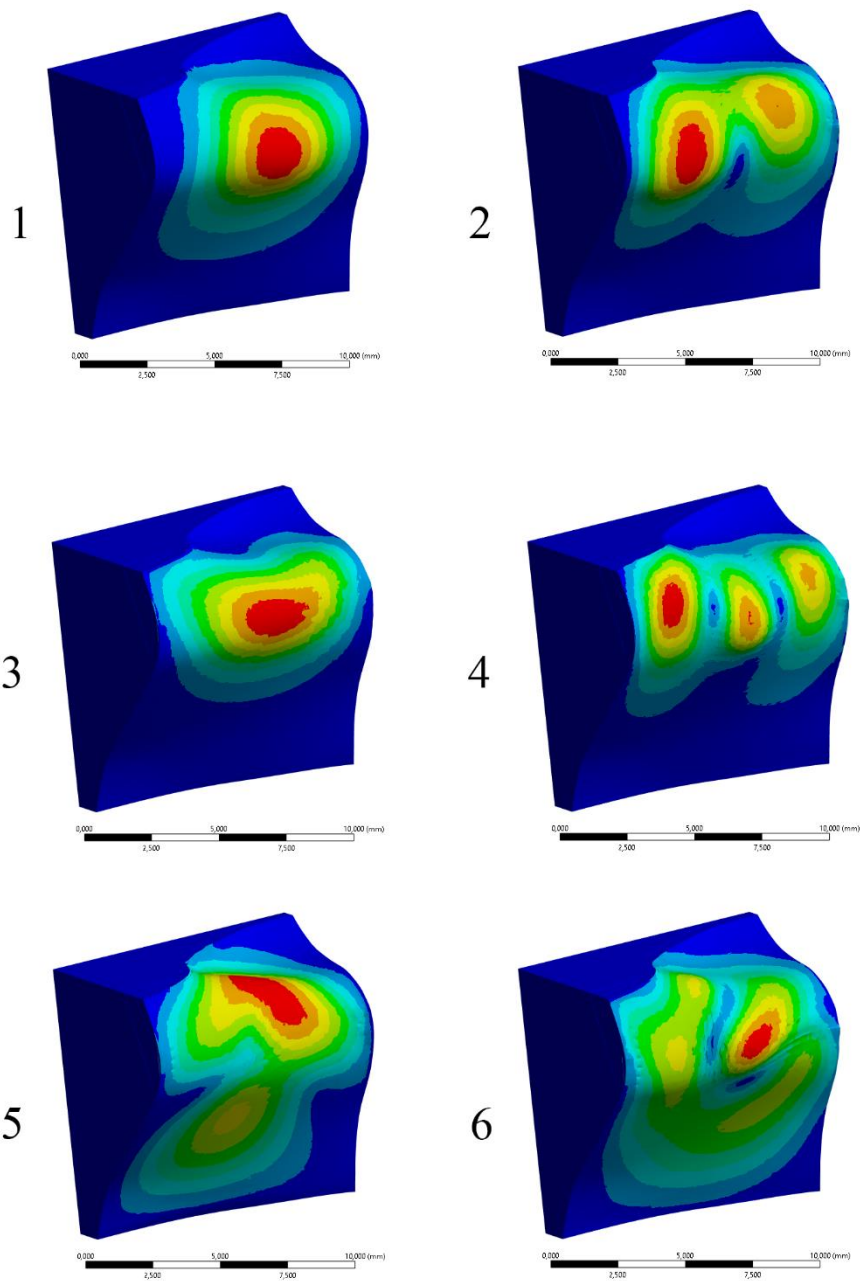


Obrázek 23 Teoretické vlastní tvary, upraveno a převzato z [28]

Pro porovnání empirických vlastních funkcí z [28] a vlastních tvarů byly vytvořeny střední řezy prvních dvou vlastních tvarů modelu, ty byly porovnány s prvními dvěma EEF. Z obrázku 24 je patrné, že mezi vlastními tvary modelu a EEF panuje určitá shoda, dalo by se říci, že první vlastní tvar první EEF dokonce odpovídá.



Obrázek 24 Porovnání vlastních tvarů 1 a 2 s EEF 1 a 2, upraveno a převzato z [28]



Obrázek 25 Vlastní tvary hlasivky

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvoření geometrického modelu hlasivek na základě 3D skenu sádrového odlitku dutiny hrtanu s hlasivkami ve fonačním postavení o frekvenci kmitání 304 Hz a následné provedení modální analýzy. Aby bylo možné model vytvořit, bylo nezbytné provést rešerši modelů využívaných k řešení této problematiky a také porozumět anatomii a fyziologii reálných hlasivek, ze kterých tyto modely vycházejí.

První kapitola této práce se věnuje typům modelů geometrie hlasivek. Ty jsou rozděleny na tři kategorie, modely se zjednodušenou geometrií, parametrické modely a modely využívající skutečné geometrie hlasivek

Druhá kapitola se věnuje anatomii hlasového ústrojí a jeho uložení, tedy anatomii hlasivek a hrtanu. Anatomický popis hrtanu je zaměřen na skelet, dutinu a svaly, u svalů je zdůrazněn jejich vliv na napětí hlasivek. Anatomie hlasivek je zaměřena na jejich jednotlivé vrstvy. Na anatomické poznatky navazuje fyziologie hlasivek a s ní spojené teorie tvorby hlasu. Práce stručně charakterizuje teorii zdroje a filtru a myoelasto-aerodynamickou teorie fonace.

Třetí kapitola se věnuje samotnému modelu hlasivek vytvořeném na základě skenu jejich reálné geometrie a řešení jeho modální analýzy. Popisuje tvorbu modelu od pořízení 3D skenu, přes jeho úpravy a výběr plošek hlasivek a tvorbu čtyřvrstvého objemového modelu na základě těchto plošek v programu Autodesk Inventor, až po tvorbu sítě konečných prvků v programu ANSYS a ustanovení okrajových podmínek uložení. V programu ANSYS je pak provedena i již zmíněná modální analýza.

Výsledkem modální analýzy je prvních šest vlastních frekvencí a vlastních tvarů modelu.

První vlastní frekvence hlasivky by měla odpovídat základní frekvenci lidského hlasu. Ta se určuje experimentálně například pomocí laryngotopografie nebo s využitím mikrofону a následného rozkladu lidského hlasu pomocí Fourierovy transformace. Hodnota základní frekvence hlasivek je závislá na biomechanických vlastnostech hlasivek, proto se u jednotlivců liší, dále se mění s věkem a kolísá i v průběhu fonace. Její perioda pak odpovídá periodě kmitu hlasivek. Studie [27] určila hodnotu základní frekvence hlasu muže ve věku okolo 30 let jako $119,1 \pm 17,0$ Hz a pro ženu obdobného věku $236,3 \pm 23,2$ Hz. Základní frekvence hlasu byla zároveň zkoumána i pro věkovou kategorii okolo 70 let a z výsledků vyplývá, že zatímco u žen základní frekvence hlasu klesla na $204,5 \pm 45,5$ Hz, u mužů stoupla na $138,6 \pm 24,4$ Hz

Po porovnání výsledné hodnoty první vlastní frekvence modelu 241,49 Hz s hodnotou základní frekvence hlasivek starší ženy je patrná shoda.

Hlasivky, z jejichž 3D skenu práce vychází patřily ženě ve věku 72 let a byly odlity ve fonačním postavení o frekvenci kmitání 304 Hz. Této frekvenci se nejvíce blíží třetí vlastní frekvence modelu 308,52 Hz, třetí vlastní tvar kmitání modelu tedy pravděpodobně odpovídá reálnému tvaru kmitání těchto hlasivek.

Vlastní tvary hlasivky byly porovnány s teoretickými vlastními tvary a empirickými vlastními funkcemi z literatury [28]. Na základě tohoto porovnání byla nalezena shoda.

Tato práce téma geometrických modelů na základě reálné geometrie hlasivek jen velmi povrchově otevírá. V další práci by bylo možné model dále zdokonalit například využitím transversálně izotropního modelu materiálu, který blíže odpovídá skutečnému materiálu hlasivek. Dalším možným vylepšením by mohla být úprava délky modelu, ta v této práci nebyla možná z důvodu omezení naskenovanou geometrií. A v neposlední řadě by bylo možné kromě struktury hlasivek zahrnout i její interakce s prouděním a vlněním vydechovaného vzduchu, tedy fluidně-strukturně-akustickou interakci.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] EWALD, J. Rich. Zur Konstruktion von Polsterpfeifen. *Pflüger's Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* [online]. 1913, **152**(4-6), 171-186 [cit. 2023-05-15]. ISSN 0031-6768. Dostupné z: doi:10.1007/BF01680977
- [2] TITZE, Ingo R. On the mechanics of vocal-fold vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 1976, **60**(6), 1366-1380 [cit. 2023-05-15]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.381230
- [3] DE OLIVEIRA ROSA, Marcelo, José Carlos PEREIRA, Marcos GRELLET a Abeer ALWAN. A contribution to simulating a three-dimensional larynx model using the finite element method. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2003, **114**(5) [cit. 2023-05-15]. ISSN 00014966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1619981
- [4] TITZE, Ingo R a David T TALKIN. A Theoretical Study of the Effects of Various Laryngeal Configurations on the Acoustics of Phonation. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. United States, 1979, **66**(1), 60-74 [cit. 2023-05-21]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.382973
- [5] HUNTER, Eric J., Ingo R. TITZE a Fariborz ALIPOUR. A three-dimensional model of vocal fold abduction/adduction. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2004, **115**(4), 1747-1759 [cit. 2023-05-25]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1652033
- [6] SCHERER, Ronald C, Daoud SHINWARI, Kenneth J DE WITT, Chao ZHANG, Bogdan R KUCINSCHI a Abdollah A AFJEH. Intraglottal Pressure Profiles for a Symmetric and Oblique Glottis with a Divergence Angle of 10 Degrees. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. United States, 2001, **109**(4), 1616-1630 [cit. 2023-05-21]. ISSN 1520-8524. Dostupné z: doi:10.1121/1.1333420
- [7] XUE, Q, X ZHENG, S BIELAMOWICZ a R MITTAL. Sensitivity of vocal fold vibratory modes to their three-layer structure: Implications for computational modeling of phonation. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. MELVILLE: Acoustical Society of America, 2011, **130**(2), 965-976 [cit. 2023-05-24]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.3605529

- [8] ŠIDLOF, Petr, Jan G. ŠVEC, Jaromír HORÁČEK, Jan VESELÝ, Ivo KLEPÁČEK a Radan HAVLÍK. Geometry of human vocal folds and glottal channel for mathematical and biomechanical modeling of voice production. *Journal of Biomechanics* [online]. 2008, **41**(5), 985-995 [cit. 2023-05-21]. ISSN 00219290. Dostupné z: doi:10.1016/j.jbiomech.2007.12.016
- [9] XUE, Qian, Xudong ZHENG, Rajat MITTAL a Steven BIELAMOWICZ. Computational Study of Effects of Tension Imbalance on Phonation in a Three-Dimensional Tubular Larynx Model. *Journal of Voice* [online]. 2014, **28**(4), 411-419 [cit. 2023-05-24]. ISSN 08921997. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvoice.2013.12.016
- [10] XUE, Qian, Xudong ZHENG, Rajat MITTAL a Steven BIELAMOWICZ. Subject-specific computational modeling of human phonation. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. MELVILLE: Acoustical Soc Amer Amer Inst Physics, 2014, **135**(3), 1445-1456 [cit. 2023-05-24]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.4864479
- [11] WANG, Xiaojian, Weili JIANG, Xudong ZHENG a Qian XUE. A computational study of the effects of vocal fold stiffness parameters on voice production. *Journal of Voice*. 2021, **35**(2), 327.e1-327.e11. ISSN 0892-1997. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2019.09.004
- [12] KRČMOVÁ, Marie. *Fonetika a fonologie* [online]. 3. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2009. Elportál. [cit. 2023-05-15]. ISSN 1802-128X. Dostupné z: <http://is.muni.cz/elportal/?id=852835>
- [13] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie*. 2., upr. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2004. ISBN 80-247-0143-X.
- [14] ROHEN, Johannes W., Chihiro YOKOCHI a Elke LÜTJEN-DRECOLL. *Anatomie člověka: fotografický atlas systematické a topografické anatomie : 6. vydání*. [Praha]: Triton, c2008. ISBN 978-80-7387-131-4.
- [15] HIRANO, M. Phonosurgery: basic and clinical investigations. *Otologia (Fukuoka)*. (21(suppl.1), 239-442.
- [16] ŠVEC, Jan G. *Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu*. B.m.: Univerzita Palackého v Olomouci, 1996.

- [17 TITZE, Ingo R. a Fariborz ALIPOUR. *The myoelastic aerodynamic theory of phonation*. Iowa: National center for voice and speech, 2006. ISBN 08-741-4156-7.
- [18 FANT, Gunnar. *Acoustic Theory of Speech Production*. Mouton. the Netherlands, 1960.
- [19 VAN DEN BERG, Janwillem. Myoelastic-Aerodynamic Theory of Voice Production. *Journal of Speech and Hearing Research* [online]. 1958, **1**(3), 227-244 [cit. 2023-05-21]. ISSN 0022-4685. Dostupné z: doi:10.1044/jshr.0103.227
- [20 ŠVEC, Jan G., Harm K. SCHUTTE, C. Julian CHEN a Ingo R. TITZE. Integrative Insights into the Myoelastic-Aerodynamic Theory and Acoustics of Phonation. Scientific Tribute to Donald G. Miller. *Journal of voice* [online]. United States: Elsevier, 2023, **37**(3), 305-313 [cit. 2023-05-21]. ISSN 0892-1997. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023
- [21 GARRETT, C. Gaelyn, John R. COLEMAN a Lou REINISCH. Comparative Histology and Vibration of the Vocal Folds: Implications for Experimental Studies in Microlaryngeal Surgery. *The Laryngoscope* [online]. 2000, **110**(5), 814-824 [cit. 2023-05-15]. ISSN 0023-852X. Dostupné z: doi:10.1097/00005537-200005000-00011
- [22 ŠÍBL, Michal. *Využití metody konečných prvků pro modelování pohybu a napjatosti hlasivek při nastavování do fonačního postavení* [online]. Brno, 2014 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32830>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Pavel Švancara.
- [23 ALIPOUR, Fariborz a Sarah VIGMOSTAD. Measurement of Vocal Folds Elastic Properties for Continuum Modeling. *Journal of voice* [online]. NEW YORK: Mosby, 2012, **26**(6), 816.e21-816.e29 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0892-1997. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvoice.2012.04.010
- [24 HÁJEK, Petr. *Výpočtové modelování samobuzeného kmitání lidských hlasivek* [online]. Brno, 2021 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113764>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Pavel Švancara.

- [25 PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. Brno: Vysoké učení
] technické v Brně Fakulta strojního inženýrství Ústav mechaniky těles, mechatroniky a
biomechaniky, N.P. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z:
<http://www.umt.fme.vutbr.cz/images/opory/MKP%20v%20inzenyrskych%20vypoctech/RIV.pdf>
- [26 MATUG, M. *Analýza formantů českých samohlásek generovaných nahlas a šeptem*
] [online]. Brno, 2008 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/13389>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Vojtěch Mišun, CSc.
- [27 YAMAUCHI, Akihito, Hiroshi IMAGAWA, Ken-ichi SAKAKIBARA, Hisayuki
] YOKONISHI, Takaharu NITO, Tatsuya YAMASOBA a Niro TAYAMA. Phase
Difference of Vocally Healthy Subjects in High-Speed Digital Imaging Analyzed With
Laryngotopography. *Journal of voice* [online]. NEW YORK: Mosby, 2013, **27**(1), 39-
45 [cit. 2023-05-25]. ISSN 0892-1997. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvoice.2012.08.002
- [28 BERRY, David A, Hanspeter HERZEL, Ingo R TITZE a Katharina KRISCHER.
] Interpretation of Biomechanical Simulations of Normal and Chaotic Vocal Fold
Oscillations with Empirical Eigenfunctions. *The Journal of the Acoustical Society of
America* [online]. United States, 1994, **95**(6), 3595-3604 [cit. 2023-05-25]. ISSN 1520-
8524. Dostupné z: doi:10.1121/1.409875