



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 ŠÍŘENÍ HLASU KOLEM LIDSKÉHO TĚLA

ANALYSIS OF A VOICE PROPAGATION AROUND THE HUMAN BODY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Zelinka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hájek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

| | |
|--------------------------|--|
| Ústav: | Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky |
| Student: | Bc. Martin Zelinka |
| Studijní program: | Inženýrská mechanika a biomechanika |
| Studijní obor: | Biomechanika |
| Vedoucí práce: | Ing. Petr Hájek, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2022/2023 |

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:

Charakteristika problematiky úkolu:

Aktuální metodika k měření lidského hlasu před hlavou pacienta nezohledňuje vliv tvaru lidského těla na odrazy některých frekvencí. Geometrie lidského těla se dá rekonstruovat z fotografií například metodou fotogrammetrie. Vytvořená geometrie se může použít k analýze šíření hlasu kolem tohoto těla.

Cíle bakalářské práce:

- Proveďte rešerši o výzkumu šíření lidského hlasu
- Vytvořte geometrický model lidského těla
- Analyzujte šíření hlasu kolem lidského těla pomocí výpočtového modelování

Základní literární prameny:

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.

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

SCHICKHOFER, Lukas, Jarmo MALINEN a Mihai MIHAESCU, 2019. Compressible flow simulations of voiced speech using rigid vocal tract geometries acquired by MRI. The Journal of the Acoustical Society of America [online]. 145(4), 2049–2061. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.5095250

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt:

Hlavním cílem této diplomové práce je tvorba vhodného realistického 3D modelu lidského těla pomocí fotogrammetrie a následným provedením harmonické akustické analýzy za účelem zjištění odrazových ploch na lidském těle a hodnot akustického tlaku s jeho hladinou při tvorbě lidského hlasu. Výsledek této práce je podpořen rešerší anatomie a fyziologie vokálního traktu včetně modelů popisujících šíření lidského hlasu ve vokálním traktu a v neposlední řadě porovnáním získaných výsledků s dosavadními pracemi.

Klíčová slova:

Vokální trakt, Fotogrammetrie, 3D model lidského těla, Frekvence, Akustický tlak, Hladina akustického tlaku, Odrazy od lidského těla

Abstract:

The main objective of this thesis is to create a suitable realistic 3D model of the human body using photogrammetry and then to perform harmonic acoustic analysis in order to determine the reflection surfaces on the human body and the values of acoustic pressure with its level in the production of the human voice. The result of this work is supported by a search of anatomy and physiology of the vocal tract including models describing the propagation of the human voice in the vocal tract and, last but not least, by comparing the obtained results with previous works.

Keywords:

Vocal tract, Photogrammetry, 3D model of the human body, Frequency, Acoustic pressure, Sound pressure level, Reflections from the human body

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace tištěné práce:

ZELINKA, Martin. Analýza šíření hlasu kolem lidského těla. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148014>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Hájek.

Citace elektronického zdroje:

ZELINKA, Martin. Analýza šíření hlasu kolem lidského těla [online]. Brno, 2023 [cit. 2022-10-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148014>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Hájek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Hájka Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

Bc. Martin Zelinka

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval panu Ing. Petru Hájkovi, Ph.D. za vedení této práce, jeho cenné rady, motivaci, čas, trpělivost a konstruktivní kritiku při jejím vypracování. Dále bych zde rád poděkoval panu MgA. Jiřímu Balátovi, který jako oficiální fotograf Zlínského kraje byl ochoten vypomoci s pořízením kvalitních fotografií, které figurovaly jako vstupní data pro tuto práci. Rovněž chci poděkovat i panu doc. RNDr. Janu G. Švecovi, Ph.D. et Ph.D. za jeho čas a ochotu při pořizování snímků. V neposlední řadě bych rád poděkoval hlavně rodině a všem svým kamarádům, kteří za mnou stáli a byli ochotni pomoci kdykoliv to bylo potřeba.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| PODĚKOVÁNÍ | 11 |
| OBSAH..... | 13 |
| ÚVOD | 15 |
| 1. ANATOMIE A FYZIOLOGIE LIDSKÉHO HLASOVÉHO ÚSTROJÍ..... | 17 |
| 1.1 ANATOMIE RESPIRAČNÍ ČÁSTI..... | 18 |
| 1.1.1 <i>Plíce a plicní sklípky</i> | 18 |
| 1.1.2 <i>Průduškový strom</i> | 18 |
| 1.2 ANATOMIE FONAČNÍ ČÁSTI | 19 |
| 1.2.1 <i>Anatomie hrtanu</i> | 19 |
| 1.2.2 <i>Hlasivky</i> | 21 |
| 1.3 ANATOMIE REZONANČNÍCH DUTIN A ARTIKULAČNÍCH PRVKŮ | 22 |
| 1.3.1 <i>Rezonanční dutiny</i> | 23 |
| 1.3.2 <i>Artikulační prvky</i> | 24 |
| 1.4 FYZIOLOGIE HLASOVÉHO ÚSTROJÍ | 24 |
| 2. VZNIK HLASU..... | 27 |
| 2.1 MYOELASTO-AERODYNAMICKÁ TEORIE (MEAD)..... | 27 |
| 2.2 TEORIE ZDROJE A FILTRU | 27 |
| 2.3 ZVUK GENEROVANÝ HLASIVKAMI..... | 27 |
| 2.4 FORMOVÁNÍ ZVUKU GENEROVANÉHO HLASIVKAMI | 28 |
| 2.5 CHARAKTERISTIKY HLASU A FORMANTY | 28 |
| 3. GEOMETRICKÉ A VÝPOČTOVÉ MODELY VOKÁLNÍHO TRAKTU..... | 31 |
| 3.1 PŘEHLED MODELŮ VOKÁLNÍCH TRAKTŮ | 31 |
| 3.1.1 <i>Modely buzení hlasivek</i> | 32 |
| 3.1.2 <i>Modely vokálního traktu</i> | 33 |
| 4. TVORBA GEOMETRIE 3D MODELU TĚLA | 37 |
| 4.1 MRI MODEL LIDSKÉ HLAVY A KRKU..... | 37 |
| 4.2 FOTOGRAMMETRIE, POPIS A PRINCIP | 37 |
| 4.3 APLIKACE FOTOGRAMMETRIE PRO KRÁTKOU VZDÁLENOST | 38 |
| 4.4 ZPRACOVÁNÍ A ÚPRAVA KOMPLETNÍHO MODELU | 41 |
| 4.4.1 <i>Úprava modelu lidského těla bez hlavy</i> | 42 |
| 4.4.2 <i>Spojení modelu hlavy a těla v jeden model</i> | 44 |
| 4.5 TVORBA PLOCH A MODELU JAKO OBJEMOVÉHO TĚLESA..... | 45 |
| 5. HARMONICKÁ AKUSTICKÁ ANALÝZA | 47 |
| 5.1 PŘÍPRAVA GEOMETRIE MODELU A OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ | 47 |
| 5.2 PŘÍPRAVA ANALÝZY A TVORBA SÍTĚ | 48 |
| 5.2.1 <i>Model Materiálu</i> | 48 |
| 5.2.2 <i>Tvorba sítě</i> | 48 |
| 5.2.3 <i>Nastavení výpočtu a okrajové podmínky</i> | 49 |
| 6. INTERPRETACE VÝSLEDKŮ ANALÝZY | 51 |
| 6.1 VÝHODNOCENÍ VE VÝCHOZÍM BODĚ VE STŘEDU ÚST | 52 |
| 6.2 FREKVENČNÍ ZÁVISLOST NENULOVÝCH BODŮ | 53 |
| 6.3 SMĚROVOST ŠÍŘENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU..... | 59 |
| 6.4 AKUSTICKÉ VELIČINY VE VOKÁLNÍM TRAKTU A NA TĚLE | 61 |
| 6.5 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S LITERATUROU | 65 |
| 7. ZÁVĚR..... | 67 |

| | |
|--|----|
| SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ | 69 |
| SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ..... | 75 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 77 |
| SEZNAM TABULEK | 78 |
| PŘÍLOHA 1 – FOTOGRAFIE Z PRŮBĚHU FOCENÍ OBJEKTU..... | 79 |
| PŘÍLOHA 2 – PRŮBĚH ZÁVISLOSTI SPL NA FREKVENCI..... | 85 |

Úvod

Lidský hlas je zvuk, jenž používáme k verbální komunikaci, společně pak s neverbální komunikací vytváří způsob dorozumívání se mezi lidmi. U většiny lidí se jedná o majoritní způsob komunikace. Již v minulosti začali vědci řešit otázky ohledně jeho vzniku či vyvíjeli snahu u jedinců s chronickým onemocněním o léčbu nebo celkové nahrazení částí lidského hlasového ústrojí přístroji nebo implantáty.

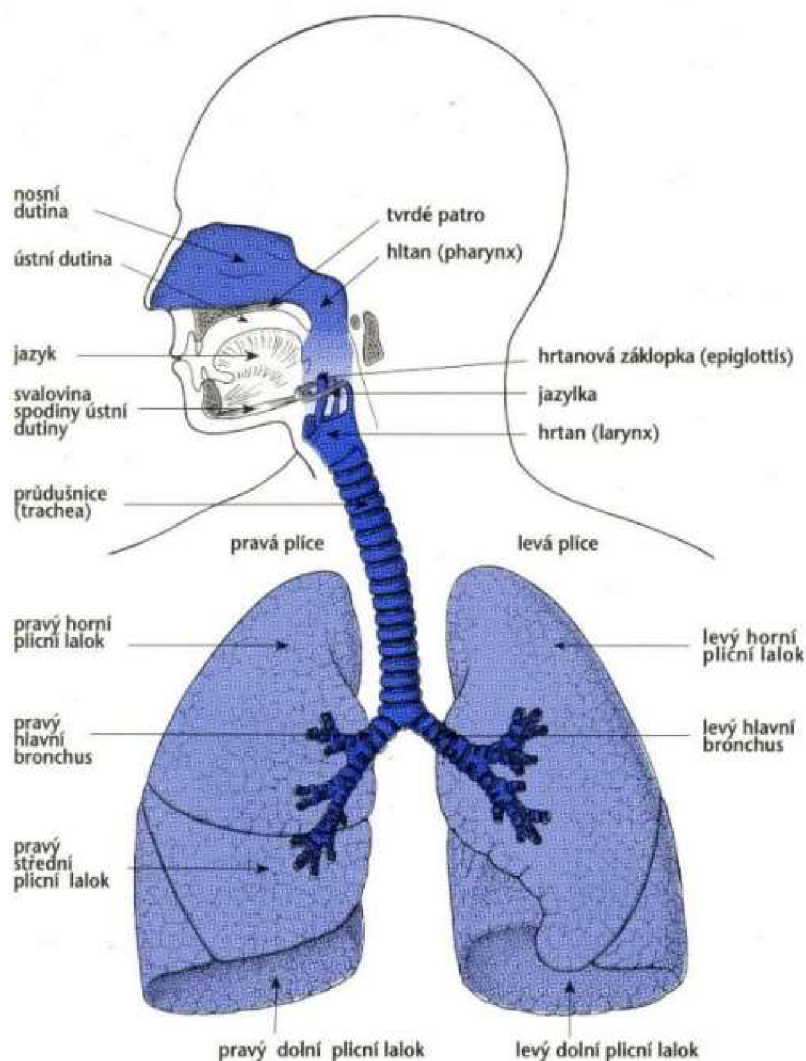
Proto, aby bylo možné provádět výzkum v odvětvích kolem vzniku hlasu, a umožnit tak léčbu nebo tvorbu implantátů, je potřeba znát podrobnou anatomii a fyziologii všech částí a orgánů těla, které mají na lidský hlas a jeho vznik vliv.

Začaly tak tedy vznikat různé testy a výzkumy materiálových vlastností jednotlivých orgánů či jednoduché modely simulující vznik a šíření hlasu. Většina těchto modelů se spíše věnovala samotným hlasivkám či šíření hlasu ve vokálním traktu. Ovšem v nedávné době se stalo bodem zájmu i šíření lidského hlasu v okolí celého lidského těla.

V této práci jsme se snažili vytvořit souhrn znalostí o anatomii a fyziologii celého hlasového ústrojí. Rovněž jsme provedli souhrn historických nebo aktuálních modelů věnujících se jak vzniku hlasu, včetně teorií, tak i jeho šíření. Posléze se tato práce zabývá tvorbou modelu s realistickou geometrií pomocí fotogrammetrie, kde jsme podrobně popsali vznik geometrie a potřebné úpravy, což vedlo k harmonické akustické analýze řešené za pomoci metody konečných prvků. Poslední částí této práce se pak stala kapitola, v níž jsme popsali dosažené výsledky a rovněž i porovnání s literaturou.

1. Anatomie a fyziologie lidského hlasového ústrojí

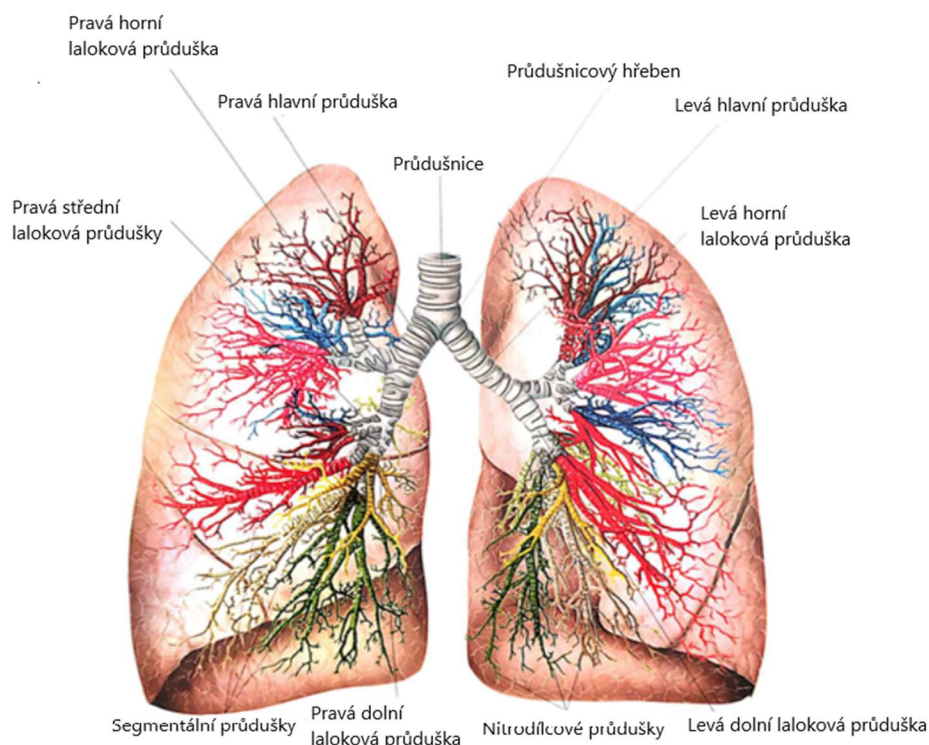
Hlas vzniká komplexní součinností hlasového ústrojí, viz (**Obr. 1**), které se v této kapitole bude dělit do dvou hlavních podkapitol, z nichž jedna bude popisovat anatomii a druhá fyziologii lidského hlasového ústrojí. Anatomická část je zaměřena na stavbu jednotlivých orgánů, zatímco fyziologická je zaměřena na vznik hlasu a jeho formování a na funkci jednotlivých orgánů [1].



Obr. 1 Anatomie hlasového ústrojí [72]

1.1 Anatomie respirační části

Majoritní část hlasového ústrojí je tvořena respirační část [2]. Ta se skládá z plic průdušek a průdušnic, viz **Obr. 2** [2]. Dále do respirační části nepřímo řadíme také svaly ovlivňující proces dýchání [2]. Jedná se o svaly mezi žeberní a bránici [2].



Obr. 2 Průduškový strom s plicemi [2]

1.1.1 Plíce a plicní sklípky

Plíce rozdělujeme na pravou a levou s následným dělením na tři a dva plicní laloky. Plíce jsou orgány, uložené v pleurální dutině, tvořené obklopující blánou (poplicnicí) a milióny tenkostěnných váčků opředených kapilárami [3]. Nejdůležitější je z našeho pohledu bránice, což je plochý sval ve tvaru vyduté klenby se šlašitým středem tvořeným třemi párovými svaly vedoucími od žeber, bederních obratlů a výběžku hrudní kosti [2].

1.1.2 Průduškový strom

V respirační části plic jsou průdušinky, které propojují plicní sklípky s hlavními průduškami ústící v průdušnici [4]. Dohromady pak vytváří průduškový strom [4].

Průdušinky

Jsou nejmenší části průduškového stromu jejichž maximální průměr nepřesahuje hodnotu 1 mm, jejich struktura se skládá z elastické tkáně a hladké svaloviny, to jim

umožňuje měnit svou strukturu a tvar při rozdílných fázích dýchacího cyklu [4]. Průdušinky se rozvětvují do generací průdušinek směrem od hlavních průdušek k plicním sklípkům [4].

Hlavní průdušky

Jsou dvě trubice, levá a pravá, tvořené největší generací průdušinek ústící v průdušnici [4]. Stěna trubic je tvořena hladkou svalovinou z elastických vláken společně s hyalinními chrupavkami, díky čemuž mohou průdušky rozšiřovat či zužovat svůj průřez [4].

Průdušnice

Je válcová trubice dlouhá zhruba 100 až 160 mm s průměrem cca 25 mm vedoucí do hrtanu [4]. Struktura je primárně tvořena neúplnými chrupavčitými kroužky ve tvaru C složením převážně z kolagenu [2, 5]. Otevřená část kroužků umožňuje změnu průřezu průdušnice [2, 5].

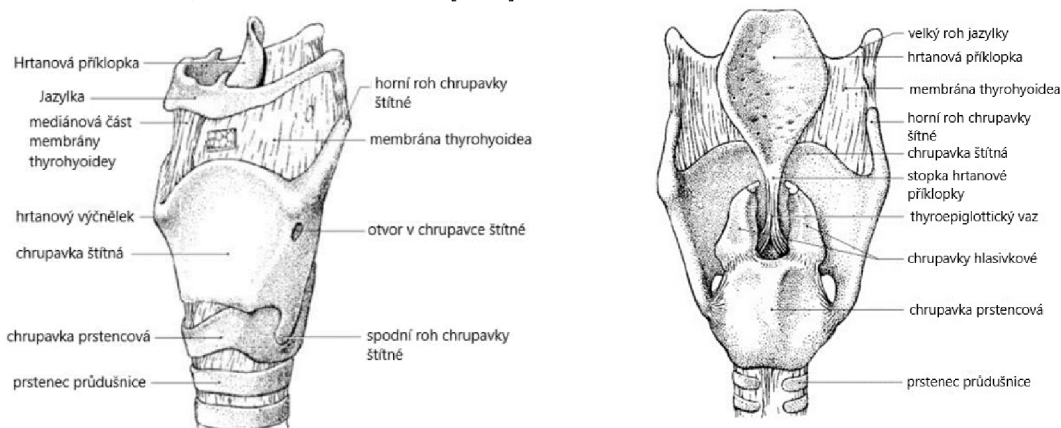
1.2 Anatomie fonační části

Tato část hlasového ústrojí je tvořena hrtanem, hlasivkami a prostorem mezi nimi zvaným glottis. Je to soustava svalů, chrupavek a kostí, které svou součinností řídí zvuk generovaný hlasivkami.

1.2.1 Anatomie hrtanu

Kosterní struktura hrtanu

Kostra hrtanu je tvořena třemi nepárovými a čtyřmi párovými chrupavkami společně s jedinou kostí, jazykou, viz **Obr. 3** [6, 7]. Hrtan přímo navazuje na průdušnici spojením průdušnice a chrupavky prstencové, na které je usazená chrupavka štítná [6, 7]. Ke chrupavce štítné je pomocí vazivové tkáně upevněná jazyka, která tvoří oporu pro Odalší komponenty hrtanové kostry [6, 7].



Obr. 3 Kosterní struktura hrtanu [6]

Thyroid cartilage (chrupavka štítná) je největší chrupavka v hrtanu [6, 7]. V transverzální rovině vypadá jako nedokončený trojúhelník s dvěma stranami tvořenými tenkými deskami ve tvaru pětiúhelníků spojujících se do tvaru písmene V [6, 7]. Její přední část vytváří výrazný výběžek, známý též jako Adamovo jablko, viditelný zejména u mužské části populace [6, 7]. Na opačných stranách se nachází chrupavkovité výběžky ve spodní části vedoucí k chrupavce prstencové, v části horní směřující k jazylce [6, 7].

Cricoid cartilage (prstencová chrupavka) je nepárová chrupavka, která jako jediná v hrtanu zcela obepíná dýchací cesty [6, 7]. Tvar chrupavky připomíná prsten s úzkou přední částí (5 mm) a vysokou zadní částí (20 mm) [6, 7]. Spodní okraj chrupavky má tvar horizontálního prstence na němž se nachází místo úchyty vazů mezi chrupavkou a tracheou [6, 7]. Horní okraj chrupavky má obloukovitý tvar vedoucí od úzké přední části k vysoké zadní části uložené pod štítnou chrupavkou, ke které je připojena vazem [6, 7].

Arytenoid cartilages (hlasivkové chrupavky) jsou párové chrupavky, tvarem připomínající trojboký jehlan [6, 7]. Jejich základny jsou spojeny s horní částí chrupavky prstencové, zatímco výběžek míří vzhůru [6, 7]. Nejdůležitější částí chrupavky je plocha, ke které se upínají hlasivkové svaly utvářející hlasivkovou šterbinu glottis [6, 7].

Epiglottis cartilage (příklopka). Chrupavka tvarem podobná listu [2]. Její horní okraj se nachází za kořenem jazyka a funguje jako přechod oddělující trávicí trakt a respirační soustavu [6, 7].

Os hyoideum (jazylka)) je jediná pružná kost hrtanu ve tvaru písmene U. Leží v přední části krku mezi dolní čelistí a chrupavkou štítnou [6, 7]. Je to kost složená z velkých i malých výběžků a tvoří místo pro úpon svalů a vazů [2].

Svalstvo hrtanu

Kromě chrupavek a jazylky se v hrtanu nachází spousta vazů a svalů, viz **Obr. 4**, které buď tvoří jeho strukturu, nebo susedí a napomáhají správnému pohybu hrtanových chrupavek a jazylky, čímž umožňují vznik hlasu [8]. Svaly v hrtanu lze rozdělit do dvou skupin, do vnější a vnitřní. Vnější svaly slouží k pohybu jazylky, vnitřní svaly slouží k ovládnutí hlasivek a ke vzniku hlasu [8].



Obr. 4 Svalstvo hrtanu [8]

Musculus cricothyroideus je párový sval uchycený k prstencové chrupavce vedoucí do dolního okraje chrupavky štítné [8]. Jedná se o prodlužovače hlasivek, které táhnou chrupavku štítnou dopředu a dolů, čímž napínají a prodlužují hlasivky [7]. To vede k rychlejšímu kmitání a zvyšování výšky tónu [7].

Musculus thyroarytenoideus jedná se párový sval tvořící tělo hlasivek napínající se mezi přední a postranní plochou chrupavky hlasivkové a chrupavky štítné [7, 8]. Ke zkracování hlasivek dochází přitahením zadního konce od hlasivkové chrupavky směrem ke chrupavce štítné, [7, 9]. Také pomáhají při uzavírání glottis [7].

Musculus cricoarytenoideus posterior je párový sval, u něhož jeden z úponů je uchycen k posteriorní ploše chrupavky prstencové a druhý k výběžku chrupavky hlasivkové [8]. Provádí addukci neboli přitáhnutí zadních konců hlasivkových chrupavek čili rozevření hlasivkové štěrby [7, 9].

Musculus cricoarytenoideus lateralis je párový sval vedoucí od oblouku prstencové chrupavky k výběžku hlasivkové chrupavky [8]. Jeho funkcí je působit jako abduktor, což znamená že uzavírá glottis tím, že k sobě přitahuje hlasivky [7, 9].

Musculus arytenoideus je párový sval, který se nachází na hřbetní ploše hlasivkových chrupavek, jeho funkcí je dovírání glottis [10].

1.2.2 Hlasivky

Hlasivky neboli hlasivkové valy, jsou nejdůležitějším párovým orgánem pro tvorbu hlasu v lidském těle. Nachází se v dutině hrtanu, která má tvar přesýpacích hodin a rozděluje se do tří částí [11]. První část ve směru proudění vzduchu se nazývá subglotická a připomíná tvar zužujícího se trychtýře [11].

Následně vzduch proudí do druhé části, kterou je malý prostor, glottis, nacházející se mezi hlasivkami. Posléze se vzduch dostane do supraglotické části tvaru

rozšiřujícího se trychtýře. [11]. Tvar hlasivek si můžeme představit jako dva klíny se zaoblenou hranou směřující k druhému klínu [11].

Struktura hlasivek je vykreslena na **Obr. 5**. Hlasivky jsou na obrázku strukturovány do pěti vrstev, které mají rozdílné materiálové i geometrické parametry a společně tvoří hlasivky.

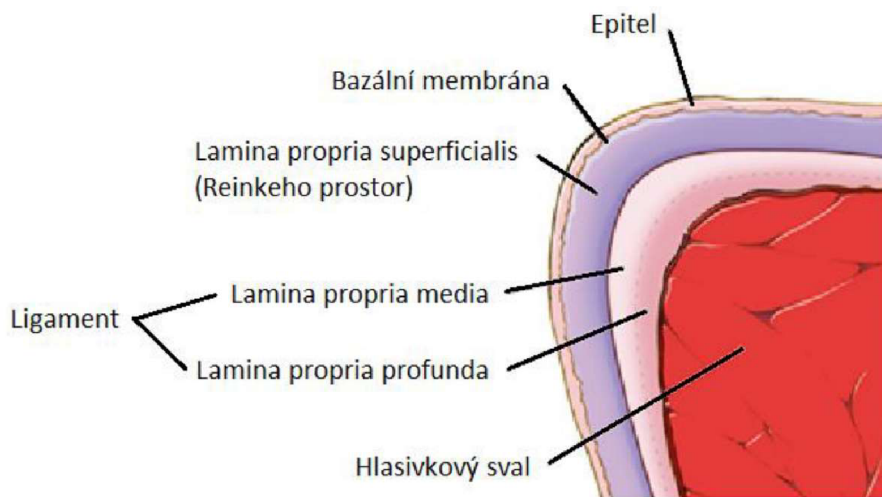
Nejhlubší vrstva je tvořena hlasivkovým svaelem o tloušťce přibližně 7–8 mm, což utváří hlavní část hlasivek [12]. Na povrchu hlasivkového svalu se nachází ligament rozdělený do dvou podvrstev.

Hlubší vrstva (Lamina propria profunda) je tvořena převážně kolagenními vlákny, která jsou orientována a vytváří tak velmi tuhou hloubkovou vrstvu [12].

Vrstva bližší povrchu (Lamina propria media) má rovněž orientována vlákna, avšak nachází se zde jen malé množství kolagenních vláken, to způsobuje, že tuhost vrstvy je podstatně nižší [12]. Následná část hlasivek se nazývá Reinkeho prostor s tloušťkou zhruba 0,3 mm [12].

Reinkeho prostor je tvořen měkkou tkání s mechanickými vlastnostmi velmi blízkými tekutině [12]. Spojením s dvěma předchozími vrstvami vytváří oblast s názvem lamina propria [12].

Poslední vrstvou obalující celou hlasivku je šupinkový epitel o tloušťce 0,05–0,1 mm, který společně s Reinkeho prostorem lze popisovat jako povrchovou vrstvu [12].



Obr. 5 Anatomická struktura hlasivek [73]

1.3 Anatomie rezonančních dutin a artikulačních prvků

Tato část anatomie není tak důležitá z hlediska vzniku hlasu jako z hlediska jeho úpravy do finální formy. Ta se děje v rezonančních dutinách a na artikulačních prvcích, kde dochází k transformaci zvuku nad hlasivkami do formy nám známé jako hlas. Všechny rezonanční dutiny a artikulační prvky se nachází v supraglottickém traktu [13]. Rezonančními dutinami rozumíme supraglottické dutiny jako hltan a dutinu ústní,

nosní a lebeční [13]. Do artikulačních prvků řadíme zuby, jazyk, rty a tvářové svaly [13].

1.3.1 Rezonanční dutiny

Hltan

První rezonanční dutinou, ve které se formuluje hlas je hltan. Tvar dutiny (u každého jedince rozdílný) je daný otevřenou příklopkou tvořící s kořenem jazyka přední stěnu vyznačující se velkou pohyblivostí [13]. Zadní stěna je stejně jako boční stěny tvořena měkkou svalovou tkání pokrytou sliznicí [13]. Na zadní stěně pak dutinu ohraničuje Passavantův svalový val uzavírající či otevírající přechod do nosní dutiny [13].

Hltan dělíme do tří částí, první část nacházející se mezi hrtanovou příklopkou a oblastí za jazykem se nazývá laryngopharynx [13]. Druhou částí je zadní oblast ústní dutiny neboli oropharynx, a poslední část se nachází v zadní oblasti nosní dutiny tzv. nosohltan nebo rhinopharynx [13]. První dvě části (laryngopharynx a oropharynx) jsou nejdůležitějšími dutinami, známé jako Purkyňův prostor [13].

Celkový objem hltanu je proměnlivý, závisí na sevření krčních a hrdelních svalů, což může být způsobeno nemocí, psychickým stavem apod [14]. Na objem má vliv i jeden z artikulačních prvků, konkrétně mandle, které mohou svůj objem v důsledku nemoci měnit, a tím i měnit objem hltanu [14].

Dutina ústní

Dutina ústní (orální) je navazující dutinou na hltan. Je to dutina, která se nachází v přední části lebky. Její tvar je dán pozicí rtů vpředu, až po fauciální pilíře oddělující dutinu ústní od hltanu, z boku je dutina ohraničena lícními svaly [14, 15]. Dutinu, lze rozdělit na přední ústní předsíň a dutinu ústní, jejichž předěl je dán pozicí zubů [16].

Dutina nosní

Dutina nosní je párová dutina nacházející se uvnitř nosu, zepředu ohraničená nosní dírkou (pro každou jedna) a zezadu Passavantovým svalovým valem, jenž dutinu otevírá či uzavírá v závislosti na jeho pohybu [17]. Tvar dutiny a jejich stěny jsou tvořeny celkem dvanácti lebečními kostmi, z nichž nejdůležitější je kost etmoidální [17].

Menší dutiny obličejových kostí

Jedná se uskupení několika dutin, které se nachází v obličejových kostech a vedou do nosní dutiny, známe jako vedlejší dutiny nosní [17]. Tyto dutiny společně s dutinou nosní se používají při tvorbě nazální souhlásek (n, ň...), při tvorbě jiných souhlásek mají nepatrný nebo nulový vliv [17].

1.3.2 Artikulační prvky

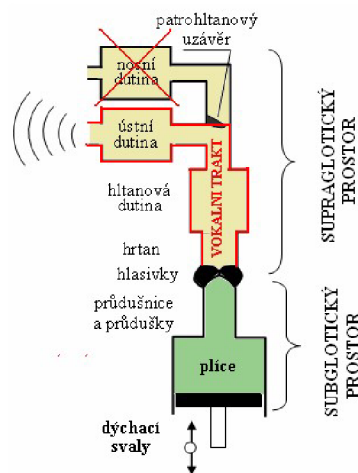
Hlavními artikulačními prvky jsou jazyk, horní a dolní ret, zuby horní čelisti, tvrdé a měkké patro, Passavantův valový sval a stěna hltanu. Kromě zubů jsou všechny artikulační prvky tvořeny měkkou svalovou tkání a primární vliv na úpravu hlasu má jejich tvar a postavení.

Jazyk

Převážně svalový orgán tvořený celkem osmi svaly (čtyři vnitřní a čtyři vnější) [16]. Kromě svalů je jazyk tvořen také sliznicí pokrytou jazykovými papilami fungující jako smyslové receptory chuti [16]. Vnitřní svaly ovládají pohyby jazyka, tyto pohyby jsou důležité pro úpravu hlasu, naopak svaly vnější (mimo jazyk) se k němu připojují pouze v určitých částech a fungují jako podpora při složitějších procesech (pohyb jazyku z pusu a dovnitř) [16].

1.4 Fyziologie hlasového ústrojí

Hlas chápeme jako zvuk, určený převážně ke komunikaci. Ten vzniká součinností celého lidského hlasového ústrojí od plic až po rezonanční dutiny a artikulační prvky, viz **Obr. 6**.

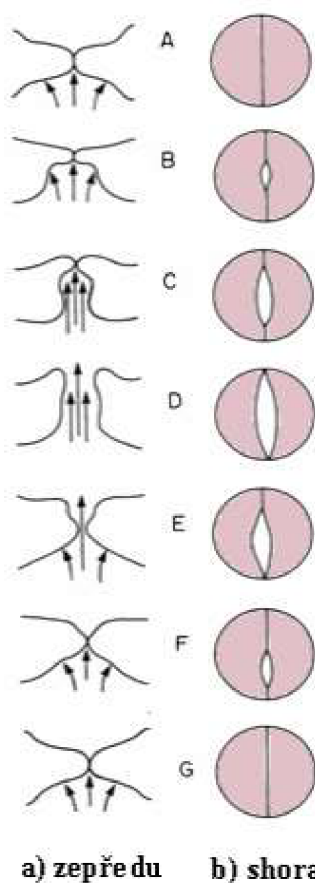


Obr. 6 Soustava lidského hlasového ústrojí [24]

Vznik hlasu začíná v subglotické oblasti autonomním cyklem rozděleným do dvou fází. První fáze cyklu (nádech) probíhá kontrakcí bránice a uvolněním mezižeberních svalů, které zvedají žeberní kosti hrudního koše [18]. Tím dojde k vytvoření podtlaku v plicích a následnému vyrovnání tlaku plněním plicních sklípků vzduchem z vnějšího prostředí [18].

Druhou fází cyklu je výdech, při němž dochází ke kontrakci mezižeberních svalů a uvolnění bránice, čímž vznikne přetlak v plicích [18]. V průběhu této fáze je vzduch vytlačován z plicních sklípků do průduškového stromu až dorazí do průdušnice směřující do hrtanu [18]. Když proud vzduchu dorazí do hrtanu, narazí na hlasivky, které

jsou svaly přitlačené k sobě a sloupec proudícího vzduchu se zastaví [19]. Při zastavení proudícího sloupce vzduchu hlasivkami se zvyšovat tlak [19]. Tím se zvedá tlak až do bodu, kdy jeho hodnota překoná hraniční hodnotu potřebnou pro rozevření hlasivek [19]. Rozevření hlasivek způsobí, že vzduch projde skrz hlasivkovou štěrbinu glottis a pokračuje dál do supraglotického prostoru. Rozevřením hlasivek se zároveň začne snižovat hodnota tlaku, pod jehož působením se hlasivky rozevřeli [19]. V momentě, kdy hodnota tlaku dostatečně klesne, dojde k opětovnému uzavření hlasivkové štěrbiny [19]. Uzavřená štěrbinu přeruší sloupec proudícího vzduchu a opět způsobí akumulaci tlaku



Obr. 7 Cyklus otevírání a zavírání hlasivek [20]

[19]. Tento proces je vyobrazen na **Obr. 7** a nazývá se kmitání hlasivek (fonace) [20]. Proces se cyklicky opakuje s vysokou frekvencí, u mužů 90–500 Hz a u žen 150–1000 Hz, viz **Obr. 7** [20].

Když vzduch projde hlasivkami, nachází se v supraglotickém prostoru [21]. Vzduch zde již nemá podobu proudícího sloupce, ale spíše tlakových pulzů vytvořených fonací [21]. Postup tlakových pulzů vzduchu rezonančními dutinami s artikulačními prvky je složitý proces vyžadující jejich součinnost [21]. Rezanční dutiny i artikulační prvky na vzduchové pulzy působí postavením, velikostí, tvarem i materiálem [21]. To umožňuje člověku vytvářet téměř nekonečné množství variací zvuků či hlásek s rozdílnými zvukovými parametry [21].

2. Vznik hlasu

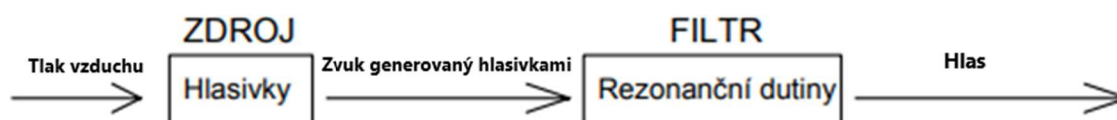
Ač je hlas každodenní součástí našeho běžného života, z důvodu komplexnosti jeho vzniku i špatnému přístupu k určitým orgánům, které mají vliv na vznik hlasu, vzniklo v průběhu času několik teorií popisujících jeho vznik.

2.1 Myoelasto-aerodynamická teorie (MEAD)

Teorie popisuje, že charakteristiky kmitání hlasivek (fonace) závisí hlavně na elasticitě tkání hlasivek [1, 22]. Předpokládá tedy, že pružné vlastnosti tkání mají na základní frekvenci kmitání hlasivek majoritní vliv [22]. Tyto vlastnosti jsou dány hrtanovými svaly, které mohou měnit svou tuhost a tím i základní frekvence [22]. Energie potřebná pro kmitání hlasivek je dle teorie dodávána proudícím vzduchem z plic (aerodynamická složka MEAD) [22]. Cyklický pohyb hlasivek teorie vysvětluje na bázi viskozity tkání způsobující rozptýlení energie v hlasívkách, a tím pádem potřebě dodávání energie pro každý cyklus v celém průběhu [22].

2.2 Teorie zdroje a filtru

V této teorii je vznik hlasu popsán jako dvoufázový proces (**Obr. 8**) [23]. První fáze popisuje statické proudění vzduchu z plic až k hlasívkám, které svým působením rozkmitá a vytvoří tak zvuk generovaný hlasívkami (první akustický signál) [23]. Druhá fáze popisuje transformaci původního hlasu rezonančními dutinami působící jako filtry utvářející výsledný hlas (výsledný akustický signál) [23].



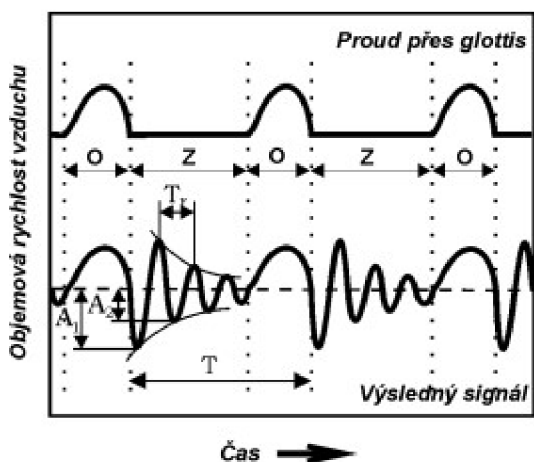
Obr. 8 Schéma teorie zdroje a filtru [1]

2.3 Zvuk generovaný hlasívkami

Zvuk nad hlasívkami si můžeme představit jako akustický signál ve tvaru pulzů vzduchu vytvořený kmity hlasivek bez úpravy rezonančními dutinami [24]. Zvuk generovaný hlasívkami se skládá ze základního tónu o základní frekvenci a určitého počtu vyšších harmonických složek odlišných amplitudou a fází [24]. Formování sloupce vzduchu proudícího z plic je ovlivněno nejen hlasívkami, ale i turbulencemi při proudění [24]. Tyto turbulence mají přibližnou podobu bílého šumu (rovnoměrně rozložená akustická energie na celé oblasti frekvencí [25]), jejich efektivní hodnota energie je oproti proudu vzduchu z plic však zanedbatelná [1, 24].

2.4 Formování zvuku generovaného hlasivkami

Formování zvuku generovaného hlasivkami do jeho finální podoby je graficky vyobrazeno na **Obr. 9** [1]. Horní část obrázku vyobrazuje průběh proudění vzduchu skrz glo-



Obr. 9 Grafické vyobrazení formulace akustického signálu [1].

sekvence O - průběh pulzu vzduchu při otevření hlasivkové štěrbině;
 sekvence Z - moment kdy je hlasivková štěrbinu uzavřena;
 T - perioda cyklu kmitání hlasivek)
 T - perioda cyklu kmitání hlasivek)

ttis, kdy výsledný akustický signál je stejný jako signál vzniklá pohybem hlasivek [1]. Spodní část obrázku popisuje realistický průběh akustického signálu ve vokálním traktu včetně rezonančních dutin a artikulačních prvků [1].

V nedávné době bylo prací Švece a spol. [22] zjištěno měřením subglotických tlaků, že při nízkých frekvencích má tlak tendenci dosahovat své maximální hodnoty na začátku uzavírání glottis, kdy se vykazuje maximální oscilace [22]. Vybuzené rezonance dutin mají kromě odlišných frekvencí od frekvence kmitání hlasivek tlumený charakter, a to z různých důvodů jako např. vlivu ztrát na měkkých tkání tvořící stěny dutin [1, 26]. Opětovným otevřením hlasivek dojde ke změně charakteristických vlastností dutin a nárůstu ztrát a snížení [1, 26]. Děj se uzavíráním a otevíráním hlasivek cyklicky opakuje [1, 26].

2.5 Charakteristiky hlasu a formanty

Hlas lze charakterizovat čtyřmi fyzikálními vlastnostmi, které souvisí s jeho vnímáním [27]. Těmito vlastnostmi jsou základní frekvence vnímaná jako výška hlasu, hladina akustického tlaku neboli hlasitost, rytmický vjem hlasu a jeho spektrální charakteristiky popisující barvu [27].

Frekvence

Frekvence hlasu je charakteristika popisující počet kmitů hlasivek za sekundu, její jednotky jsou Hz [27]. Její hodnota je závislá na několika stabilních i proměnlivých faktorech [27]. Mezi stabilní faktory ovlivňující frekvenci patří rozměry hrtanu, pohlaví, věk a tělesná stavba jedince [27]. Faktory, které proměnlivě působí na frekvenci hlasu jsou

napětí kolagenních vláken, odpor hlasivkové štěrbině určený silou hlasivek a hodnoty tlaku vydechaného vzduchu [27].

Intenzita hlasu

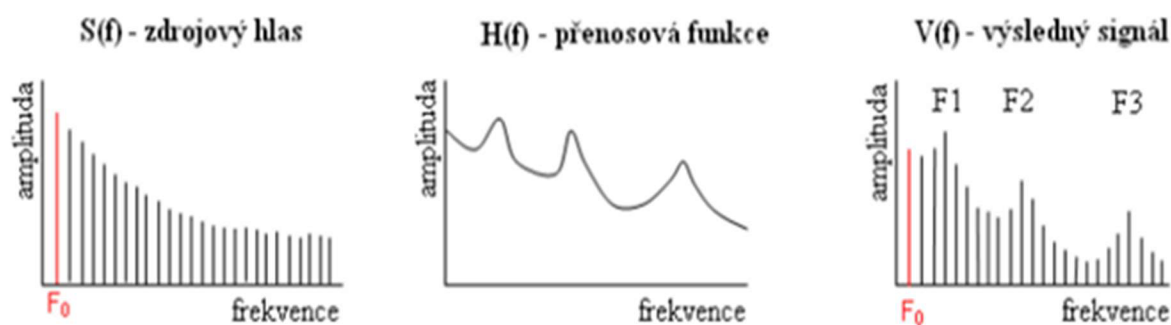
Je obecně popsána jako vektorová veličina popisující proudění akustické energie skrz jednotku plochy prostředí [28]. Intenzita je primárně ovlivněna strukturou hrtanu a celé supraglottické části [27]. Na intenzitu hlasu má také vliv účinnost hlasivek při generování zvuku a pohltivost stěn rezonančních dutin a artikulačních prvků při šíření hlasu v supraglottické části [27]. V případě že se buď v hrtanu nebo ve vokálním traktu vyskytuje morfologicky, patologicky nebo emočně vytvořené zúžení vyprodukovaný hlas je tlumený [27].

Barva hlasu

Tato vlastnost je individuální pro každého člověka je majoritně ovlivněna vyššími harmonickými frekvencemi frekvenčního spektra a má vliv na znění všech hlásek [29]. Je závislá na anatomickém uspořádání rezonančních dutin, artikulačních prvků a jejich pohybech při tvorbě hlasu [1, 30]. Základ pro výslednou barvu však vytváří hlasivky [1, 30]. Změny hlasové barvy od „běžné“ jsou způsobeny převážně emočním rozpoložením daného člověka v okamžik tvorby hlasu [29].

Formanty a frekvenční spektrum

Formanty chápeme jako maxima akustické energie pro určité frekvence ve frekvenčním spektru [30]. Každý formant popisujeme dvěma charakteristikami, střední frekvencí a šířkou pásma [30]. Graficky znázorněná podstata formantu je na **Obr. 10** [31]. Na levé části obrázku je vidět průběh harmonických frekvencí, kdy hodnota amplitudy má klesající tendenci vůči nárůstu frekvence [31]. V prostřední části je vyobrazena přenosová funkce vokálního traktu [31]. Na pravé části je vyobrazena kombinace průběhu harmonických frekvencí a přenosové funkce, což nám dává podobu výsledného akustického signálu [31]. Na tomto grafu jsou vyobrazeny výsledné formanty F_1 až F_3 .



Obr. 10 Proces formování frekvenčního spektra [31]

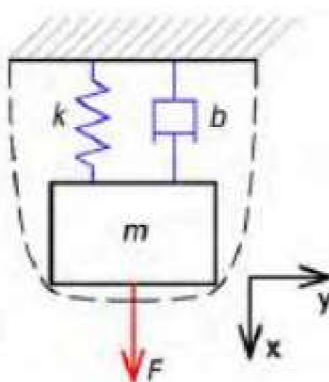
3. Geometrické a výpočtové modely vokálního traktu

Využití výpočetních a geometrických modelů vokálního traktu s hlasivkami, anebo pouze jen hlasivek, je pro studium vzniku lidského hlasu hojně využíváno [32]. Procesy spjaté se vznikem hlasu mají fyzikální charakter [32]. Díky moderním technologiím dnes lze poměrně podrobně zkoumat geometrii i materiálové vlastnosti anatomických struktur vokálního traktu včetně dynamiky artikulačních prvků [32].

3.1 Přehled modelů vokálních traktů

Vývoj modelů vokálního traktu sahá až do první poloviny 20. století, kdy neexistovali počítače [32]. Podstata prvních modelů vokálního traktu byla tvořena pomocí analogií s elektrickým přenosovým zařízením [32]. Reprezentativním modelem této doby je model LEA (electrical line analog), který sehrál klíčovou roli při vzniku teorie zdroje a filtru [32]. Už z těchto modelů vyplynula důležitost jednotlivých částí hlasového ústrojí při tvorbě hlasu [32]. Rovněž se ukázalo, že i jednoduché modely jsou dostatečné pro zkoumání tvorby samohlásek [32].

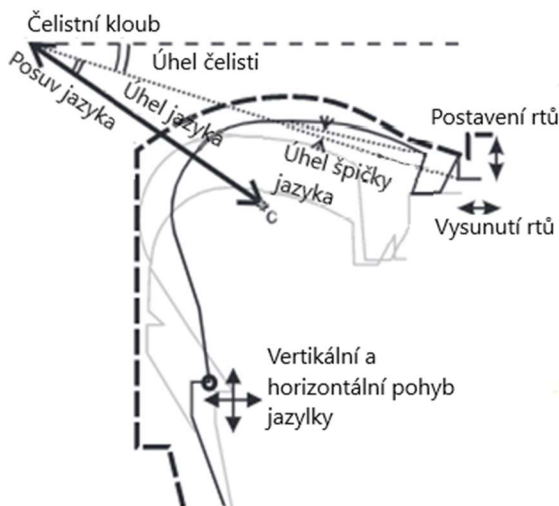
Modelování hrálo velmi důležitou roli u snahy pochopit dynamiku hlasivek při interakci se zbytkem vokálního traktu [32]. Při používání řady různých modelů se ukázalo, že nejjednodušší model tvořený jedním hmotným pružinovým oscilátorem (**Obr. 11**) nelze použít pro aproximaci interakce hlasivek se zbylou částí vokálního traktu, ale pouze pro popis chování osamocených hlasivek [32]. Popis interakce hlasivek s prouděním včetně pohybu hlasivek dokáže popsat až model vytvořený ze dvou hmotných oscilátorů [32]. Propracovanější modely, které vznikly v 70. letech 20. st. dokázaly již reprodukovat více hlasových jevů [32]. V tomto období se také pozornost ubírala k vývoji hlasových syntetizérů, neboli tvorbě umělého hlasu počítačem a lepšímu pochopení produkce lidského hlasu [32, 33].



Obr. 11 Jednohmotný pružinový oscilátor [32]

3.1.1 Modely buzení hlasivek

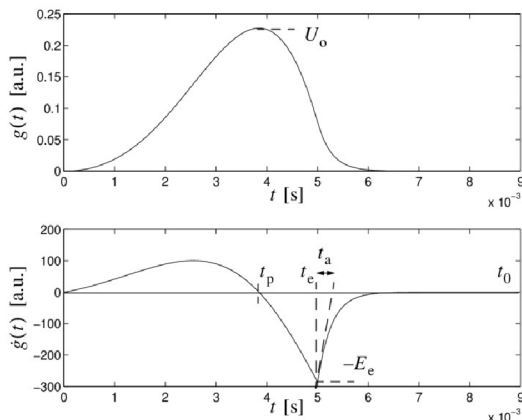
Modelem dle literatury rozumíme reálný nebo abstraktní objekt s obsahem všech podstatných charakteristik primárního objektu s účelem zjednodušení a řešitelnosti reálných problémů [34].



Obr. 12 Ilustrace jednoho z geometrických artikulačních modelů [32]

Liljencrantsův-Fantův model

Je historicky nejrozšířenějším modelem, který byl navrhnutý v roce 1960 a publikován v roce 1985 [35, 36]. Tento model slouží k simulaci buzení hlasivek se snahou napodobit skutečné objemové zrychlení proudícího sloupce vzduchu hlasivkovou štěrbinou [36]. Proudící sloupec vzduchu je definován malým počtem parametrů [36, 37]. Model, na rozdíl od popisu proudění sloupce vzduchu vztaženého k periodě kmitu, pracuje s časovou derivací toku vzduchu neboli s objemovou rychlostí [36]. Hlavním omezením modelu je jeho složitost při výpočtu, jelikož vyžaduje řešení implicitních rovnic proveditelných pouze numerickým přístupem [35]. To způsobuje, že je nevhodný pro použití v případech s omezením výpočtové náročnosti, například při syntéze řeči v reálném čase [35].



Obr. 13 Typický průběh cyklu podle LF modelu [35]

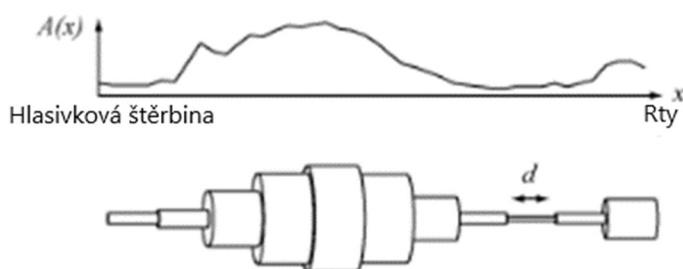
(nahore průběh toku vzduchu;
dole derivace průběhu toku vzduchu)

3.1.2 Modely vokálního traktu

Tyto modely lze obecně dělit podle počtu dimenzionálních parametrů. Modely vokálního traktu chápeme jako modely vytvořené ze snímků zobrazovacích metod (počítačové tomografie, magnetické rezonance, rentgenu nebo ultrazvuku) za účelem řešení určitého problému. [38]

Jednorozměrné modely lidského vokálního traktu

Jednorozměrné modely vokálního traktu jsou založeny na bázi matematických funkcí (**Obr. 14**) popisující reálný proces produkce a šíření zvuku [38, 39]. Takto vytvořené funkce slouží k sestrojení řady válcových trubic o různých rozměrových parametrech zjednodušující geometrii vokálního traktu do jedné dimenze [40, 41]. Modely jsou obvykle omezené pouze na rovinné vlny [39, 40].



Obr. 14 oblast funkce tvořící analogickou řadu trubic [38]

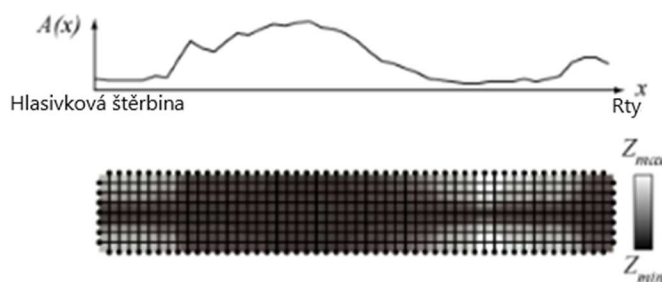
Model Fanta a Bavegarda [41] je parametrický model, který vznikl rozšířením předešlých prací Fanta [41, 43]. Model je uzpůsoben pro 13 vybraných švédských hlásek definovaných funkcemi ploch průřezů [41]. Funkce jsou založeny na skutečných datech z rentgenu a tomografických studií [41, 43]. Vytvořené funkce vykazují poměrně velkou shodu s porovnávacími zvukovými nahrávkami [41].

Model Storyho (2005) je model popsáný čtyřmi úrovněmi reprezentující různé parametry modelu [44]. První úroveň utváří podklad pro samohlásky z dat naměřených při magnetické rezonanci vokálního traktu [44]. Druhá úroveň obsahuje funkce formulující souhlásky na celé délce traktu [44]. Třetí úroveň je umožněna úprava parametrů artikulačních prvků [44]. Poslední reprezentuje a ovládá spojení mezi hlasivkami a dutinou nosní s obličejovými dutinami [44].

Dvourozměrné modely lidského vokálního traktu

Přidáním druhé rozměrové dimenze se zjistilo, že modely dokáží poskytnout lepší syntézu samohlásek [39, 45].

Jack Mullen [39] přišel s alternativním přístupem aplikace funkce plochy na model traktu. Přístup spočívá v zachování pravoúhlé sítě a mapování měnícího se tvaru traktu v závislosti na plošných funkcích přiřazujících akustickou impedanci (poměr akustického tlaku a objemové rychlosti) vln obdélníkové sítě, viz **Obr. 15** [39]. To způsobí přenos účinků tvaru traktu k syntéze formantů [39]. Struktura modelu si díky tomu dokáže zachovat svůj tvar a změny v prostoru modelu jsou prováděny na impedanci, což umožní dynamickou manipulaci modelu ve skutečném čase a usnadňuje syntézu [39].



Obr. 15 funkce plochy samohlásky s impedančním mapování [39]

Marc Arnela [45] navrhl model pomocí čtyřstupňové metodiky, která má za cíl sladit chování 2D simulací a chování 3D hlasivek s kruhovým profilem vokálního traktu [45]. Podstata metodiky spočívá v úpravě 2D profilu vokálního traktu za účelem vyladění formantů, úpravě impedance stěn vůči šířce pásma formantů, škálování toku vzduchu v hlasivkové štěrbině na úroveň tlaku 3D modelu a úpravě vyzařování 2D modelu do bodu kdy věrohodně reprezentuje 3D model na základě optimalizačního procesu [45]. Tento model byl testován na samohlásky /a/, /i/ a /u/ [45]. Výsledky testování oproti jiným (starším) modelům nevykazovaly tak velké odchylky [45].

Trojrozměrné modely lidského vokálního traktu

Prudký rozvoj výpočetní techniky umožnil velký vývoj jak v tvorbě geometrie modelů, tak i jejich zpracování a následných simulacích a analýzách [46]. 3D modely vokálního traktu jsou dnes nejrozšířenějšími a nejmodernějšími modely [46]. Velké zastoupení těchto modelů je způsobeno možností detailního popisu mechanismu tvorby hlasu včetně dynamiky artikulačních prvků [46]. Největší nevýhodou je výpočtový čas, jenž se může pohybovat v řádech, dnů, týdnů a u modelů vyšší úrovně i měsíců [46].

Švancara a Horáček [47] navrhli 3D model vytvořený za účelem vlivu tonzilektomie neboli vlivu odstranění mandlí na produkci českých samohlásek /a/ a /i/ [47]. K vyhodnocení byla použita metoda konečných prvků (MKP) aplikována na akustické prostory reprezentující lidské hlasové ústrojí uzpůsobené pro tvorbu českých samohlásek /a/ a /i/ [47]. Samohlásky byly simulovány přechodovou analýzou a buzeny modelem LF [35, 47]. Výsledky získané pomocí toho modelu popisují vliv odstranění

mandlí jako výrazný posuv frekvencí u druhých a čtvrtých formantů v řádech desítek hertzů [47].

Takemoto a spol. [48] při rekonstrukci dat 3D geometrie vokálního traktu z magnetické rezonance použili metodu konečných diferencí [48]. V této práci byla metoda použita pro formulaci přenosové funkce vokálního traktu pro pět japonských samohlásek [48]. Vytvořené funkce byly rovněž porovnány s funkcemi z akustických měření fyzikálních modelů [48]. Účel tohoto modelu měl určit shodu vypočtených přenosových funkcí s naměřenými funkcemi, jež dle autorů vykazovaly dobrou shodu až do deseti kHz [48]. Dalším účelem modelu bylo zkoumání vlivu vybraných artikulačních prvků na změnu spektrálních vlastností hlasu [48].

Arnela a spol. [49] pro tuto práci vytvořili 3D dynamické reprezentace vokálního traktu z dat magnetické rezonance (MRI) za účelem generování dvojhlásek na základě průřezů, které byly extrahovány ze statických modelů vokálního traktu rovněž z dat MRI [49]. Dvojhlásky byly generovány interpolací polohy, orientace a tvaru průřezů [49]. K řešení problému byla použita metoda MKP, jejíž výstup byl porovnán i s výstupy z 1D akustického modelu založeného na metodě přenosových matic [49]. Výsledek ukázal shodu obou metod při řešení s 3D modelem, při řešení s 1D modelem vykazovaly odlišné výsledky [49].

Trojrozměrné modely lidského vokálního traktu včetně geometrie hlavy

Cílem těchto výpočtových modelů je zjistit, jaký vliv mohou mít odrazy hlasu od lidského těla.

Švancara, Tomeček a spol. [50] stojí za tvorbou modelu umožňující simulaci šíření zvuku hlasovým traktem a jeho šířením kolem lidské hlavy [50]. Model lze rozdělit do dvou částí. Jedna část je model traktu vytvořeného pro českou samohlásku /a:/ a část druhá je tvořená modelem hlavy vytvářející akustickou bariéru, kolem které se hlas po opuštění traktu šíří [50]. Model hlavy by vytvořen na základě dat z počítačové tomografie (CT) [50]. Generování samohlásky je provedeno pomocí přechodové analýzy v MKP a buzení hlasivek modelem LF [50]. Výsledkem práce jsou frekvence formantů, které vykazují dobrou shodu s literaturou, simulace rovněž umožňuje vyhodnocení přenosové funkce mezi referenčním a libovolným bodem v prostoru kolem hlavy [50].

Arnela a spol. [51] vytvořili model sestavený z geometrie vokálního traktu a realistické geometrie hlavy [51]. Model hlavy je vytvořen na základě dat ze zkoumání anatomie, včetně odlišných vrstev a částí (lebka, kůže...) vytvářející realistický dojem [51]. Její model je zároveň navržen tak, aby byl vhodný pro MKP, ale také aby bylo

možné pomocí animačních prvků provést vizualizaci ke generovanému zvuku [51]. Očekávaným využitím modelu je rozšíření poznatků o šíření hlasu a také potenciální využití v audiovizuálním a animátorském prostředí [51]. Model vytvořený zde je navržen na samohlásku /a:/ [51].

4. Tvorba geometrie 3D modelu těla

Důležitým aspektem pro správnou analýzu bylo použití vhodného modelu geometrie. Pro tuto práci jsme vytvořili realistický model lidského těla. Model byl vytvořený ze dvou spojených modelů, z nichž jeden detailně reprezentoval hlavu včetně krku s vokálním traktem a druhý zbytek lidského těla.

4.1 MRI model lidské hlavy a krku

Model hlavy, který jsme použili pro tuto práci, byl vytvořen z dat magnetické rezonance neboli MRI ve formátu DICOM [52]. Data byla následně převedena do přijatelného formátu softwarem Medical 3D Image Modeling [53], jehož výsledkem byly separované modely vokálního traktu a hlavy [52]. Tyto modely byly importovány do softwaru CATIA V5 [54], kde došlo k následné úpravě včetně sestavení [52]. Výsledkem byl detailní model hlavy s vokálním traktem v podobě objemového tělesa [52]. Jelikož se jednalo o model s vysokou kvalitou a přesností, použili jsme jej i my v naší práci.

4.2 Fotogrammetrie, popis a princip

O fotogrametrii byly první zmínky již v polovině 20. století, kdy její podoba byla čistě analogová, opticky-mechanická technika [55]. Postupem času se rozvinula od analytických metod se základem spočívajícím v počítačových výpočetních algoritmech až k digitální fotogrametrii založené na digitálních fotografiích a počítačovém vidění [55].

Fotogrammetrie je technika zaměřená především na tvorbu trojrozměrných modelů a terénu z dvourozměrných fotografií. Je použitelná při tvorbě topografických map, tvorbě digitálních modelů pro numerické simulace aj. [55]. Její princip bychom mohli popsat jako triangulace, neboli pořízení fotografií z alespoň dvou odlišných bodů, pomocí kterých vytvoříme tzv. přímky pohledu (line of sight) na objekt [56]. Tyto přímky se matematicky protínají a dávají tak za vznik trojrozměrným souřadnicím bodům zájmu utvářejících objekt [56].

Fotogrametrii lze rozdělit na dva typy [55]. Prvním typem je letecký, dochází při něm k pořízování fotografií ze vzduchu, druhým je pozemní (s krátkou vzdáleností), při níž jsou fotografie pořízeny ze vzdálenosti menší než 200 m od objektu [55]. Pro tuto práci jsme použili fotogrametrii pro krátkou vzdálenost, jejímž objektem je muž ve věku 56 let, doc. RNDr. Jan G. Švec Ph.D. et Ph.D. z Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, jehož model lidské hlavy máme k dispozici.

4.3 Aplikace fotogrammetrie pro krátkou vzdálenost

Aplikování fotogrammetrie na náš objekt jsme rozdělili do několika kroků.

První krok – pořizování vstupních dat

První krok je nejdůležitější, má vliv na celý následující proces. Tento krok spočíval v pořizování vstupních dat, jimiž jsou kvalitní digitální snímky. Jejich pořizování by mělo podléhat kompromisu mezi velikostí scény, vlastnostmi materiálu, kvalitou textur, množstvím světla a dalšími [57].

Získané snímky by měly být co nejvíce ostré, bez rozmazání způsobeném pohybem při focení nebo hloubkou ostrosti [57]. Doporučené je proto při focení používat stativ či vyšší rychlost uzávěrky na redukci rozmazání od pohybu [57]. Dále je vhodné snížit hodnotu průměru clony pro větší hloubku ostrosti a pro minimalizaci šumu snížit hodnotu citlivost snímače ISO [57].

Z našeho focení zkušebních objektů (lékárničky, boty a školního penálu) jsme zjistili, že fotografie je vhodné pořizovat z konstantní vzdálenosti od objektu kolem dokola při rotování v jednom směru.

Expozice pořízených fotografií by se měly částečně překrývat. To z důvodu aby došlo ke správné lokalizaci polohy fotoaparátu vůči objektu při pořízení fotografie v programu použitým pro jejich zpracování [57].

Množství pořízených fotografií by mělo být adekvátní vůči velikosti objektu a dostatečnému pokrytí všech detailů. Detaily jsme při testování fotili od konstantní vzdálenosti jako celý objekt a postupně se k nim přibližovali.

Velký problém při expozici je také osvětlení objektu, které by mělo být rovnoměrné po celém povrchu foceného objektu včetně záhybů apod.

Posledním důležitým detailem je, že veškeré hodnoty nastavené na fotoaparátu ovlivňující focení, musí zůstat po celou dobu pořizování fotografií nezměněny. Z těchto důvodů byl objekt focen profesionálním fotografem MgA. Jiřím Balátem v místnosti s adekvátními podmínkami zařízenými jeho fotografickým vybavením, viz **Obr. 16** a Příloha 1 – Fotografie z průběhu focení objektu.



Obr. 16 Fotografování docenta Jana Švece fotografem MgA. Jiřím Balátem

Druhý krok – Meshroom a importování fotografií

Druhý krok spočíval ve zvolení správného softwaru pro zpracování fotografií a jejich importu. Pro tento krok jsme zvolili open-source software Meshroom [57], určený pro fotogrammetrii na krátkou vzdálenost. Tento software jsme si vybrali hlavně z důvodů jeho dostupnosti, množství různých návodů a jeho neustálému vývoji nejen vývojáři, ale i samotnými uživateli.

Fotografie do programu byly importovány ve formátu .jpg. Tím jsme sice ztratili část obrazových dat, ale je to formát, který dokáže program zaručeně zpracovat. Po importování fotografií program sám automaticky provedl kontrolu všech fotografií a v případě nekvalitních fotografií či fotografií, které program vyhodnotil jako nepoužitelné, je odebral a vyřadil z následného procesu. Fotografie, se kterými program dále pracoval, označil barvou zelenou, naopak barva červená by označovala fotografie vyřazené.



Obr. 17 Snímky po importování a automatické kontrole

Třetí krok – Tvorba řídké 3D rekonstrukce

Ve třetím kroku jsme provedli nastavení vedoucí k tvorbě řídké 3D rekonstrukce (sparse 3D reconstruction). Toto nastavení je rozloženo do čtyř bloků v programu Meshroom, a to do FeatureExtraction, ImageMatching, FeatureMatchnig a StructureFromMotion. Úvodní nastavení těchto bloků je dostatečně kvalitní pro dobrou rekonstrukci, ale i přesto jsme provedli drobné změny, které nám byly doporučeny v návodu vytvořeném uživateli [58].

V bloku extrakce prvků (FeatureExtraction) jsme zvolili doporučené algoritmy DSPSIFT a AKAZE [58]. Tyto algoritmy detekce prvků mají základ tvořený na identifikaci stabilních klíčových bodů, jež jsou invariantní vůči změnám měřítka, rotace a osvětlení [57, 58]. Algoritmus AKAZE je navíc založený i na bodech, které jsou odolné vůči šumu a rozmazání [57, 58]. Identifikované klíčové body na snímcích Meshroom

používá k porovnání snímků a rekonstrukci 3D modelu [57, 58]. Zároveň bylo podstatné abychom zrušili automaticky zaškrtnuté Force CPU extraction, čímž Meshroom používal pro modelaci pouze CPU [57].

Bloky spojování snímků a prvků (ImagineMatching a FeatureMatching) jsme nechali beze změny v základním nastavení softwaru [57].

Poslední změnou tohoto kroku byla u bloku (StructureFromMotion) změna hodnoty minimální délky vstupní stopy (Min. input track length) ze 2 na 3 [57]. Tím jsme zvýšili minimální počet shodujících se prvků potřebných k vytvoření stopy, neboli sady obrazových prvků shodných napříč několika fotografiemi, v 3D rekonstrukci (odhadu polohy a orientace kamery) [57, 58]. Zvýšená hodnota vedla sice k menšímu počtu stop, ale zato k potenciálně spolehlivějším výsledkům [55, 56].



Obr. 18 Řídká 3D rekonstrukce z fotografií

Čtvrtý krok – Tvorba sítě v Meshroomu

Z řídké 3D rekonstrukce jsme vytvořili hustou neupravenou síť [57]. Charakteristiky sítě jsou určovány bloky PrepareDenseScena, DepthMap, DepthMapFilter, Meshing, MeshingFilter, pro které jsme od původního nastavení provedli pár změn [57].

První blok, PrepareDenseScene, neboli příprava husté sítě, určený k zpřesnění a přípravě řídkého mračka bodů na hustou rekonstrukci, byl ponechán nepozměněný [57].

První změna byla provedena až v bloku DepthMap (Hloubková mapa), který vytváří odhad hloubky jednotlivých bodů ve scéně [57]. Změnou v tomto bloku bylo posunutí hodnoty DownScale (faktoru zmenšující měřítko hloubkové mapy). Jeho změnou na hodnotu jedna jsme určili, že nedošlo k žádnému zmenšení (znepřesnění) hloubkových map, ale došlo k prodloužení času procesu a využití paměti počítače [57]. Pro

naš případ bylo ale důležité zvolit hodnotu jedna, jinak by výsledná kvalita sítě a modelu byla nepoužitelná.

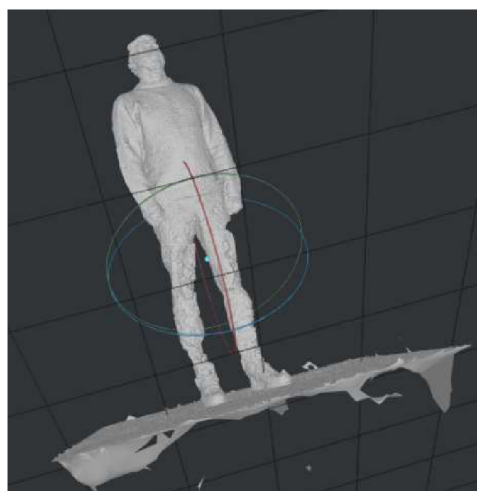
Třetí blok DepthMapFilter (filtr hloubkové mapy) slouží k filtraci hloubkových map, jež mohou obsahovat různé chyby a šum [57, 58]. U tohoto bloku jsme dle doporučení navýšili hodnotu pro kritérium Min. Consistent Cameras na dva a Min. Consistent Cameras Bad Similarity na tři [57, 58]. Zvýšením hodnoty jsme zajistili, že k tvorbě modelu a jednotlivých prvků software používal kombinování většího množství snímků a z nich vytvořených kamer [57, 58]. Tímto jsme dosáhli větší přesnosti a kvality rekonstrukce husté sítě modelu [57, 58].

Předposledním blokem je Meshing (síťování) zaměřený na tvorbu 3D sítě z bodů. Tento blok umožňuje korigovat parametry související se sítí, jejími prvky nebo její tvorbou [57, 58]. My jsme u tohoto bloku zvýšili hodnotu Min. Observation Angle For SfM Space Estimation určující minimální hodnotu úhlu mezi dvěma pohledy [58]. Těmito pohledy lze pozorovat bod prvku sítě se zohledněním pro 3D rekonstrukci neboli minimální míru vzájemného překrytí sousedních snímků [57, 58]. Zvýšením hodnoty na osmdesát stupňů získáme větší přesnost 3D rekonstrukce modelu [58].

Finální blok ovlivňující tvorbu sítě je MeshingFilter (filtr sítě), jímž došlo k filtraci vytvořené sítě, zvýšením její kvality a snížením šumu [55, 56]. Tento celý blok včetně všech ostatních nezmíněných hodnot ve všech dalších krocích jsme ponechali s původním nastavením, které jsme pro náš případ shledali dostatečnými.

4.4 Zpracování a úprava kompletního modelu

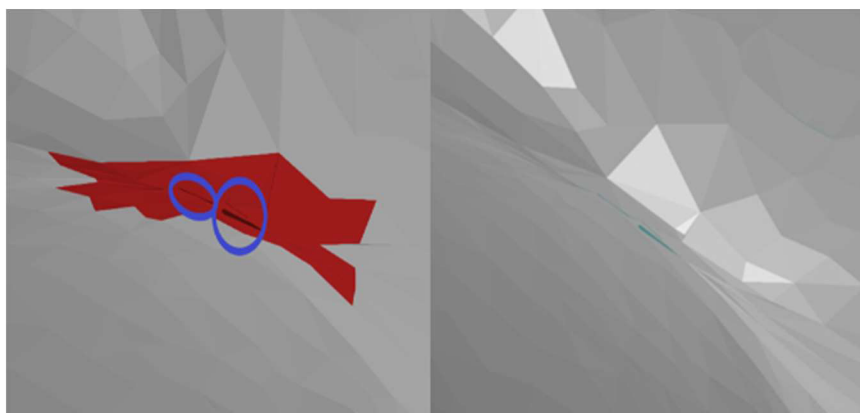
Jednou z nejdůležitějších a zároveň nejkomplikovanějších částí této práce je tvorba modelu geometrie, který musí co nejvíce odpovídat realitě a zároveň splnit naše požadavky ohledně budoucí výpočtové náročnosti, dostatečné kvalitě, schopnosti softwarů zpracovat geometrický tvar a zároveň na něm provést analýzu šíření hlasu kolem lidského těla.



Obr. 19 Výsledná filtrovaná síť

4.4.1 Úprava modelu lidského těla bez hlavy

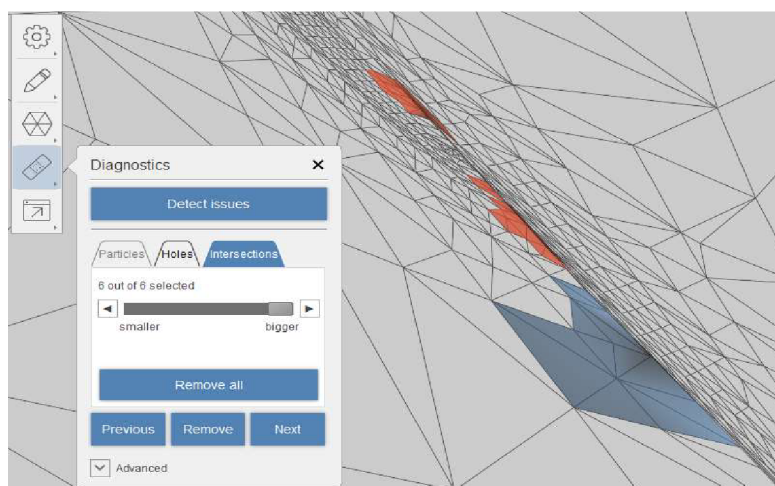
Začátek úprav spočíval v importu dat ve vhodném formátu do programu GOM Inspect Suite [59] určenému ke zpracování a exportu sítě ve formátu STL. Počáteční úprava spočívala v eliminaci prvků položených volně v prostoru, které vznikly jako chyba při tvorbě sítě. Dále jsme odstranili části spojené s tělem, ale nepatřící k modelu, jako například části podlahy, viz **Obr. 19**. V modelu byly opraveny chyby sítě, které jsou na **Obr. 20** vlevo označeny modře. Chyby byly vyřešeny smazáním a nahrazením novými prvky, vyplňujícími oblast vzniklé díry. Možnost automatizované fixace všech chyb nedoporučujeme, jelikož tato fixace velice často vedla ke zhoršení kvality sítě a vzniku nových chyb.



Obr. 20 Chybná síť modelu

Dalším krokem bylo upravení ostrých přechodů mezi rukama a tělem a v okolí nohou. Tato úprava probíhala identicky jako u předchozích chyb s tím rozdílem, že tentokrát jsme vybírali větší části, které tvořily ostrý přechod nebo sousedící prvky svírající ostrý úhel. Důvodem provedení této operace byla eliminace oblasti náchylné k chybám při tvorbě ploch či výskytu skrytých chyb, jež nelze jednoduše zpozorovat.

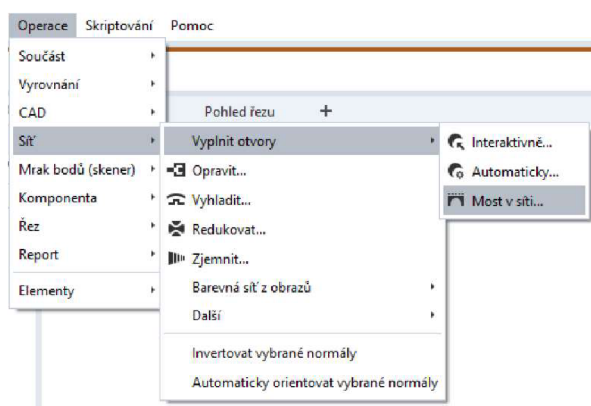
Po očištění modelu od vzniklých chyb a kritických oblastí s jejich potenciálním výskytem bylo potřeba odstranit oblast ve spodní části bérce pravé nohy, okolí stehenních svalů a kolen obou dolních končetin kde došlo k propadu sítě. Tento propad byl způsoben nejspíše kvůli jednoduše, světlé barvě oblečení a přechodu z lemu nohavice na botu. Vzhledem ke skutečnosti, že se jednalo o poměrně velkou oblast, nebylo možné ji opravit pouhým odstraněním a nahrazením. K této chybě jsme proto zvolili odlišný přístup, kdy došlo k odstranění celé propadlé oblasti bez blízkého okolí. Přes vytvořenou díru v modelu jsme sestavili „mosty v síti“, vytvořené tak, aby se jejich konce nacházely v jedné rovině kolmé na střednicovou osu dané oblasti nohy. Generováním těchto mostů za pomoci operace pro plnění otvoru v síti, viz **Obr. 21**, jsme rozdělili vzniklou díru na menší oblasti, a to až dokud jsme neuznali, že díry jsou dostatečně malé, aby při vyplnění vhodně nahradily tvar lidské nohy.



Obr. 21 Analýza a oprava sítě v programu ReCap

Po všech těchto úpravách jsme přešli k operaci interaktivního vyplnění děr, což nám umožnilo vyhledat zbylá, chybná místa sítě. Ani v tomto případě však nedoporučujeme používat automatické opravy, nýbrž použít tento nástroj, pouze jako vyhledávač chyb a jejich opravu provést ručním nastavením pro plnění děr. Postupným eliminováním chyb v síti jsme dosáhli limitu softwaru.

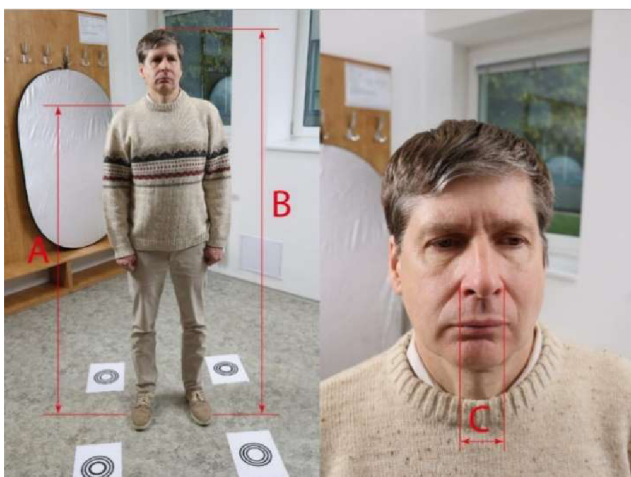
Některé chyby možné opravit nebylo a snaha o jejich opravu vedla k zvýšení počtu chyb nebo k selhání softwaru. Řešením těchto komplikací se ukázal export a následný import modelu do programu Autodesk ReCap Photo [60]. I tento program jsme použili za účelem analýzy chyb v síti a jejich následné opravě odstraněním prvků a zaplněním děr, viz **Obr. 22**. Po opakovaných opravách jsme ani v tomto softwaru nedokázali upravit síť, aby neobsahovala žádné chyby nebo chybné prvky. Kompletní eliminace chyb jsme dosáhli až po opakovaném importování, exportování, analyzování a opravou mezi zmíněnými dvěma softwary. Tento krok nám zabral zhruba devět verzí modelu, nežli bylo dosaženo požadovaného výsledku.



Obr. 22 Operace vyplňující otvory pomocí mostů

4.4.2 Spojení modelu hlavy a těla v jeden model

Po dokončení modelu těla, kdy oba používané softwary vyhodnotily síť bez chyb, jsme exportovali model těla a model hlavy separátně do softwaru Fusion 360 | 3D CAD, CAM, CAE, & PCB Cloud-Based Software [61]. V tomto softwaru jsme pomocí operace využívající faktor měřítka z aktuálních, výstupních a změřených parametrů na objektu, viz **Obr. 23**, vytvořili model ve skutečné velikosti.



Obr. 23 Měřené reálné rozměry na těle objektu

A = 148 cm (pravé rameno)
B = 178 cm (celková výška)
C = 3,7 cm (šířka nosu)

Po této úpravě jsme oba modely importovali do jedné sestavy, ve které jsme usazovali model hlavy na tělo a snažili se co nejpřesněji dosáhnout bodu vzájemného překrývání hlav od obou modelů. Tímto krokem jsme získali informace o vzniku místa spojení modelů a převedli je do softwarového prostředí GOM [59], kde jsme u modelu těla provedli kompletní odstranění nekvalitní sítě tvořící hlavu a nepotřebných částí na základě znalosti místa spoje. To samé jsme provedli i u modelu hlavy z MRI snímků, viz **Obr. 24**.



Obr. 24 Modely připraveny ke spojení v jeden (modely jsou na obrázku v různém měřítku)

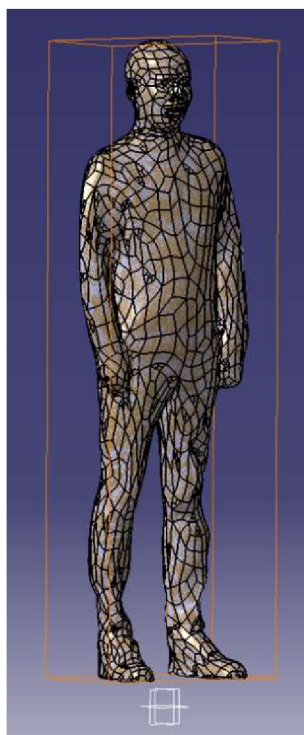
Modely oříznuté a připravené ke spoji jsme otevřeli v softwaru Fusion 360. Opět byly modely vůči sobě posouvány a pootáčený až do bodu, kdy usazení hlavy vůči tělu odpovídalo realitě. Mezi oběma modely se nacházela minimální mezera. Díky této mezeře, po převedení modelů do software GOM [59], jsme provedli spojení obou modelů „mosty v síti“ stejným postupem, jako při opravě stehen, viz kapitola 4.4.1.

Výsledkem byl model geometrie s kvalitním tvarem hlavy a těla použitelný pro další aplikace. Vzhledem k velkému množství prvků u finálního modelu a omezené výpočetní kapacitě jsme model ještě jednou otevřeli v softwaru ReCap [60], kde jsme provedli generování sítě pro model s menším počtem prvků (30% z původního množství).

4.5 Tvorba ploch a modelu jako objemového tělesa

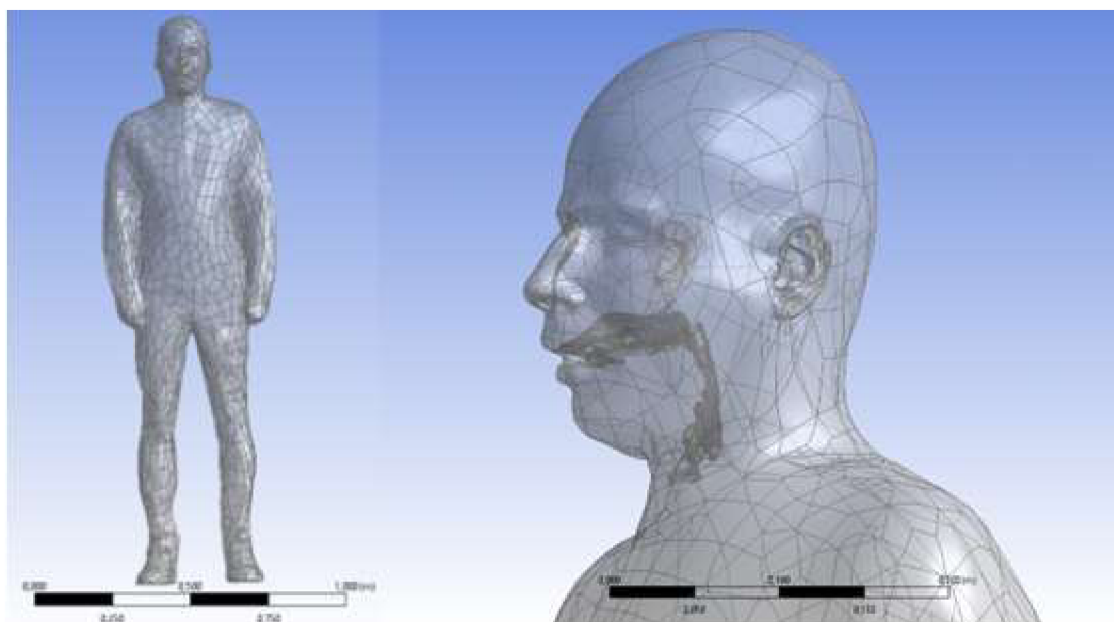
Pro operaci převodu modelu na plochy jsme se rozhodli pro použití návrhářského softwaru CATIA V5 [54], ve kterém byla provedena kontrolní analýza sítě bez potřeby oprav. V našem případě byla síť vyhodnocena bezchybně a mohli jsme tak přejít k převodu na model z ploch.

To jsme provedli v sekci Quick Surface Reconstruction operací Automatic surface. Pro tuto operaci jsme oproti původnímu nastavení zvýšili požadavky na hodnotu střední povrchové odchylky 0,001 mm, s úrovní povrchového detailu na 5000 a cílovém poměru dobrých bodů na 99 %. Tyto požadavky byli velice náročné, proto rekonstrukce modelu do formátu ploch zabrala několik hodin, její výsledek je vyobrazen na **Obr. 25**.



Obr. 25 Model tvořený plochami

Při testování prvotních výsledků se však ukázalo že model tvořený plochami nebyl vhodný pro analýzu a bylo jej potřeba dále převést do podoby, kdy se jednalo o objemové těleso. To jsme učinili operací definující uzavřené plochy, čímž jsme získali výsledný produkt, který byl vyhodnocen bez chyb. Problémem tohoto výsledku bylo, že ač jej software vyhodnotil kladně, pro naše účely nevyhovoval. Zkušební analýza dopadla několika chybami ukazující na vytvořený model. Jelikož CATIA V5 [54] nedokázala tyto chyby odhalit a napravit, importovali jsme objemový model do softwaru SOLIDWORKS [59], kde byly tyto chyby odhaleny a opraveny. Výsledný produkt je vyobrazen na **Obr. 26** v systémovém prostředí ANSYS© Designmodeler™ [62].



Obr. 26 Výsledný model s detailním pohledem na hlavu (vpravo)

5. Harmonická akustická analýza

V této kapitole provedeme přípravu harmonické akustické analýzy včetně jejího řešení, které jsme provedli za pomoci výpočtového softwaru ANSYS Workbench 2022 R2 [63], dále jen Workbench. Tuto kapitolu rozdělíme do několika kroků.

5.1 Příprava geometrie modelu a okolního prostředí

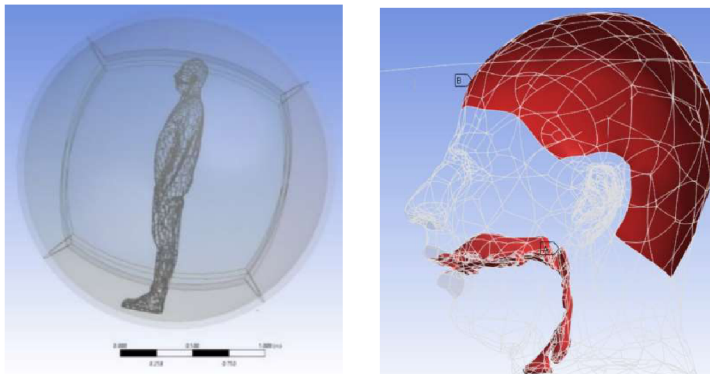
Prvním krokem této kapitoly je finální příprava geometrie včetně okolního prostředí pro analýzu. Vytvořenou geometrii jsme otevřeli v CAD prostředí DesignModeler s přidaným doplňkem pro tvorbu okolí AdvancedEnclosure. Doplňěk AdvancedEnclosure jsme upřednostnili z důvodu použití nekonečných elementů oproti PML (perfectly matched layer) vrstvě. Nekonečné elementy jsou rychlejší na výpočet, což jsme si ověřili tvorbou zjednodušeného modelu, pro který jsme provedli identickou analýzu s použitím PML vrstvy a nekonečných elementů. Výsledky byly téměř totožné, ovšem čas analýzy se pro PML vrstvu zvyšoval s počtem prvků a při použití elementů o velikosti 50 mm byl více jak trojnásobný.

Po načtení modelu jsme spustili doplňěk s nastavením, dle **Obr. 27**.

| Definition of AdvancedEnclosure | |
|---|------------------|
| Shape | Sphere in Sphere |
| L, Bounding Size | 2.046102 [m] |
| Type | Fixed |
| <input type="checkbox"/> R1, Inner Radius | 1.05 [m] |
| <input type="checkbox"/> R2, Outer Radius R2>R1 | 1.1 [m] |
| Target Bodies | All Bodies |
| Delete Target Bodies? | Yes |
| Create Named Selections? | Yes |

Obr. 27 Nastavení doplňku AdvancedEnclosure

Po jeho spuštění došlo k vygenerování dvou koulí se společným středem, z nichž první tvořila vnitřní prostředí s poloměrem o velikosti 1,05 m. Její součástí byla i díra s identickým tvarem jako náš model. Druhá, vnější koule, obepínala kouli vnitřní a měla vnější poloměr 1,1 m, doplňěk ji zároveň rozdělil na 6 stejně velkých dílů, které se daly mapovaně vysítovat. Výsledné oblasti jsou vyobrazeny na **Obr. 28** včetně měřítka. Doplňěk vytvořil i komponenty z ploch a těles. Komponenty pro vokální trakt, kůži a vlasy jsme vytvořili manuálně.



Obr. 28 Prostředí kolem modelu (vlevo) komponenta vlasů a vokálního traktu (vpravo)

5.2 Příprava analýzy a tvorba sítě

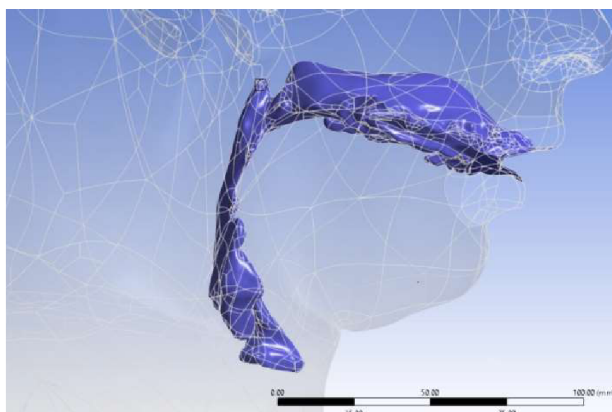
Nyní jsme se přesunuli do prostředí Workbench [63].

5.2.1 Model Materiálu

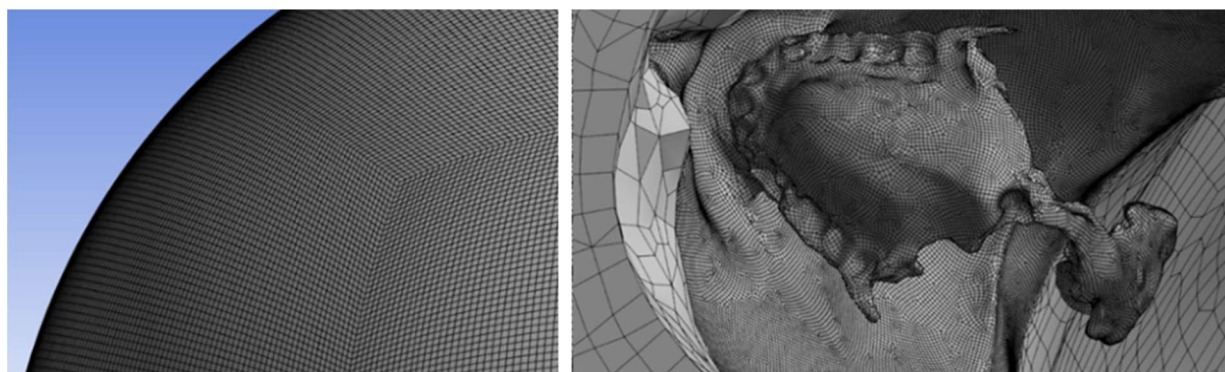
Pro tuto analýzu jsme vytvořenému prostředí přiřadili model materiálu vzduchu, jehož materiálové parametry jsme přebrali ze softwaru ANSYS [63]: teplota 22 °C, hustota 1,125 kg/m³, rychlost zvuku 343 m/s.

5.2.2 Tvorba sítě

Vytvořená síť byla převážně tvořena šestistěnnými prvky sítě nebo pyramidovými lineárními elementy s průměrnou velikostí 10 mm. Pro síť byly použity prvky FLUID30, vyplňující prostor a modelující chování akustické tekutiny, a FLUID130, simulující absorpční účinky tekutiny na hranici vnější kružnice [64, 65] Rovněž jsme zamezili adaptivní dimenzování prvků. Tím bylo zajištěno, že prvky generované sítě se nebudou postupně směrem od středu zvětšovat. Ve vokálním traktu byla nastavena jemnější síť o průměrné velikosti prvku 1 mm, viz **Obr. 29**. Výsledná síť je tvořena 5 222 895 prvky a 5 840 476 uzly. S detailem na zjemněnou je vyobrazena na **Obr. 30**.



Obr. 29 Komponenta ploch tvořící vokální trakt



Obr. 30 Výsledná síť (vlevo) s detailem na zjemnění (v pravo)

5.2.3 Nastavení výpočtu a okrajové podmínky

Dle vzorců (1) a (2) z předmětu Biomechanika IV – bioakustika a dle nejjemnější možné sítě, kterou jsme dokázali vytvořit, jsme určili maximální frekvenci, pro kterou můžeme zaručit správnost výsledků analýzy. Pomocí těchto vypočtených hodnot jsme

$$f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}} = \frac{340}{0,12} = 2833,33 \text{ Hz} \quad (1)$$

$$\lambda_{min} = \text{velikost prvku} \cdot 12 = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 12 = 0,12 \text{ m} \quad (2)$$

definovali pásmo frekvencí harmonické analýzy od 0 do 2800 Hz s krokem 100 Hz, což dalo vzniku pásmu, které zároveň obsahuje řečové frekvence a odpovídá akustickému kritériu hustoty sítě pro lineární elementy [66, 67]. Dále jsme celou oblast stanovili jako akustický region.

| | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Vokální trakt (akust. Impedance) | 83666 kgm ⁻² |
| Kůže (absorpční koeficient) | 0,03 |
| Vlasy (absorpční koeficient) | 0,4 |

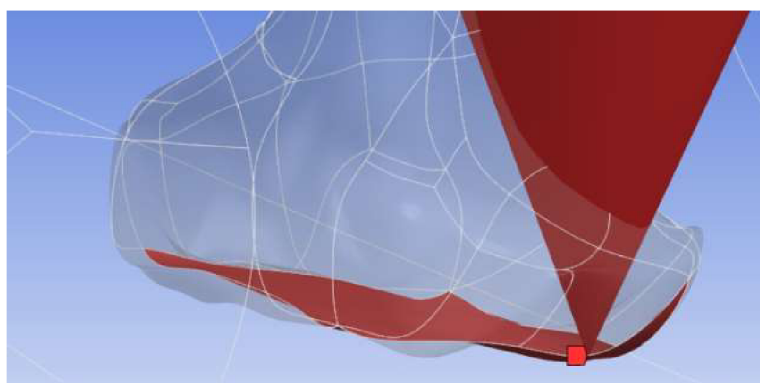
Komponenty jsou shrnuty v Tab. 1 Tabulka hodnot akustické impedance a absorpčního koeficientu

Tab. 1 Tabulka hodnot akustické impedance a absorpčního koeficientu

Akustickou impedanci jsme stanovili pro všechny plochy komponent vokálního traktu, zatím co pro plochy reprezentující kůži a vlasy jsme použili příslušný koeficient tlumení.

Buzení jsme aplikovali na plochu hlasivkové štěrbiny, viz **Obr. 31**. Tato plocha byla buzena akustickou rychlostí 2,4 mm/s, která podle přepočtu (3) pro rovinnou vlnu, kdy je akustická rychlost a tlak ve fázi, odpovídá hodnotě tlaku jednoho pascalu [28].

$$P = Z \cdot v \quad (3)$$



Obr. 31 Plocha reprezentující hlasivky

Poslední úpravou před spuštěním analýzy byla provedena úprava vnější hranice. Jelikož velká část prvků, které jsou na hranici výpočtové oblasti, neměly své uzly přesně na poloměru 1,1 m, a tím pádem byly tyto uzly buď mimo oblast, anebo těsně pod

```
1 Polomer=1100
2
3 /PREP7
4 alls
5 csys,2
6
7 NSEL,S,loc,x,Polomer-1,Polomer+1
8 NMODIF,all,Polomer,
9
10 csys,0
11 alls
12
13
14 /SOLU
```

Obr. 32 Příkazy k posunutí uzlů na hranici

povrchem, nelze na ně aplikovat podmínku Absorption elements, a tím pádem je použit jako nekonečné prvky. Proto jsme do analýzy přidali příkazový soubor, který tyto uzly posouvá na požadovanou hranici poloměru, viz **Obr. 32**.

6. Interpretace výsledků analýzy

Řešení harmonické analýzy trvalo kolem 50 hodin na počítači s parametry v Tab. 2.

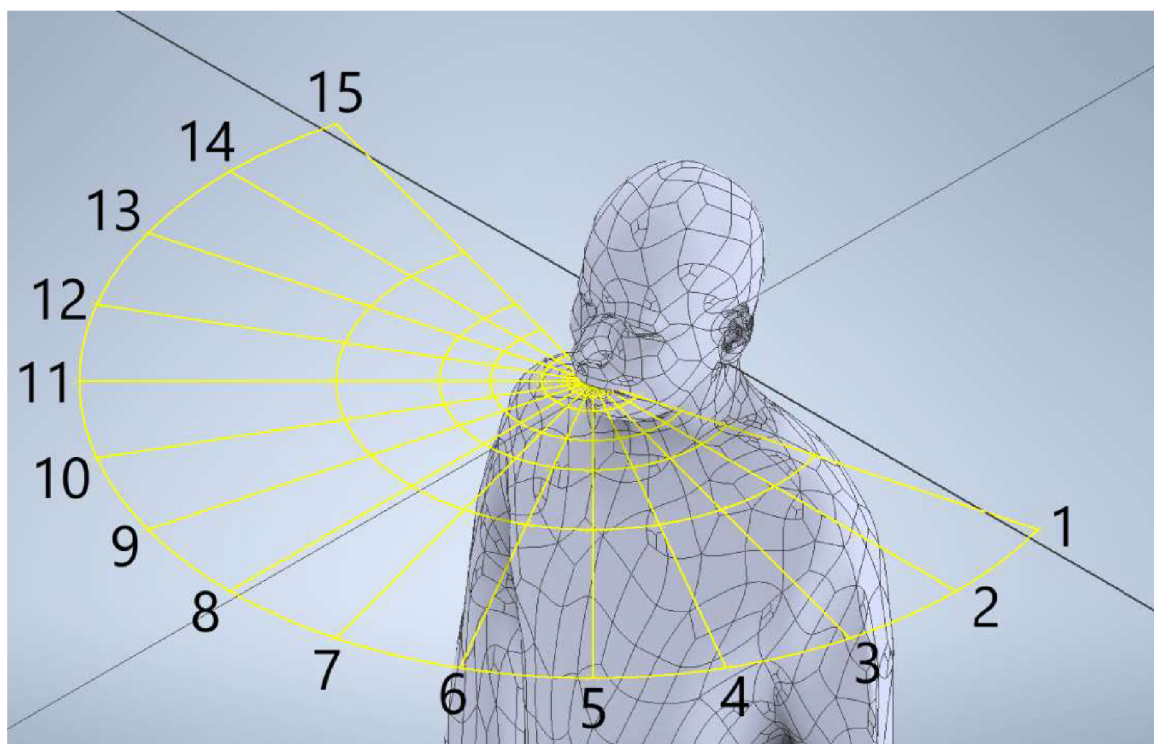
Tab. 2 Tabulka parametrů počítače použitého pro výpočet

| | |
|----------------|--|
| Procesor | Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v4 @ 2.20 GHz |
| Paměť | 128 GB |
| Disk | Western Digital Black 8 TB |
| Grafická karta | NVIDIA Quadro M6000 24 GB |

Po dokončení analýzy jsme získali data hodnot akustického tlaku v závislosti na frekvenci pro vybrané body, které jsou vyobrazeny na **Obr. 33**. Tyto body byly dány dvěma parametry: vzdáleností od úst (poloměrem) a úhlem od mediální roviny, podobně jako v práci Ing. Batelky [68]. Vzdálenost od středu úst byla odstupňována poloměry 0, 25, 50, 100, 200, 300, 500 a 1000 mm.

Úhel 0° od mediální roviny souhlasí s úsečkou k bodu 8 (viz **Obr. 33**). Ostatní úhly jsme oproti této rovině otáčeli o násobky 15° do hodnoty $\pm 105^\circ$ (doleva -105° a doprava $+105^\circ$).

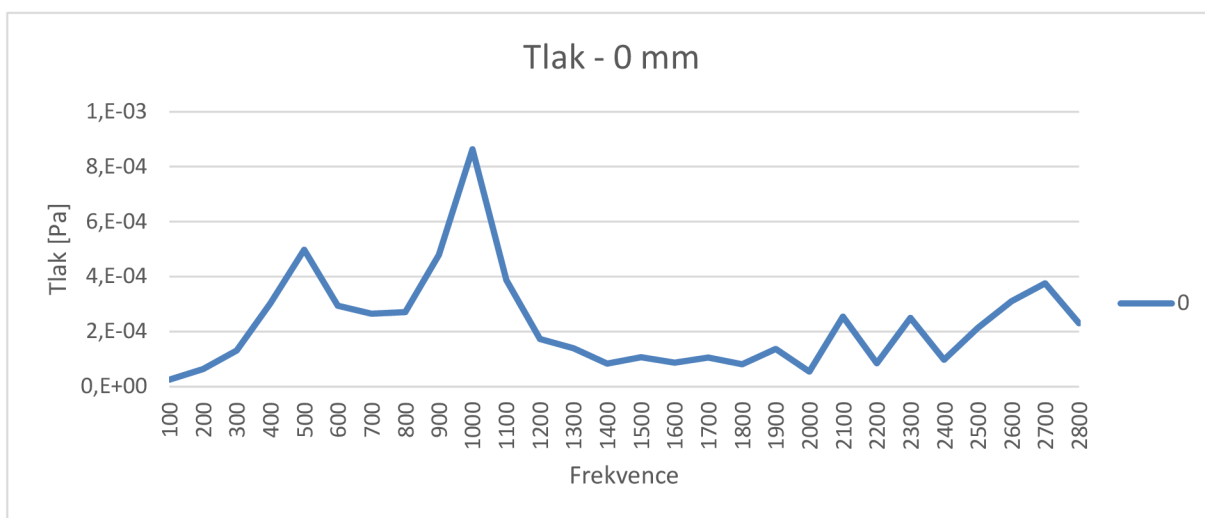
Pro vzniklé body jsme získali souřadnice ve směru os x a y . Tlak byl vyhodnocován v nejbližším uzlu k dané souřadnici.



Obr. 33 Vybrané body analýzy v prostoru před ústy

6.1 Vyhodnocení ve výchozím bodě ve středu úst

První graf (**Obr. 34**) vyobrazuje závislost mezi akustickým tlakem a frekvencí. Z tohoto grafu můžeme vyčíst polohu formantů. Při porovnání s prací [69], která se mimo jiné zabývala i modální analýzou, byl použit stejný model hlavy s vokálním traktem. Při srovnání těchto dvou prací můžeme říct, že hodnota prvního formantu (531,6 Hz) se téměř shoduje a hodnoty druhého formantu (1179 Hz) je o zhruba 100 Hz posunuta. To je dáno hrubým výpočetním krokem, kvůli časové náročnosti.



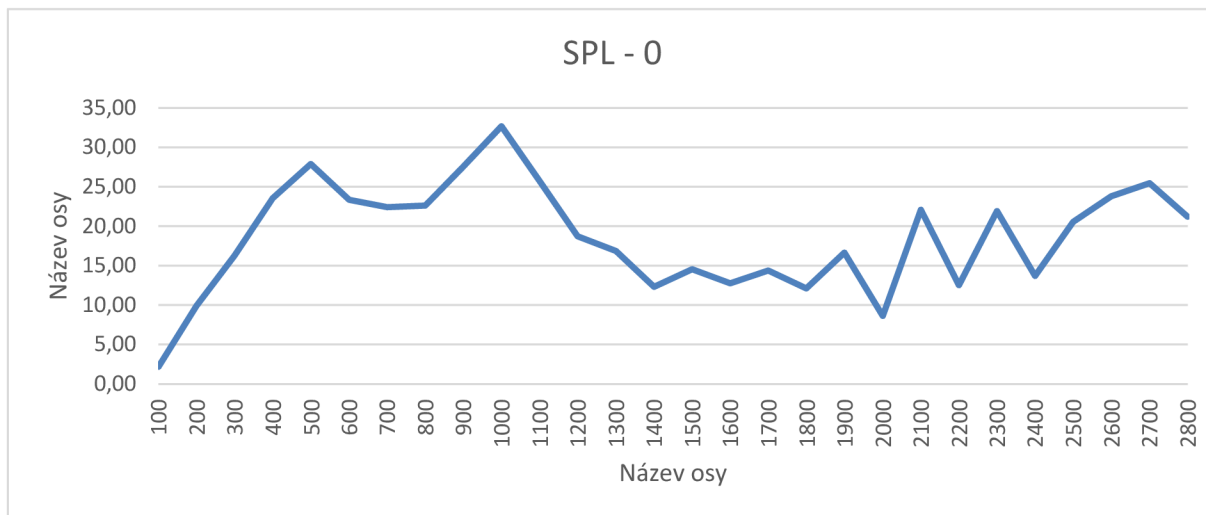
Obr. 34 Závislost akustického tlaku na frekvenci pro bod ve středu úst

Pro další výsledky jsme dle vzorce (3) vypočetli hodnotu amplitudy tlaku, kde proměnná p_r je hodnota reálné složky naměřeného tlaku a p_i je hodnota imaginární složky naměřeného tlaku. Tuto hodnotu jsme dosadili do vzorce (4), kde p_0 je hodnota referenčního akustického tlaku, která se udává jako práh slyšení 2×10^{-5} Pa [66], a vypočetli jsme hladinu akustického tlaku (SPL).

$$p = \sqrt{p_r^2 + p_i^2} \quad (3)$$

$$SPL = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (4)$$

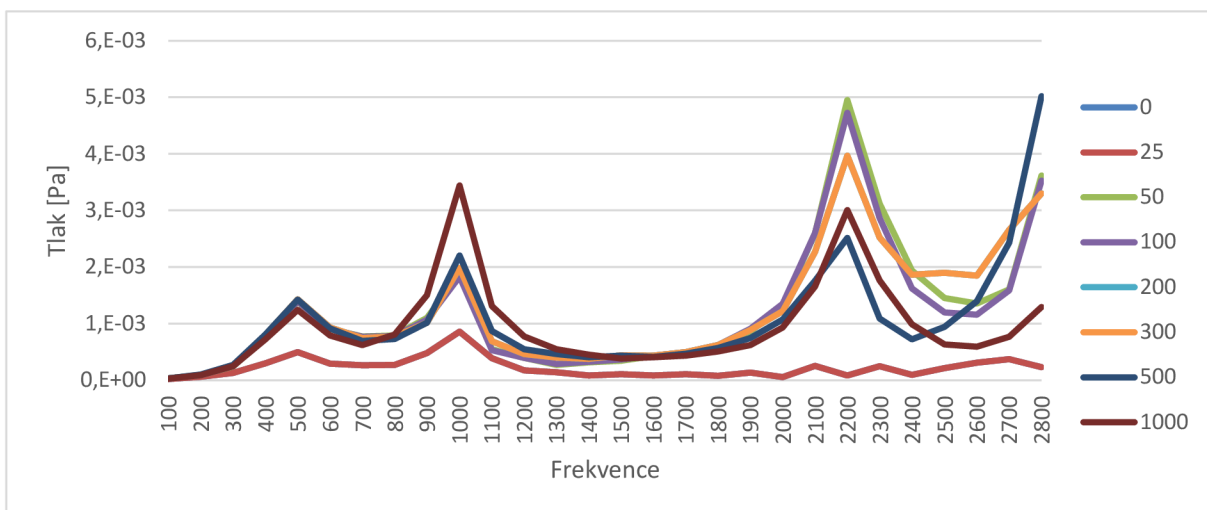
Hladina akustického tlaku v závislosti na frekvenci pro bod v ústech je vyobrazena na **Obr. 35**. Průběhy SPL v ostatních bodech jsou vyobrazeny v Příloha 2 – Průběh závislosti SPL na frekvenci.



Obr. 35 Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci pro bod ve středu úst

6.2 Frekvenční závislost nenulových bodů

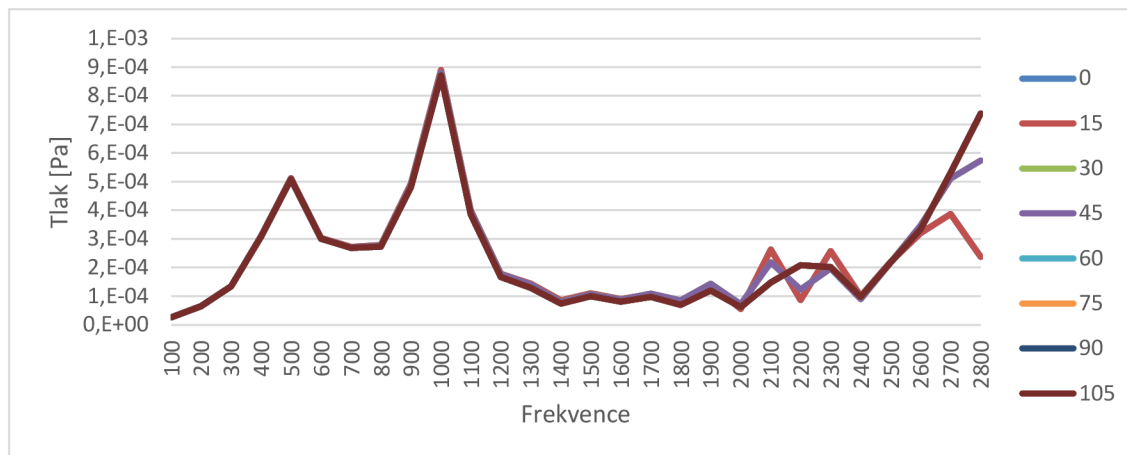
První graf ukazuje závislost akustického tlaku na frekvenci bez pootočení pro různé vzdálenosti. Zde můžeme pozorovat útlum v jednotlivých bodech v závislosti na narůstající vzdálenosti od počátečního bodu, zvláště pro vyšší frekvence. Výjimkou jsou body ve vzdálenosti 0 mm a 25 mm. V těchto dvou bodech jsme naměřili nejnižší, téměř identické, hodnoty. To může být způsobeno velkou citlivostí výsledků kolem výstupu z úst do volného prostoru na vyhodnocovací pozici.



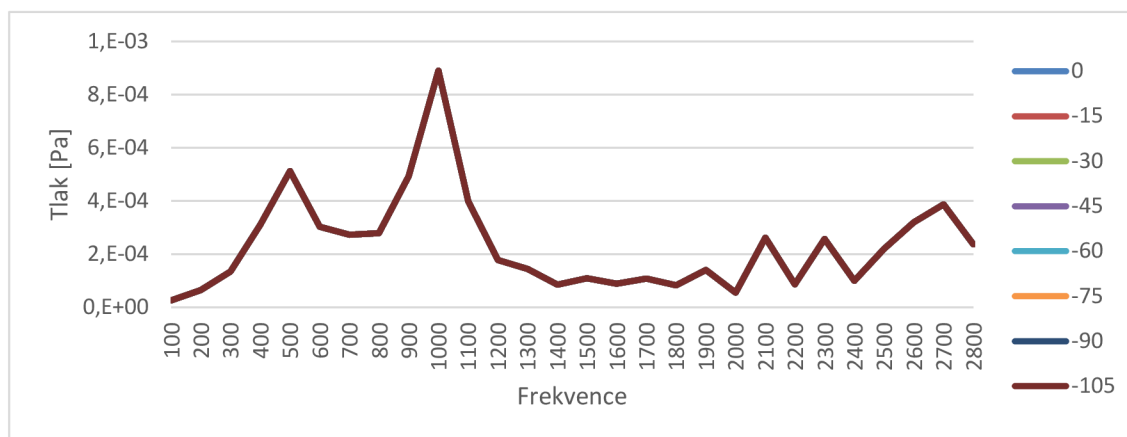
Obr. 36 Závislost akustického tlaku na frekvenci pro různé vzdálenosti 0 – 1000 mm

První dvojice grafů (**Obr. 37** a **Obr. 38**) ukazuje závislost akustického tlaku ve vzdálenosti 25 mm, kde došlo k spíše menším odrazům od částí těla. Průběh je téměř

identický pro všechny body, až na frekvence 2000–2800 Hz, kde vznikly menší odchylky. Tato změna průběhů se týká dvojice bodů pod úhlem 30° a 45° a bodů 60°–105°. Pro tyto body došlo zřejmě k většímu odrazu akustických vln od těla než pro zbylé body, jež mají identický průběh s minimálními odlišnostmi.



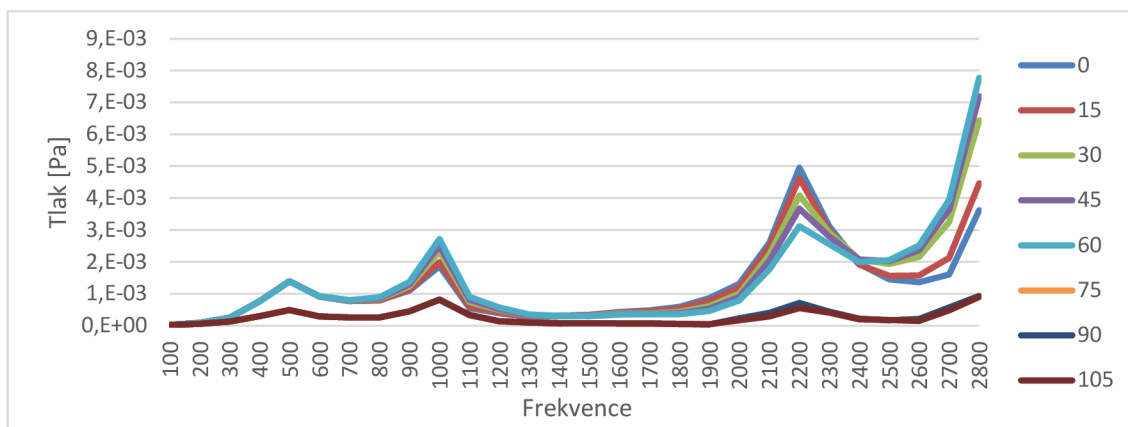
Obr. 37 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 25 mm pro 0° – 105°



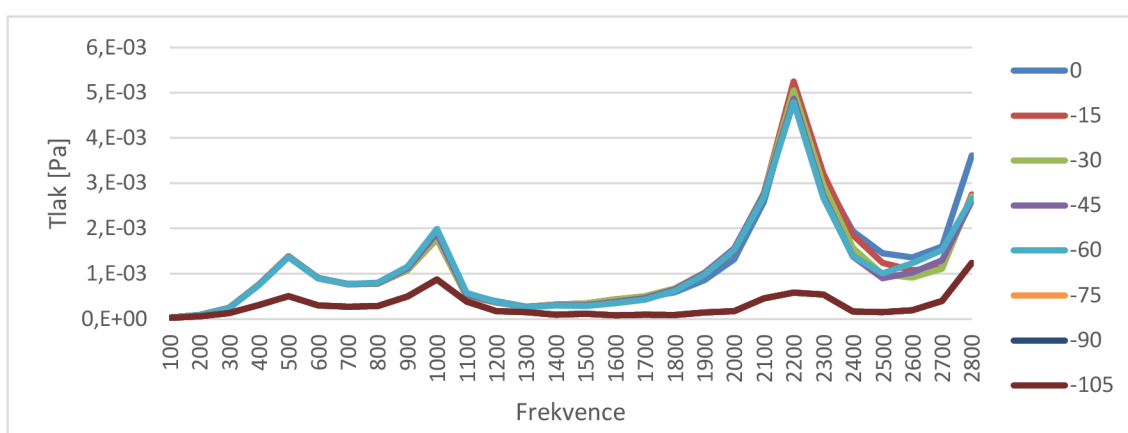
Obr. 38 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 25 mm pro 0° – -105°

Pro body vzdálené od počátku 50 mm jsme vyobrazili průběh závislosti na **Obr. 39** a **Obr. 40**. Na prvním obrázku jsme mohli vidět výraznější rozdíly mezi průběhy. Je vidět, že se vzrůstajícím úhlem od mediální roviny klesá amplituda akustického tlaku, obzvláště pro vyšší frekvence. Výrazně klesá pro úhly 90° a -105°, zřejmě kvůli tomu, že u vyšších frekvencí nedochází k tak výraznému ohybu vlnění kolem těla.

Pro body pod úhly 0°–105° (**Obr. 40**) je průběh velice obdobný, až na to, že nárůst nebyl tak velký a rozdíly mezi úhly 0° – -75° tak výrazné jako u kladných úhlů.

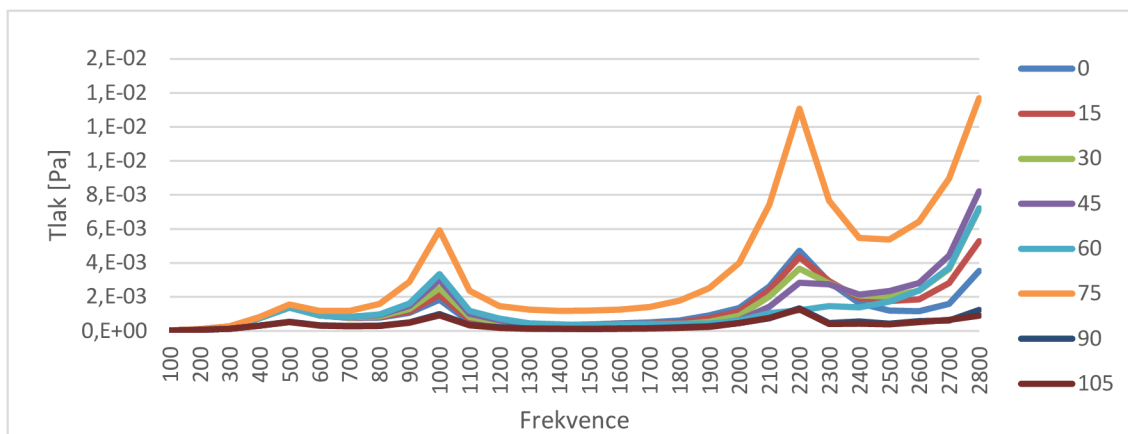


Obr. 39 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 50 mm pro $0^\circ - 105^\circ$

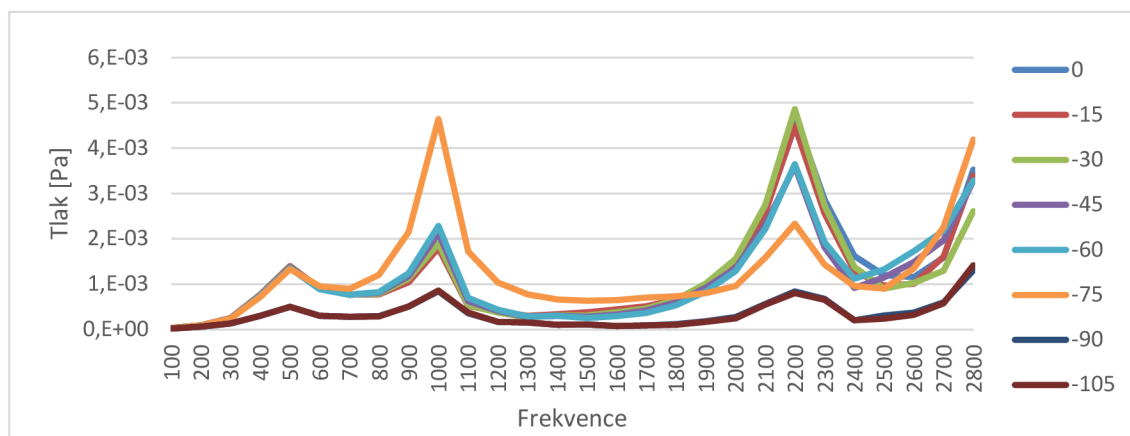


Obr. 40 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 50 mm pro $0^\circ - -105^\circ$

Průběh závislosti bodů ve vzdálenosti 100 mm je na **Obr. 41** a **Obr. 42**. Obecně je průběh velmi podobný jak ve vzdálenosti 50 mm, až na úhel 75° , jehož tlaky převyšují ostatní a mění se i charakter jejich průběhu. U úhlu -75° , se výrazně mění amplitudy formantů a pro hodnotu 2500 Hz klesne tlak na nejmenší hodnotu. Srovnáním těchto dvou grafů můžeme vidět vliv odrazů od těla kolem frekvence 2200 Hz.

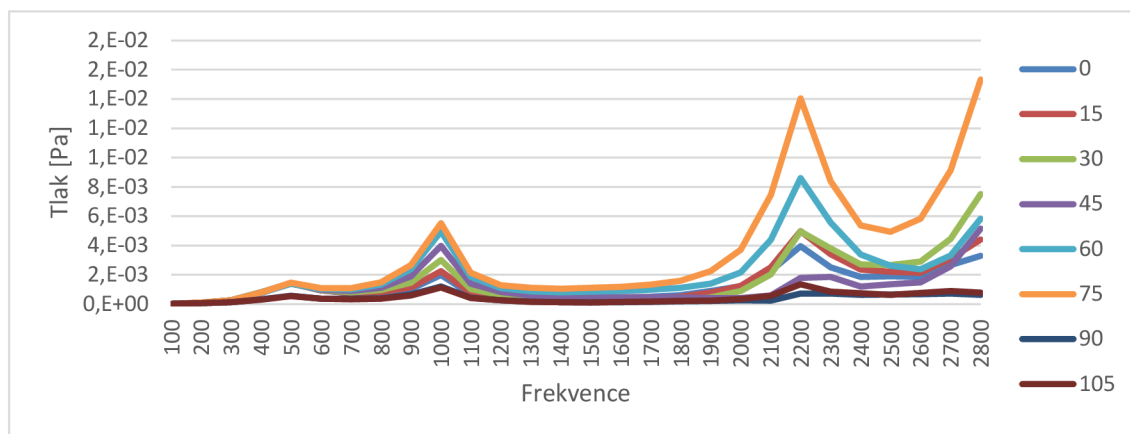


Obr. 41 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 100 mm pro $0^\circ - 105^\circ$

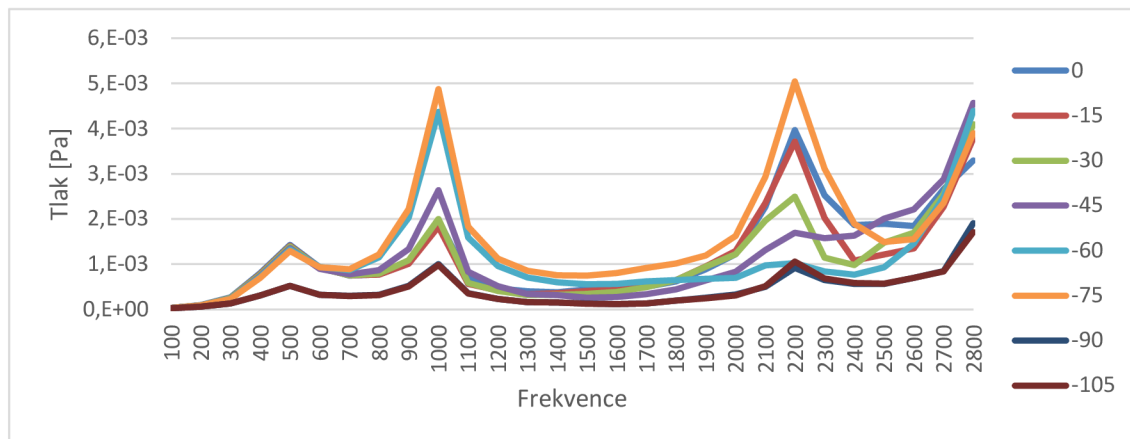


Obr. 42 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 100 mm pro 0° – -105°

Ve vzdálenosti 200 mm je na pravé straně osoby (v kladných úhlech) vidět vliv odrazů od těla kolem úhlů 60° a 75°, viz **Obr. 43** a **Obr. 44**.



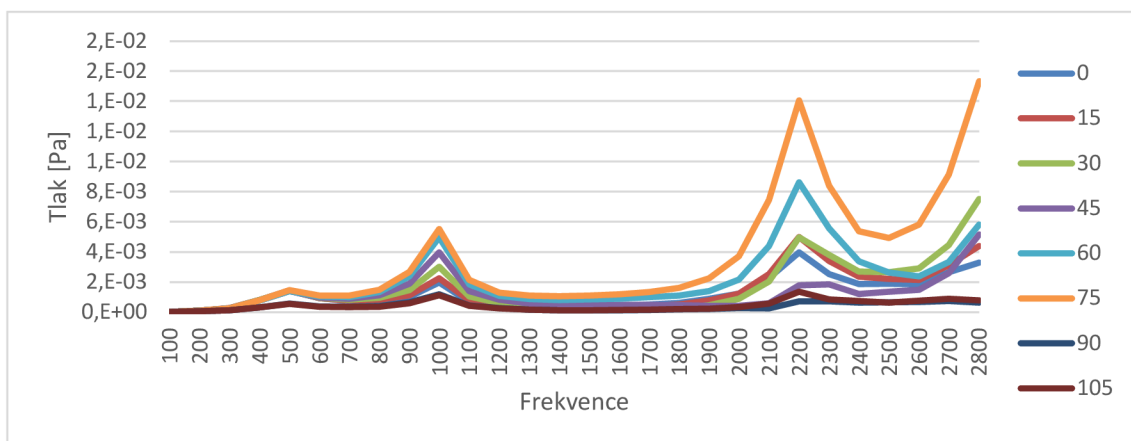
Obr. 43 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 200 mm pro 0° – 105°



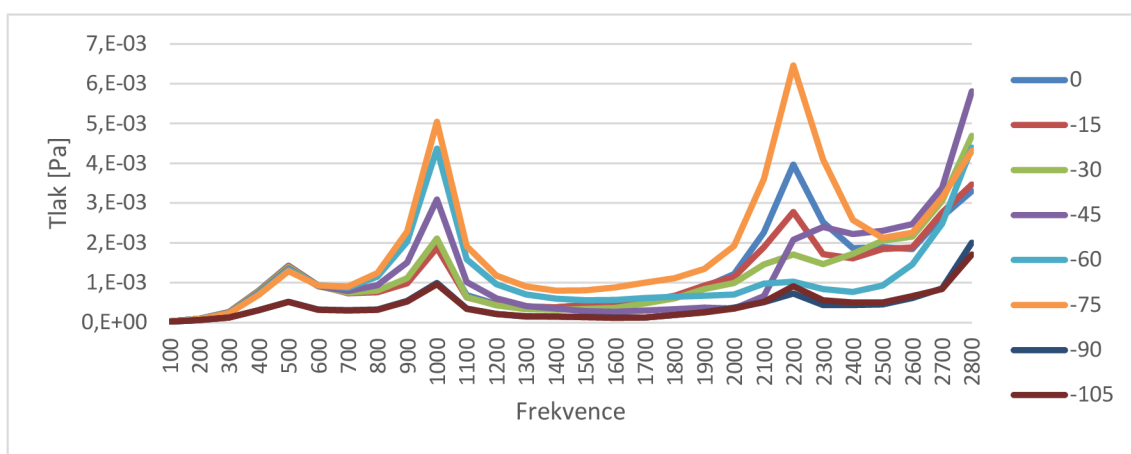
Obr. 44 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 200 mm pro 0° – -105°

Totéž se děje i ve vzdálenosti 300 mm viz **Obr. 45** a **Obr. 46**.

Vlevo od osoby (v záporných úhlech) jsou ve stejných vzdálenostech na stejných úhlech vidět odrazy ovlivňující amplitudy tlaku na 1000 Hz. Vlevo jsou mimo to kolem frekvence 2200 Hz ovlivněny i tlaky na -45° a -75°.

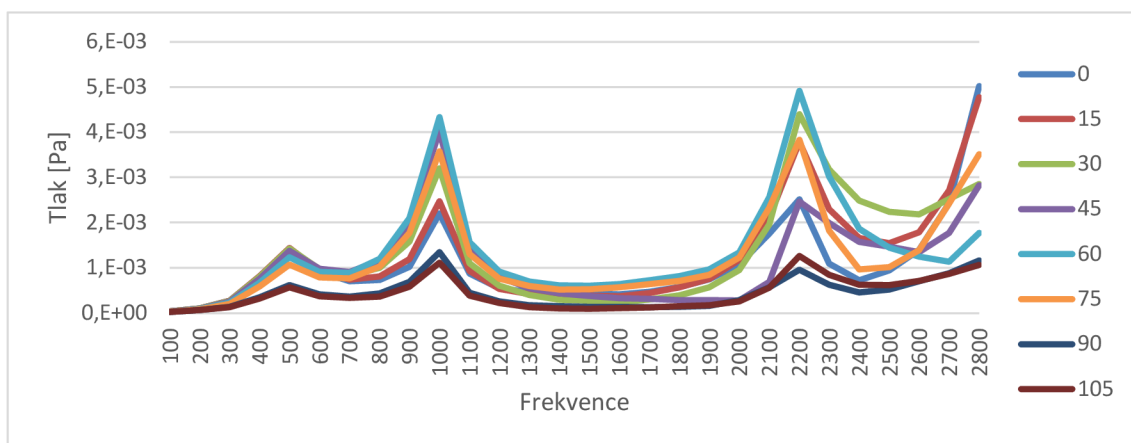


Obr. 45 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 300 mm pro $0^\circ - 105^\circ$

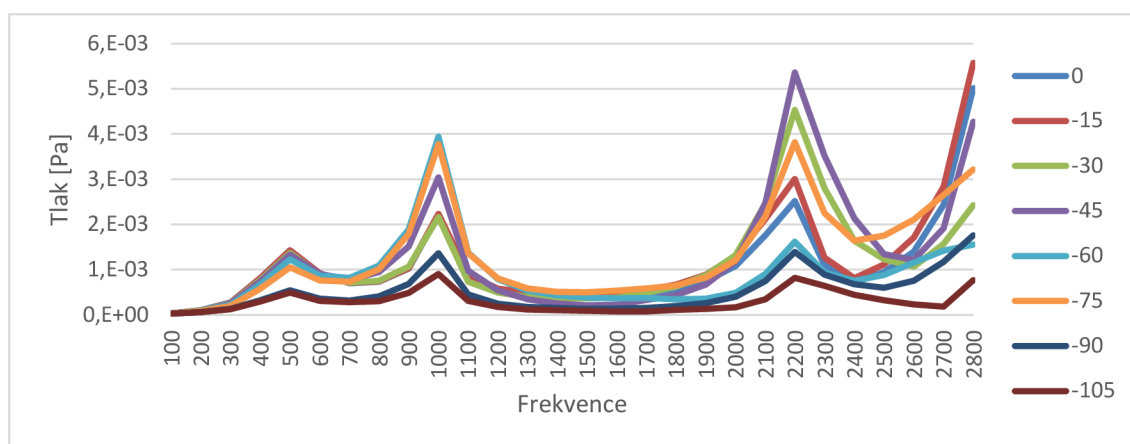


Obr. 46 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 300 mm pro $0^\circ - -105^\circ$

Pro body ve vzdálenosti 500 mm se vliv odrazů zmenšuje, což je vidět na menších rozestupech mezi křivkami na **Obr. 47** a **Obr. 48**, ale také i pro vzdálenost 1000 mm na **Obr. 49** a **Obr. 50**.

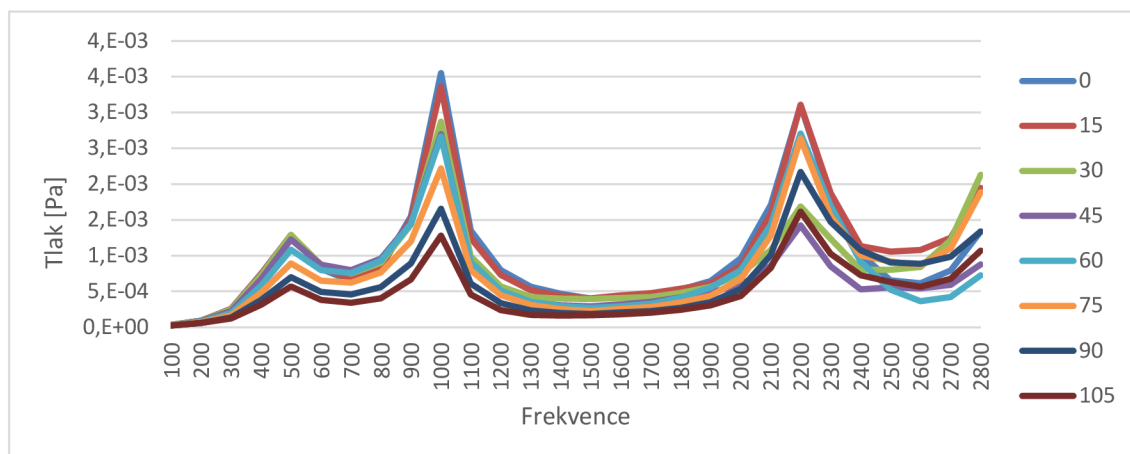


Obr. 47 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 500 mm pro $0^\circ - 105^\circ$

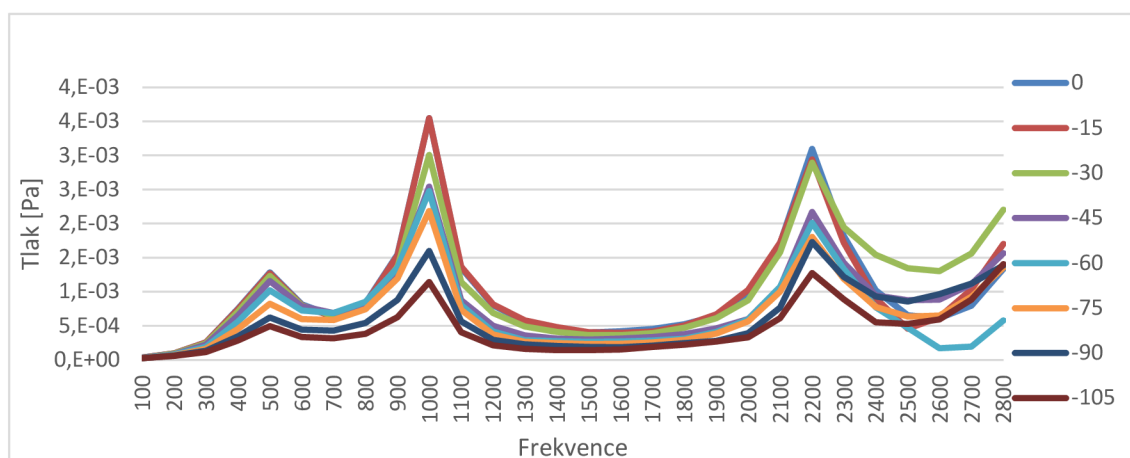


Obr. 48 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 500 mm pro 0° – -105°

Pro body ve vzdálenosti 1000 mm jsme vykreslili průběh na **Obr. 49** a **Obr. 50**. Zde jsme poprvé zaznamenali, že hodnota akustického tlaku byla vyšší při frekvenci 1000 Hz než při frekvenci 2200 Hz. Také zde můžeme pozorovat, že hodnota klesá v závislosti na tom, jak moc se body pootáčí od nulového bodu. Průběhy jsou téměř totožné, až na průběhy bodů s úhlem -30° a -60° od frekvence 2300 Hz.



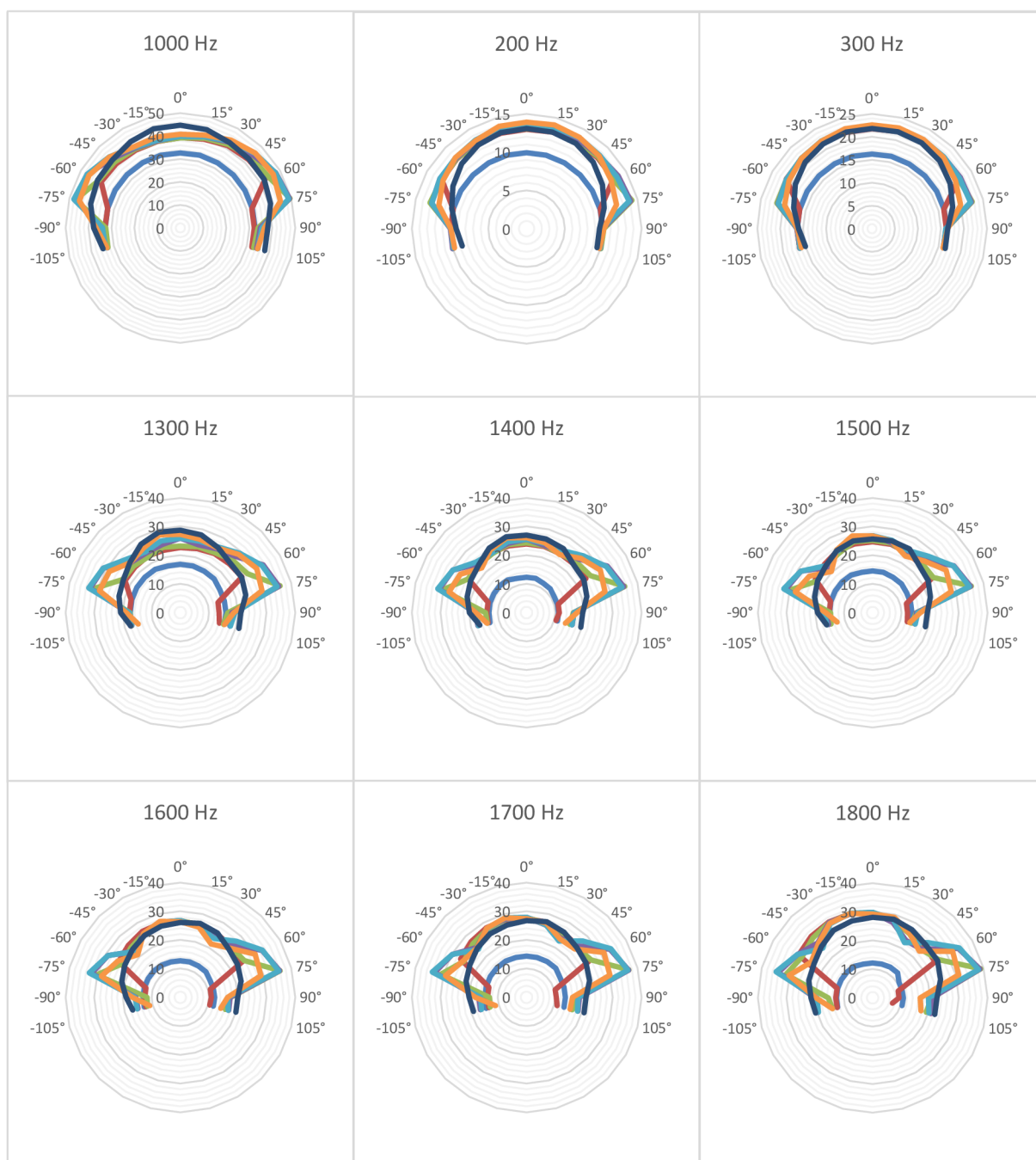
Obr. 49 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 1000 mm pro 0° – 105°

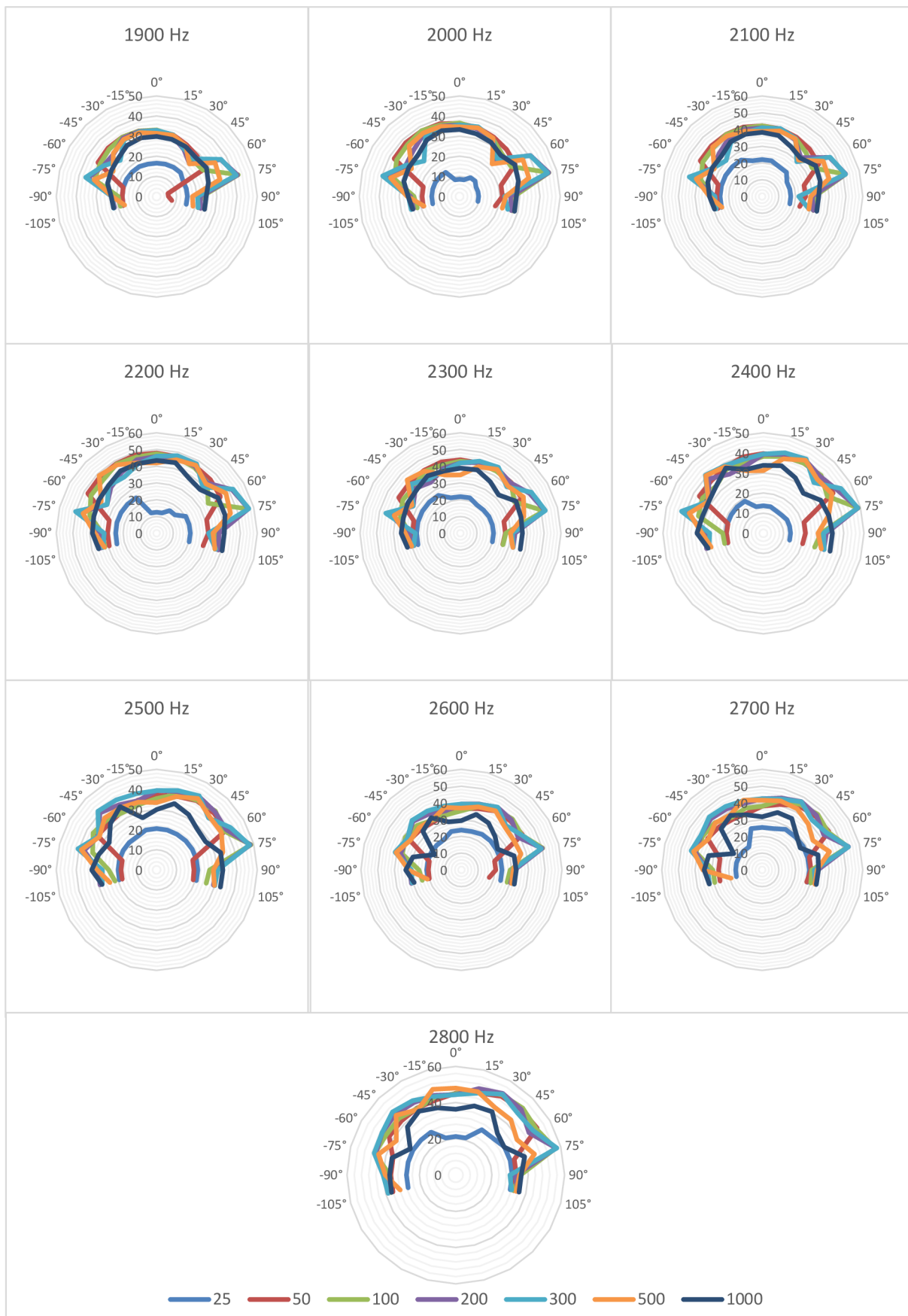


Obr. 50 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 1000 mm pro 0° – -105°

6.3 Směrnost šíření hladiny akustického tlaku

Akustický vzruch se v dostatečné vzdálenosti od bodového zdroje v nekonečném homogenním izotropním prostředí šíří podélným vlněním v kulových vlnoplochách [28]. To jsme se snažili přibližně zachytit pomocí polárních grafů, na kterých byla vyobrazena směrnost hladiny akustického tlaku v závislosti na frekvenci. Tyto grafy jsou rozděleny v jedné rovině postupně pro všechny vzdálenosti a pro všechny frekvence. Grafy jsou vyobrazeny na **Obr. 51**.





Obr. 51 Směrové diagramy

Pro první frekvenci 100 Hz můžeme pozorovat průběh s nejmenšími naměřenými hodnotami hladiny akustického tlaku (SPL). Průběh závislosti je spíše hladký, bez výrazných změn, kromě bodů s úhlem $\pm 75^\circ$ ve všech vzdálenostech kromě 25 mm a 1000 mm. Jedinou výjimkou jsou body ve vzdálenosti 50 mm, kdy ke skokové změně dochází už při úhlu $\pm 60^\circ$.

Pro frekvenci 200 Hz můžeme pozorovat růst naměřených hodnot o 10 dB a přiblížení průběhů, kromě bodů ve vzdálenosti 25 mm.

Tvar toto průběhu trval až do frekvence 900 Hz, kdy se začaly přibližovat frekvenci druhého formantu, a mohli jsme pozorovat zúžení rozptylu naměřených hodnot, kromě vzdáleností 25 mm a 1000 mm. Tvar průběhu těchto hodnot zůstal stejný.

Od 1000 Hz se průběh nijak více neměnil, až na vzdálenost 1000 mm, jejíž průběh již nebyl hladký, ale s malými změnami pro různé úhly a různé frekvence.

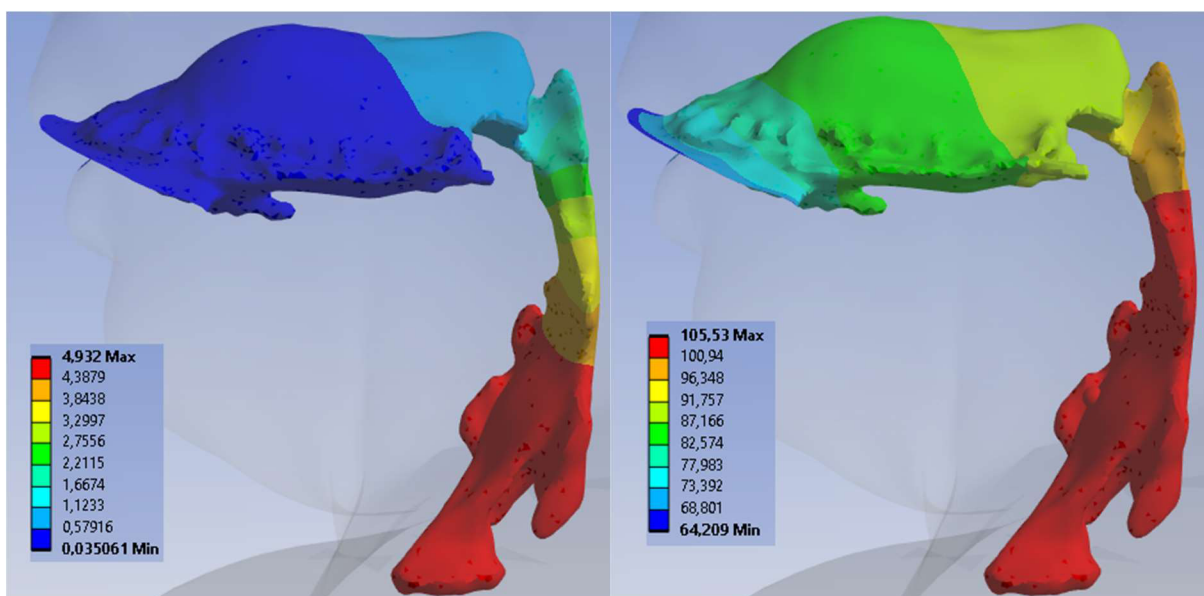
Od frekvence 1500 Hz jsme pro úhel 30° zaznamenali postupný propad hodnot, jenž se s narůstající frekvencí navyšoval.

Poslední velkou změnou byla změna průběhu pro body ve vzdálenosti 25 mm, která započala při frekvenci 1800 Hz. Pro další frekvence jsou průběhy bez dalších větších změn. A největší hodnotu hladiny akustického tlaku jsme mohli naměřit v bodě ve vzdálenosti 300 mm pod úhlem 75° .

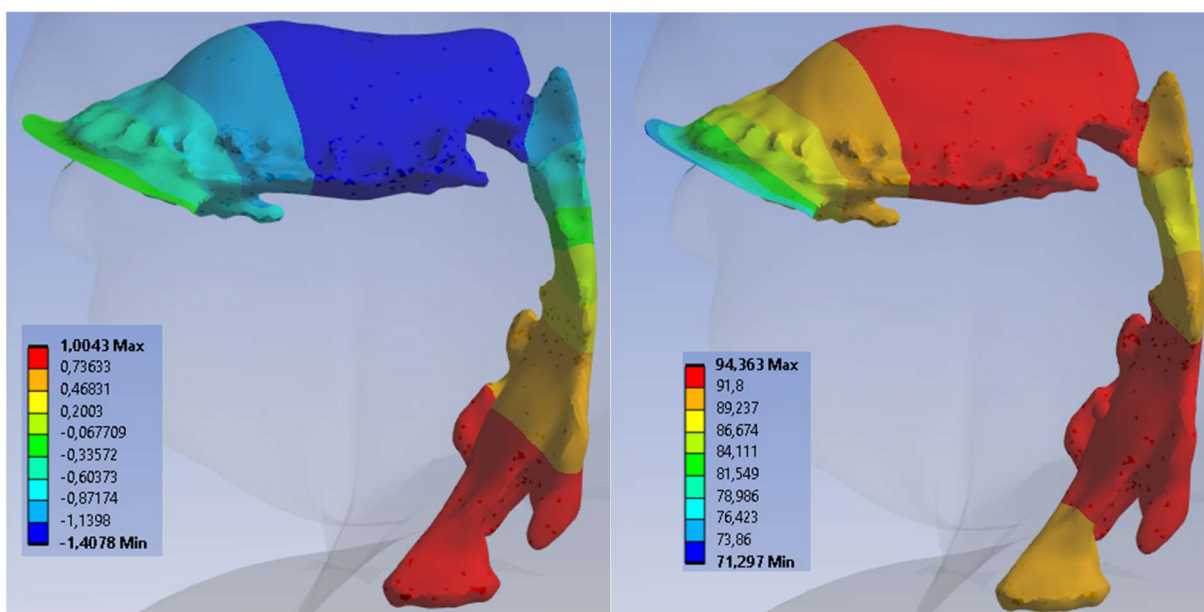
6.4 Akustické veličiny ve vokálním traktu a na těle

Zaměříme se na akustické tlaky a hladinu akustického tlaku ve vokálním traktu, a to pro vybrané frekvence prvního (500 Hz) a druhého (1000 Hz) formantu, protože ty ovlivňují srozumitelnosti samohlásky [70], a pro frekvenci 2800 Hz.

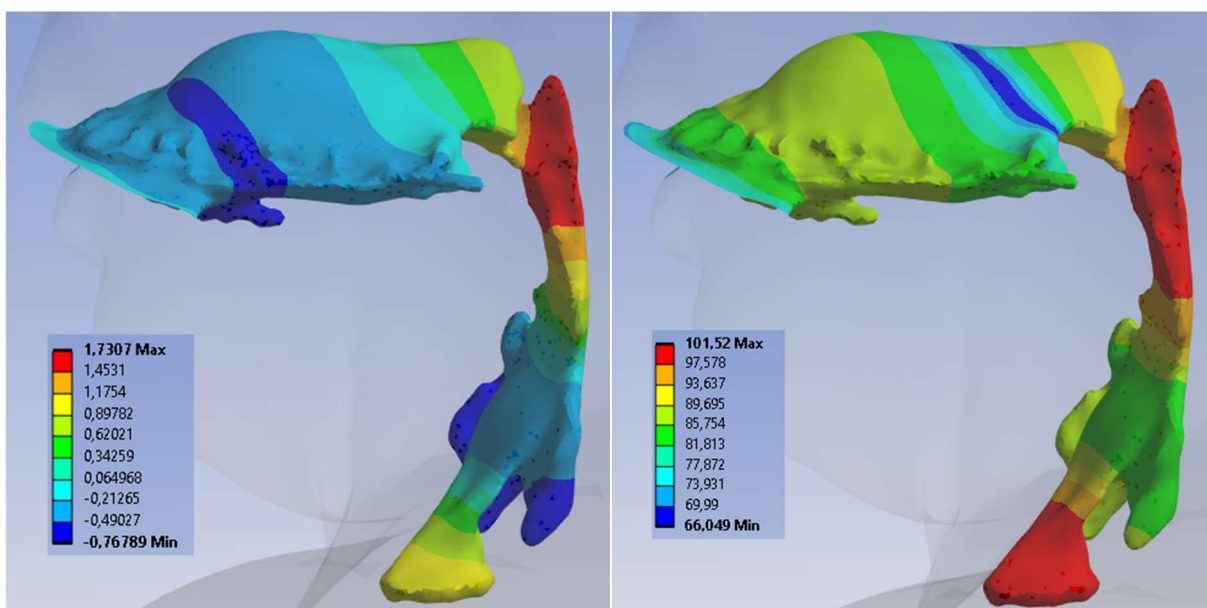
Na **Obr. 52** jsme vyobrazili akustické tlaky a SPL pro frekvenci 500 Hz, pro frekvenci 1000 Hz na **Obr. 53** a 2800 Hz na **Obr. 54**. Hodnoty SPL na výstupu z úst se u prvního formantu pohybují kolem 68 dB a u druhého kolem 78 dB. Srovnáme-li tyto hodnoty s grafem na **Obr. 35**, vidíme, že jsou zhruba dvakrát vyšší. To je způsobeno velkými rozdíly v hlasitosti (nebo v hodnotě akustického tlaku) na výstupu z úst, kde je řešení silně nelineární.



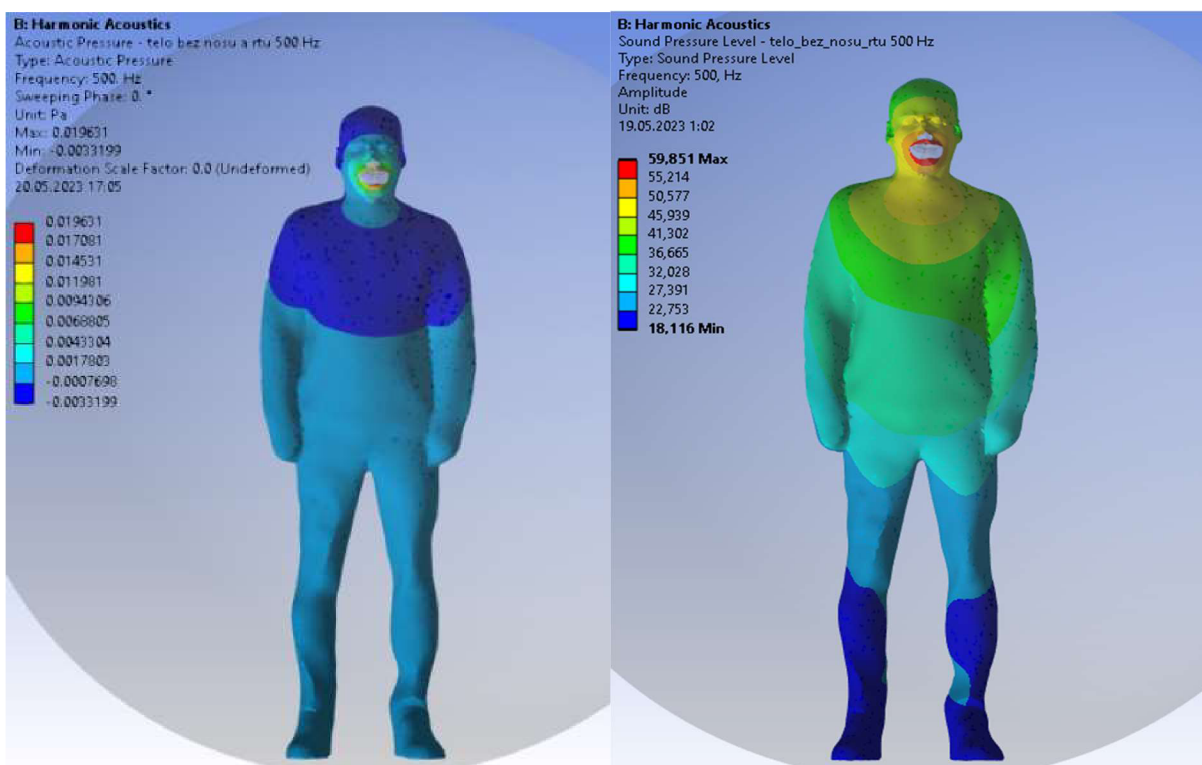
Obr. 52 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) ve vokálním traktu (500 Hz)



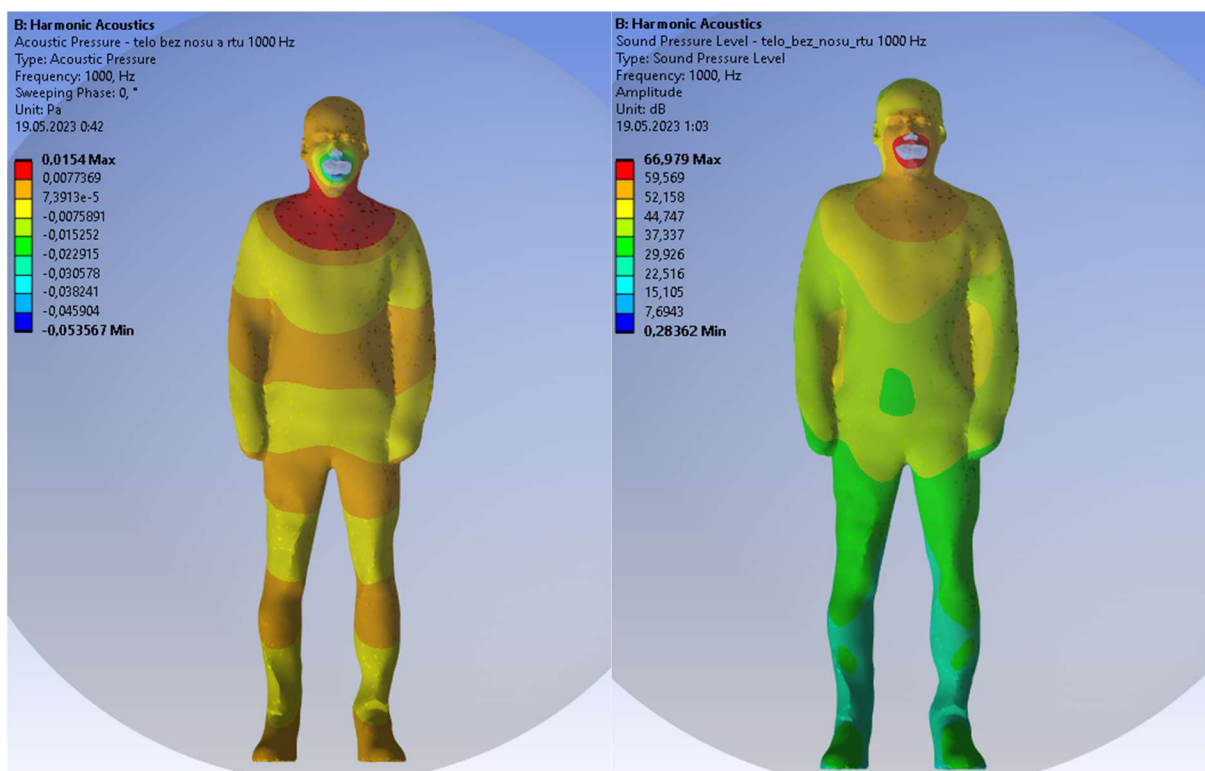
Obr. 53 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) ve vokálním traktu (1000 Hz)



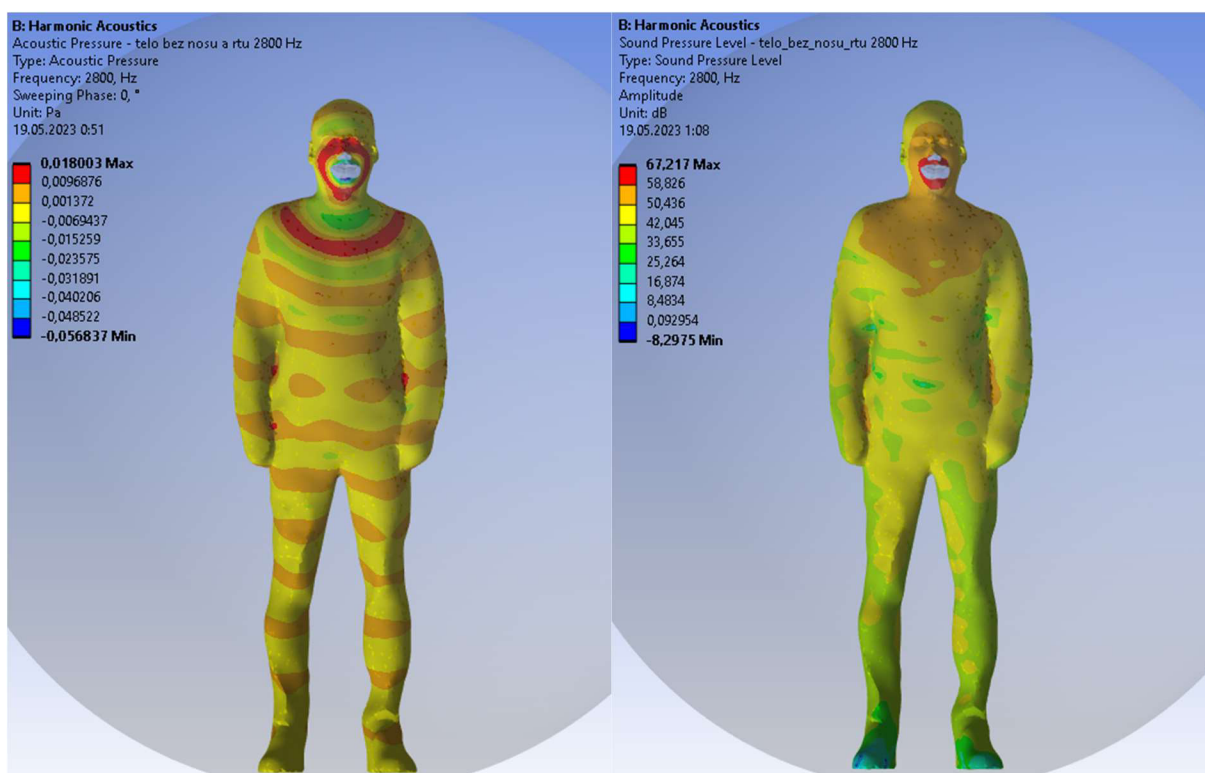
Obr. 54 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) ve vokálním traktu (2800 Hz)



Obr. 55 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) na těle bez rtů a nosu (500 Hz)



Obr. 56 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) na těle bez rtů a nosu (1000 Hz)



Obr. 57 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) na těle bez rtů a nosu (2800 Hz)

Na **Obr. 55**, **Obr. 56** a **Obr. 57** můžeme vidět, jak se hlas šíří mimo lidské tělo a zároveň, že kromě rtů a spodní části nosu, které jsou ze zobrazení odebrány, se nachází maximum

v oblasti klíčních kostí a horní části prsních svalů. Od zbytku těla nedochází k tak velkým odrazům, ovšem při vyšších frekvencích se začala objevovat maxima na rukách blízko loktu či zápěstí. Je možné, že při vyšších frekvencích by tyto odrazy byly výraznější. Také je zde vidět, jak od úst k nohám klesá amplituda akustického tlaku a tím i SLP, což je patrné i na obrázcích pro frekvenci 1000 Hz, ovšem pro nejvyšší frekvenci je vidět několik period vln včetně jejich útlumu.

6.5 Srovnání výsledků s literaturou

Obdržené výsledky můžeme srovnat s prací Ing. Batelky [68] a Vampoly et. al [71]. Ing. Batelka [68] využil identický model geometrie hlavy a odlišná lidská těla z otevřených databází. Vampola et. al [71] naměřil formanty při snímání geometrie lidské hlavy, která byla použita v této práci. Všechny práce včetně této použily model geometrie lidské hlavy získané při vyslovování české samohlásky /a:/.

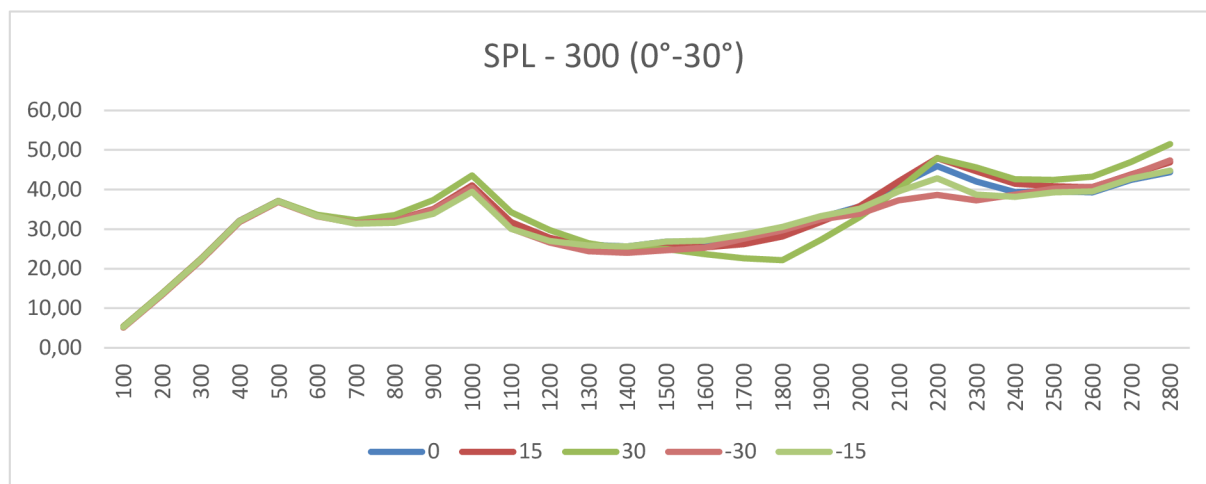
Poněvadž jsme analýzu vyhodnocovali s krokem 100 Hz, frekvence prvního formantu vyšla 500 Hz, což je podobné jako u práce [68], kde frekvence prvního formantu byla 531 Hz. Práce [71] naměřila frekvenci formantu s hodnotou 600 – 840 Hz. Rozdíl může být způsoben použitým buzením: v naší práci je buzení na úrovni hlasivek harmonické, v [71] je měřen lidský hlas s fyziologicky kmitajícími hlasivkami.

Jako frekvenci druhého formantu jsme vypočetli hodnotu 1000 Hz, podobně jako v práci [68]. Práce [71] stanovila frekvenci hodnotu v rozmezí 1100 – 1230 Hz. V naší práci a práci [68] můžeme uvažovat, že se jedná o velmi blízké výsledky, jelikož naše výsledky jsou vždy v celých stovkách hertzů. Odlišnost od práce [71] pak může být způsobena použitím rozdílného frekvenčního kroku a odlišným nastavením akustické impedance pro vokální trakt a zejména polohou bodu, ve kterém došlo k měření hodnot, protože v blízkém poli se řešení rychle mění

S prací [68] jsme dále porovnali směrové diagramy pro frekvence 500 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz a 2000 Hz ve vzdálenosti 200 mm a závislost SPL na frekvenci pro body ve vzdálenosti 300 mm a úhly 0° , $\pm 15^\circ$ a $\pm 30^\circ$. S prací [68] jsme se rozhodli porovnat pouze výsledky ve vzdálenosti 200 mm a výše, jelikož je pravděpodobné, že se počáteční bod v ústech nachází u obou prací jinde a mohlo by dojít k zásadním rozdílům při porovnávání pro menší vzdálenosti.

Nejdříve tedy porovnáme směrové diagramy, kdy diagram pro 500 Hz vykazuje dobrou shodu, až na úhly $\pm 90^\circ$, kdy jsme zaznamenali veliký pokles, ale v práci [68] se neprojevil. Pro následné frekvence došlo k odlišnostem v řádech jednotek dB, které se navyšovaly, když se body začali přibližovat k bodu $\pm 75^\circ$, kde jsme naměřili nejvyšší hodnoty. Toto bylo velmi podobné i pro frekvenci 1500 Hz a 2000 Hz. Pro tyto dva body jsme si mohli povšimnout, že ač byla maxima pro práci [68] naměřena při -90° , pro kladnou hodnotu úhlu tomu tak nebylo, což nesouhlasí s naší prací, což mohlo být způsobeno odlišným pootočením hlavy vůči souřadnicovému systému.

Pro porovnání průběhu závislosti SPL s prací [68] použijeme graf na **Obr. 58**. Při porovnání s prací [68] můžeme z grafu na obrázku 7.18 v práci [68] vyčíst shodu s naší prací (**Obr. 58**) až do frekvence 2200 Hz, kde jsme naměřili růst hodnot, ale v práci [68] nikoliv. Při porovnávání bodů blízkých počátku, kde je velká citlivost analýzy pozorujeme odlišnosti od práce [68]. Obecně ale můžeme tvrdit, že naše práce má shodu s dalšími dřívějšími pracemi, ale pouze v určitém rozmezí bodů a frekvencí. Citlivost výsledků na polohu vyhodnocovacích bodů klesá se vzdáleností od úst, proto byl vybrán bod ve vzdálenosti 300 od úst. V tomto bodě se průběhy blížily jak v poloze formantů, tak i v jejich amplitudách.



Obr. 58 Graf SPL pro vybrané body

7. ZÁVĚR

Rešeršní část práce se věnuje popisu anatomie a fyziologie. Tato kapitola začíná stručným rozdělením anatomie hlasové ústrojí.

V její první části jsme se věnovali popisu plic a průdušnice, posléze jsme se věnovali popisu fonační částí vokálního traktu. Zde jsme věnovali zvláštní pozornost kostře společně se svaly hrtanu včetně hlasivek. Až jsme se dostali k rezonančním dutinám a artikulačním prvkům z nichž jsme se věnovali jazyku. Tuto část jsme zakončili souhrnem fyziologie jednotlivých orgánů a částí těla důležitých pro vznik hlasu.

Druhá kapitola byla věnována vzniku hlasu. Popsali jsme zde teorii zdroje a filtru a Myoelasto-aerodynamickou teorii fonace. Taktéž jsme popsali zvuk generovaný hlasivkami a jeho následné formování, když se šířil rezonančními dutinami. Zároveň jsme zde popsali specifické charakteristiky hlasu a formanty.

Ve třetí kapitole došlo k detailní rešerši modelů popisujících tvorbu hlasu a rovněž modelů šíření hlasu pro různé dimenzionální modely, od 1D až po 3D modely s realistickou geometrií.

Další kapitola je součástí praktické části této práce a popisuje tvorbu modelu založeného na realistické geometrii. Věnovali jsme se zde modelu lidské hlavy s vokálním traktem ze snímků magnetické rezonance a zároveň modelu lidského těla tvořeného pomocí fotogrammetrie s detailním postupem. Vstupními daty pro tvorbu těla byly fotografie doc. RNDr. Jana G. Švece, Ph.D. et Ph.D. V této kapitole jsme taktéž popsali úpravu modelu v různých CAD softwarech, a jejich vzájemné spojení a převedení do formátu vhodného pro použití v analýze s MKP.

Tuto analýzu včetně okrajových podmínek jsme popsali v páté kapitole, rovněž jsme se v ní věnovali tvorbě okolního prostředí a odůvodnění upřednostnění nekonečných prvků před PML vrstvou.

V poslední kapitole jsme se věnovali interpretaci dosažených výsledků, ve kterých jsme hledali frekvence formantů až do 2 800 Hz.

Důležité pro nás byly hodnoty frekvence prvních dvou formantů stěžejních pro srozumitelnost samohlásky, jež jsme pro první formant stanovili na 500 Hz, pro druhý na 1000 Hz. Rovněž jsme ukázali průběh závislosti akustického tlaku pro různé vzdálenosti a natočení, z čehož vyplynulo, že s navyšující se frekvencí hodnoty akustického tlaku rostou, zvláště pak při frekvenci blízké formantům.

Součástí této kapitoly bylo i určení směrovosti šíření akustického tlaku v polárních grafech, z nichž můžeme určit, že hodnota akustického tlaku při úhlu $\pm 75^\circ$ dosahuje výrazně vyšších hodnot, což ukazuje na odrazy v této části těla.

V neposlední řadě jsme obdrželi plochy, od nichž se nejvíce odráží lidský hlas při jeho šíření v okolí lidského těla. Vyobrazili jsme zde vokální trakt pro frekvence formantů a frekvenci 2800 Hz i lidské tělo, kde jsme odstranili rty a spodní část nosu

pro lepší vykreslení těchto odrazových ploch na zbytku těla. Práce jsme zakončili srovnáním našich obdržných výsledků s dalšími pracemi.

SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] ŠVEC, Jan G. *Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu*. B.m., 1996. b.n.
- [2] EMILIO MARTÍN ORTE, Jordi Vigué. *Atlas lidského těla v obrazech*. B.m.: Rebo, 2010. ISBN 9788072348961.
- [3] ČIHÁK, Radomír a Miloš GRIM. *Anatomie 2*. B.m.: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-44788-0.
- [4] *Lung Anatomy - Physiopedia* [online]. [vid. 2022-11-02]. Dostupné z: https://www.physio-pedia.com/Lung_Anatomy
- [5] *Conducting Zone | Boundless Anatomy and Physiology | Course Hero* [online]. [vid. 2022-11-02]. Dostupné z: <https://www.coursehero.com/study-guides/boundless-ap/conducting-zone/>
- [6] FLYNN, William a Paula VICKERTON. *Anatomy, Head and Neck, Larynx Cartilage. StatPearls* [online]. 2022 [vid. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK553185/>
- [7] *Anatomy | Medical School - University of Minnesota* [online]. [vid. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://med.umn.edu/ent/patient-care/lions-voice-clinic/about-the-voice/how-it-works/anatomy>
- [8] *Muscles of the larynx: Anatomy, function, diagram | Kenhub* [online]. [vid. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/muscles-of-the-larynx>
- [9] KLÍMA, Jaromír. *Computational Modelling of Function of Human Vocal Folds*. B.m., 2009. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství.
- [10] DRUGA, Rastislav, Miloš GRIM, Libor PÁČ, Blanka POSPÍŠILOVÁ a Karel SMETANA. *ZÁKLADY-ANONATOMIE-3_Miloš-Grim,-Rastislav-Druga-et-al..pdf*. 2005, 164.
- [11] KUBÍČEK, Radek. *Dynamic Characteristics Obtained From Solution of Simple Vocal Folds Models* [online]. 2016, 81. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?action=detail&zp_id=92416&fid=&rok=&typ=&jazyk=&text=radek+kubicek&hl_klic_slova=0&hl_abstrakt=0&hl_nazev=0&hl_autor=1&str=1
- [12] MATUG, Michal. *Náhradní hlasivky pro generování zdrojového hlasu*. 2015, 147.
- [13] HRADECKÁ, Zuzana. *Fyziologie lidského hlasového ústrojí* [online]. 2007, 1–105. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/77787/prif_m/
- [14] *5.1 Mluvní orgány a jejich funkce* [online]. [vid. 2022-11-11]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/elportal/estud/ff/js07/fonetika/materialy/ch05s01.html>
- [15] GOEL, Alexander N. a Jennifer L. LONG. *The oral cavity. Dysphagia*

- Evaluation and Management in Otolaryngology* [online]. 2018, 5–12. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-56930-9.00002-4
- [16] *Oral cavity: Anatomy, tongue muscles, nerves and vessels / Kenhub* [online]. [vid. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/the-oral-cavity>
- [17] *Nasal cavity: Anatomy, structure, parts, blood supply / Kenhub* [online]. [vid. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/nasal-cavity>
- [18] *Mechanika dýchání – WikiSkripta* [online]. [vid. 2023-02-11]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Mechanika_dýchání
- [19] *Understanding Voice Production - THE VOICE FOUNDATION* [online]. [vid. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://voicefoundation.org/health-science/voice-disorders/anatomy-physiology-of-voice-production/understanding-voice-production/>
- [20] *Physiology / Medical School* [online]. [vid. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://med.umn.edu/ent/patient-care/lions-voice-clinic/about-the-voice/how-it-works/physiology>
- [21] *Phonetics - Trills / Britannica* [online]. [vid. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/phonetics/Trills>
- [22] 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]. 2021. ISSN 18734588. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023
- [23] TOKUDA, Isao. The Source–Filter Theory of Speech. *Oxford Research Encyclopedia of Linguistics* [online]. 2021 [vid. 2023-02-15]. Dostupné z: doi:10.1093/ACREFORE/9780199384655.013.894
- [24] MIŠUN, Vojtěch. *Tajemství lidského hlasu*. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-3499-8.
- [25] *Barva zvuku – WikiSkripta* [online]. [vid. 2023-02-15]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Barva_zvuku
- [26] SCHUTTE, H K a D G MILLER. Folia Phoniatica-f4"fr-separatum Resonanzspieie der Gesangsstimme in ihren Beziehungen zu supra-und subglottalen Druckverll ufen: Konscqenzen ff r die Stimmbildungstheorie. nedatováno.
- [27] *Acoustics – UNED Voice Lab* [online]. [vid. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://unedvoicelab.com/acoustics/>
- [28] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [29] *7.1.3 Barva hlasu* [online]. [vid. 2023-02-19]. Dostupné

- z: <https://is.muni.cz/elportal/estud/ff/js08/fonetika/ucebnice/ch07s01s03.html>
- [30] REZAEI NASSER. *An Introduction to Speech Sciences (Acoustic Analysis of Speech)* [online]. nedatováno [vid. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://irj.uswr.ac.ir/article-1-3-en.pdf>
- [31] GILÁNOVÁ, Tereza. Analysis of compensatory source voice after laryngectomy. 2009, 92.
- [32] DE BOER, Bart a W. Tecumseh FITCH. Computer Models of Vocal Tract Evolution: An Overview and Critique. <http://dx.doi.org/10.1177/1059712309350972> [online]. 2010, 18(1), 36–47 [vid. 2023-02-26]. ISSN 10597123. Dostupné z: doi:10.1177/1059712309350972
- [33] *Akustická syntéza řeči :: Katedra kybernetiky ZČU* [online]. [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.kky.zcu.cz/cs/research-fields/acoustic-speech-synthesis>
- [34] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-887-8.
- [35] PERROTIN, Olivier, Lionel FEUGÈRE a Lionel FEUGÈRE. Perceptual equivalence of the Liljencrants-Fant and linear-filter glottal flow models. *Journal of the Acoustical Society of America* [online]. nedatováno, 2021(2), 1273–1285 [vid. 2023-02-27]. Dostupné z: doi:10.1121/10.0005879i
- [36] RYŠAVÝ, Antonín. Výpočtové modelování funkce lidského vokálního traktu. 2016, 67.
- [37] *Speech production and acoustic properties - Introduction to Speech Processing - Aalto University Wiki* [online]. [vid. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://wiki.aalto.fi/display/ITSP/Speech+production+and+acoustic+properties>
- [38] TOMEČEK, Vojtěch. *VYUŽITÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ PRO MODELOVÁNÍ ŠÍŘENÍ HLASU VOKÁLNÍM TRAKTEM A OKOLO HLAVY ČLOVĚKA* [online]. Brno, 2013 [vid. 2023-03-01]. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/20275/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [39] JACK MULLEN, DAVID M. HOWARD a DAMIAN T. MURPHY. *Vocal Tract Modelling with the 2D Digital Waveguide Mesh* [online]. 2007 [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www-users.york.ac.uk/~dtm3/vocaltractDWM.html>
- [40] *Šíření akustického vlnění – WikiSkripta* [online]. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Šíření_akustického_vlnění
- [41] FANT, G. a M. BAVEGARD. Parametric model of VT area functions: vowels and consonants. *TMH-QPSR* [online]. 1997, 38(1), 001–020 [vid. 2023-03-01].

- Dostupné z: <http://www.speech.kth.se/qpsr>
- [42] FANT, Gunnar. Vocal tract area functions of Swedish vowels and a new three-parameter model. *2nd International Conference on Spoken Language Processing (ICSLP 1992)* [online]. 1992, 807–810. Dostupné z: doi:10.21437/ICSLP.1992-262
- [43] FANT, Gunnar. A new three-parameter model of VT area functions. *ESPRIT BR, SPEECHMAPS*. 1993, 28.
- [44] STORY, Brad H. A parametric model of the vocal tract area function for vowel and consonant simulation. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2005, **117**(5), 3231–3254 [vid. 2023-03-01]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1869752
- [45] ARNELA, Marc a Oriol GUASCH. Two-dimensional vocal tracts with three-dimensional behavior in the numerical generation of vowels. *Citation: The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2014, **135**, 369 [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: doi:10.1121/1.4837221
- [46] ARNELA, Marc. *Demos: FEM simulations of voice* [online]. [vid. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://marcarnela.wordpress.com/demos/#8D>
- [47] ŠVANCARA, Pavel a J HORÁČEK. *NUMERICAL MODELLING OF EFFECT OF TONSILLECTOMY ON PRODUCTION OF CZECH VOWELS /A/ AND /I/* [online]. 2005 [vid. 2023-03-04]. Dostupné z: https://www.isca-speech.org/archive_v0/maveba_2005/papers/mv05_151.pdf
- [48] TAKEMOTO, Hironori, Parham MOKHTARI a Tatsuya KITAMURA. Acoustic analysis of the vocal tract during vowel production by finite-difference time-domain method. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2010, **128**(6), 3724–3738. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.3502470
- [49] ARNELA, Marc, Saeed DABBAGHCHIAN, Oriol GUASCH a Olov ENGWALL. MRI-Based Vocal Tract Representations for the Three-Dimensional Finite Element Synthesis of Diphthongs. *IEEE/ACM Transactions on Audio Speech and Language Processing* [online]. 2019, **27**(12), 2173–2182 [vid. 2023-03-04]. ISSN 23299304. Dostupné z: doi:10.1109/TASLP.2019.2942439
- [50] VAMPOLA, T, A M LAUKKANEN, J HORÁČEK a J G ˇ SVEC. Finite element modelling of vocal tract changes after voice therapy. *Applied and Computational Mechanics*. 2011, **5**, 77–88.
- [51] ARNELA, Marc, Leonardo PEREIRA-VIVAS a Jorge EGEEA. An animated realistic head with vocal tract for the finite element simulation of vowel /a [online]. nedatováno. Dostupné z: doi:10.21437/IberSPEECH.2022-2
- [52] HÁJEK, Petr. *Inovace předmětu Vibrace , hluk a bioakustika o experimentální*

- analýzu šíření hlasu vokálním traktem a okolo hlavy člověka.* nedatováno.
- [53] MARCIÁN, Petr, Ondřej KONEČNÝ, Libor BORÁK, Jiří VALÁŠEK, Kamil ŘEHÁK, David KRPALEK a Zdeněk FLORIAN. *Models in Biomechanics Depending on Gained Data from Ct/Mri and Micro- Ct.* Brno: Brno University of Technology, 2011. ISBN 978-80-214-4302-0.
- [54] *CATIA fórum - Manuál CATIA - Úvod* [online]. [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: <http://www.catia-forum.cz/manual-catia/introduction/>
- [55] *Photogrammetry - an overview | ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/photogrammetry>
- [56] JAY A, Siegeil, PEKKA J. SAUKKO a MAX M. HOUCK. *Encyclopedia of Forensic Sciences | ScienceDirect* [online]. Second. 2013 [vid. 2023-03-22]. ISBN 978-0-122-382166-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123821669/encyclopedia-of-forensic-sciences>
- [57] *Tutorial: Meshroom for Beginners — Meshroom v2021.0.1 documentation* [online]. [vid. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/tutorials/sketchfab/sketchfab.html>
- [58] *Photogrammetry Course: Photoreal 3D with Blender and Reality Capture - Blender Market* [online]. [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://blendermarket.com/products/photogrammetry-course>
- [59] *GOM Inspect Suite – softwarová sada pro metrologii* [online]. [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/software/gom-inspect-suite/>
- [60] *Autodesk ReCap Pro a ReCap Photo - 3D mračna bodů - zpracování* [online]. [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.arkance-systems.cz/produkty/autodesk-recap-pro>
- [61] *Fusion 360 | Cloudový software 3D CAD, CAM, CAE a PCB | Autodesk* [online]. [vid. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- [62] *3D CAD software - DPS Software CZ* [online]. [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: https://www.dps-software.cz/reseni/3d-cad-software/?gclid=Cj0KCQjwxYOiBhC9ARIsANiEIfaiNMlIGi4ohIkHjeqcWc9Oa5XxRG58UuPk8wGMw3lJOqkJ9PGbN-YaAi7gEALw_wcB
- [63] *Ansys Workbench | Simulation Integration Platform* [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>
- [64] *FLUID130* [online]. [vid. 2023-04-29]. Dostupné z: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_FLUID130.html

- [65] 6.3. *Elements for Acoustic Analysis* [online]. [vid. 2023-04-29]. Dostupné z: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/elementselems.html
- [66] *Práh sluchu a sluchové pole – WikiSkripta* [online]. [vid. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Práh_sluchu_a_sluchové_pole
- [67] PRINN, Albert G. A Review of Finite Element Methods for Room Acoustics. *Acoustics 2023, Vol. 5, Pages 367-395* [online]. 2023, **5**(2), 367–395 [vid. 2023-05-23]. ISSN 2624-599X. Dostupné z: doi:10.3390/ACOUSTICS5020022
- [68] BATELKA, Jiří. *VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ ŠÍŘENÍ LIDSKÉHO HLASU VOKÁLNÍM TRAKTEM A V PROSTORU OKOLO TĚLA*. Brno, 2022. Vysoké učení technické v Brně.
- [69] RYŠAVÝ, Antonín. *Výpočtové modelování šíření hlasu okolo hlavy člověka pomocí metody konečných prvků*. B.m., 2018. Vysoké učení technické v Brně.
- [70] TITZE, Ingo R. *Principles of Voice Production*. New Jersey: Englewood Cliffs, 1994. ISBN 0-13-717893-X.
- [71] VAMPOLA, Tomáš, Jaromír HORÁČEK a Jan G. ŠVEC. FE modeling of human vocal tract acoustics. Part I: Production of Czech vowels. *Acta Acustica united with Acustica* [online]. 2008, **94**(3), 433–447. ISSN 16101928. Dostupné z: doi:10.3813/AAA.918051
- [72] *Dýchací soustava – Wikisofia* [online]. [vid. 2022-11-01]. Dostupné z: https://wikisofia.cz/wiki/Dýchací_soustava
- [73] FILIP LEKEŠ. *MODÁLNÍ ANALÝZA MODELŮ HLASÍVEK SE SOUSTŘEDĚNÝMI PARAMETRY* [online]. Brno, 2018. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: doi:10.1109/TAU.1968.1161949

Seznam zkratek a symbolů

| Zkratka | Význam |
|----------|---|
| MEAD | Myoelasto-aerodynamická teorie |
| F1 | První formant |
| F3 | Třetí formant |
| LEA | Electric line analog |
| st. | Století |
| LF model | Liljencrantsův-Fantův model |
| MKP | Metoda konečných prvků |
| 3D | Trojdimenzionální |
| 1D | Jednodimenzionální |
| MRI | Magnetická rezonance |
| CT | Počítačová tomografie |
| ISO | Citlivost snímače fotoaparátu na světlo |
| CPU | Centrální procesová jednotka |
| CAD | Computer aided design |
| PML | Perfectly matched layer |
| SPL | Sound pressure level |

| Symbol | Rozměr | Význam |
|----------------|----------------------|-------------------------|
| P | [Pa] | Tlak |
| Z | [kgm ⁻²] | Akustická impedance |
| v | [ms ⁻¹] | Rychlost |
| p _r | [Pa] | Reálná složka tlaku |
| p _i | [Pa] | Imaginární složka tlaku |
| Log | [-] | Dekadický logaritmus |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Anatomie hlasového ústrojí [72] | 17 |
| Obr. 2 Průduškový strom s plícemi [2]..... | 18 |
| Obr. 3 Kosterní struktura hrtanu [6]..... | 19 |
| Obr. 4 Svalstvo hrtanu [8] | 21 |
| Obr. 5 Anatomická struktura hlasivek [73]..... | 22 |
| Obr. 6 Soustava lidského hlasového ústrojí [24]..... | 24 |
| Obr. 7 Cyklus otevírání a zavírání hlasivek [20]..... | 25 |
| Obr. 8 Schéma teorie zdroje a filtru [1] | 27 |
| Obr. 9 Grafické vyobrazení formulace akustického signálu [1]. | 28 |
| Obr. 10 Proces formování frekvenčního spektra [31] | 29 |
| Obr. 11 Jednohmotný pružinový oscilátor [32]..... | 31 |
| Obr. 12 Ilustrace jednoho z geometrických artikulačních modelů [32] | 32 |
| Obr. 13 Typický průběh cyklu podle LF modelu [35] | 32 |
| Obr. 14 oblast funkce tvořící analogickou řadu trubic [38]..... | 33 |
| Obr. 15 funkce plochy samohlásky s impedančním mapování [39]..... | 34 |
| Obr. 16 Fotografování docenta Jana Švece fotografem MgA. Jiřím Balátem | 38 |
| Obr. 17 Snímky po importování a automatické kontrole..... | 39 |
| Obr. 18 Řídká 3D rekonstrukce z fotografií..... | 40 |
| Obr. 19 Výsledná filtrovaná síť..... | 41 |
| Obr. 20 Chybná síť modelu..... | 42 |
| Obr. 21 Analýza a oprava sítě v programu ReCap..... | 43 |
| Obr. 22 Operace vyplňující otvory pomocí mostů | 43 |
| Obr. 23 Měřené reálné rozměry na těle objektu..... | 44 |
| Obr. 24 Modely připraveny ke spojení v jeden | 44 |
| Obr. 25 Model tvořený plochami..... | 45 |
| Obr. 26 Výsledný model s detailním pohledem na hlavu (vpravo)..... | 46 |
| Obr. 27 Nastavení doplňku AdvancedEnclosure | 47 |
| Obr. 28 Prostředí kolem modelu (vlevo) komponenta vlasů a vokálního traktu (vpravo)..... | 47 |
| Obr. 29 Komponenta ploch tvořící vokální trakt..... | 48 |
| Obr. 30 Výsledná síť (vlevo) s detailem na zjemnění (v pravo) | 48 |
| Obr. 31 Plocha reprezentující hlasivky | 49 |
| Obr. 32 Příkazy k posunutí uzlů na hranici | 50 |
| Obr. 33 Vybrané body analýzy v prostoru před ústy | 51 |
| Obr. 34 Závislost akustického tlaku na frekvenci pro bod ve středu úst | 52 |
| Obr. 35 Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci pro bod ve středu úst | 53 |
| Obr. 36 Závislost akustického tlaku na frekvenci pro různé vzdálenosti 0 – 1000 mm | 53 |
| Obr. 37 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 25 mm pro 0° – 105° | 54 |
| Obr. 38 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 25 mm pro 0° – -105° | 54 |
| Obr. 39 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 50 mm pro 0° – 105° | 55 |
| Obr. 40 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 50 mm pro 0° – -105° | 55 |
| Obr. 41 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 100 mm pro 0° – 105° | 55 |
| Obr. 42 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 100 mm pro 0° – -105° | 56 |
| Obr. 43 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 200 mm pro 0° – 105° | 56 |
| Obr. 44 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 200 mm pro 0° – -105° | 56 |

| | |
|---|----|
| Obr. 45 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 300 mm pro $0^\circ - 105^\circ$ | 57 |
| Obr. 46 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 300 mm pro $0^\circ - -105^\circ$ | 57 |
| Obr. 47 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 500 mm pro $0^\circ - 105^\circ$ | 57 |
| Obr. 48 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 500 mm pro $0^\circ - -105^\circ$ | 58 |
| Obr. 49 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 1000 mm pro $0^\circ - 105^\circ$ | 58 |
| Obr. 50 Závislost akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 1000 mm pro $0^\circ - -105^\circ$ | 58 |
| Obr. 51 Směrové diagramy..... | 60 |
| Obr. 52 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) ve vokálním traktu (500 Hz)..... | 62 |
| Obr. 53 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) ve vokálním traktu (1000 Hz)..... | 62 |
| Obr. 54 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) ve vokálním traktu (2800 Hz)..... | 63 |
| Obr. 55 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) na těle bez rtů a nosu (500 Hz) | 63 |
| Obr. 56 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) na těle bez rtů a nosu (1000 Hz) | 64 |
| Obr. 57 Akustické tlaky (vlevo) a SPL (vpravo) na těle bez rtů a nosu (2800 Hz) | 64 |
| Obr. 58 Graf SPL pro vybrané body..... | 66 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab.1 Tabulka hodnot akustické impedance a absorpčního koeficientu..... | 49 |
| Tab.2 Tabulka parametrů počítače použitého pro výpočet..... | 51 |

Příloha 1 – Fotografie z průběhu focení objektu



Osvětlovací technika použitá k nasvícení objektu



Osvětlovací technika použitá k nasvícení objektu



Příprava focení objektu



Nastavení fotoaparátu pro prostředí



Pořizování fotografií objektu (z boku)



Pořizování fotografií objektu (zezadu)



Pořizování fotografií objektu (z pohledu fotografa)

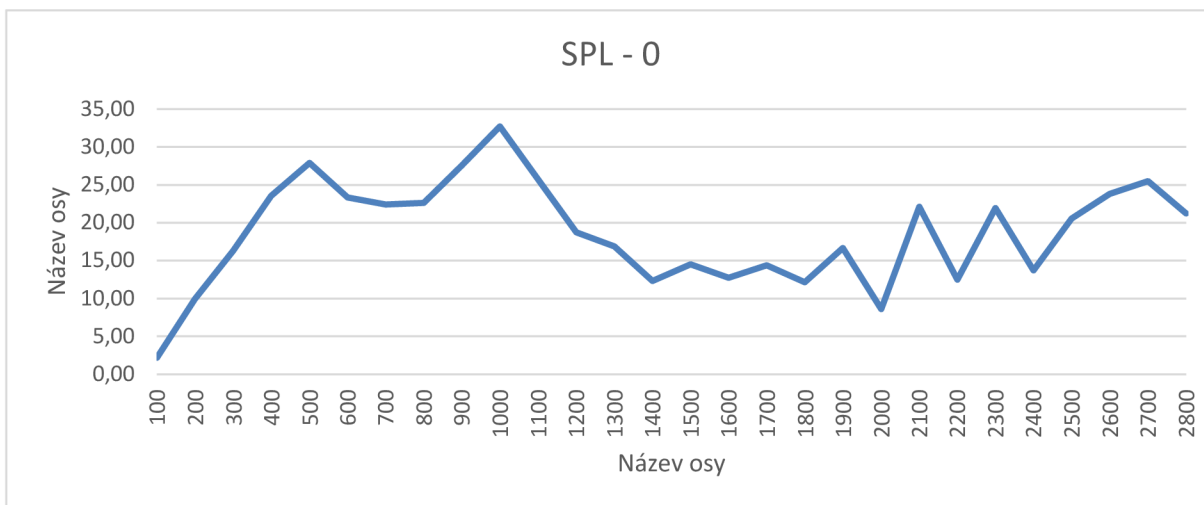


Pořizování fotografií detailu objektu

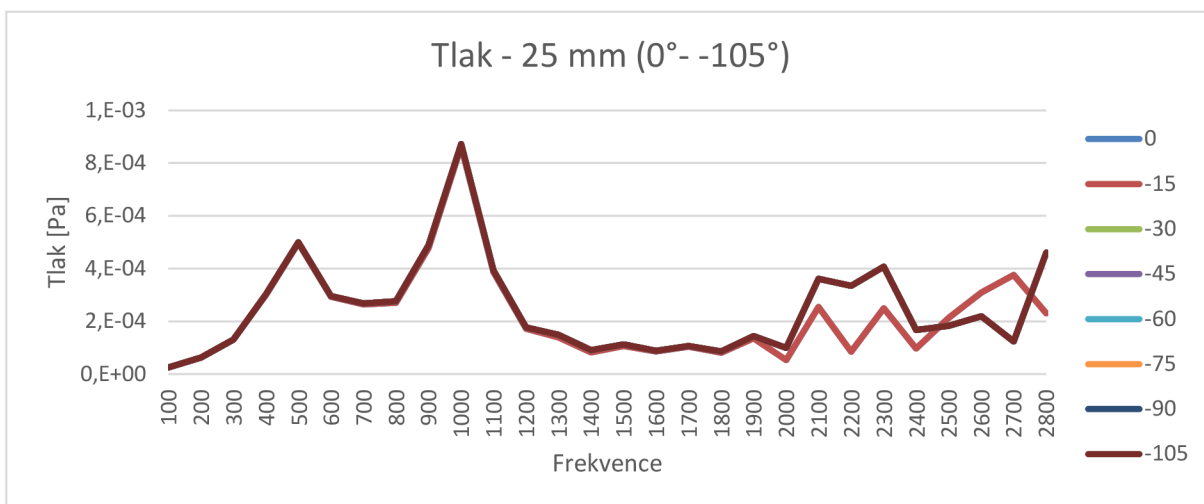


Požizování fotografií detailu objektu

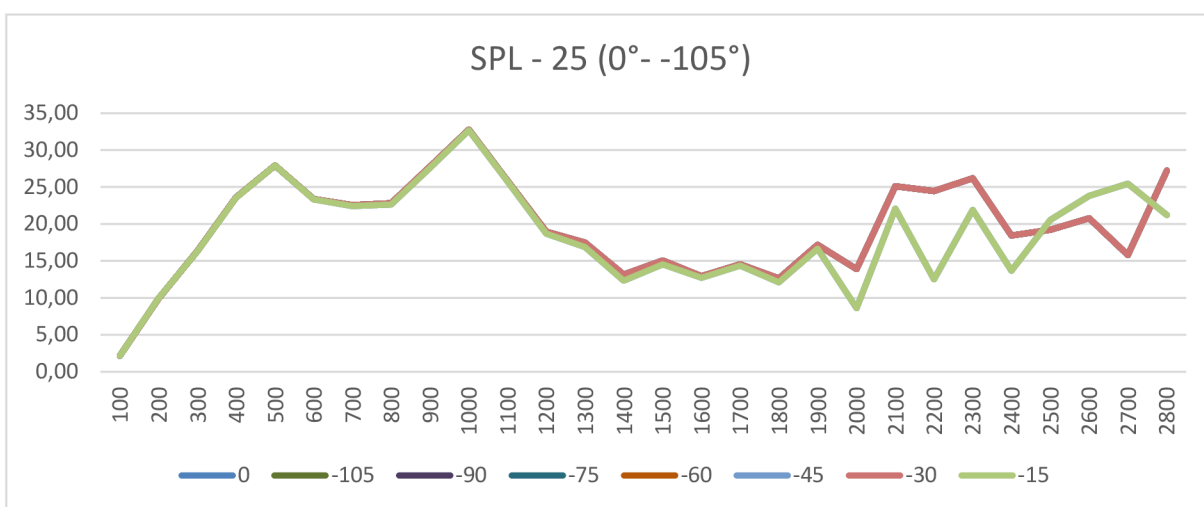
Příloha 2 – Průběh závislosti SPL na frekvenci



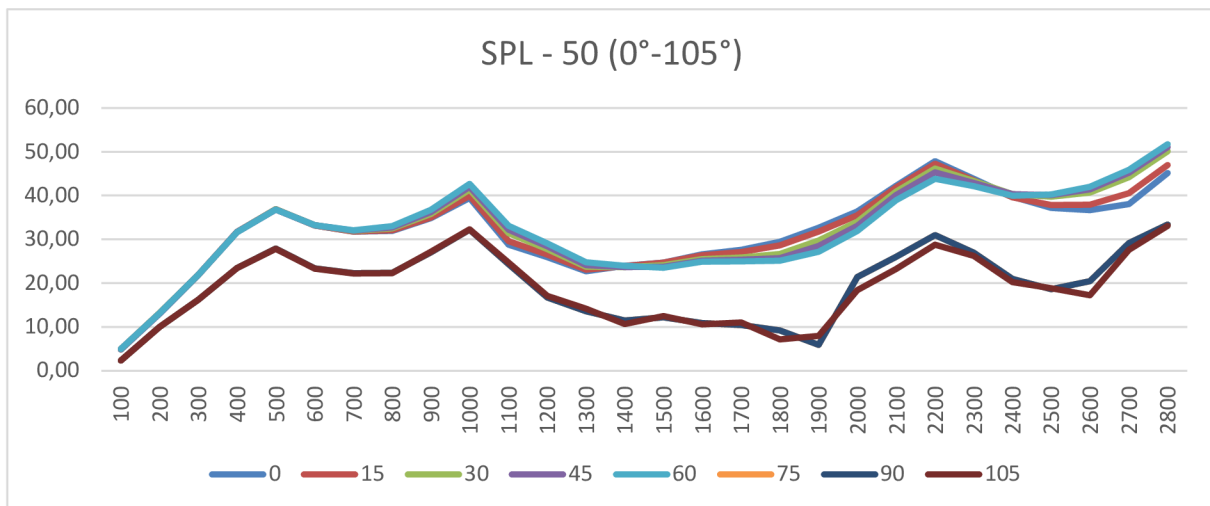
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 0 mm



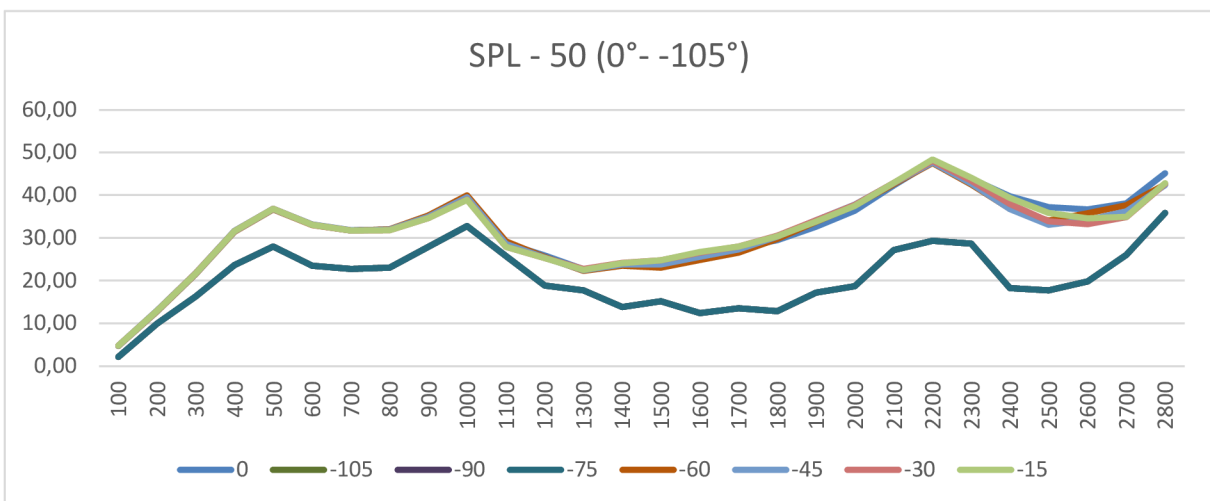
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 25 mm pro 0° – 105°



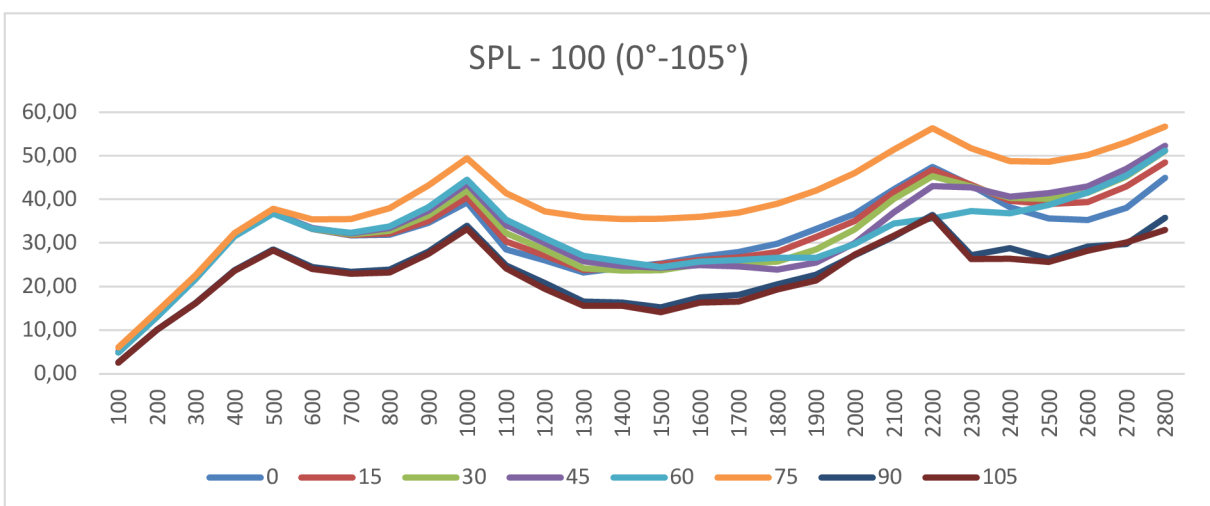
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 25 mm pro 0° – -105°



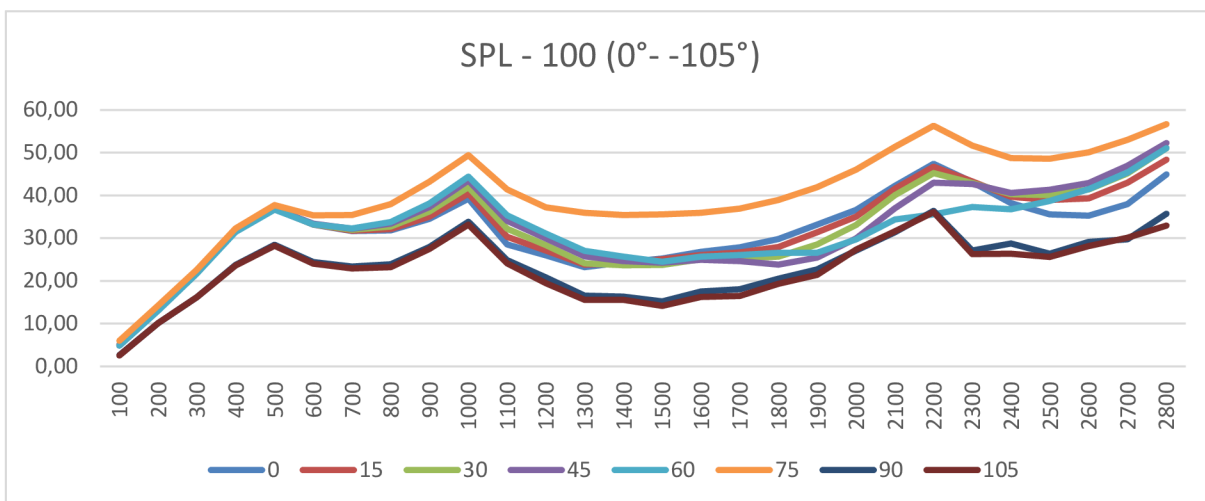
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 50 mm pro 0° – 105°



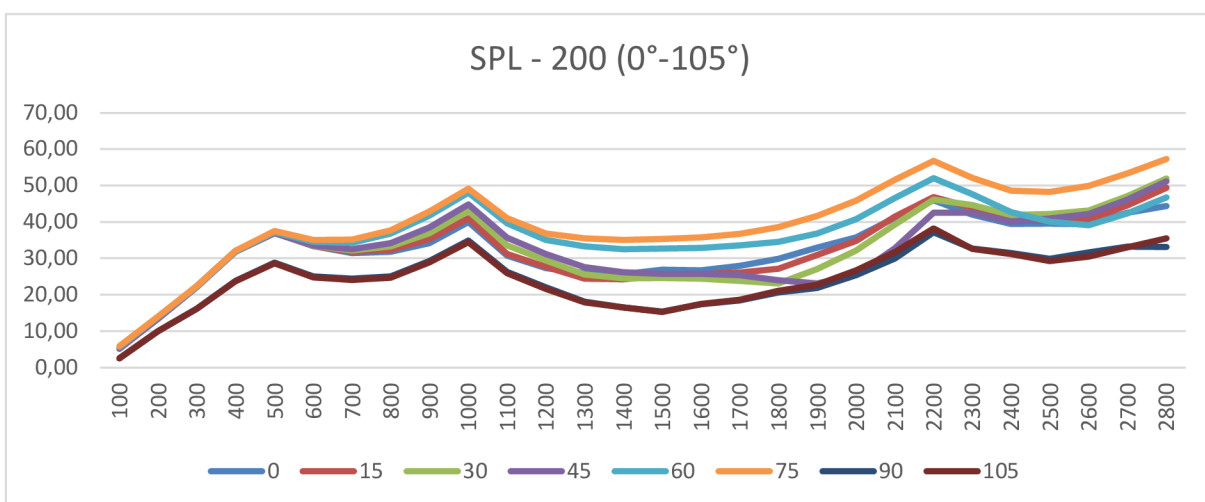
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 50 mm pro 0° – -105°



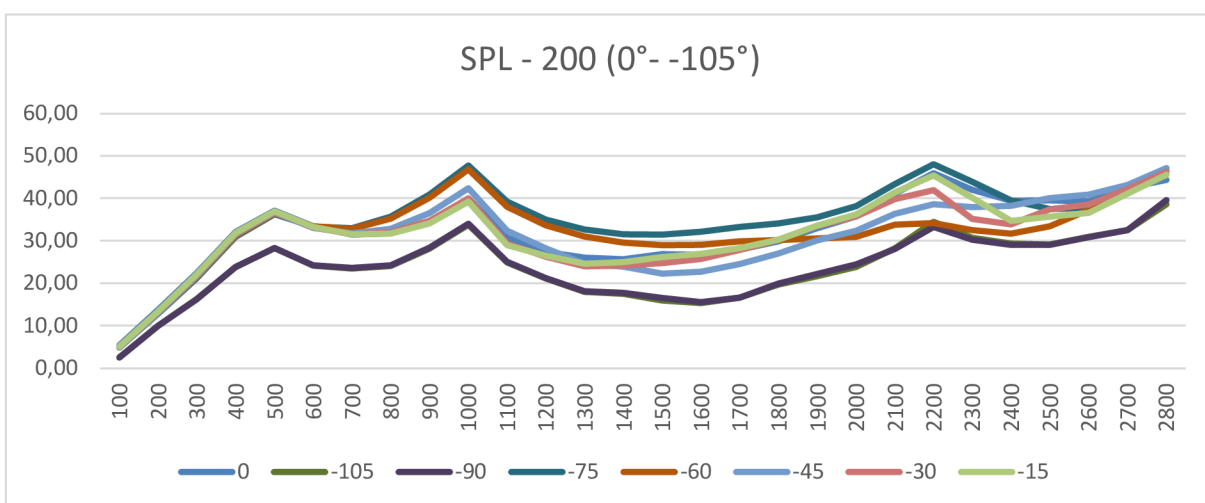
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 100 mm pro 0° – 105°



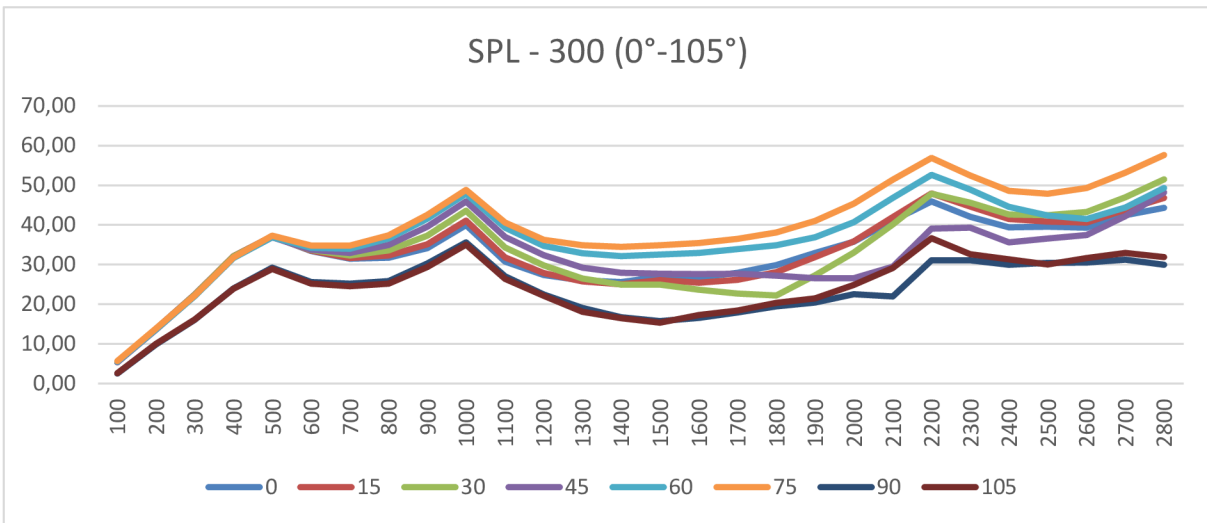
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 100 mm pro 0° – -105°



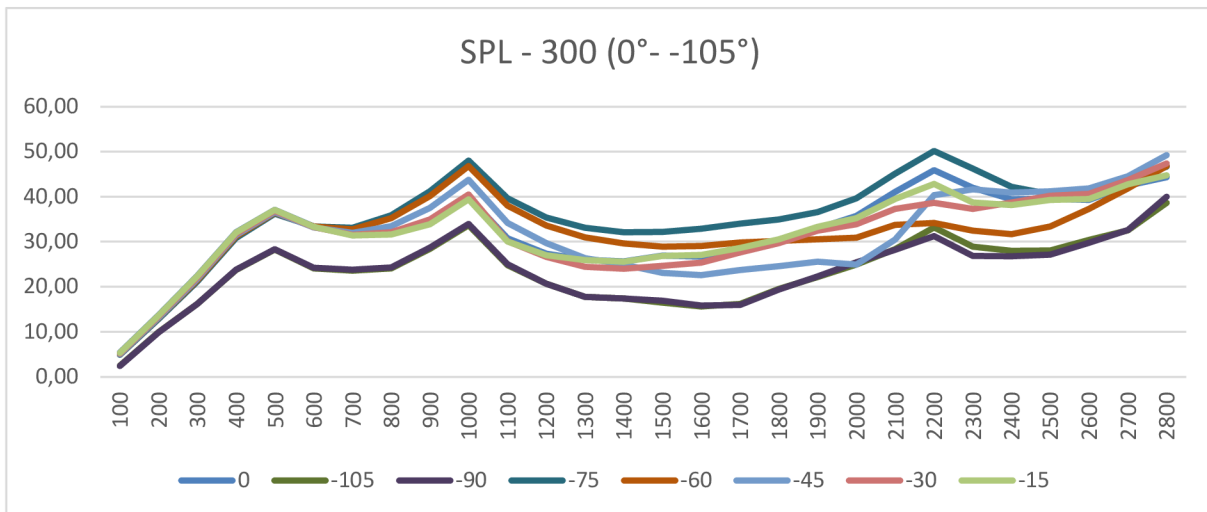
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 200 mm pro 0° – 105°



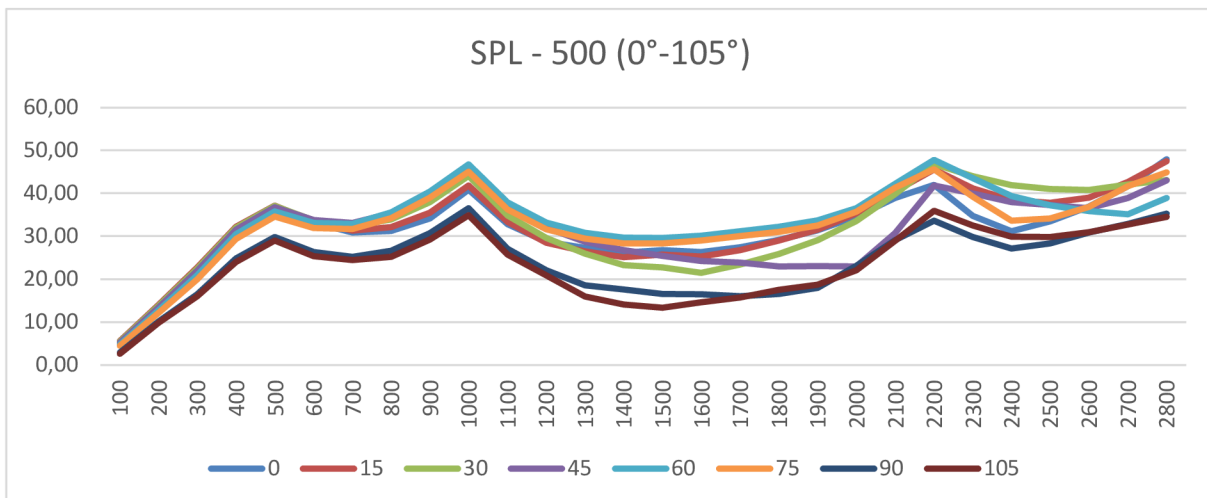
Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 200 mm pro 0° – -105°



Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 300 mm pro 0° – 105°



Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 300 mm pro 0° – -105°



Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci ve vzdálenosti 500 mm pro 0° – 105°