

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

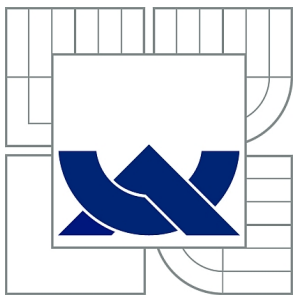
VLIV EXOSTÓZ NA SLUCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

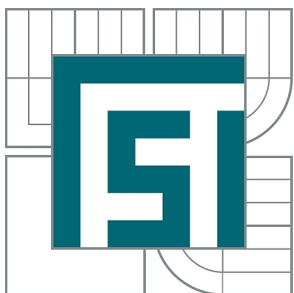
ŠÁRKA VALIŠOVÁ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

VLIV EXOSTÓZ NA SLUCH

INFLUENCE OF EXOSTOSES ON HEARING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ŠÁRKA VALIŠOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. KAREL PELLANT, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Šárka Vališová

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Vliv exostóz na sluch

v anglickém jazyce:

Influence of exostoses on hearing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přenos zvuku z okolního prostředí do místa smyslového vnímání (tj. vnitřního ucha) lze simulovat pomocí MKP modelů. Pomocí těchto modelů pak lze studovat přenosové vlastnosti jednotlivých částí lidského ucha, provádět analýzy vlivu některých ušních onemocnění na sluch popř. provádět predikce účinnosti chirurgických zásahů v oblasti zevního a středního ucha.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracování rešerše dostupné literatury v oblasti řešeného problému
- 2) Diskuse vlivu změn tvaru zevního zvukovodu na hodnoty jeho vlastních frekvencí
- 3) Zpracování souboru audiologických vyšetření pacientů s výskytem exostóz
- 4) Konfrontace výsledků audiologie s mechanickou studií

Seznam odborné literatury:

Pejchal, P., Modelování šíření zvuku ve vnějším zvukovodu. Diplomová práce. VUT Brno, Brno 2003.

Syka, J., Voldřich, L., Vrabc, F., Fyziologie a patofyziologie zraku a sluchu, Avicenum, zdravotnické nakladatelství, Praha, 1981.

Mejzlík J., Pellant K., Pellant A., Šalandová J. Ovlivnění akustických vlastností zevního zvukovodu exostózami (Acoustic properties of the External Auditory Canal Influenced by Exostoses), Otorinolaryng. a Foniat. 51, č.1,s.14-16, Praha 2002

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Karel Pellant, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18.11.2010

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Exostózy jsou kostěné výrůstky v zevním zvukovodu lidského ucha. Hlavním cílem bakalářské práce je zjistit, jaký vliv může mít změna tvaru zevního zvukovodu v důsledku výskytu exostóz na mechanický přenos zvuku do vnitřního ucha. Úloha byla řešena pomocí MKP modelování provedeného v systému ANSYS. Výpočtový 2D model normálního ucha byl převzat z diplomové práce B. Ouali: Development of 2D finite element model of human ear (VUT v Brně, 2009) a zahrnoval akustický subsystém zevního zvukovodu, elastický bubínek, středoušní dutinu se sluchovými kůstkami a dutinu vnitřního ucha. Na tomto modelu byly provedeny úpravy simulující výskyt exostóz ve formě dvou protilehlých polokruhů zužujících průsvit zvukovodu. Byla uvažována různá velikost a různá poloha oboustranných exostóz a sledován jejich vliv na přenosovou charakteristiku vnějšího zvukovodu. Dále byl zpracován soubor audiologických vyšetření 19 pacientů s výskytem exostóz v předoperačním a pooperačním stavu. Na závěr bylo provedeno srovnání výsledků audiometrických vyšetření s výsledky konečnoprvkových modelací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sluch, ucho, zevní zvukovod, exostóza, MKP modelování, audiometrie

ABSTRACT

Exostoses are periosteophyte inside the external auditory canal of the human ear. The main objective of this bachelor's thesis is to determine the potential impact of the shape modification of the external auditory canal due to occurrence of exostoses on the mechanical sound transmission into the internal ear. The task was solved by FEM modelling performed in the ANSYS system. The simple finite element 2D model of the normal human ear has been taken from the diploma thesis B. Ouali: Development of 2D finite element model of human ear (BUT Brno, 2009), the model included the external ear canal, elastic eardrum, otitis cavity with the otitis ossicles and the cavity of the internal ear. The changes simulating exostoses in form of two opposite semicircles were performed. The different size and position of the symmetrical exostoses were studied. The influence of the exostoses on the sound transfer characteristics of the external ear canal was discussed. It was processed the set of the audiograms (19 patients). The results of the modelling and the results of the audiology were compared, the preoperativ and the postoperativ stages were considered.

KEYWORDS

Hearing, ear, external auditory canal, exostosis, FEM modelling, audiometry

VALIŠOVÁ, Šárka *Vliv exostóz na sluch*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2012. 68 s. Vedoucí práce byl doc. RNDr Karel Pellant, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vliv exostóz na sluch“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. RNDr. Karlu Pellantovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji vedoucímu kliniky ORL MUDr. Janu Mejzlíkovi za poskytnutí audiologických vyšetření pacientů a cenných rad pro zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	19
1 Fyziologická akustika	21
1.1 Základní akustické veličiny	21
1.1.1 Akustický tlak	21
1.1.2 Rychlost zvuku	21
1.1.3 Akustická impedance	22
1.1.4 Akustická energie a intenzita	22
1.2 Odraz a průchod zvuku	23
1.3 Ohyb zvuku	23
1.4 Absorpce zvuku	24
1.5 Hladina hlasitosti zvuku	24
2 Anatomie lidského ucha	27
2.1 Anatomické roviny	27
2.2 Zevní ucho	28
2.2.1 Boltec	28
2.2.2 Zevní zvukovod	28
2.3 Střední ucho	29
2.3.1 Dutina středoušní	29
2.3.2 Sluchové kůstky	29
2.3.3 Sluchová (Eustachova) trubice	30
2.4 Vnitřní ucho	30
2.4.1 Kostěný labyrint	30
2.4.2 Blanitý labyrint	31
2.5 Vedení zvuku a sluchové senzory	31
3 Vyšetřovací metody v audiologii	33
3.1 Zkoušky pomocí ladiček	33
3.2 Audiometrie, audiometrické vyšetření	33
3.3 Audiometrické vyšetření čistými tóny	34
3.3.1 Audiogram	34
3.3.2 Vyšetření vzdušného vedení	34
3.3.3 Vyšetření kostního vedení	34
3.3.4 Maskování	35
3.4 Obecné zhodnocení audiogramu	35
4 Ovlivnění akustických vlastností zevního zvukovodu exostózami	37
4.1 Exostózy	37
4.2 Důsledky exostóz	37
4.2.1 Chirurgický postup pro odstranění exostóz	38
4.2.2 Výsledky vyšetření pacientů po operaci exostóz	38
4.2.3 Změny slyšení po operaci exostóz	39
4.2.4 Opakovaný výskyt exostóz po operacích	39

5	Diskuze vlivu exostóz na sluch	41
5.1	Možná změna modálních vlastností zevního zvukovodu při výskytu exostóz - analytické řešení	41
5.1.1	Akustické kavity	41
5.1.2	Přenos zvukových vln normálním zevním zvukovodem	44
5.1.3	Kostní vedení zvuku	45
5.1.4	Módy normálního zvukovodu a zvukovodu s exostózami	46
5.2	Numerický model v systému ANSYS	48
5.2.1	Geometrie modelu zevního zvukovodu s exostózami	48
5.2.2	Harmonická analýza	50
5.3	Vliv exostóz - zpracování audiogramů	54
5.3.1	Zpracování audiogramů	54
6	Závěr	61
	Literatura	63
	Seznam použitého lékařského názvosloví	65
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Průchod vlnění kolem překážky [4]	23
1.2	Průchod vlnění přes otvory [4]	24
1.3	Křivky stejné hladiny hlasitosti podle Fletchera a Munsona [4]	25
2.1	Zobrazení lidského ucha [6]	27
2.2	Prostorové znázornění rovin těla [14]	28
3.1	Typy nedoslýchavostí [12]	36
4.1	Oboustranný výskyt exostóz [7]	37
4.2	Histopatologický vzorek exostózy [8]	37
5.1	Typy módů kavit [4]	41
5.2	Akustické módy kavity oboustranně otevřené [4]	42
5.3	Akustické módy kavity na jedné straně zavřené [4]	43
5.4	Akustické módy kavity oboustranně uzavřené [4]	44
5.5	První dva módy zdravého zevního zvukovodu	47
5.6	První dva módy zevního zvukovodu s exostózami	47
5.7	Zjednodušený 2D konečnoprvkový model lidského ucha	48
5.8	Geometrie numerického modelu zevního zvukovodu s exostózami (rozměr v mm)	49
5.9	Změna velikosti elementů 2D konečnoprvkového modelu zevního zvukovodu při velkém nárůstu oboustranných exostóz	49
5.10	Hodnoty akustického tlaku na bubínek pro exostózy různé velikosti. Oboustranné exostózy kruhového tvaru jsou umístěny na začátku zevního zvukovodu.	50
5.11	Hodnoty akustického tlaku na bubínek pro exostózy různé velikosti. Oboustranné exostózy kruhového tvaru jsou umístěny ve středu zevního zvukovodu.	51
5.12	Hodnoty akustického tlaku na bubínek pro exostózy různé velikosti. Oboustranné exostózy kruhového tvaru jsou umístěny na konci zevního zvukovodu.	51
5.13	Relativní změna (pokles) přenosové funkce L_{pr} zevního zvukovodu (vůči normálnímu zvukovodu) pro exostózy na začátku zevního zvukovodu	52
5.14	Relativní změna (pokles) přenosové funkce L_{pr} zevního zvukovodu (vůči normálnímu zvukovodu) pro exostózy ve středu zevního zvukovodu	52
5.15	Relativní změna (pokles) přenosové funkce L_{pr} zevního zvukovodu (vůči normálnímu zvukovodu) pro exostózy na konci zevního zvukovodu	53
5.16	Průměrné hodnoty relativní změny (poklesu) přenosové funkce zevního zvukovodu (vůči normálnímu zvukovodu) způsobené exostózami. Zahrnuty jsou různé velikosti a polohy exostóz v zevním zvukovodu.	53
5.17	Audiogramy pacientů - vzdušné vedení zvuku - před operací	55
5.18	Audiogramy pacientů - kostní vedení zvuku - před operací	55
5.19	Audiogramy pacientů - vzdušné vedení zvuku - těsně po operaci	56
5.20	Audiogramy pacientů - kostní vedení vzduchu - těsně po operaci	56

5.21	Audiogramy pacientů - vzdušné vedení zvuku - po zhojení	57
5.22	Audiogramy pacientů - kostní vedení zvuku - po zhojení	57
5.23	Střední hodnoty audiogramů pacientů - vzdušné vedení zvuku - před operací a po zhojení	58
5.24	Střední hodnoty audiogramů pacientů - kostní vedení zvuku - před operací a po zhojení	58
5.25	Střední hodnoty audiogramů pacientů - vzdušné vedení zvuku - těsně po operaci a po zhojení	59
5.26	Střední hodnoty audiogramů pacientů - kostní vedení zvuku - těsně po operaci a po zhojení	59

SEZNAM TABULEK

3.1	Hodnocení závažnosti poruchy sluchu [12]	36
4.1	Doprovodné potíže u pacientů trpících exostózami [8]	37
4.2	Stupnice závažnosti exostóz [8]	38
4.3	Závažnost exostóz u jednotlivých pacientů [8]	38
4.4	Pooperační komplikace u pacientů [8]	39
4.5	Průměrné hodnoty prahu sluchu určené z průměrů sluchu na 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz (popř. 4 kHz) [8]	40
4.6	Změny u percepční nedoslýchavosti při kostním vedení zvuku [8]	40
5.1	Helmholtzovy rezonanční frekvence pro různé velikosti a polohy exostóz v zevním zvukovodu	46
5.2	Průměrné hodnoty prahu sluchu určené z průměrů sluchu na 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz (popř. 4 kHz)	60

ÚVOD

Exostózy jsou povrchové kostní výrůstky z tkáně kosti zevního zvukovodu lidského ucha. Dopady tohoto onemocnění, ať již na vzdušné nebo kostní vedení zvuku, nejsou dosud v literatuře jednoznačně vysvětleny. Na otázku, zda změny tvaru zevního zvukovodu v důsledku výskytu exostóz mohou mít vliv na přenos akustické energie z vnějšího prostředí do vnitřního ucha, se snaží odpovědět tato bakalářská práce.

Pro řešení této úlohy byla použita metoda konečných prvků. Výpočtový 2D model normálního ucha byl převzat z práce [17] a zahrnoval akustický subsystém zevního zvukovodu, elastický bubínek, středoušní dutinu se sluchovými kůstkami a dutinu vnitřního ucha. Na tomto modelu byly provedeny úpravy simulující výskyt exostóz ve formě dvou protilehlých polokruhů zužujících průsvit zvukovodu.

V úvodní části jsou rozebrány principy akustiky lidského ucha a popsána patologie zevního zvukovodu vlivem exostóz. Vzhledem k tomu, že v literatuře je často v souvislosti s kostním slyšením diskutován okluzní efekt podmíněný částečným uzavěrem zevního zvukovodu v důsledku výskytu exostóz, dutina mezi exostózami a bubínkem byla uvažována jako Helmholtzův rezonátor a byly provedeny výpočty hodnot rezonančních frekvencí pro různé polohy a různé velikosti exostóz.

Jako hlavní cíl bylo sledování vlivu oboustranných exostóz různých velikostí a různých poloh v zevním zvukovodu na přenosovou charakteristiku modelu zevního zvukovodu. Postup tvorby modelu zevního zvukovodu s exostózami a příslušná aplikace okrajových podmínek jsou uvedeny v kapitole 5.2.1. Vlastní výpočty jsou popsány v kapitole 5.2.2. Pro zjištění přenosové funkce zevního zvukovodu bylo předpokládáno buzení 1 Pa na vstupu do zevního zvukovodu a byly sledovány hodnoty akustického tlaku 1 mm před středem bubínku.

V kapitole 5.3 je popsáno zpracování souboru 19 pacientů ORL kliniky Pardubice s výskytem exostóz, u pacientů byla přitom provedena audiologie s výskytem exostóz a po jejich odoperování.

Na závěr bylo provedeno srovnání výsledků audiometrie s výsledky konečnoprvkových modelací.

1 FYZIOLOGICKÁ AKUSTIKA

1.1 Základní akustické veličiny

1.1.1 Akustický tlak

Celkový tlak v daném prostředí se v průběhu šíření vlnění mění, kolísá okolo původního statického nebo barometrického tlaku v ovzduší [4]. Tento jev je způsoben zhušťováním a zředováním kmitajících částic prostředí. Za akustický tlak p [Pa] je považována odchylka celkového tlaku p_c prostředí od tlaku barometrického p_b při vlnění v daném prostředí. Akustický tlak při vlnění o frekvenci f a fázovém posuvu φ má tvar harmonické funkce a je dán vztahem (1.1)

$$p_c = p_b + p(t) \quad (1.1)$$

kde

$$p(t) = p_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi) = p_0 \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (1.2)$$

kde p_0 je amplituda akustického tlaku a t je čas.

Efektivní hodnota akustického tlaku je vyjádřena vztahem (1.3)

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (1.3)$$

Člověk je citlivý na změnu tlaku vzduchu, je tedy citlivý i na změny akustického tlaku. Jestliže je změna tlaku vzduchu s frekvencí nad 16 Hz, člověk vnímá tyto změny jako zvuk pomocí sluchového orgánu. Mladý člověk je schopen zachytit i velmi malou změnu akustického tlaku. Tato hodnota tlaku se pohybuje okolo 20 μPa a ve srovnání s barometrickým tlakem, jehož hodnota je přibližně 101 300 Pa, je nepatrná.

1.1.2 Rychlost zvuku

Podnětem pro sluchový orgán jsou vibrace, které vychází ze zvukového zdroje a šíří se v plynech, kapalinách a v pevných látkách [1]. V plynném a kapalném prostředí se šíří jen tlakové (akustické) vlny, jejichž **rychlost** šíření (c) ve vzduchu při teplotě 0 °C je 332 m/s. **Vlnová délka** (λ) označuje vzdálenost dvou nejbližších bodů vlnění se stejným akustickým tlakem. Při zvyšování vlnové délky slyšíme hlubší tón, při snižování slyšíme tóny vysoké. Částice prostředí mohou kmitat buď napříč směru šíření zvuku, nebo ve směru šíření zvuku [2]. Při šíření akustických vln dochází k harmonickému kolísání tlaku vzduchu a vytvářejí maximální výchylku tlaku od klidové polohy označovanou **amplituda** (a). **Tónová frekvence** (f) vyjadřuje, kolikrát se na jednom místě akustického pole vyskytne za 1 s kolísání akustického tlaku. Frekvenční jednotkou je Herz (Hz). Rychlost zvuku, vlnová délka a frekvence jsou spojeny vztahem (1.4)

$$f \cdot \lambda = c \quad (1.4)$$

Pokud je kmitání zdroje nepravidelné, je také vlnění nepravidelné a neperiodické, příslušný zvuk je nehudební a vnímáme jej jako hluk. Lidský sluch dokáže vnímat zvuk v rozsahu 16 – 20 000 Hz, přičemž nejcitlivější je v oblasti frekvence lidského hlasu (2000 – 5000 Hz). Ve stáří může horní sluchová hranice poklesnout až na 5000 Hz.

1.1.3 Akustická impedance

Akustická impedance je obecně dle [15] poměr tlaku p (popř. síly) a rychlosti kmitání částic v . V akustice dělíme impedanci na *akustickou*, *specifickou* a *normovanou*. **Specifická impedance** Z_S je definována vztahem (1.5)

$$Z_S = \frac{p(x, t)}{v(x, t)} \quad (1.5)$$

Normovaná impedance Z_N je podíl specifické impedance Z_S a vlnového odporu $Z_0 = \rho_0 \cdot c_0$, kde ρ je akustická hustota a c je rychlost zvuku. **Akustická impedance** Z_A je definována vztahem (1.6)

$$Z_S = \frac{p(x, t)}{w(x, t)} \quad (1.6)$$

kde w je objemová rychlost.

1.1.4 Akustická energie a intenzita

Kmitající vzduch nese mechanickou energii. V akustice se zavádí střední hodnota akustické energie, která je rovna (1.7) [15]

$$w_a = \rho_0 \cdot v_a^2 \quad (1.7)$$

kde ρ je hustota a v_a je rychlost elementu.

Důležitější než energie je výkon a intenzita akustické vlny. Akustický výkon vlny P je definován jako množství akustické energie prošlé určitou plochou S za určitý čas. Akustický výkon vztahovaný na plochu kolmou na směr šíření vlny se nazývá **intenzita zvuku** I_a a je dána vztahem (1.8)

$$I_a = \frac{P}{S_{\perp}} = \frac{P}{S \cdot \cos\phi} \quad (1.8)$$

kde ϕ je úhel mezi směrem šíření vlny a normálou plochy S . Pro postupovou vlnu tedy platí po úpravách vztah (1.9)

$$I_a = p_a \cdot v_a = \pm Z_A \cdot v_a^2 = \pm \frac{p_a^2}{Z_A} \quad (1.9)$$

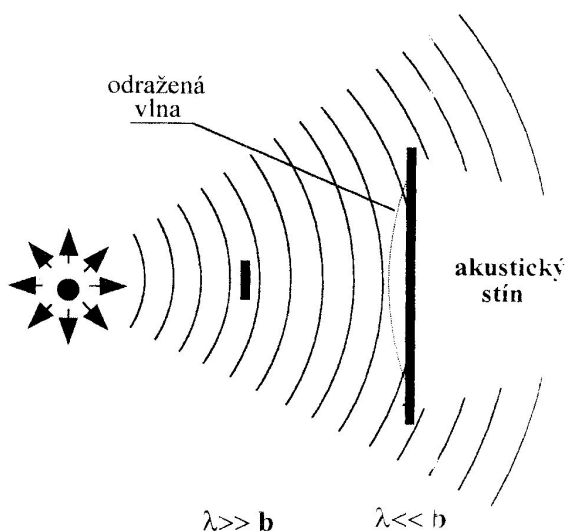
Znaménkem \pm je zde rozlišen postup vlny ve směru a proti směru osy x . Při výskytu exostóz v zevním zvukovodu se velikost plochy průchodu akustické vlny mění, tudíž akustická intenzita je výrazně tímto jevem ovlivněna.

1.2 Odraz a průchod zvuku

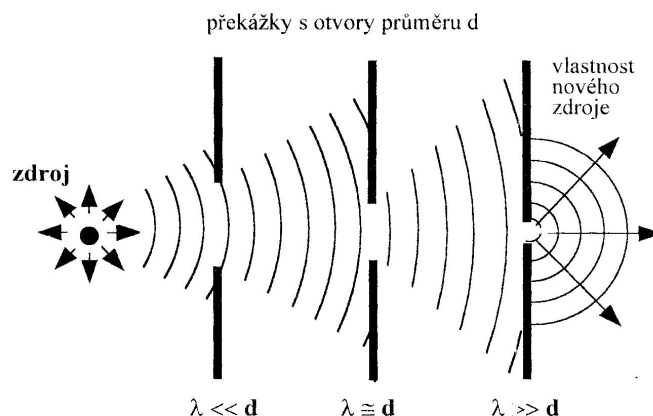
Pokud rovinná akustická vlna dopadne na rovinné rozhraní s jiným médiem, pak se část vlnění odrazí a část prochází druhým médiem [4]. Podíl odraženého a procházejícího vlnění závisí na úhlu dopadu vlny na rovinné rozhraní, na rychlosti zvuků a hustotách obou materiálů na obou stranách rozhraní.

1.3 Ohyb zvuku

Při nárazu akustické vlny na překážku určité délky, která je rozměrově malá oproti délce příslušné akustické vlny, tato vlna pokračuje přes překážku a vytváří pouze malý akustický stín za překážkou (Obr.1.1) [4]. Akustický stín se zvětšuje a prodlužuje při zvyšující se frekvenci, tj. při zmenšující se délce akustické vlny. Proto je u exostóz v zevním zvukovodu ohyb zvuku podstatný pouze na vysokých frekvencích. Vlnění za překážkou je způsobeno ohybem vln okolo hran překážky. Ohyb vln za překážkou (difrakce) lze vysvětlit pomocí Huygensova principu. Předpokládá, že v každém okamžiku lze každý bod na čelní akustické vlnoploše chápat jako nový akustický zdroj. Další poloha akustické vlny může být takto vytvářena z předcházející vlny. Výše uvedený princip způsobuje, že nízkofrekvenční vlny se ohýbají za překážkou snadněji než akustické vlny vysokofrekvenční. Vysokofrekvenční vlny tedy vytvářejí za stejnou překážkou větší akustický stín než vlny nízkofrekvenční. Obdobná situace nastává při průchodu vlnění otvory s různými průměry (Obr.1.2). Akustický stín za otvorem se zmenšuje při zvyšující se délce akustické vlny, až u otvoru, jehož průměr je násobně menší než délka akustické vlny, se akustický stín neutváří a další vlnění má charakter nového akustického zdroje.



Obr. 1.1: Průchod vlnění kolem překážky [4]



Obr. 1.2: Průchod vlnění přes otvory [4]

1.4 Absorpce zvuku

Při dopadu akustické vlny na povrch např. pevného média se část energie vlnění transformuje na jiný druh energie, nejčastěji na tepelnou energii [4]. Akustická absorpce (pohltivost) je definována **součinitelem pohltivosti** α dle vztahu (1.10)

$$\alpha = \frac{I_0 - I}{I_0} \quad (1.10)$$

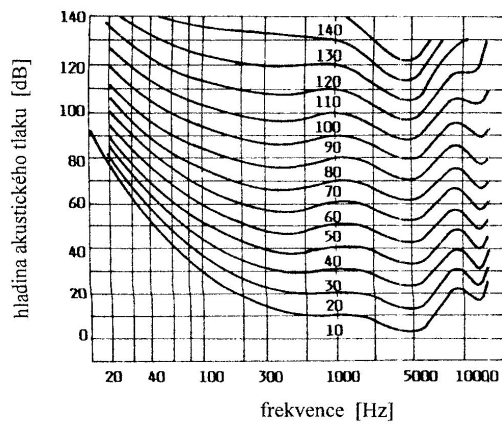
kde I_0 je intenzita vlnění dopadajícího na stěnu a I je intenzita odraženého vlnění. Součinitel pohltivosti je definován v rozmezí $0 \leq \alpha \leq 1$, přičemž $\alpha = 0$ odpovídá nulové pohltivosti a $\alpha = 1$ odpovídá maximální pohltivosti, při kterém je veškerá energie pohlcována povrchem druhého média. Pohltivost závisí na mnoha materiálových charakteristikách (efektivní drsnosti povrchu, pórovitosti povrchu, poddajnosti, v některých případech i na rezonančních vlastnostech povrchu). Z našeho pohledu je absorpce podstatná, vyskytuje-li se v zevním zvukovodu zánět, nádor, apod... V systému Ansys je absorpce definována odlišně a to vztahem (1.11)

$$\alpha = \frac{Z_S}{Z_0} \quad (1.11)$$

kde Z_S je specifická impedance a Z_0 je vlnový odpor prostředí.

1.5 Hladina hlasitosti zvuku

Lidské vnímání hlasitosti čistých tónů závisí na jejich frekvenci [4]. Tuto závislost nejlépe vystihuje tzv. svazek křivek stejné hladiny hlasitosti (*Obr. 1.3*). Pokusy ukazují, že například zvuk o intenzitě 40 dB a o frekvenci 1 kHz se zdá být zhruba stejně hlasitý jako zvuk o intenzitě 90 dB a frekvenci 50 Hz.

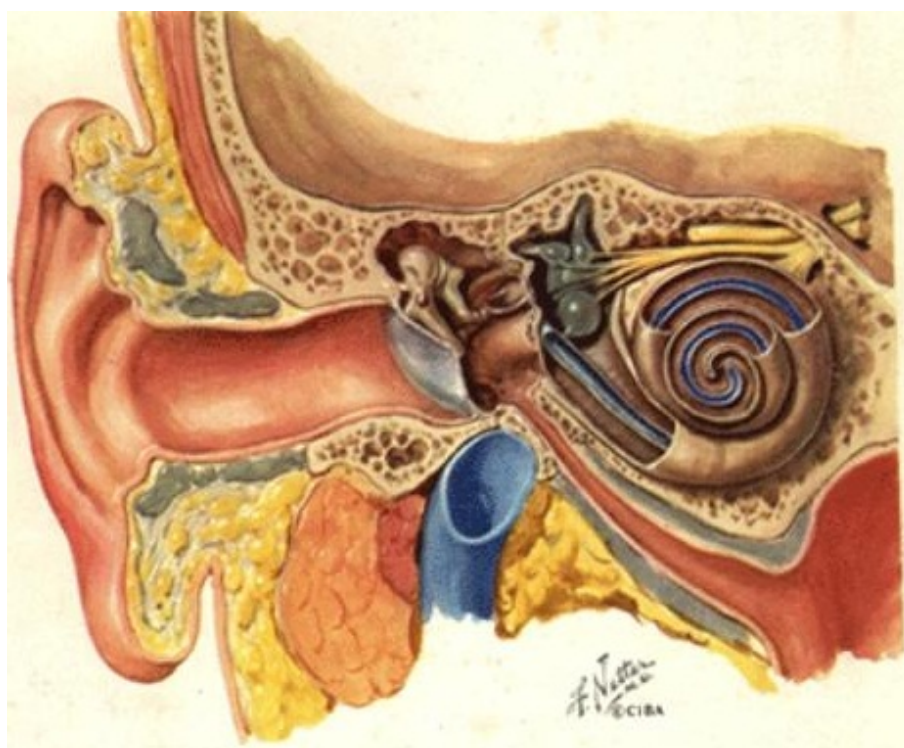


Obr. 1.3: Křivky stejné hladiny hlasitosti podle Fletchera a Munsona [4]

2 ANATOMIE LIDSKÉHO UCHA

Zvuk je mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat sluchový vjem. Vodič zvuku (obvykle vzduch) zprostředkuje spojení mezi zdrojem zvuku a jeho přijímačem, kterým je např. lidské ucho.

Ucho (*auris*) (Obr.2.1) dělíme na **rovnovážné ústrojí** a **sluchové ústrojí** [1], [3]. Funkcí rovnovážného ústrojí je vnímání polohy a pohybu hlavy v prostoru. Funkcí sluchového ústrojí je rozlišování a zprostředkování vnímání zvuků, které vznikají kmitáním pevných těles. Lidský sluch dokáže vnímat zvuk v rozsahu 16 – 20 000 Hz, přičemž nejcitlivější je v oblasti frekvence lidského hlasu (2000 – 5000 Hz). Lidské ucho je stavebně komplikované a skládá se ze tří hlavních oddílů: **zevní ucho** (*auris externa*), **střední ucho** (*auris media*) a **vnitřní ucho** (*auris interna*).

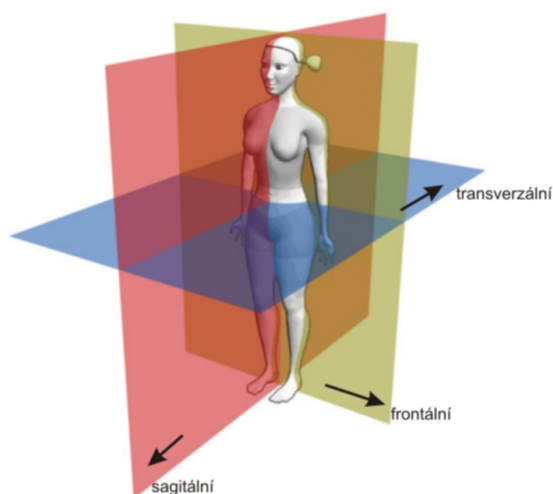


Obr. 2.1: Zobrazení lidského ucha [6]

2.1 Anatomické roviny

Popis lidského těla nebo jeho částí je vztažen na tzv. *základní anatomickou polohu* (Obr.2.2), kdy tělo stojí vzpřímeně s horními končetinami visícími volně podle těla tak, že dlaně jsou obrácené dopředu [13]. Pro jednoznačný popis relativní polohy a pohybu jednotlivých částí těla vůči této poloze se zavádějí myšlené navzájem kolmé roviny. **Rovina mediální/střední** je svislá rovina, která dělí lidské tělo na dvě symetrické poloviny. **Roviny sagitální/předozaďní** jsou další roviny rovnoběžné s rovinou mediální. **Roviny frontální/pravolevé** jsou roviny rovnoběžné s čelem

a dělí lidské tělo na přední a zadní část. **Roviny transverzální/příčné** jsou horizontální roviny a probíhají lidským tělem napříč.



Obr. 2.2: Prostorové znázornění rovin těla [14]

2.2 Zevní ucho

Zevní ucho (*auris externa*) je povrchovou částí sluchového ústrojí a skládá se z **boltece** (*auricula*) a **zevního zvukovodu** (*meatus acusticus externus*) zakončeného elastickým **bubínkem** (*membrana tympani*) [3].

2.2.1 Boltec

Plochý tvar ušního boltece (*auricula*) utváří četné individuální možnosti v tvarování záhybů [2], [3]. Je tvořený elastickou zprohýbanou chrupavkou (pouze lalůček chrupavčitý podklad nemá, je vyplněn tukovým mazivem) a odstává od hlavy pod úhlem 25 – 45 stupňů. Svaly ušního boltece jsou velmi malé, prakticky nefunkční, proto je pohyblivost ušního boltece značně omezena. V podstatě představuje "nálevku", která směřuje akustické vlny do zevního zvukovodu. Ušní boltec vytváří výrazný akustický stín pro zvuky přicházející zezadu a umožňuje tak lokalizovat zvuky v předozadní rovině [5].

2.2.2 Zevní zvukovod

Zevní zvukovod (*meatus acusticus externus*) je trubice tvořená v zevních dvou třetinách chrupavčítým podkladem a ve vnitřní třetině podkladem kostěným [2], [3]. Průběh zvukovodu v horizontálním směru je esovitý, průsvit zvukovodu nepravidelně eliptický. Na konci zevního zvukovodu se nachází **bubínek**, který je hranicí mezi zevním a středním uchem. Délka zvukovodu u zdravého dospělého člověka je v průměru 35 mm. Bubínek má tvar velmi mělké nálevky, na které je ze stany středního ucha přirostlá rukojeť kladívka. Okraj bubínku z tuhé vazovité chrupavky je

umístěn do bubínkové kosti. Zbývající plocha bubínku je utvořena 0,1 mm silnou tenkou elastickou membránou eliptického tvaru o délce poloos 9x10 mm. Membrána je vyztužena vazovitými chrupavčitými výztuhami směřujícími od okraje do středu bubínku. Sklon zasazení bubínku ve zvukovodu je u dospělého člověka 40 – 50 stupňů v transversálním (horizontálním) směru a asi 50 stupňů v sagitálním (předozaďním) směru. Výstelka zvukovodu je tvořena kůží, která se směrem do středního ucha ztenčuje a obsahuje mazové žlázy produkující ušní maz. Nečistoty jsou ze zvukovodu samy vypuzovány ven. Při vstupu do zevního zvukovodu z kůže vyrůstají chloupky, které se s přibývajícím věkem stávají výraznějšími.

2.3 Střední ucho

Střední ucho (*auris media*) je umístěno převážně v pyramidě spánkové kosti a je tvořeno soustavou různě velkých pneumatických dutin, které jsou vystlány sliznicí [2]. Střední ucho vzniklo z první entodermální štěrbinu, která se vychlípila ze stěny primitivního hltanu, proto je spojeno s dutinou hltanu prostřednictvím sluchové trubice [3]. Střední ucho sestává z **dutiny středoušní** (*cavum tympani*), **sluchových kůstek** (*ossicula auditus*), **sluchové (Eustachovy) trubice** (*tuba auditiva*) a **dutin mastoidního výběžku** (*cellulae mastoideae*).

2.3.1 Dutina středoušní

Středoušní dutina (*cavum tympani*) je malý štěrbinovitý prostor zasazený ve spánkové kosti [3]. Tvar dutiny se podobá tvaru bikonkávní čočky (resp. tvaru přesýpacích hodin) o výšce asi 20 mm, délce 10 mm a šířce 2 až 6 mm, přičemž nejužší místo se nachází uprostřed. Dutina je obklopena šesti stěnami: stěnou laterální, mediální, horní, dolní, přední a zadní. Laterální stěna je tvořena především bubínkem, který je prohnutý do středoušní dutiny. Mediální stěna je kostěná, utváří hranici mezi středoušní dutinou a labyrintem vnitřního ucha. Tato stěna uprostřed výrazně vyklenuje (vytváří tzv. promotorium) v prvním závitu kostěného hlemýžďe cochleí.

2.3.2 Sluchové kůstky

Drobné sluchové kůstky (*ossicula auditus*) jsou hlavní výplní středoušní dutiny [3]. **Kladívko** (*malleus*), **kovadlinka** (*incus*) a **třmínek** (*stapes*), ležící v horní polovině středoušní dutiny, spolu utvářejí pohyblivý mechanismus. Rukojeť kladívka je přirostlá k bubínku, třmínek je vsazen do oválného okénka mediální stěny. Funkce sluchových kůstek spočívá v přenosu mechanických pohybů bubínku do fluidní výplně dutiny vnitřního ucha (tj. perilymfy).

Kladívko

Kladívko (*malleus*) představuje největší kůstku z kůstek sluchových [3]. Skládá se z několika částí. Zaoblená hlavička je tuhým kloubem spojena s tělem kovadlinky. Hlavička se směrem dolů zužuje a přetváří se v krátký krček, který svisle vzhůru přechází v rukojeť.

Kovadlinka

Tělo kovadlinky (*incus*) je sedlového tvaru [2]. Jeden z výběžků se postupně zužuje a zplošťuje, druhý z výběžků je tenký, delší a míří nepatrně vpřed směrem k vnitřní části ucha. Koncové zaoblení výběžku plynne nasedá na hlavičku třmínku.

Třmínek

Tvar třmínku (*stapes*) připomíná tvar jezdeckého třmenu [2], [3]. Hlavička se symetricky rozbíhá ve dvě paralelně protáhlá raménka, směřující horizontálním směrem ke středu ucha. Ploténka třmínku má ledvinovitý tvar a je vsazena do oválného okénka v mediální stěně, toto spojení je přitom elastické (tj. pomocí membrány).

2.3.3 Sluchová (Eustachova) trubice

Sluchová trubice (*tuba auditiva*) spojuje středoušní dutinu s dutinou hltanovou [3]. U dospělého člověka sluchová trubice dorůstá délky 3,5 až 4 cm, tvarem je podobná zevnímu zvukovodu. Otvor trubice v oblasti hltanu je o rozměrech 9 x 5 mm, zužuje se až na rozměry 5 x 3 mm při ústí do dutiny středoušní. Funkcí sluchové dutiny je vyrovnávání tlaku vzduchu v dutině středoušní s barometrickým tlakem vzduchu v okolním prostředí.

2.4 Vnitřní ucho

Vnitřní ucho (*auris interna*) je umístěno v pyramidě spánkové kosti [3]. Ve vnitřním uchu se nachází síť kanálků a dutinek tvořících **kostěný labyrint** (*labyrinthus osseus*), který je vyplněn čirou tekutinou (perilymfou). Kostěný labyrint tvoří ochrannou schránku pro mnohem menší **labyrint blanitý** (*labyrinthus membranaceus*), který je vyplněn tekutinou podobnou perilymfě. Oba labyrinty jsou složeny z vestibulární a hlemýžďové části. Vnitřní ucho obsahuje smyslový epitel dvojího typu. V hlemýžďové části je epitel sluchového čidla (akustické vlnění přeměňuje na nervové impulzy, které jsou sluchovou dráhou odváděny do specializovaných oddílů mozkové kůry). Ve vestibulární části je epitel rovnovážného čidla, který slouží k registraci polohy a pohybu hlavy v prostoru.

2.4.1 Kostěný labyrint

Labyrint (*labyrinthus osseus*) je složen ze čtyř částí: **předsíň** (*vestibulum*), **kostěné polokruhové kanálky** (*canales semicirculares ossei*), **hlemýžď** (*cochlea*) a **vnitřní zvukovod** (*meatus acusticus internus*) [3]. Předsíň je ve tvaru vejčité dutinky a nacházejí se v ní dva váčky, utriculus a sacculus, nesoucí na vnitřním povrchu smyslové buňky. Utriculus je ovoidního tvaru, citlivý na lineární zrychlení. Sacculus je kulatý a je propojen s hlemýžďem. Z předsíně vystupují tři polokruhové kanálky (přední, zadní, postranní) a opět v ní končí, jsou uloženy k sobě kolmo. Tyto kanálky jsou také opatřeny smyslovými buňkami umístěnými v blanitých kanálcích, které jsou citlivé na úhlové zrychlení. Kostěný hlemýžď se nachází v přední části

kostěného labyrintu a je tvořen kostěným kanálkem stočeným do spirály. Kostěná spirála se obtáčí kolem modiolu a má 2,5 závitů.

2.4.2 Blanitý labyrint

Blanitý labyrint (*labyrinthus membranaceus*) je tvořen uzavřeným systémem váčků a trubiček, který je uložen v kostěném labyrintu [3]. Je podstatně menší, prostor vznikající mezi oběma labyrinty je vyplněn perilymfou. Blanitý labyrint je přichycen ke kostěným stěnám vazivovou tkání. Dutiny blanitého labyrintu jsou vyplněny endolymfou. Zdrojem obou tekutin je krevní plazma. Blanitý labyrint je tvořen **předsíňovým labyrintem** sestávajícím ze dvou váčků, utriculus a sacculus, a z blanitých kanálků (*viz. výše*). Druhou částí blanitého labyrintu je **hlemýžďový labyrint** tvořený tenkou, dlouhou a slepě uzavřenou trubičkou, která je vsazena do kostěné spirály. Zde je uložen vlastní **sluchový orgán** (*organum spirale Corti*), který má tvar spirálního valu a probíhá od baze až k vrcholu hlemýžďe. Cortiho orgán je tvořen smyslovými buňkami a je zahalen rosolovitou membránou obsahující čivé vlásky smyslových buněk, které jsou opředeny dendrity neuronů.

2.5 Vedení zvuku a sluchové senzory

Ušní boltec zachytí akustické vlny vedené prostředím a nasměruje je do zevního zvukovodu [1]. Bubínek, který ukončuje zevní zvukovod, zachytí akustické vlny ve zvukovodu a kolísání akustického tlaku jej rozkmitá. Kmity přechází do středního ucha a pomocí pohyblivého mechanismu vnitřních sluchových kůstek se přenáší na oválné okénko vnitřního ucha. Zde dochází 22-násobně ke zvýšení tlaku. Důležitou funkcí sluchových kůstek je přenos zvuku (nejlépe beze ztráty) z vnějšího prostředí s nízkým vlnovým odporem do prostředí s vysokým vlnovým odporem (tj. kapalina vnitřního ucha). Mezi funkce svalů upínajících se na rukojeť kladívka patří reflexní udržování konstantní intenzity zvuku, ochrana před příliš hlasitým zvukem a snížení rušivých šelestů. Kromě tohoto způsobu přenosu zvuku je také možný přímý přenos kmitů celé lebky na hlemýžď. Tento způsob se nazývá kostní vedení zvuku. Po fyziologické stránce nemá téměř význam, využívá se hlavně při stanovení diagnostiky vad vnímání zvuku. Vibrace membrány oválného okénka vyvolané třmínkem způsobí posun objemu perilymfy, což má za následek vyklenutí membrány okrouhlého okénka. Stěny endolymfatické trubice se poddávají vlnovitému zvýšení tlaku a vzniká postupující vlna. Vzruch se v tekutině šíří dál vnitřkem horního kanálku přes helicotrema do spodního kanálku. Během průchodu vzruchu kanálky se basilární membrána deformuje [4]. Rychlost vlny v tekutině průběžně klesá a je mnohem pomalejší než rychlost zvuku, vlnová délka se prodlužuje a amplituda roste na maximum. Zvuky s rozličnou frekvencí zaznamenává basilární membrána vnitřního ucha jako maximální záchvěvy v různých vzdálenostech od oválného okénka. Tato maxima mají poměrně plochý tvar a čím je zvuk nižší frekvence, tím větší je vzdálenost příslušného maxima od vstupního oválného okénka [4]. Kmity způsobují nepatrné posuny basilární a tektoriální membrány vůči sobě a vytváří podráždění vnějších vestibulárních buněk. Tyto procesy jsou částí procesu zesílení asi stonásobně (tj. 40 dB). Kmitáním endolymfy dochází k ohybu cílů (řasinek), otevření transdukčních kanálků, uvolnění

transmitteru z vnitřních vestibulárních buněk (vlastních sluchových receptorů) a k následnému vedení nervového impulzu k CSN.

3 VYŠETŘOVACÍ METODY V AUDIOLOGII

Audiologie je definována jako věda o sluchu, umožňuje diagnostikovat, ohodnotit a určit příčinu vady sluchu[12]. Za zakladatele oboru je považován Raymond Carhart (1912 – 1975), v Evropě je však za zakladatele audiologie považován Georg von Békésy (1889 – 1972).

Vyšetřovací metody používané dnes v audiologii můžeme dělit dle [12] na **metody subjektivní** (behaviorální) a **metody objektivní**. Při použití subjektivních metod jsme odkázáni na dobrou spolupráci vyšetřovaného pacienta, na jeho chování. Tyto metody mohou být komplikovány pacienty, kteří z různých důvodů nejsou schopni spolupráce (vysoký věk, mentální defekt, kombinované postižení) a je stále velká skupina pacientů, kteří budou svou poruchu zveličovat nebo zcela simulovat. Mezi objektivní metody zahrnujeme vyšetření korových evokovaných odpovědí, kmenových evokovaných odpovědí a cochleografie. Jsou označovány jako metody elektrofyziologické. Základní informací pro audiologická vyšetření je podrobná anamnéza (možné rodinné dispozice, zda se jedná o poruchy získané – po středoušních zánětech, po práci v hluku nebo zda poruchy byly doprovodným jevem stáří). Důležitá je i informace o stavu nosní průchodnosti a průchodnosti nosohltanu.

3.1 Zkoušky pomocí ladiček

Ještě před padesáti lety byl sluch vyšetřován pouze pomocí sady ladiček v rozmezí frekvencí 64 – 4186 Hz [12]. Ke klasickému vyšetření sluchu bylo nezbytné provést zkoušku Rinneho, Weberovu a Schwabachovu. Rinneho a Weberova zkouška nám poskytuje informaci o tom, zda se jedná o nedoslýchavost percepční nebo převodní. Tyto dvě zkoušky nám stačí pro orientaci před vlastním audiometrickým vyšetřením.

3.2 Audiometrie, audiometrické vyšetření

Audiometrie je technika vyšetření sluchového prahu pomocí speciálních testů [12]. Audiometrické vyšetření zachycuje subjektivní vjem vyšetřovaného pacienta na přesně definovaný zvukový podnět (intenzita, frekvence, charakter podnětu – tón, šum, slovo, věta). Vyšetření se provádí v tiché komoře, v kabině nebo quasi tiché místnosti, s malým dozvukem a zvýšenou pohltivostí stěn. Audiometrické vyšetření zahrnuje určení prahu sluchu čistými tóny pro vzdušné a kostní vedení. Vyšetřovací komora musí splňovat určité parametry, které jsou dány ČSN ISO 8253 – 1, 2, 3.

Pro audiometrická vyšetření používáme **audiometr** a **sluchátka**. V klinické praxi se používají čtyři druhy audiometrů. *Screeningový audiometr* umožňuje vyšetřit 4 – 6 frekvencí pouze pro vzdušné vedení. *Diagnostický audiometr* umožňuje vyšetřit 6 frekvencí pro vzdušné vedení a 3 – 4 frekvence pro vedení kostní. *Klinický audiometr* umožňuje vyšetřit až 11 frekvencí pro vzdušné vedení (125, 250, 500, 750 Hz, 1, 2, 3, 4, 6, 8 a 12 kHz) a může dosáhnout intenzity až 130 dB a 7 frekvencí pro vedení kostní (250, 500, 750 Hz, 1, 2, 3 a 4 kHz), všechny nadprahové testy a slovní nebo řečovou audiometrii. *Vysokofrekvenční audiometr* umožňuje vyšetření frekvencí od 64 Hz až do 20 kHz pro vzdušné vedení. Ostatní parametry jsou obdobné jako u

klinického audiometru. Sluchátka užívaná při audiometrickém vyšetření jsou trojího typu: *kompletně zakrývající boltec, přikládaná na boltec a vkládaná do zvukovodu.*

3.3 Audiometrické vyšetření čistými tóny

3.3.1 Audiogram

Audiogramem rozumíme grafické znázornění výsledku sluchových testů (audiometrie) [12]. Práh sluchu definuje křivka spojující prahové intenzity různých frekvencí. Výsledek měření prahu sluchu je zapsán do audiogramu a porovnán s křivkou normálního sluchu (reprezentováno 0 v audiogramu). Porovnáním obou audiogramů dostaneme sluchovou ztrátu. Na ose x na grafu je intervalově vyjádřena frekvence v Hz, na osu y je zaznamenávána intenzita v 5 – 10 dB intervalech. Rozmezí je většinou od -10 dB do 120 dB. Používané symboly pro pravé a levé ucho se liší, shoda je pouze v použití barvy, pravé ucho je označováno červeně, levé ucho modře. Vzdušné vedení vpravo je označováno kroužky, vlevo křížky. Kostní vedení je v našem případě označováno hranatými závorkami ([- vpravo,] - vlevo. Někdy je kostní vedení označováno šipkami (<>).

3.3.2 Vyšetření vzdušného vedení

V tiché komoře provádíme audiometrické vyšetření pomocí audiometru se sluchátky [12]. Výsledkem je grafické zobrazení sluchového prahu pro jednotlivé frekvence, při běžném klinickém vyšetření vyšetřujeme 8 frekvencí (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000 a 8000 Hz). Frekvence 750 Hz a 3000 Hz vyšetřujeme při podezřeních na neurinom n. statoacustici. Náš postup vyšetřování se kryje s doporučeným postupem ISO. Pacient se posadí do tiché komory tak, aby vyšetřující mohl pozorovat reakci pacienta. Pacient reaguje na nejtišší podnět, přičemž tón trvá 1 – 2 vteřiny. Při vyšetření začínáme na frekvenci 1000 Hz na lepším uchu. Pokud vyšetřujeme pacienta, který má normální sluch, začínáme intenzitou 40 dB, pokud vyšetřujeme pacienta se sluchovou poruchou, začínáme intenzitou 70 dB. Pokud pacient slyší tón této intenzity, snižujeme intenzitu po 5 dB, až přestane udávat slyšení. Pak zvyšujeme intenzitu po 5 dB, až udává opět slyšení. Postup se opakuje 3x a hodnota, která se 2x opakuje, je práh sluchu (HL – hearing level). Od frekvence 1000 Hz postupujeme k hlubokým frekvencím, pak se vracíme na frekvenci 2000 Hz a vyšetřujeme vysoké frekvence. Ptáme se, zda pacient slyší hluboký nebo vysoký tón a ve kterém uchu jej slyší.

3.3.3 Vyšetření kostního vedení

Akustický podnět může být přiváděn [12] ke sluchovému orgánu ve vnitřním uchu i přes kosti lebky. Podnět pro rozkmitání kostí lebky však musí být velmi intenzivní. V klinické audiologii jsou tyto podněty realizovány pomocí vibrátoru, který se přiloží na proc. mastoideus (na místo, kde je tón slyšet nejhlasitěji na frekvenci 500 Hz) nebo na čelo. Vibrátor je zavěšen na pružině a mezi kůží proc. mastoideus a vibrátorem nesmí být vlasy. Protože zvuk dorazí do obou cochleí prakticky ve stejné době, musí

vyšetřující posoudit, zda pacient slyší skutečně zvuk ve vyšetřovaném uchu nebo v uchu nevyšetřovaném. Velkou roli ve vyšetření hraje maskování nevyšetřovaného ucha.

3.3.4 Maskování

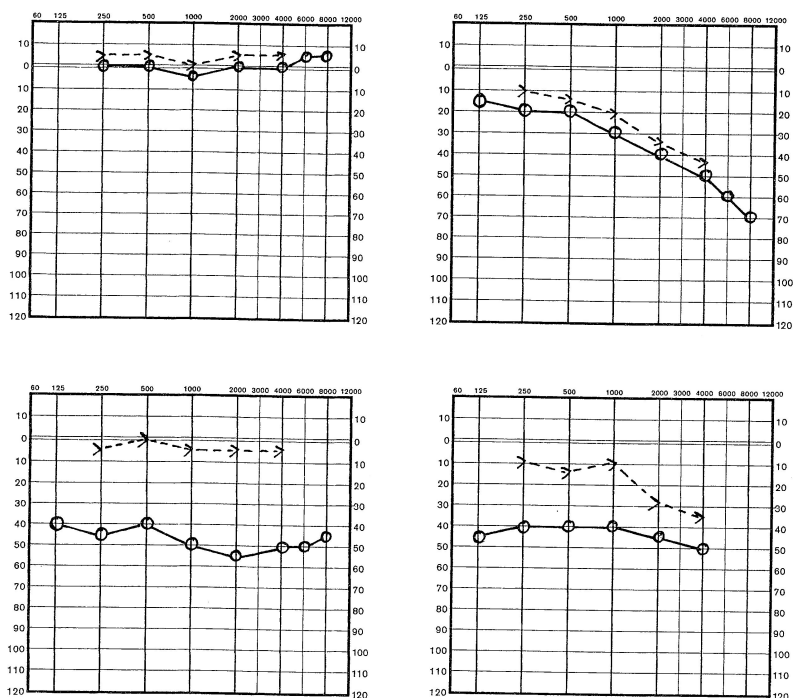
Maskováním při audiometrickém vyšetření rozumíme vyloučení nevyšetřovaného ucha, tudíž i vyloučení možného přeslechu tónů do nevyšetřovaného ucha [12]. Přeslech nastává při intenzitě vyšší než 50 dB. K ohlucení nevyšetřovaného ucha se používá NB šum (úzkopásmový šum) nebo WB šum (bílý šum). Pro určení intenzity šumu pro vzdušné i kostní vedení existuje řada vzorců. Maskování při vyšetření prahu kostního vedení je velmi problematické, někdy se nepodaří vůbec. Pro určení intenzity šumu pro maskování musíme brát v úvahu i vznik okluzního efektu při uzavření zevního zvukovodu sluchátky, přičemž dochází ke zlepšení prahu kostního vedení o 5 – 10 dB. Při maskování vzdušného vedení se nejčastěji používá postupné maskování NB šumem. Začíná se na intenzitě 40 dB a pokud pacient stále slyší tón v nevyšetřovaném uchu, zvyšuje se intenzita maskovacího šumu po 10 dB do té doby, než pacient slyší vyšetřovací tón ve vyšetřovaném uchu. Nikdy však intenzita maskovacího šumu nepřekračuje 80 dB, kdy dochází k centrálnímu maskování. Pro maskování kostního vedení se používá nejčastěji metoda plateau, kdy do nevyšetřovaného ucha aplikujeme maskovací šum 60 dB. Jestliže pacient stále slyší vyšetřovaný tón v nevyšetřovaném uchu, přeslýchá a intenzitu maskovacího šumu zvyšujeme po 5 dB. Jakmile pacient přestane slyšet vyšetřovací tón v nevyšetřovaném uchu, je dosažena hodnota plateau, která nezvyšuje hodnotu sluchového prahu na vyšetřovaném uchu. Efektivní hodnota maskování metodou plateau se pohybuje mezi 40 – 75 dB.

3.4 Obecné zhodnocení audiogramu

Při posuzování výsledků vyšetření prahu sluchu (HL - Hearing Level) vzdušného a kostního vedení posuzujeme vztah mezi těmito prahy [12]. Za normálních okolností sleduje práh kostního vedení práh vedení vzdušného, je stejný jako práh vzdušného vedení nebo ± 5 dB. U percepční nedoslýchavosti dochází ke zvýšení prahu sluchu u vzdušného i u kostního vedení. U převodní nedoslýchavosti je ztráta ve vzdušném vedení, práh kostního vedení je normální. U smíšené nedoslýchavosti je zvýšený práh vzdušného i kostního vedení. Z rozdílu mezi vzdušným a kostním prahem určujeme cochleární rezervu. Tyto stavy jsou vykresleny na (Obr.3.1).

Na základě audiometrického vyšetření jsme schopni posoudit i závažnosti sluchové poruchy nebo vady. Hodnocení závažnosti poruchy sluchu udává Tab. 5.1.

Pokud audiometrické vyšetření prokáže převodní poruchu sluchu, musíme příčinu nedoslýchavosti objasnit až dalšími speciálními audiometrickými testy.



Obr. 3.1: Typy nedoslýchavostí [12]

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| a) normální sluch | b) percepční nedoslýchavost |
| c) převodní nedoslýchavost | d) smíšená nedoslýchavost |
| > - kostní vedení | o - vzdušné vedení |

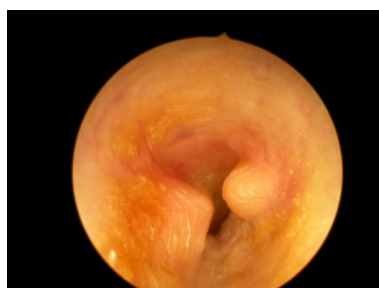
Změna prahu slyšitelnosti v dB	Hodnocení závažnosti poruchy
15 dB HL	Normální sluch
16 - 25 dB HL	Velmi lehká porucha
26 - 40 dB HL	Lehká porucha
41 - 55 dB HL	Mírná porucha
56 - 70 dB HL	Mírná až středně těžká porucha
71 - 90 dB HL	Těžká porucha
91 dB HL a více	Velmi těžká porucha

Tab. 3.1: Hodnocení závažnosti poruchy sluchu [12]

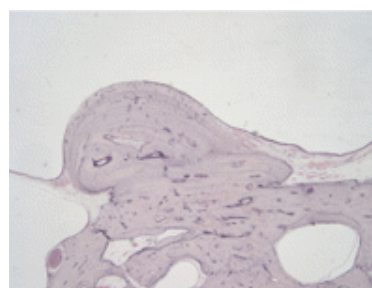
4 OVLIVNĚNÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ ZEVNÍHO ZVUKOVODU EXOSTÓZAMI

4.1 Exostózy

Sluchové exostózy jsou kostní výrůstky zevního zvukovodu [8]. Exostózy zejména postihují lidi, kteří jsou vystaveni vlivu studené vody, např. plavce, surfaře, potápěče. Typicky postihují pacienty v zevním zvukovodu oboustranně (výrůstky se v zevním zvukovodu tvoří naproti sobě) (Obr. 4.1). Prvotní záněty ucha a ztráty slyšení zapříčiněny exostózami jsou nejprve léčeny prostřednictvím léků a ušních ucpávek. Jestliže však příznaky exostóz začnou být opakované, řeší se u pacientů tento problém operativně různými chirurgickými technikami.



Obr. 4.1: Oboustranný výskyt exostóz [7]



Obr. 4.2: Histopatologický vzorek exostózy [8]

4.2 Důsledky exostóz

V USA byl proveden dle [8] výzkum na 327 pacientech (401 uší), kteří byli mezi lety 1990 – 2006 podrobeni operaci v důsledku výskytu exostóz. V mnoha případech pacienti trpěli doprovodnými potížemi viz. Tab. 5.1. Někteří pacienti se podrobili dvěma operacím průměrně v intervalu 20 měsíců, 2% pacientů (7 uší) se současně při operaci exostóz podrobila i plastice perforovaného ušního bubínku a 2,2% pacientů (9 uší) byl současně při operaci vyňat třímínek.

Uvedený druh potíží	Počet pacientů	Počet pacientů v %
Opakující se zánět zevního zvukovodu	137	41,9%
Pocit zalehlého ucha	96	29,4%
Ztráta slyšení	83	25,4%
Bolesti	24	7,3%
Hučení v uchu	8	2,4%

Tab. 4.1: Doprovodné potíže u pacientů trpících exostózami [8]

Na základě lékařských mikroskopických analýz byla stanovena stupnice závažnosti exostóz *Tab. 5.2*, která je definována procentuálním rozsahem ucpání zevního zvukovodu.

Rozsah ucpání v %	Stupnicové ohodnocení
0%	Normální, 0
< 33%	Minimální, 1
33% - 66%	Mírný, 2
> 66%	Vážný, 3

Tab. 4.2: Stupnice závažnosti exostóz [8]

Předoperační a pooperační vyšetření pro zaznamenání audiometrických dat bylo prováděno standardně vedením zvuku vzduchem (na frekvencích 0,5, 1, 2 a 3 kHz) a kostním vedením (na frekvencích 1, 2 a 3 kHz).

4.2.1 Chirurgický postup pro odstranění exostóz

Řez zevním zvukovodem je proveden mediálně, jak jen exostózy dovolí a ucho je stočeno vpřed [8]. Zbývající kůže pokrývající exostózy je vyhrnuta za pomoci zakulaceného nože a po dobu procedury je nepřetržitě předsunuta směrem k ušnímu bubínku. Pro ochranu odhrnuté kůže může být použita ochranná fólie. Výrůstek je odvrátán a zbylé převisy po vrtání jsou odstraněny kyretou. Až je celý výrůstek odstraněn, je odhrnutá kůže znovu umístěna na původní místo a upravena, jak je potřeba.

4.2.2 Výsledky vyšetření pacientů po operaci exostóz

Operace exostóz probíhaly ve 48,4% u pacientů postižených exostózami v pravém uchu a v 51,6% u pacientů s exostózami v levém uchu [8]. Vážný stav exostóz (stupnicové ohodnocení 3 z *Tab. 5.2*) mělo 82,9% pacientů s exostózami v pravém uchu a 85,1% pacientů s exostózami v levém uchu. Celkové ohodnocení závažnosti exostóz u operovaných pacientů uvádí *Tab. 4.3*.

Stupnicové ohodnocení	Počet pacientů	Počet pacientů v %
1	5	1,2%
2	13	3,2%
3	383	95,5%

Tab. 4.3: Závažnost exostóz u jednotlivých pacientů [8]

Pooperační komplikace, které se vyskytují jen zřídka, jsou ukázány v *Tab. 4.3*. Nejčastější pooperační komplikací bylo dlouhodobé hojení, které se vyskytuje ve 4,5% odoperovaných uší. Příčinou dlouhodobého hojení převážně bylo brzké vystavení odoperovaného ucha vlivu vody.

Pooperační komplikace	Počet pacientů	Počet pacientů v %
Ochrnutí obličeje	0	0%
Odhalení čelistního kloubu	1	0,2%
Perforace bubínku	1	0,2%
Zúžení zevního zvukovodu	5	1,2%
Nutná další úprava	2	0,5%
Infekce zevního zvukovodu	6	1,5%
Dlouhodobé hojení	18	4,5%

Tab. 4.4: Pooperační komplikace u pacientů [8]

4.2.3 Změny slyšení po operaci exostóz

Výzkum [8] byl proveden na 254 uších. Změny rozdílu mezi kostním vedením zvuku a vedením zvuku vzduchem (zlepšení), stejně jako prahová hodnota kostního slyšení na 4 kHz (zhoršení), jsou zobrazeny v *Tab. 4.5*. Změna v kostním vedení vysokých frekvencí nebyla významná. *Tab. 4.6* ukazuje změny v percepční nedoslýchavosti.

4.2.4 Opakovaný výskyt exostóz po operacích

Delší pooperační sledování bylo nutno provést u 91 uší [8]. V průměru sledování této skupiny trvalo necelých 24 měsíců. Návrat odstraněných exostóz byl zaznamenán u 8 uší, přičemž časové rozmezí pro znovuoobjevení nových exostóz se pohybovalo od 1 roku do 15 let. V 5ti případech z 8 byly nově vzniklé exostózy ohodnoceny stupněm závažnosti 3.

	Průměr před operací [dB] (směrodatná odchylka)	Průměr po operaci [dB] (směrodatná odchylka)	Změna před/po operaci - průměr [dB] (směrodatná odchylka)
Vedení vzduchem - průměr měření na 0,5; 1; 2 a 3 kHz	20,0 (20,0)	15,6 (14,4)	4,4 (14,9)
Kostní vedení - průměr měření na 0,5; 1; 2 a 3 kHz	12,0 (11,0)	11,8 (10,5)	0,18 (5,1)
Rozdíl mezi vedením zvuku vzduchem a kostním vedením	7,9 (13,3)	3,6 (7,2)	4,3 (12,6)
Kostní vedení 1; 2; 4 kHz	14,7 (12,9)	15,0(12,2)	-0,39 (5,7)
Kostní vedení 4 kHz	21,3 (19,4)	25,0 (18,9)	-3,7 (8,3)

Tab. 4.5: Průměrné hodnoty prahu sluchu určené z průměrů sluchu na 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz (popř. 4 kHz) [8]

	Průměr měření na 1; 2 a 4 kHz (% uší)	4 kHz (% uší)
Zhoršení ≥ 25 dB	0	0,4
Zhoršení > 15 až 25 dB	0,4	4,4
Stejně - 15 až 15 dB	99,2	94,0
Zlepšení > 15 až 25 dB	0,4	1,2

Tab. 4.6: Změny u percepční nedoslýchavosti při kostním vedení zvuku [8]

5 DISKUZE VLIVU EXOSTÓZ NA SLUCH

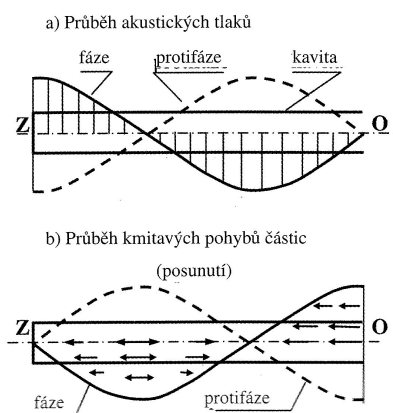
5.1 Možná změna modálních vlastností zevního zvukovodu při výskytu exostóz - analytické řešení

5.1.1 Akustické kavity

Mezi akustické kavity (dutiny) může být zařazeno i sluchové ústrojí, kde za jistých okolností dochází k rezonanci patřičného vzduchového prostoru [9]. V kavitě vzniká stojaté vlnění. Sluchové ústrojí je tvořeno zevním zvukovodem, středoušními dutinami, dutinami ve vnitřním uchu a v průběhu kostního vedení mohou být zahrnuty i dutiny lebeční. Jelikož je sluchové ústrojí coby akustická kavitka poměrně složitým prostorovým akustickým útvarem, je vhodné se blíže seznámit s akustickými vlastnostmi jednodušších tvarů kavit.

Akustické kavity jednodušších tvarů

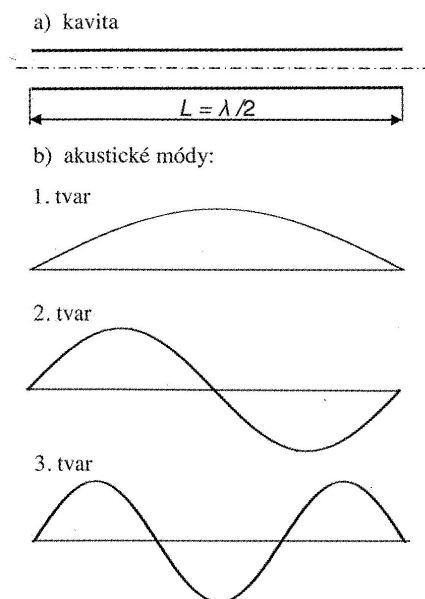
Nejjednoduššími akustickými kavitami jsou válec, popřípadě kužel [9]. Akustické tlaky a kmitavé pohyby (posunutí) vzduchových částic u vibrujícího vzduchového sloupce jsou závislé na tom, zda jsou konce akustických kavit zavřené či otevřené. Jelikož je délka kavitky převládající nad jejím příčným průřezem, zanedbáme příčné kmitky částic v příslušném vzduchovém sloupci a budeme uvažovat pouze kmitky podélné. Akustické módy lze pozorovat dvojím způsobem, tj. průběhem akustických tlaků nebo průběhem kmitání (posunutí) vzduchových částic. Platí, že kde je akustický tlak nulový, je kmitavý pohyb částic maximální a naopak, kde je akustický tlak maximální, je kmitavý pohyb částic nulový (Obr. 5.1). Zobrazení jedné nebo druhé varianty zaznamenání akustických módů závisí na typové úloze. U otevřeného konce kavitky je akustický tlak nulový, neboť zde se nemohou vytvářet žádné tlakové změny a u uzavřeného konce kavitky se naopak vytváří maximální akustický tlak.



Obr. 5.1: Typy módů kavit [4]

Trubice na obou koncích otevřená

Akustické tlaky jsou na obou koncích nulové u všech akustických módů [9]. Proto má základní akustický mód pouze polovinu délky akustické vlny v kavitě.



Obr. 5.2: Akustické módy kavity oboustranně otevřené [4]

Mezi délkou trubice L a délkou akustické vlny λ platí vztah

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_1} \quad (5.1)$$

kde c je rychlost šíření vzduch v daném prostředí a f_1 je první vlastní frekvence akustického módu. Odtud základní vlastní frekvence podélných kmitů vzduchového sloupce je vyjádřena vztahem

$$f_1 = \frac{c}{4L} \quad (5.2)$$

Druhá vlastní frekvence je, když $L = \lambda$ a platí pro ni vztah

$$f_2 = \frac{c}{L} = 2f_1 \quad (5.3)$$

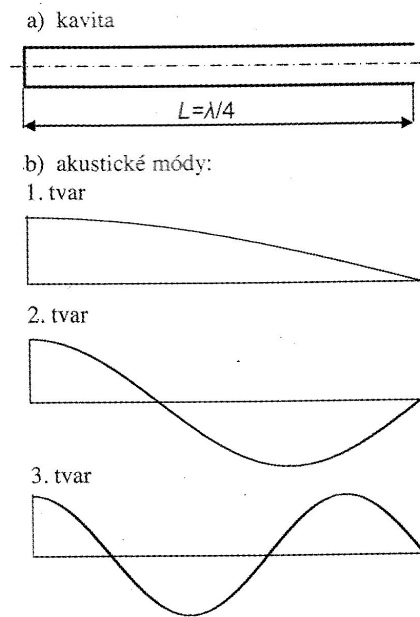
Obecně tedy platí vztah pro n -tou vlastní frekvenci ($n = 1, 2, 3, \dots$) a je roven

$$f_n = nf_1 \quad (5.4)$$

Vlastní frekvence kavity trubice otevřené na obou jejích koncích tvoří úplnou harmonickou řadu.

Trubice na jednom konci otevřená a na druhém konci uzavřená

Akustický tlak na otevřeném konci trubice je nulový a na uzavřeném konci trubice je maximální [9]. Proto má základní akustický mód čtvrtinu délky akustické vlny v kavitě.



Obr. 5.3: Akustické módy kavity na jedné straně zavřené [4]

Mezi délkou trubice a délkou akustické vlny platí vztah

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_1} \quad (5.5)$$

Odtud základní vlastní frekvence podélných kmitů vzduchového sloupce je vyjádřena vztahem

$$f_1 = \frac{c}{4L} \quad (5.6)$$

Druhá vlastní frekvence je dána vztahem

$$f_2 = \frac{3c}{4L} = 3f_1 \quad (5.7)$$

Obecně tedy platí vztah pro n -tou vlastní frekvenci ($n = 1, 3, 5, 7, \dots$) a je roven

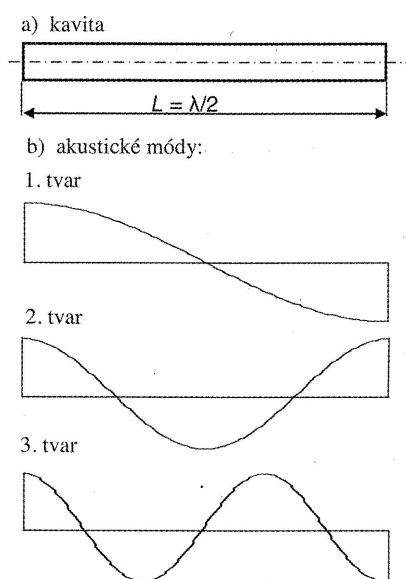
$$f_n = nf_1 \quad (5.8)$$

Zde se vytváří harmonická postupnost pouze lichými násobky základní frekvence a neobsahuje tedy sudé násobky základní frekvence.

Trubice uzavřená na obou koncích

Akustické tlaky jsou maximální na obou koncích uzavřené kavity [9]. Mezi délkou trubice a délkou akustické vlny platí vztah

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_1} \quad (5.9)$$



Obr. 5.4: Akustické módy kavity oboustranně uzavřené [4]

Odtud základní vlastní frekvence podélných kmitů vzduchového sloupce je vyjádřena vztahem

$$f_1 = \frac{c}{2L} \quad (5.10)$$

Tento vztah je totožný se vztahem pro kavitu na obou koncích otevřenou a obecně tedy platí vztah pro n -tou vlastní frekvenci ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$) a je roven

$$f_n = n f_1 \quad (5.11)$$

Postupnost vlastních frekvencí je zde opět úplně harmonická, ale vzniklé akustické módy se od sebe liší velikostí akustických tlaků.

5.1.2 Přenos zvukových vln normálním zevním zvukovodem

Vzhledem ke geometrii zevního zvukovodu můžeme zvukovod považovat za trubici s jedním koncem otevřeným a s druhým koncem uzavřeným. Systém přenosu zvuků vzdušnou cestou (zevním a středním uchem) může být rozdělen do několika podsystémů, kde přenos zvuku každým podsystémem je výrazně frekvenčně závislý [5]. Na hodnotu modálních frekvencí v zevním zvukovodu má také vliv (snížení až o 10%) olemování zvukovodu ušním boltcem. Šířka a délka zvukovodu má vliv na zesilování určitých frekvencí, přičemž délkou zvukovodu uvažujeme celkovou délku zalomené osy zevního zvukovodu, u zdravého člověka v průměru 35 mm. Ze vztahu (5.12)

$$f < \frac{0,586c}{D} \quad (5.12)$$

kde c je rychlost zvuku v trubici a D je průměr zvukovodu, můžeme předpokládat pro frekvence nižší než 2,8 kHz šíření jen rovinných vln. Při dopadu zvukových

vln z okolního fluidního prostředí dochází v zevním zvukovodu k interferenci mezi vlnou dopadající a vlnou odraženou od bubínku popř. stěn středoušní dutiny. Maximální interference nastává tehdy, když je délka zvukovodu rovna čtvrtině vlnové délky dopadající vlny, tj. první modální frekvence v zevním zvukovodu je kolem 2,8 kHz. V této oblasti frekvence se akustický tlak před bubínkem zvýšil. Důležitým parametrem ovlivňujícím přenos zvuku zevním zvukovodem je absorpce vln na stěnách zevního zvukovodu, středoušní dutiny a bubínku. Absorpce nemění hodnotu modálních frekvencí, výrazně však ovlivňuje průběh rezonančních křivek. V případě výskytu exostóz se dá předpokládat větší vliv absorpce (větší odrazové plochy).

5.1.3 Kostní vedení zvuku

V 19. století bylo všeobecně potvrzeno, že člověk je schopen vnímat zvuky jak vedené vzduchem, tak přenášené kostním vedením skrze lebku [10]. Kostní vedení zásadně ovlivňují tyto faktory: **šíření zvuku k zevnímu zvukovodu, přenos vlnění přes sluchové kůstky ve středním uchu, přenos vlnění v cochleárních tekutinách, modifikace cochleárního prostoru a přenos tlaku z mozkomíšní tekutiny**. Vibrační módy mohou být v lebce rozděleny do tří základních frekvenčních pásem. Na nejnižších frekvencích, přibližně pod 400 Hz, se lebka pohybuje (vibruje) jako celek. Při vyšších frekvencích, od 400 Hz do 1 kHz, je možné pohyby lebky vnímat jako systém hmotných pružin, zatímco při vysokých frekvencích, nad 1 kHz, se zvuk lebku šíří v podobě vln. Pouze při vysokých frekvencích je překročena rezonanční hladina v lebce.

Některé faktory přispívající k percepci zvuku při kostním vedení

Zevní zvukovod

Jestliže je zevní zvukovod plně otevřený, neovlivňuje vnímání zvuku kostním vedením. Jestliže je však zevní zvukovod uzavřený (nebo zúžený exostózami), hladina zvuku se v zevním zvukovodu na nízkých frekvencích zvýší [10]. Vzniklý jev je označován za okluzní efekt, který vzniká na principu **Helmholtzova rezonátoru**.

Helmholtzův rezonátor je obecně nádoba (nejčastěji se vzduchem) s malým otvorem nebo otevřeným krkem (jako prázdná láhev) [11]. Na nízkých frekvencích (kdy vlnová délka značně přesahuje rozměry rezonátoru) se vzduch krkem pohybuje jako spojitá hmota. Jestliže je objem vzduchu v nádobě V , kruhový otvor nebo kruhový krk s lemem mají plochu průřezu S a rychlost zvuku ve vzduchu je $c = 340$ m/s, potom je Helmholtzova rezonanční frekvence dána vztahem (5.13)

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(h + 0,8\sqrt{S})}} \quad (5.13)$$

kde h je délka krku (nebo v případě kruhového otvoru tloušťka stěny nádoby).

Velikost zvýšení hladiny zvuku tedy závisí na typu a umístění okluzního zdroje (v našem případě zejména velikosti, pozici a charakteru exostóz). Podle vztahu (5.13) byly vypočteny některé změny Helmholtzových rezonančních frekvencí pro různé velikosti a polohy exostóz z zevním zvukovodu. Výsledky jsou zapsány do *Tab. 5.1*.

Poloha a velikost exostóz	Helmholtzova rezonanční frekvence v [Hz]
Začátek zvukovodu - malý nárůst exostóz	1913
Střed zvukovodu - malý nárůst exostóz	2706
Začátek zvukovodu - střední nárůst exostóz	1112
Střed zvukovodu - střední nárůst exostóz	1572

Tab. 5.1: Helmholtzovy rezonanční frekvence pro různé velikosti a polohy exostóz v zevním zvukovodu

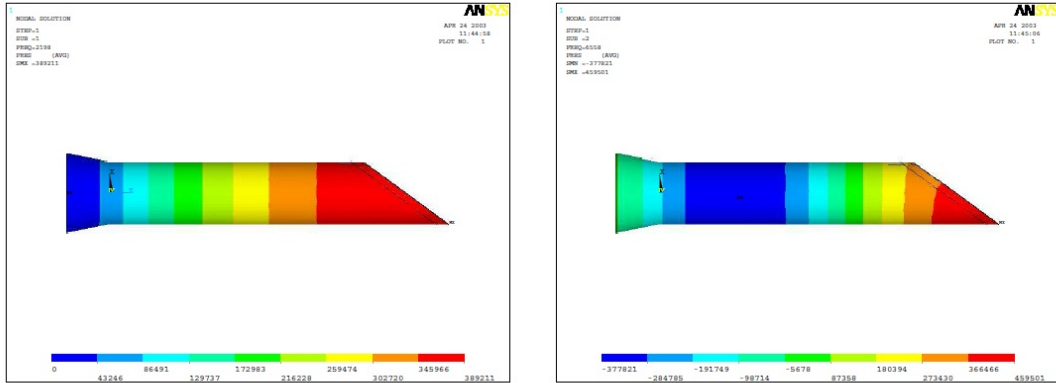
Sluchové kůstky středního ucha

Sluchové kůstky jsou ve středním uchu zavěšeny pomocí bubínku a dvou sva-
lových šlach [10]. Toto uložení sluchových kůstek vytváří pohyblivý mechanismus,
jehož vibrace se liší v průběhu kostního vedení od vibrací kostí obklopujících stře-
doušní dutinu. Rozdílný pohyb mezi plošinkou na třmínku a cochleárním promo-
toriem vytváří podnět pro vstup vlnového vzruchu do cochleí. Pro frekvence mezi
0,2 – 1,5 kHz jsou vibrace pro kostní vedení o 5 - 15 dB nižší, než vibrace u vedení
vzduchem, proto se tento zdroj na zmíněných frekvencích nepovažuje za významný
zdroj ovlivňující percepci zvuku během kostního vedení. Ale podobnost pohybů kůs-
tek mezi 1,5 – 3 kHz ukazuje, že setrvačný efekt středoušních kůstek může ovlivnit
vnímání zvuků kostním vedením během tohoto frekvenčního rozsahu.

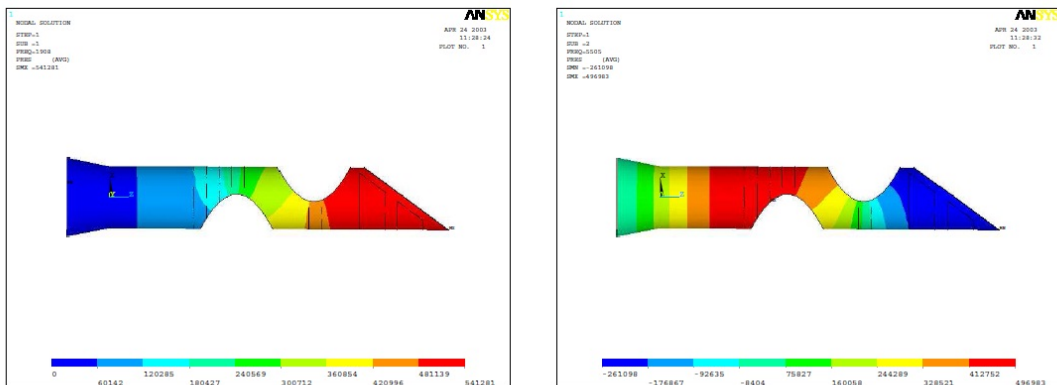
Kostní vedení má tedy jednak složku buzení v labyrintu cochleí a jednak převodní
(rozkmítáním kůstek). U převodní složky buzení exostózy ovlivňují kostní vedení,
dochází totiž ke změně frekvence Helmholtzova rezonátoru [18]. Změny frekvencí
jsou patrné z *Tab. 5.1*. Kromě toho zřejmě v případě velkých exostóz dochází i k
buzení akustického subsystému vyplňující prostor mezi bubínkem a exostózou (tzn.
že na vysokých frekvencích nelze vyloučit při odstranění exostózy zhoršení sluchu
kostním vedením).

5.1.4 Módy normálního zvukovodu a zvukovodu s exostó- zami

V diplomové práci [16] byl v systému ANSYS vytvořen model normálního zevního
zvukovodu (bez exostóz) a zvukovodu s exostózami a následně byla provedena jeho
modální analýza. Z *Obr.5.5* a *Obr.5.6* je patrné, že se mění modální frekvence.
Dochází k zakřivení a následnému prodloužení módu akustické osy zevního zvuko-
vodu. Tím zřejmě dochází ke snížení hodnot jednak modálních frekvencí akustického
subsystému zevního zvukovodu a zřejmě i ke snížení tlaku na bubínek v důsledku
zmenšení průsvitu zevního zvukovodu.



Obr. 5.5: První dva módy zdravého zevního zvukovodu

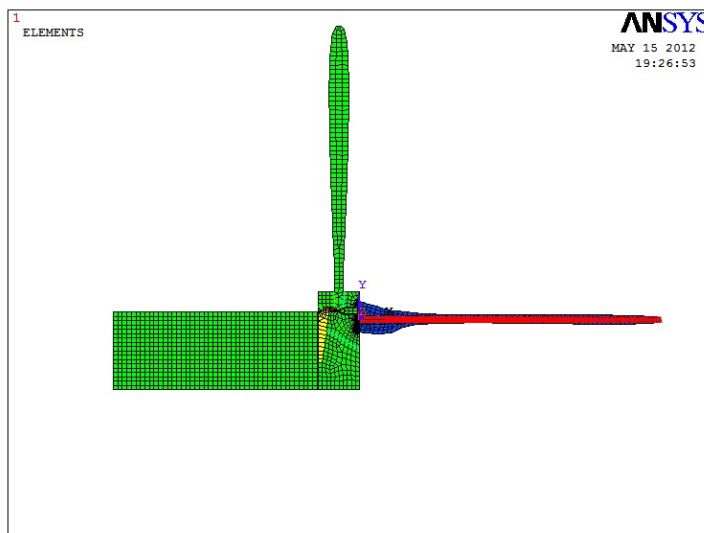


Obr. 5.6: První dva módy zevního zvukovodu s exostózami

5.2 Numerický model v systému ANSYS

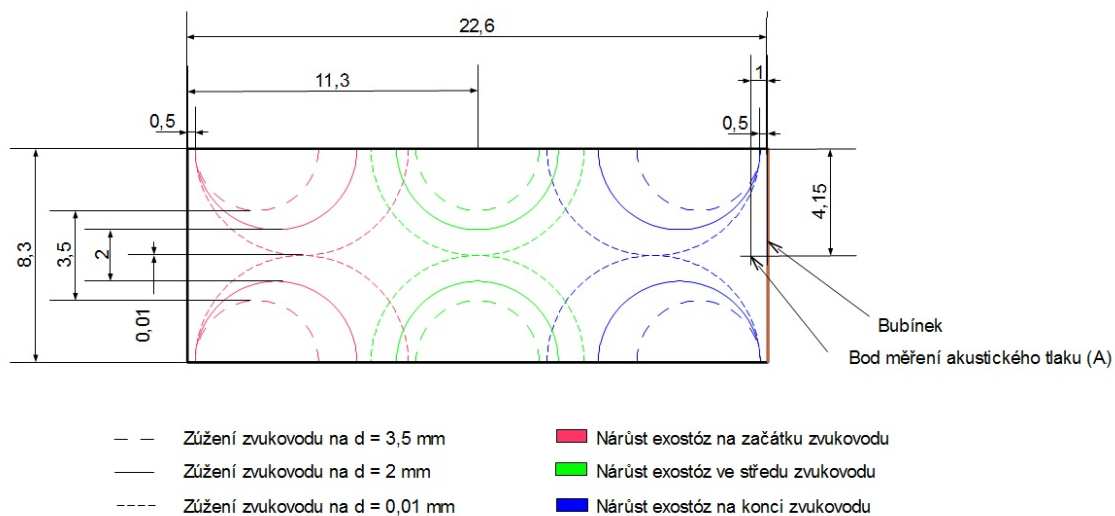
5.2.1 Geometrie modelu zevního zvukovodu s exostózami

Model zevního zvukovodu s exostózami byl vytvořen na zjednodušeném 2D modelu lidského ucha vytvořeného v systému ANSYS. Výpočtový 2D model lidského ucha byl převzat z práce [17] a zahrnoval akustický subsystém zevního zvukovodu, elastický bubínek, středoušní dutinu se sluchovými kůstkami a dutinu vnitřního ucha. Jednoduchý 2D konečnoprvkový model lidského ucha je zobrazen na *Obr. 5.7*.

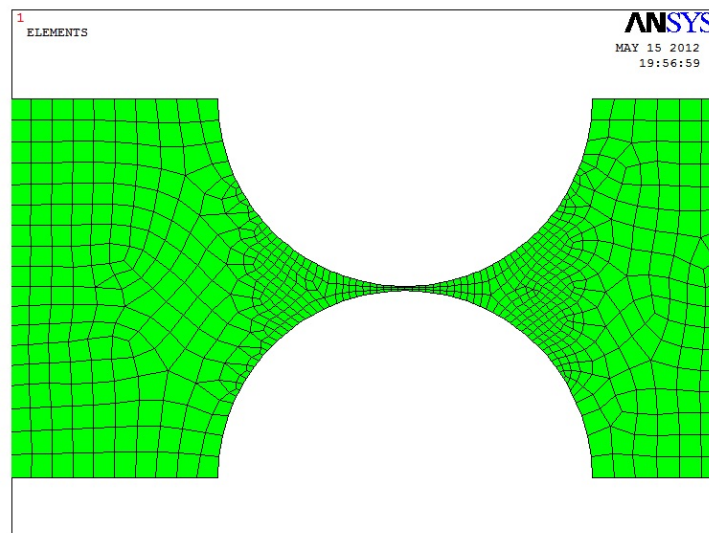


Obr. 5.7: Zjednodušený 2D konečnoprvkový model lidského ucha

Exostózy v tomto případě představují dva polokruhy odečtené booleovskými operacemi od modelu normálního zvukovodu. Pro spočtení harmonických analýz modelu byly vytvořeny tři modelové situace předpokládaného nárůstu oboustranných exostóz v zevním zvukovodu (tj. malý, střední a velký nárůst exostóz). Pro situaci malého nárůstu oboustranné exostózy byl průsvit zevního zvukovodu zúžen na 3,5 mm v místě vrcholků exostóz, pro střední nárůst exostózy byl průsvit zúžen na 2 mm a při velkém nárůstu exostózy byl průsvit zúžen na 0,01 mm. Tyto modelové situace byly postupně aplikovány na začátek, střed a konec zevního zvukovodu. Při modelaci exostóz na začátku resp. konci zvukovodu byla dána konstantní vzdálenost od začátku zvukovodu resp. bubínku, na kterou se nanášely koncové body polokruhů reprezentující danou exostózu (tj. poloha jednoho konce jednotlivých exostóz zůstávala stále stejná). Při modelaci ve středu zvukovodu byla dána konstantní vzdálenost od začátku zvukovodu (geometrický střed zvukovodu), na kterou se nanášely středy kruhů reprezentující danou exostózu (tj. poloha vrcholků jednotlivých exostóz zůstávala stále stejná). Zjednodušený 2D model zvukovodu s modelovými situacemi popsanými výše je zobrazen na *Obr.5.7*. Dále musela být zajištěna průchodnost akustických vln velmi malým průsvitem (0,01 mm) při nárůstu velké exostózy. Tato podmínka byla zajištěna změnou velikosti elementů v oblasti daných exostóz. Zjednodušený 2D konečnoprvkový model části zvukovodu s velkým nárůstem exostóz je na *Obr.5.8*.



Obr. 5.8: Geometrie numerického modelu zevního zvukovodu s exostózami (rozměr v mm)



Obr. 5.9: Změna velikosti elementů 2D konečnoprvkového modelu zevního zvukovodu při velkém nárůstu oboustranných exostóz

5.2.2 Harmonická analýza

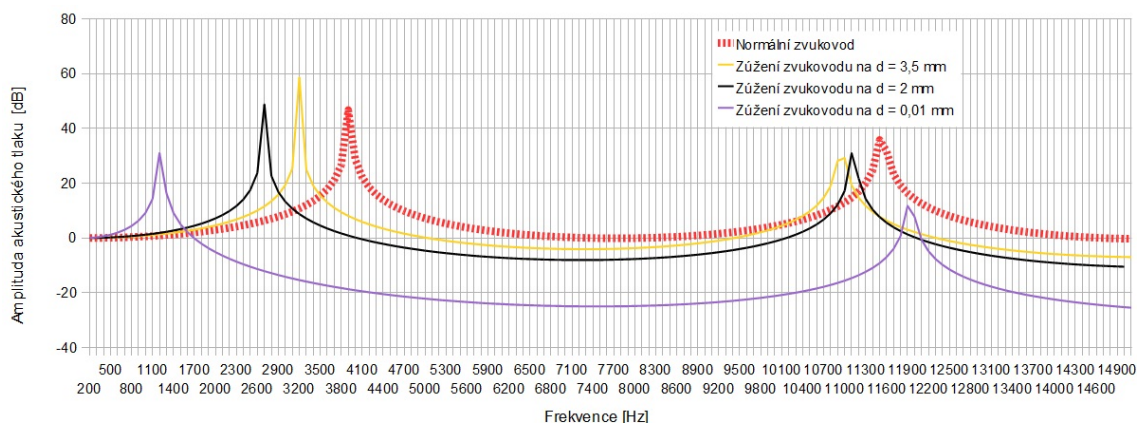
Na vytvořeném 2D modelu akustického subsystému byla provedena harmonická analýza. Harmonická analýza v systému ANSYS zjišťuje přenosové funkce studovaného systému. Z matematického hlediska se jedná o zjištění odezvy daného systému na jednotkovou hodnotu vstupní veličiny (stejně pro všechny frekvence). Harmonická analýza byla provedena v rozsahu 100 Hz - 15 kHz s krokem 100 Hz. Na obvodu trubice (normálního zvukovodu i zvukovodu s exostózami) byly položeny výchylky rovny nule a na konci trubice byl umístěn "elastický bubínek". Na vstupu do zvukovodu bylo aplikováno buzení tlakem o amplitudě $p_0 = 1$ Pa. Jako výstup z harmonické analýzy byla zvolena závislost hodnoty tlaku p_A na frekvenci pro nod těsně před středem bubínku (1mm), tj. přenosová funkce zevního zvukovodu. Byly provedeny parametrické výpočty jednak pro různé polohy oboustranných exostóz a jednak pro různé hodnoty jejich velikosti (tj. různé hodnoty zúžení zvukovodu). Vypočtené přenosové funkce jsou na *Obr.5.10* - *Obr.5.12*.

Aby bylo možné posoudit vliv exostóz na hodnotu sluchu vzdušným vedením, byly sledovány relativní hladiny (pokles) akustického tlaku L_{pr} pro jednotlivé polohy exostóz vůči hodnotám tlaku pro normální zvukovod. Relativní hladiny (pokles) akustického tlaku byly určeny podle vztahu

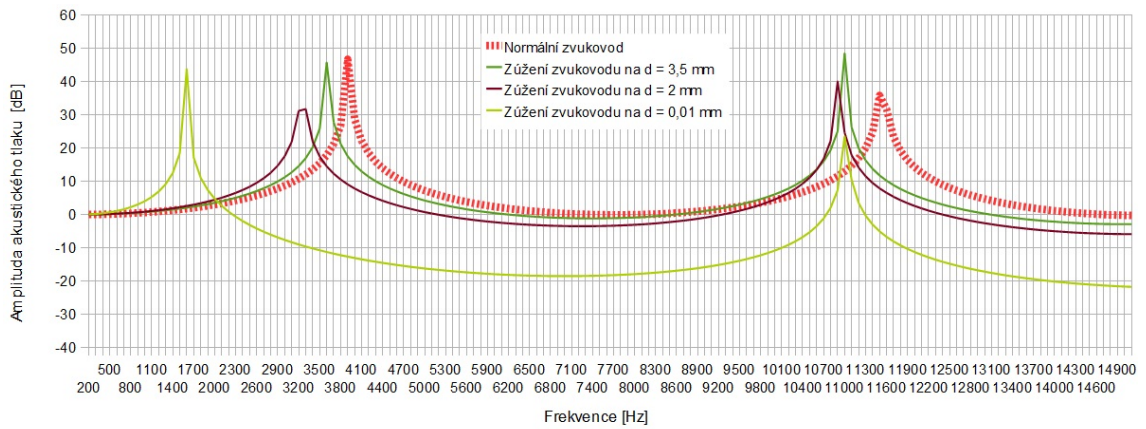
$$L_{pr} = -20 \cdot \log \left(\frac{p_A}{p_n} \right) \quad (5.14)$$

kde p_A je akustický tlak před bubínkem pro zevní zvukovod s exostózou a p_n je akustický tlak normálního zvukovodu.

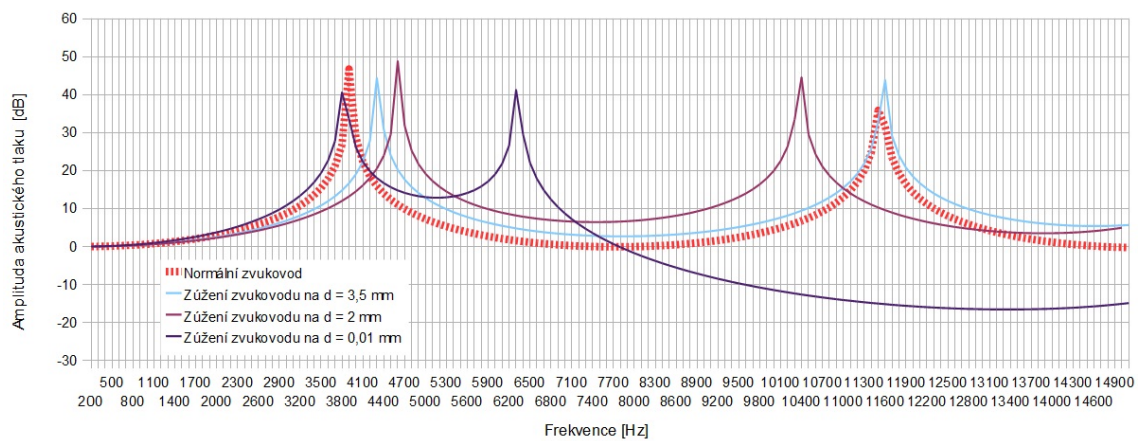
Vypočtené změny přenosových funkcí jsou na *Obr.5.13* - *Obr.5.15*. Ze zhotovených grafů byla stanovena křivka průměrných hodnot vlivu exostóz na hodnotu sluchu vzdušným vedením pro různé polohy a velikosti exostóz v zevním zvukovodu (*Obr.5.16*).



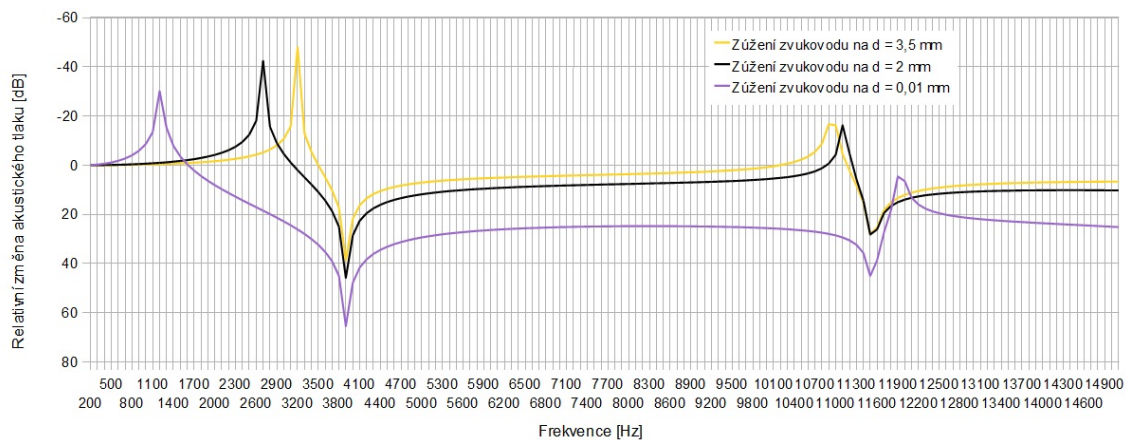
Obr. 5.10: Hodnoty akustického tlaku na bubínek pro exostózy různé velikosti. Oboustranné exostózy kruhového tvaru jsou umístěny na začátku zevního zvukovodu.



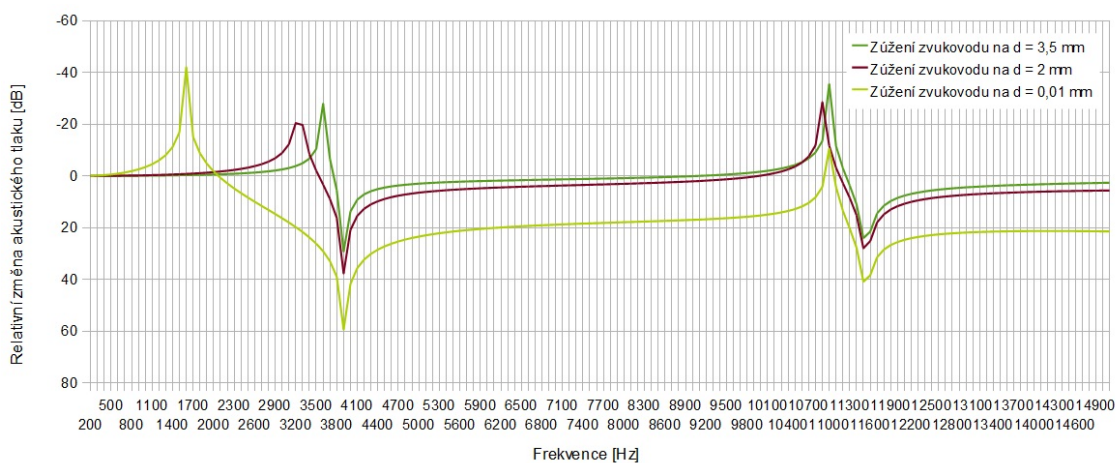
Obr. 5.11: Hodnoty akustického tlaku na bubínek pro exostózy různé velikosti. Oboustranné exostózy kruhového tvaru jsou umístěny ve středu zevního zvukovodu.



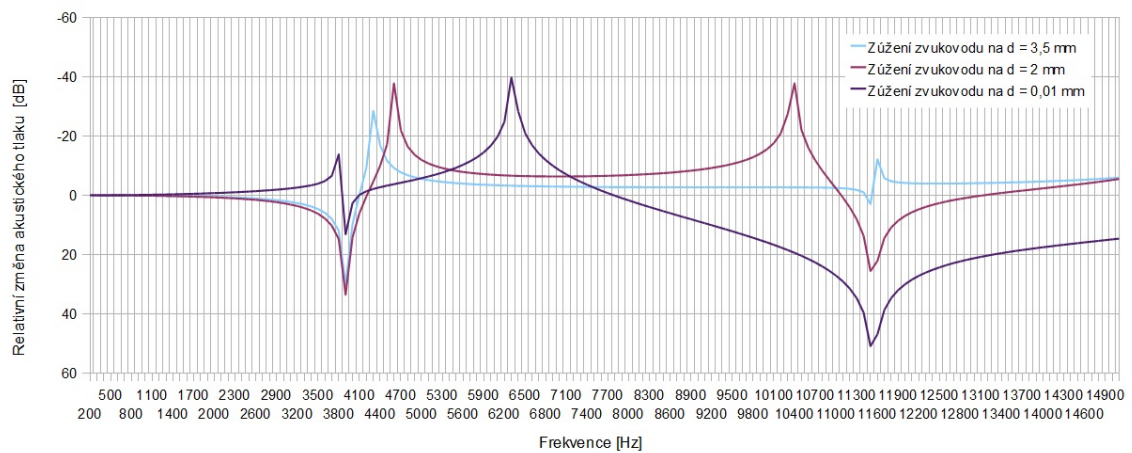
Obr. 5.12: Hodnoty akustického tlaku na bubínek pro exostózy různé velikosti. Oboustranné exostózy kruhového tvaru jsou umístěny na konci zevního zvukovodu.



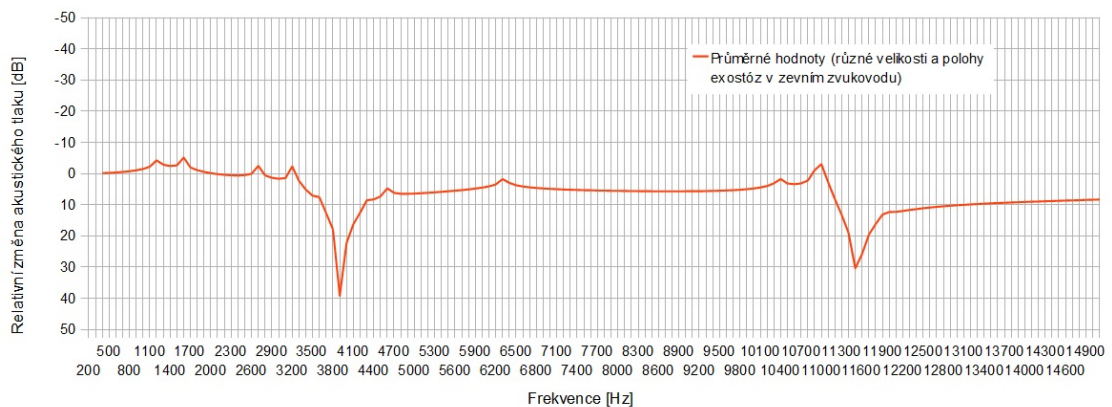
Obr. 5.13: Relativní změna (pokles) přenosové funkce L_{pr} zevního zvukovodu (vůči normálnímu zvukovodu) pro exostózy na začátku zevního zvukovodu



Obr. 5.14: Relativní změna (pokles) přenosové funkce L_{pr} zevního zvukovodu (vůči normálnímu zvukovodu) pro exostózy ve středu zevního zvukovodu



Obr. 5.15: Relativní změna (pokles) přenosové funkce L_{pr} zevního zvukovodu (vůči normálnímu zvukovodu) pro exostózy na konci zevního zvukovodu



Obr. 5.16: Průměrné hodnoty relativní změny (poklesu) přenosové funkce zevního zvukovodu (vůči normálnímu zvukovodu) způsobené exostózami. Zahrnuty jsou různé velikosti a polohy exostóz v zevním zvukovodu.

5.3 Vliv exostóz - zpracování audiogramů

5.3.1 Zpracování audiogramů

Studie byla provedena na 19 pacientech ORL oddělení Pardubické krajské nemocnice. Audiogramy sledovaných pacientů pro studii poskytl MUDr. Jan Mejzlík, Ph.D. po osobní návštěvě v pardubické nemocnici. Z 19 pacientů mělo 8 pacientů výskyt exostóz v pravém i levém uchu, přičemž u 11 pacientů byl výskyt exostóz spojen s dalším onemocněním sluchového ústrojí. V audiogramech byl měřen práh slyšitelnosti pro vzdušné a kostní vedení zvuku na frekvencích 125, 256, 512, 1024, 2048, 2896, 4096, 5792 a 8192 Hz (resp. 256, 512, 1024, 2048, 2896 a 4096 Hz pro kostní vedení).

Sluch pacientů před operací

Na *Obr.5.17* a *Obr.5.18* jsou zobrazeny audiogramy 28 pacientů pro vzdušné vedení zvuku a 17 audiogramů pro kostní vedení zvuku.

Sluch pacientů těsně po operaci

Na *Obr.5.19* a *Obr.5.20* jsou zobrazeny audiogramy 16 pacientů pro vzdušné vedení zvuku a 11 audiogramů pro kostní vedení zvuku.

Sluch pacientů po zhojení

Na *Obr.5.21* a *Obr.5.22* jsou zobrazeny audiogramy 13 pacientů pro vzdušné vedení zvuku a pouze 2 audiogramy pro kostní vedení zvuku.

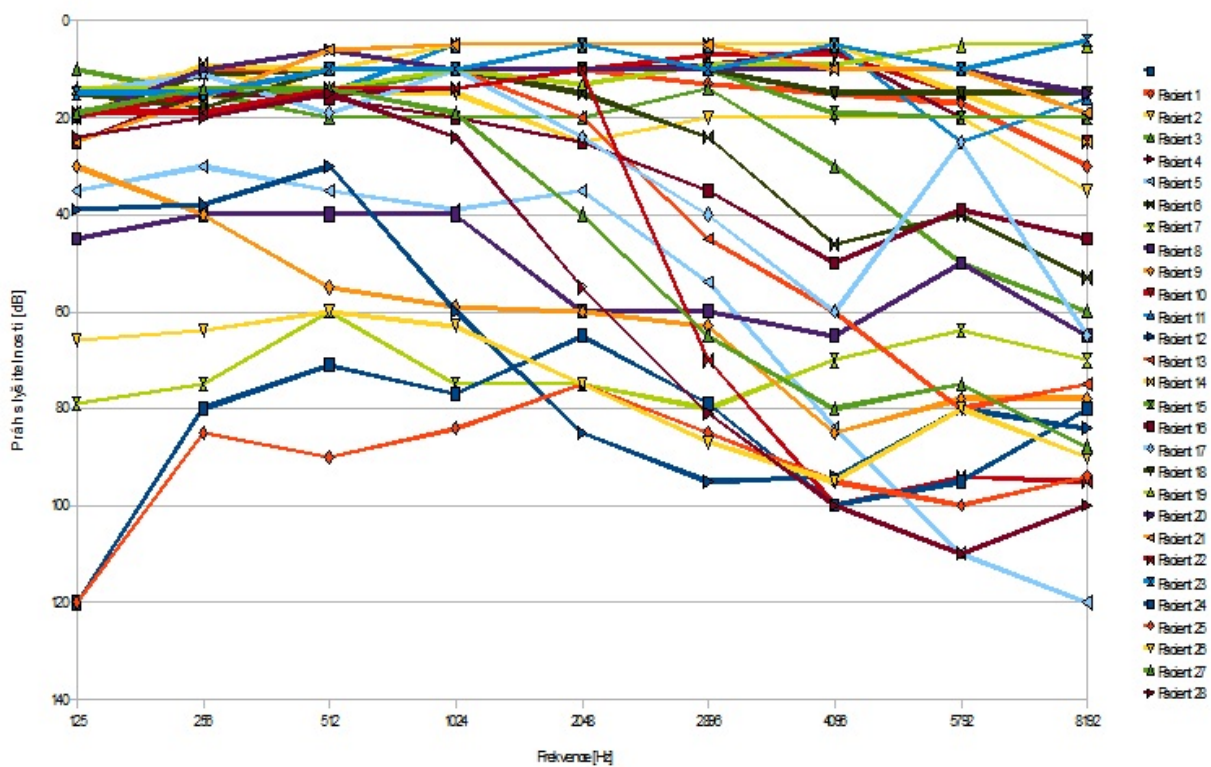
Srovnání středních hodnot audiogramů

Ze zhotovených grafů byly stanoveny křivky středních hodnot popisující sluch pacientů v jednotlivých stádiích při vzdušném a kostním vedení zvuku.

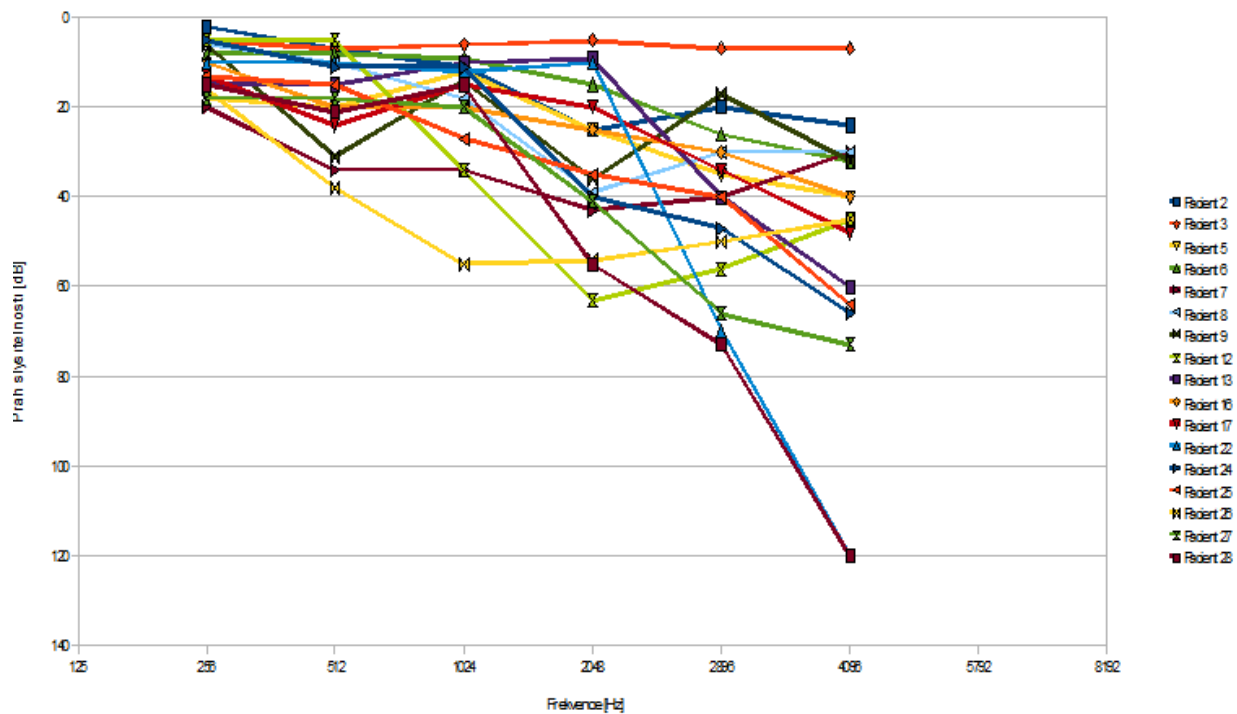
Na *Obr.5.23* a *Obr.5.24* jsou zobrazeny křivky středních hodnot vzdušného a kostního vedení zvuku u sledovaných pacientů před operací a po zhojení. Křivka středních hodnot audiogramů pacientů před operací z *Obr.5.23* souhlasí s křivkou průměrných hodnot vlivu exostóz na hodnotu sluchu vzdušným vedením (*Obr.5.16*), kde pro frekvence nižší než 3 kHz je ovlivnění exostózami menší než pro frekvence vyšší než 3 kHz. Při odstranění exostóz zřejmě dochází k relativnímu zhoršení sluchu vzdušným vedením na nízkých frekvencích (menší jak 2 kHz). Pro frekvence vyšší než 2 kHz dochází naopak k jeho zlepšení.

Na *Obr.5.25* a *Obr.5.26* jsou zobrazeny křivky středních hodnot vzdušného a kostního vedení zvuku u sledovaných pacientů těsně po operaci a po zhojení.

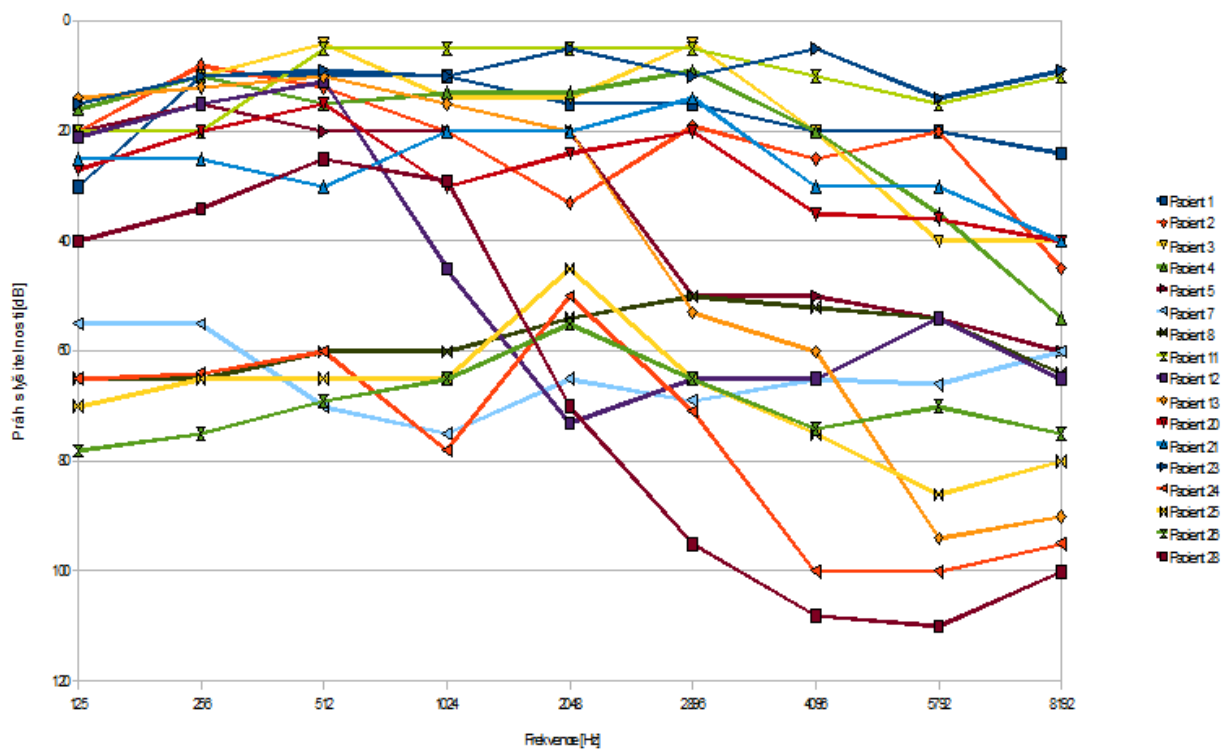
Kvantitativní vyjádření pooperační změny sluchu (tj. po odstanění exostóz) na základě průměrování hodnot sluchu na frekvencích 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz a 3 kHz (viz. [8]) se nezdá být vhodné - viz. *Tab. 5.2*. Důvodem jsou vysoké hodnoty směrodatné odchylky (viz. [8]).



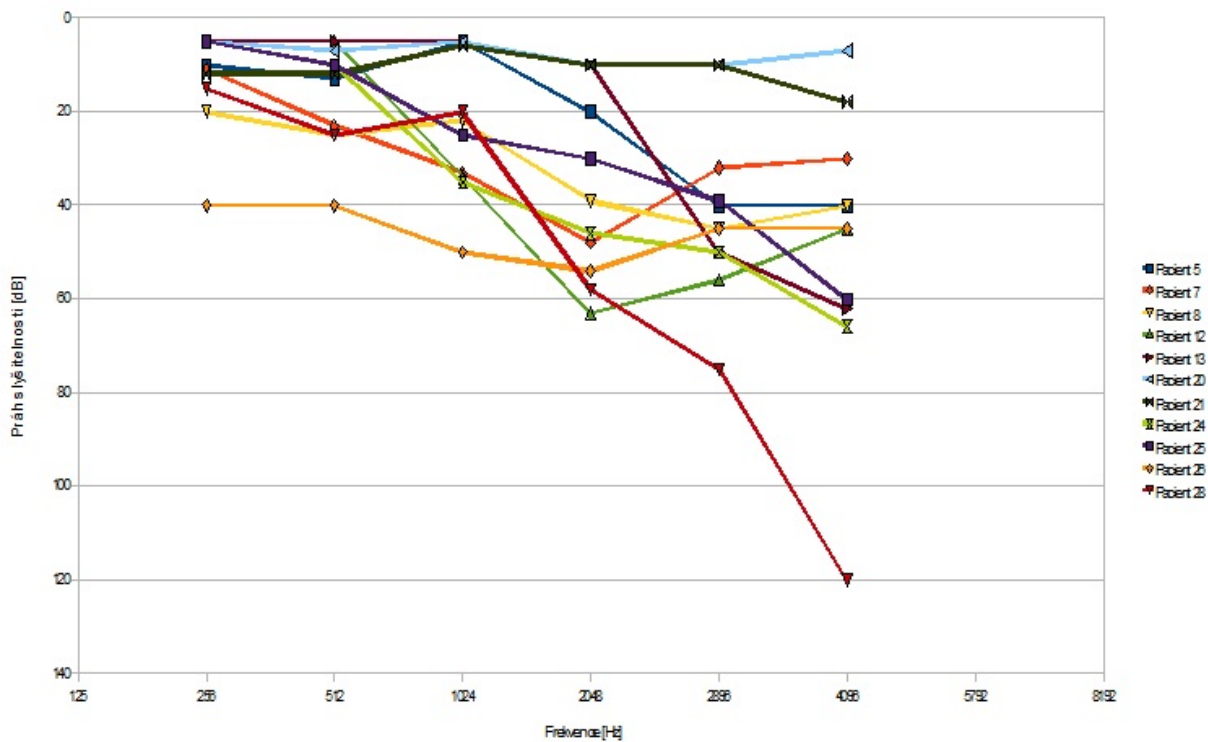
Obr. 5.17: Audiogramy pacientů - vzdušné vedení zvuku - před operací



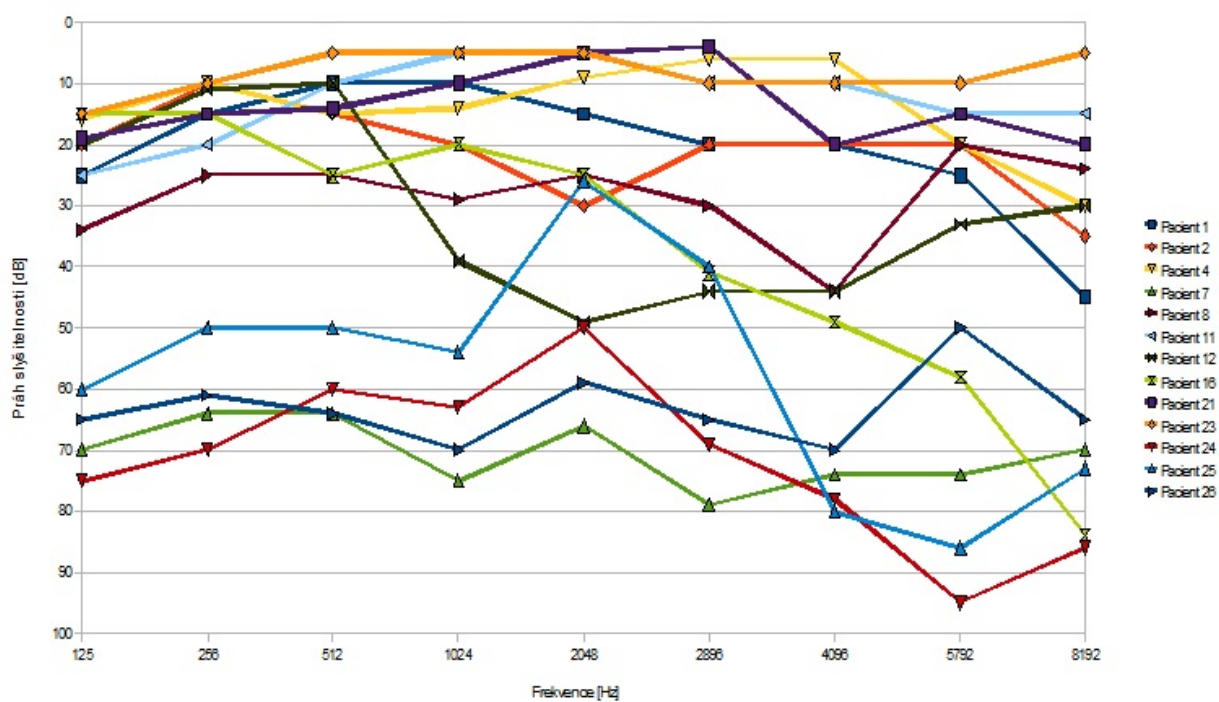
Obr. 5.18: Audiogramy pacientů - kostní vedení zvuku - před operací



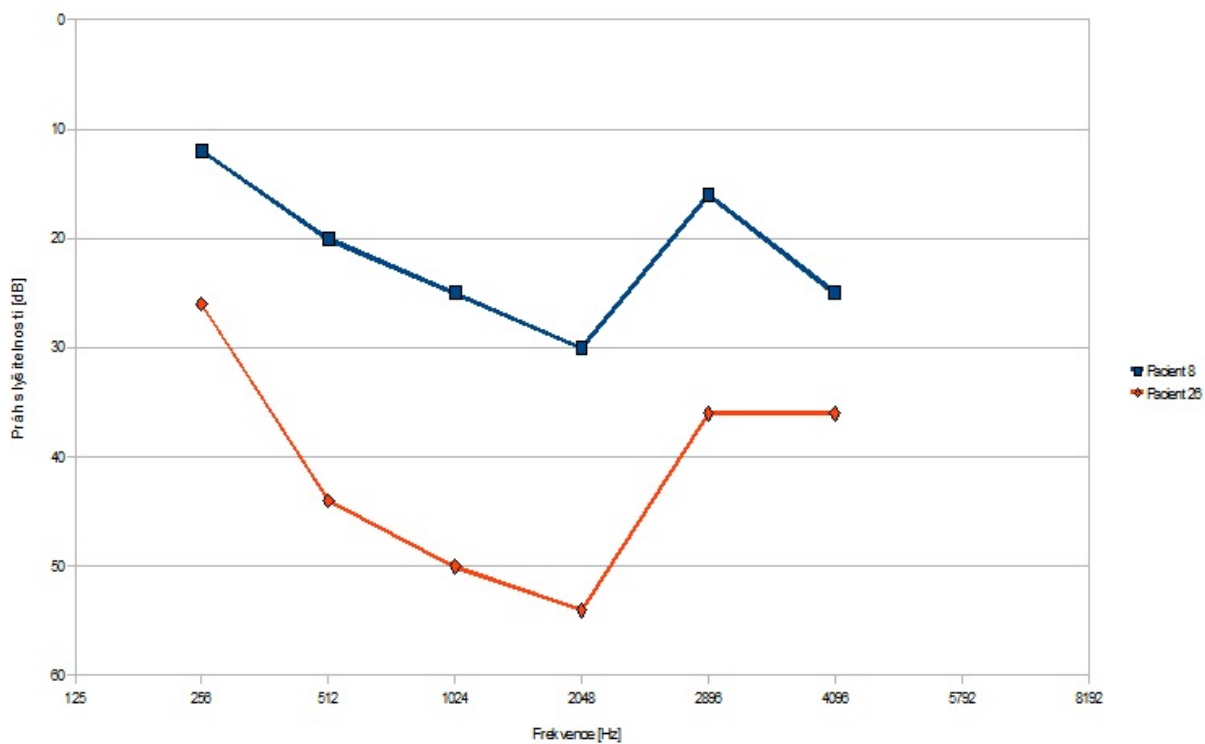
Obr. 5.19: Audiogramy pacientů - vzdušné vedení zvuku - těsně po operaci



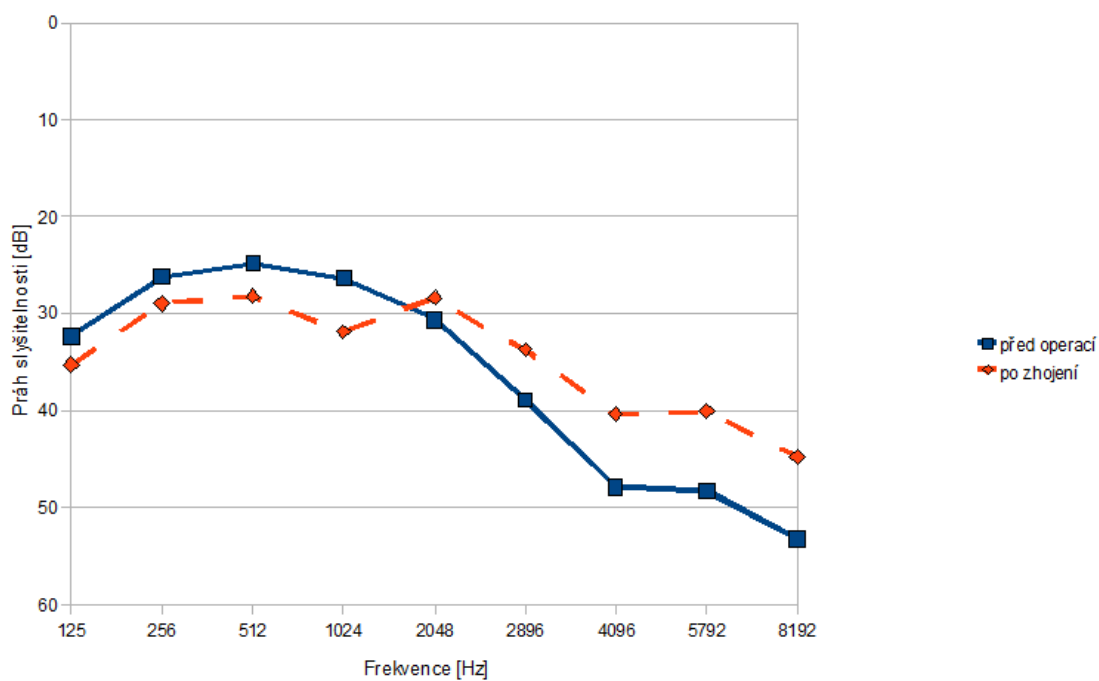
Obr. 5.20: Audiogramy pacientů - kostní vedení vzduchu - těsně po operaci



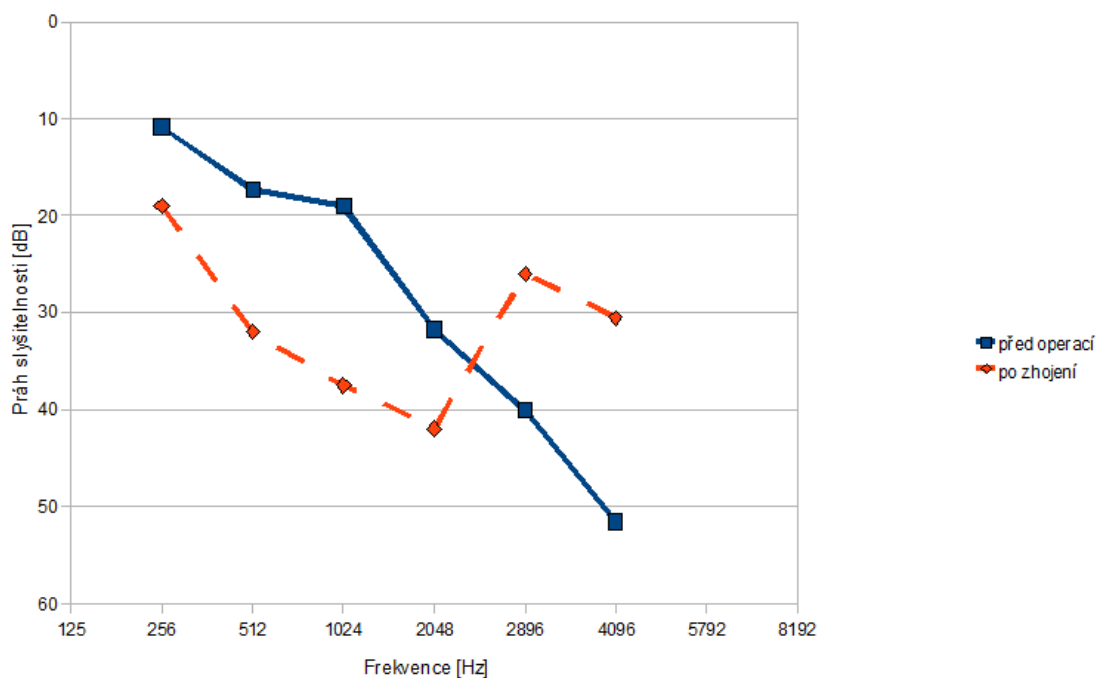
Obr. 5.21: Audiogramy pacientů - vzdušné vedení zvuku - po zhojení



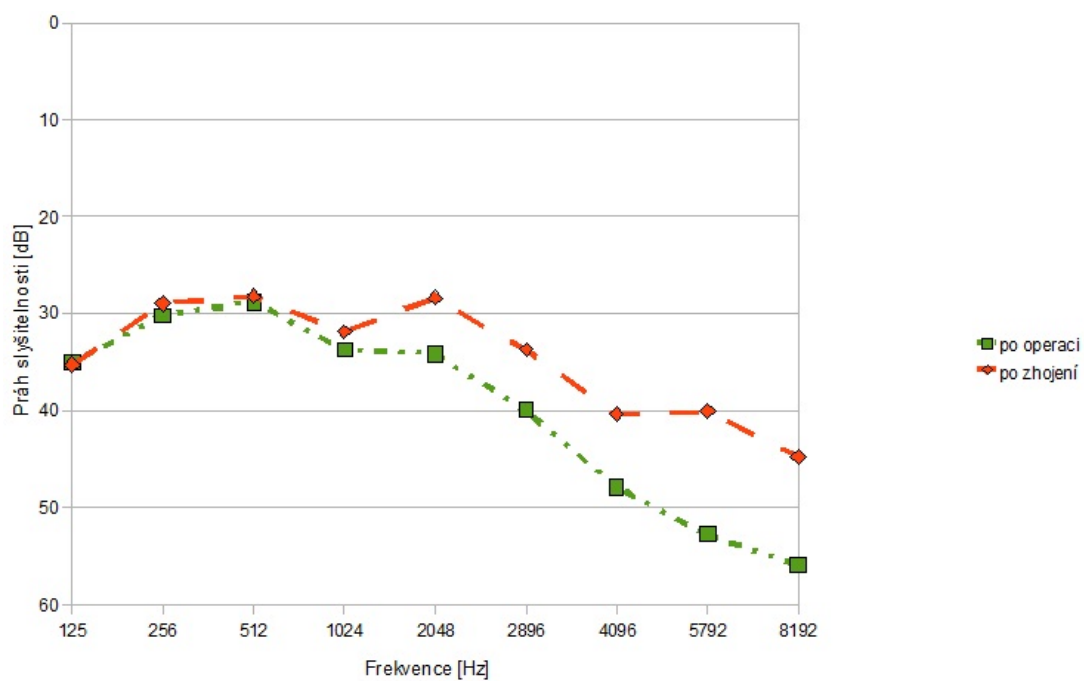
Obr. 5.22: Audiogramy pacientů - kostní vedení zvuku - po zhojení



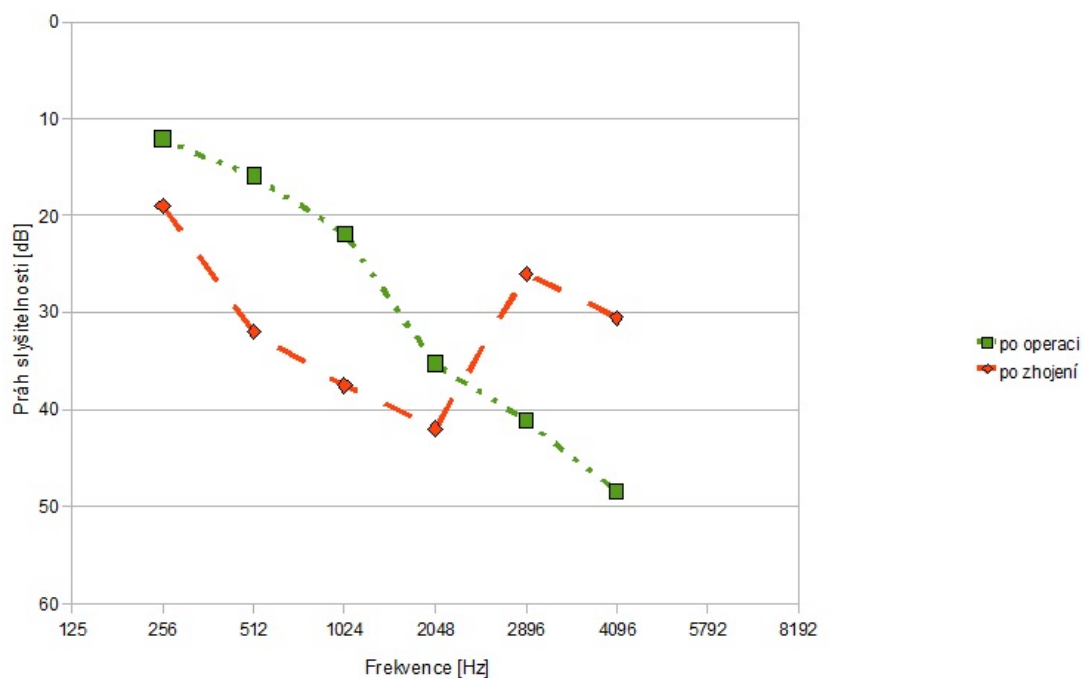
Obr. 5.23: Střední hodnoty audiogramů pacientů - vzdušné vedení zvuku - před operací a po zhojení



Obr. 5.24: Střední hodnoty audiogramů pacientů - kostní vedení zvuku - před operací a po zhojení



Obr. 5.25: Střední hodnoty audiogramů pacientů - vzdušné vedení zvuku - těsně po operaci a po zhojení



Obr. 5.26: Střední hodnoty audiogramů pacientů - kostní vedení zvuku - těsně po operaci a po zhojení

	Průměr před operací [dB]	Průměr po zhojení [dB]	Změna před operací a po zhojení - průměr [dB]
Vedení vzduchem - průměr měření na 0,5; 1; 2 a 3 kHz	30,18	30,5375	-0,3575
Kostní vedení - průměr měření na 0,5; 1; 2 a 3 kHz	27,0275	34,375	-7,3475
Rozdíl mezi vedením zvuku vzduchem a kostním vedením	3,1525	-3,8375	6,99
Kostní vedení 1; 2; 4 kHz	34,067	36,67	-2,603
Kostní vedení 4 kHz	51,53	30,5	21,03

Tab. 5.2: Průměrné hodnoty prahu sluchu určené z průměrů sluchu na 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz (popř. 4 kHz)

6 ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá diskuzí vlivu exostóz (tj. patologie zevního zvukovodu) na vzdušné nebo kostní vedení zvuku. Dopady tohoto onemocnění nejsou dosud v literatuře jednoznačně vysvětleny.

Úloha je řešena v systému ANSYS na základě výpočetní simulace pomocí 2D konečnoprvkových modelů. Výsledky jsou konfrontovány s audiogramy 19 pacientů s výskytem exostóz, u kterých byly známy audiogramy před a po operačním stavu.

Na základě harmonické analýzy bylo zjištěno, že při výskytu exostóz v přední části zevního zvukovodu dochází ke snižování hodnot první modální frekvence akustického subsystému normálního zevního zvukovodu. Pro polohu exostóz blíže k bubínku bylo zjištěno, že naopak dochází k jejímu zvyšování.

Aby bylo možné provést srovnání s audiologickými vyšetřeními, byl proveden výpočet střední hodnoty přenosové funkce zevního zvukovodu s exostózami. Při zprůměrování byly uvažovány různé polohy exostóz (těsně na vstupu, ve středu a těsně před bubínkem) a různé velikosti exostóz (zúžení průsvitu zevního zvukovodu na 3,5 mm, 2 mm a 0,01 mm). Z frekvenční závislosti takto zjištěné přenosové funkce vyplývá, že pro nízké frekvence (menší jak 3 kHz) exostózy prakticky sluch neovlivňují. Pro vyšší frekvence (vyšší než 3 kHz) byl pokles přenosové funkce oproti normálnímu sluchu kolem 5 dB. Tento závěr potvrdilo i zpracování souboru audiogramů naměřených u 19 pacientů před a po operaci. U nich byl proveden výpočet středních hodnot audiogramů (všech pacientů) před a po operaci. U těchto středních hodnot bylo pro vzdušné vedení při odstranění exostóz a zhojení zjištěno výrazné zlepšení sluchového prahu (kolem 8 dB) na vysokých frekvencích (nad 3 kHz). Pro nízké frekvence hodnoty audiogramů po zhojení vykazovaly nižší hodnoty prahu slyšení, odchylky však byly do 3 dB, tj. na úrovni měřících chyb při audiologii.

LITERATURA

- [1] SILBERNAGEL, S.; DESPOPOULOS, A. *Atlas fyziologie člověka* Praha: Avicenum, 2004. 435s ISBN: 80-85623-79-X
- [2] MEJZLÍK, J. *Atlas fyziologie člověka* Praha: Avicenum, 2004. 435s ISBN: 80-85623-79-X
- [3] DOKLÁDAL, M.; PÁČ, L. *Anatomie člověka III.1.* vyd. Brno: Vydavatelství MU, 2002. 285s ISBN: 80-210-3027-5
- [4] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk* Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2005. 177s ISBN: 80-214-3060-5
- [5] PELLANT, K.; DUŠEK, D.; PEJCHAL, P.; MEJZLIK, J. *SIMULACE VLIVU EXOSTÓZ NA PERCEPCI ZVUKU* Brno: Ústav mechaniky těles FSI VUT Brno, 2003. 4 s.
- [6] *Middle Ear - Hearing Care Center* [online]. [cit. 3. 4. 2012]. Dostupné z URL: <http://hearingcarecenter.com/hearing_middle.htm>.
- [7] *"Co jsem viděl v uchu" - fotky z ORL ambulance* [online]. [cit. 5. 4. 2012]. Dostupné z URL: <http://orl.misto.cz/_MAIL_/ucho/ucho.htm>.
- [8] HOUSE, J. W.; WILKINSON, E. P. *External auditory exostoses: Evaluation and treatment* Otolaryngology-Head and Neck Surgery. 2008. Los Angeles: American Academy of Otolaryngology. p 672-678.
- [9] MIŠUN, V. *Tajemství lidského hlasu* 1.vyd. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2010. 391s ISBN: 978-80-214-3499-8
- [10] Stenfelt, S. *Overview and recent advances in bone conduction physiology* Division of technical audiology, Department of neuroscience and locomotion. 2007. Linköping: Linköping University.
- [11] VINOKUR, R. *Vibroacoustic effects in MEMS* Sound and vibration. 2003. Laguna Hills, California: Wieland Associates Inc. p 22-25.
- [12] NOVÁK, A. *AUDIOLOGIE* Praha: Tisk Unitisk, spol. s r. o., 2003. 333s
- [13] *Přednáška z anatomie pro fyzioterapeuty* [online]. [cit. 13. 3. 2012]. Dostupné z URL: <<http://biomech.ftvs.cuni.cz/kab/archiv/anatomie-061004.ppt>>.
- [14] *Asociace masérů a terapeutů* [online]. [cit. 13. 3. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.asociace-maseru.cz/roviny_na_tele.html>.
- [15] VAŇKOVÁ, M. *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí* Brno: VUT v Brně, 1998.
- [16] DUŠEK, D. *Ovlivnění akustických vlastností zevního zvukovodu exostózami* Diplomová práce, Brno: VUT v Brně, 2003.

- [17] OUALI, B. *Development of 2D finite element model of human ear* Diplomová práce, Brno: VUT v Brně, 2009.
- [18] SEDLÁČEK, K. *Základy audiologie* Praha: Státní zdravotnické nakladatelství, 1956.

SEZNAM POUŽITÉHO LÉKAŘSKÉHO NÁZVOSLOVÍ

Entoderm - jeden ze tří hlavních skupin buněk vznikajících při embryogenezi

Perilymfa - tekutina vyplňující prostor mezi blanitým a kostním labyrintem

Dendrity - krátké výběžky neuronu dostředivého typu, které přijímají nervový vzruch

Cilie - řasinky, pohybové orgány buněk (složitější buněčné struktury se specifickou funkcí)

Helikotrema - otvor v kopuli hlemýždě vnitřního ucha

Transdukce - změna permeability membrány senzoru, která se projeví jako stupňovaná odpověď, jejíž amplituda stoupá s intenzitou podnětu

Sluchové evokované odpovědi - jsou odrazem průběhu nervového vzruchu cochleou počínaje a mozkovou kůrou sluchové oblasti konče

Převodní nedoslýchavost - vnitřní ucho pracuje správně, avšak něco zabraňuje zvuku proniknout vnějším a středním uchem do ucha vnitřního

Percepční nedoslýchavost - nejběžnější typ nedoslýchavosti, původ má ve vnitřním uchu nebo na dráze zvukového nervu, k poškození nejčastěji dochází ve vnitřním uchu (hlemýžď / cochlea), v takovém případě jsou vláskové buňky hlemýždě narušeny a nemohou přenášet neuro-elektrické impulzy do mozku

Směšená nedoslýchavost - sluchovou poruchou je postiženo vnitřní ucho a navíc je zvuk utlumován při svém průchodu vnějším a středním uchem dříve, než dosáhne hlemýždě

Histopatologie - je vyšetřovací metoda, která zahrnuje mikroskopické vyšetření tkáně za účelem studia projevů onemocnění

Neurinom n. statoacustici - neurinom nervi acustici - je nezhoubný nádor vycházející z Schwannomových buněk obalujících sluchový a rovnovážný nerv

Proc. mastoideus - processus mastoideus – bradavkovitý výběžek vyčnívající z kosti skalní, která je součástí kosti spánkové

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f_{vz}	vzorkovací kmitočet
c	rychlost zvuku
λ	vlnová délka
a	amplituda
f	tónová frekvence
α	součinitel pohltivosti
p	akustický tlak
p_c	celkový tlak
p_b	barometrický tlak
φ	fázový posuv
t	čas
p_0	amplituda akustického tlaku
p_{ef}	efektivní hodnota akustického tlaku
D	průměr
S	obsah
h	délka krku (tloušťka stěny Helmholtzova rezonátoru)
f_H	Helmholtzova rezonanční frekvence
Hz	Herz
Pa	Pascal
dB	Decibel
HL	Hearing Level
I_0	Intenzita vlnění dopadajícího na stěnu
I	Intenzita odraženého vlnění
I_a	Intenzita zvuku
Z_S	Specifická impedance
Z_0	Vlnový odpor prostředí
Z_N	Normovaná impedance

Z_A	Akustická impedance
L_p	Relativní hladina akustického tlaku
w	Objemová rychlost
ρ	Hustota
w_a	rychlost elementu