

UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

**MĚŘENÍ MEZÍ SLYŠITELNOSTI
LIDSKÉHO UCHA**

Bakalářská práce

Autor: Anežka Veselá

Studijní program: B1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání

Matematika se zaměřením na vzdělávání

Vedoucí práce: RNDr. Michaela Křížová, Ph.D.

Hradec Králové

květen 2015

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Zadání bakalářské práce

Autor:	Anežka Veselá
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzika se zaměřením na vzdělávání Matematika se zaměřením na vzdělávání
Název závěrečné práce:	Měření mezí slyšitelnosti lidského ucha
Název závěrečné práce AJ:	Measuring the limits of audibility of the human ear
Cíl a metody práce:	Cílem této bakalářské práce je ověřit na určitém vzorku osob různého věku a pohlaví meze slyšitelnosti lidského ucha. V teoretické části bude podrobně popsán proces slyšení a frekvence, které je člověk schopen uchem zachytit. V praktické části bude úkolem nejen naměřit nejnižší a nejvyšší slyšitelnou frekvenci u daného člověka, ale naměřit zvláště pravé a levé ucho a pokusit se vysledovat závislost rozdílu slyšitelných mezí na jeho praváctví či leváctví.
Garantující pracoviště:	Katedra fyziky, Přírodovědecká fakulta
Vedoucí práce:	RNDr. Michaela Křížová, Ph.D.
Oponent:	Mgr. Filip Studnička, Ph.D.
Datum zadání závěrečné práce:	23. 5. 2014
Datum odevzdání závěrečné práce:	

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, a že jsem v seznamu použité literatury uvedla všechny prameny, ze kterých jsem vycházela.

V Hradci Králové dne 29. 5. 2015

Anežka Veselá

Poděkování:

Děkuji paní RNDr. Michaele Křížové, Ph.D. za motivaci, odborné vedení a rady poskytnuté při psaní práce. Dále bych ráda poděkovala všem dobrovolníkům za spolupráci a poskytnutí informací.

Anotace:

VESELÁ, Anežka. *Měření mezí slyšitelnosti lidského ucha*. Hradec Králové, 2015. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce Michaela Křížová. 52 s.

První část této práce se zaměřuje na teorii, zabývá se základními fyzikálními pojmy z akustiky a popisuje anatomii sluchového ústrojí, proces slyšení a základní audiometrické vyšetřovací metody používané v lékařské praxi.

V druhé části jsou předvedena a vyhodnocena data naměřená na dobrovolnících, která dokazují snižování horní meze slyšitelné frekvence lidského ucha s věkem. Dále porovnání mezí slyšitelnosti pravého a levého ucha vzhledem k pravorukosti nebo levorukosti respondenta.

Klíčová slova: akustika, zvuk, sluch, meze slyšitelnosti, audiologie, audiometrie

Annotation:

VESELÁ, Anežka. *Measuring the limits of audibility of the human ear*. Hradec Králové, 2015. Bachelor Thesis at Faculty of Science University of Hradec Králové. Thesis Supervisor Michaela Křížová. 52 p.

The first part of the Bachelor Thesis is focused on the theoretical background. Basic physical concepts of acoustics are described as well as the anatomy of human auditory system, the process of hearing and basic audiometric examination methods used in medical practice.

Data measured on volunteers are presented and evaluated in the second part. We have shown that the upper limit of the audible frequency of a human ear decrease with age. Furthermore the dependence of audibility of right and left ear on the right-handedness or left-handedness of the respondent has been studied.

Key words: acoustics, sound, hearing, limits of audibility, audiology, audiometry

Obsah

Úvod	8
1 Základní pojmy z akustiky.....	9
1.1 Zvuk	9
1.1.1 Vlastnosti zvuku a jeho fyzikální popis	10
1.1.2 Vlnová rovnice	10
1.1.3 Výška, barva a hlasitost zvuku	11
1.1.4 Akustický tlak a akustická impedance	13
1.2 Infrazvuk.....	14
1.3 Ultrazvuk	14
1.4 Zdroje zvuku.....	15
1.5 Šíření zvuku.....	16
1.5.1 Rychlost šíření zvuku v různých prostředích	19
2 Lidský sluch.....	21
2.1 Anatomická stavba ucha.....	21
2.1.1 Příjem a zpracování zvuku lidským uchem	22
2.1.2 Rovnovážné ústrojí	23
2.2 Sluchový práh a pole.....	24
2.3 Klasifikace sluchových vad.....	26
2.3.1 Klasifikace postižení podle doby vzniku	26
2.3.2 Klasifikace postižení podle místa poškození.....	27
2.3.3 Klasifikace podle stupně poškození sluchu	27
2.4 Diagnostika sluchových vad.....	28
2.4.1 Subjektivní sluchové testy	28
2.4.2 Objektivní sluchové testy	31
2.4.3 Vyšetřování sluchu nejmenších dětí	34
3 Měření mezí slyšitelnosti lidského ucha	36
3.1 Popis měření	36
3.2 Zpracování naměřených hodnot.....	38
3.3 Výsledky měření	39
Závěr	44
Seznam použité literatury a zdrojů.....	45
Seznam obrázků, tabulek a grafů	47
Příloha	48

Úvod

Sluch je pro člověka jedním z nejdůležitějších smyslů, které využívá ke vnímání okolního světa. Fylogeneticky jde o nejmladší smysl a někdy je popisován také jako velmi jemný hmat. Lidský sluch se vyvíjí již v prenatálním období. V 5. měsíci těhotenství je sluchový aparát plodu stejně funkční jako u dospělého člověka a dítě začíná vnímat zvuky matčina těla.

Ucho zdravého člověka je schopno rozeznat frekvence přibližně od 16 do 20 000 Hz. Tato hranice ale není vůbec ostrá, někteří jedinci mohou velmi výrazně vybočovat. Starší člověk postupně ztrácí schopnost slyšet vyšší frekvence (slyší od 50 do 10 000 Hz). Vlny s vyššími a nižšími frekvencemi se označují jako ultrazvuk a infrazvuk, a ty běžně člověk neslyší. Na rozdíl od lidí je však slyší různí živočichové. Jak se orientují při letu netopýři? Jak komunikují delfíni, velryby a sloni na velkou vzdálenost? Proč nám jsou některé tóny příjemné a některé nám rvou uši? Proč plašič hlodavců neplaší i lidi? Nejsme hluší, jen jsou zvuky, které můžeme slyšet, a také jsou zvuky, které mohou slyšet jen zvířata.

Cílem této bakalářské práce je ověřit na určitém vzorku osob různého věku a pohlaví meze slyšitelnosti lidského ucha. Úkolem praktické části je nejen naměřit nejnižší a nejvyšší slyšitelnou frekvenci u daného člověka, ale naměřit zvláště pravé a levé ucho a pokusit se vysledovat závislost rozdílu slyšitelných mezí na jeho praváctví či leváctví.

1 Základní pojmy z akustiky

Akustika je jednou z nejstarších vědních disciplín fyziky, zabývající se fyzikálními ději spojenými se vznikem, šířením, působením zvuku na přijímače a jiná tělesa a dokonce vnímáním zvuku sluchovými orgány. [1] Jako každý vědní obor se člení na další podobory, zde uvádím některé z nich:

Fyzikální akustika se zabývá fyzikálními vlastnostmi zvuku (vznikem, šířením, odrazem a pohlcováním), matematickým a technickým popisem bez ohledu na subjektivní vnímání lidským uchem.

Fyziologická akustika zkoumá vznik zvuku v hlasivkách a příjem sluchovými orgány, jak se zvuk dostane ke sluchovému orgánu a co v něm způsobí.

Bioakustika se zabývá studiem zvukových projevů zvířat, např. cvrček, netopýr.

Hudební akustika je akustika hudebních nástrojů a prostorů.

Stavební akustika zkoumá akustiku uvnitř budov, vhodnost podmínek k poslechu hudby a porozumění řeči v obytných prostorech, možnost šíření zvuku mezi místnostmi a z vnějšího prostředí.

Prostorová akustika popisuje akustiku budov a staveb z vnějšku a obecného prostoru, vliv hluku ze silnic a letišť na okolní stavby apod.

Elektroakustika popisuje elektronicky šířený, zaznamenaný nebo neprodukovaný zvuk.

Psychoakustika se zajímá o zpracování zvuku mozkiem. [2]

1.1 Zvuk

Zvukové nebo též akustické vlny jsou vlny podélné. Tedy mechanické vlny, u nichž dochází ke kmitům částic podél přímky ve směru šíření vlny, a kde se vytvářejí oblasti vysokého a nízkého tlaku (zhuštění a zředění). Tyto vlny mají široký rozsah frekvencí, ale konvenčně je oblast kmitočtů zvuku vymezena slyšitelností lidského ucha od 16 Hz do 20 kHz. Uvedené hranice jsou odvozeny podle průměrných mezí slyšitelnosti naší populace. Také různé publikace poskytují mírně odlišné rozmezí. Existují jedinci, jejichž meze slyšitelnosti se od těch uvedených výrazně liší. Nejcitlivější je ucho na zvuky, které se pohybují v oblasti lidské řeči, což představuje rozmezí 400 až 5 000 Hz (i tento údaj se v publikacích různí). Zvuky můžeme rozdělit na periodické, neboli tóny, a neperiodické, do nichž řadíme šum, hluk, apod. Příkladem periodických zvuků je lidský hlas nebo zpěv ptáků.

1.1.1 Vlastnosti zvuku a jeho fyzikální popis

Vlastnosti zvuku můžeme popsat pomocí několika fyzikálních veličin.

Perioda T (jednotkou sekunda s) je fyzikální veličina, která udává dobu jednoho kmitu periodického děje, kdy se systém dostává zpět do výchozího stavu. *Frekvence, kmitočet f* (jednotkou hertz $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$) udává počet zopakování periodického děje za časovou jednotku, další jednotkou je počet otáček za minutu (ot./min). *Úhlová frekvence ω* (jednotkou rad.s^{-1}) vyjadřuje změnu fáze za jednotku času. Pomocí této veličiny je definován vztah mezi frekvencí a periodou

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}.$$

Maximální výchylka (amplituda) y_m je největší vzdálenost, o kterou se kmitající těleso (částice prostředí) vychýlí z rovnovážné polohy, zatímco *okamžitá výchylka y* představuje vzdálenost soustavy od rovnovážné polohy v určitém okamžiku.

Fáze vlnění φ je bezrozměrná veličina určující tvar vlny v daném místě a času, udáváme ji většinou jako počáteční fázi – určuje počáteční výchylku (v čase $t = 0 \text{ s}$).

Vlnová délka λ je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází a amplitudou.

Rychlost vlnění v závisí na vlastnostech nosného prostředí, je různá pro příčná a podélná vlnění a stoupá s rostoucí teplotou v prostředí.

Vztah mezi vlnovou délkou a rychlostí šíření vlny popisuje rovnice

$$\lambda = \frac{v}{f}.$$

1.1.2 Vlnová rovnice

Pro popis mechanismu šíření konkrétní vlny popisující dynamiku vlnění je nutné znát rovnici pro zrychlení – vlnovou rovnici.

V jednom rozměru píšeme rovnici ve tvaru

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0,$$

kde $y = y(x, t)$ představuje harmonickou funkci, v rychlost vlnění.

Trojrozměrná rovnice vlny pro harmonickou funkci $\psi = \psi(x, y, z, t)$ má tvar

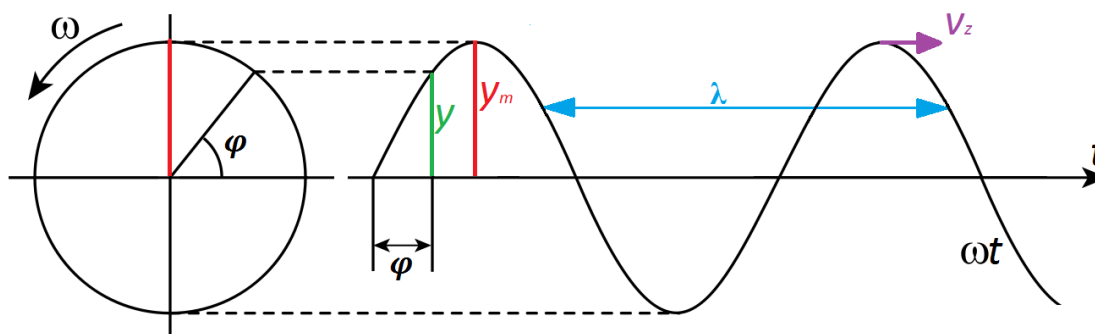
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0.$$

Řešením vlnové rovnice je sinusoida

$$y = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

$$y = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{v} \right).$$

Pro lepší názornost jsou na následujícím obrázku (Obr. 1) uvedené veličiny znázorněny na příčné vlně.



Obrázek 1 - Harmonická vlna a její parametry

1.1.3 Výška, barva a hlasitost zvuku

Výše uvedené veličiny jsou fyzikální a objektivně popisují vlastnosti zvukového vlnění. Výška, barva a hlasitost zvuku jsou vlastnosti subjektivní, které nejlépe popisují, jak subjektivně zvuk vnímáme.

Výška se neudává obecně u zvuku, ale pouze u tónů (zvuky periodické), u neperiodického vlnění by neměl tento termín smysl. *Absolutní výška* tónu je určena pomocí frekvence periodického pohybu a měří se také v hertzech (Hz). U jednoduchých tónů s jedinou frekvencí je absolutní výška určena právě touto jedinou frekvencí. Složené tóny vznikají superpozicí většího počtu tónů jednoduchých a jejich absolutní výška je určena tzv. *základní frekvencí*, která je z frekvencí složeného tónu nejnižší. Kmitočty ostatních jsou celočíselnými násobky frekvence základního tónu, nazýváme je *vyššími harmonickými* tóny. Měřit absolutní výšku tónu lze pomocí přístrojů (s využitím rezonance, rázů, apod.), ale uchem ji zhodnotit neumíme. Pro subjektivní vnímání zvuku je důležitější *relativní výška tónu*, která je určena podílem frekvence měřeného tónu ke kmitočtu pevně zvoleného *referenčního tónu*. Hudební akustika nejčastěji využívá referenční tón o kmitočtu 440 Hz (komorní *a*), v technické praxi jím bývá tón o frekvenci 1 kHz. Pomocí poměru frekvencí se vyjadřují hudební intervaly, např. oktáva je určena poměrem frekvencí 2:1, tedy tón o oktávu vyšší má dvojnásobnou frekvenci. Vnímání různých výšek zvuku lidským uchem závisí na citlivosti konkrétního sluchového orgánu. Subjektivní pocity výšek tónů nejsou obecně ve stejném poměru jako jejich frekvence.

Barva tónu je charakteristikou, díky níž je naše ucho schopno rozlišit od sebe dva složené tóny, i pokud mají stejnou absolutní výšku. Je určena obsahem vyšších harmonických tónů ve složeném tónu, jejich počtem a amplitudami. Rozdílná barva zvuků z různých zdrojů je dána způsobem vzniku v rezonátorech, které se liší tvarem, velikostí a materiálem. To můžeme pozorovat u různých hudebních nástrojů, z nichž každý má jedinečný zvuk.

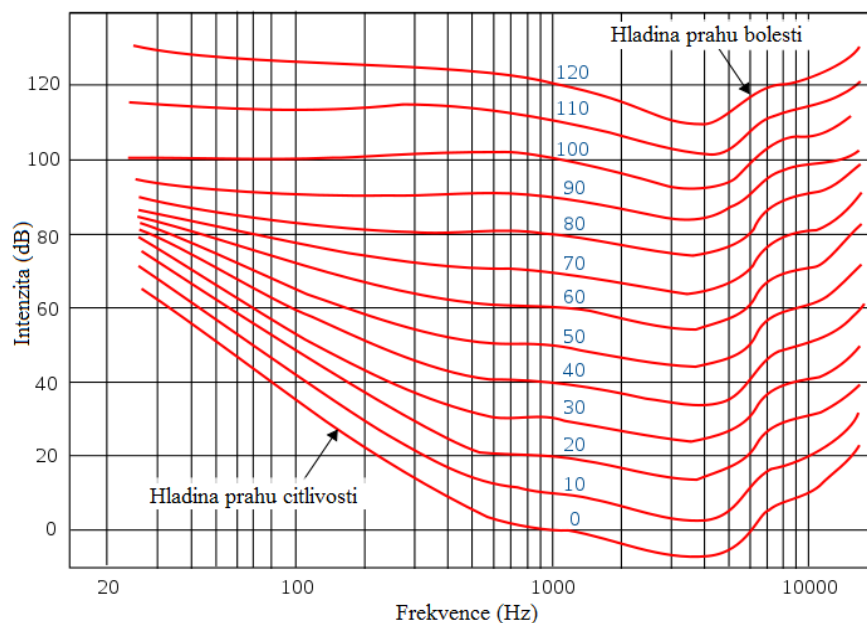
Výkon zvukového vlnění nazýváme *akustický výkon*. Akustický výkon udává, jak velká část energie zvukového vlnění se za určitý čas přenesse od zdroje k uvažovanému bodu zvukového pole $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$. Jednotkou akustického výkonu je watt (W).

Hlasitost je subjektivní veličina, která závisí na citlivosti sluchu. Pro objektivní posouzení byla zavedena *intenzita* zvuku I , která je definovaná jako podíl výkonu zvukového vlnění a plochy, kterou toto vlnění prochází $I = \frac{\Delta P}{\Delta S}$, její jednotkou je watt na metr čtvereční ($W \cdot m^{-2}$). Intenzitu zvuku určují změny tlaku prostředí a také výška tónu. Intenzita zvuku je přímo úměrná energii kmitání zdroje vlnění, která závisí na druhé mocnině amplitudy výchylky a frekvence. Citlivost lidského ucha je největší při frekvencích zvuku mezi 400 a 4000 Hz. S tím souvisí pojmy práh slyšení a práh bolesti (viz dále). Poměr mezi největší a nejmenší intenzitou zvuku v oblasti největší citlivosti ucha je 10^{12} , proto je vhodné *hladinu intenzity* neboli *hlasitost* L vyjadřovat pomocí logaritmické stupnice. Její jednotkou je bel (B), v praxi se však častěji užívá jednotka nižší: decibel (dB). Lidské ucho má rozlišovací schopnost řádově 1 decibel. V logaritmickém měřítku lze hladinu intenzity zvuku L s intenzitou I vyjádřit vztahem

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

kde I_0 představuje intenzitu prahu slyšení a činitel 10 zajišťuje převod na decibely. [2]

Nejmenší tlaková změna, kterou je zdravé ucho schopno registrovat, je silně kmitočtově závislá. Na frekvenci 1000 Hz je minimální postřehnutelná tlaková změna $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, zatímco na 63 Hz je to $3,6 \cdot 10^{-3}$ Pa. S rostoucími zvukovými podněty se rozdíl v citlivosti sluchu na různých frekvencích vyrovnávají. Na hranici prahu bolesti je největší tlaková změna, kterou ucho zaznamená na 1000 Hz asi 63 Pa, na 63 Hz je to tlak 142 Pa. Tedy na prahu citlivosti je pro stejný vjem na 63 Hz potřeba 555krát větší tlaková změna než na 1000 Hz, na prahu bolesti je zapotřebí pouze 2,25krát větší tlakové změny. Hladiny stejné hlasitosti se značí křivkami, které se podle autorů prvního měření nazývají Fletcherovy - Munsonovy křivky a jsou vykresleny na obrázku 2. [3]



Obrázek 2 - Fletcherovy - Munsonovy křivky [20]

1.1.4 Akustický tlak a akustická impedance

Akustický tlak p udávaný v pascálech (Pa) popisuje stav prostředí v konkrétním bodě prostředí bez závislosti na směru šíření zvuku. Definujeme ho jako rozdíl mezi velikostí celkového tlaku v daném bodě zvukového pole a hodnotou atmosférického tlaku (referenční hodnota atmosférického tlaku činí $2 \cdot 10^5$ Pa). Přítomnost zvuku tedy mění hodnotu celkového tlaku v daném bodě nahoru nebo dolů o velikost tlaku akustického. Úroveň akustického tlaku popisuje veličina *hladina akustického tlaku*

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log \frac{p}{p_0},$$

kde p je okamžitá naměřená hodnota tlaku a p_0 představuje akustický tlak odpovídající $2 \cdot 10^5$ Pa. V našem bezprostředním okolí na nás akustický tlak neustále působí, odpovídající hladiny jsou uvedeny v tabulce č. 1. [4]

Akustická impedance Z bývá také nazývána akustický vlnový odpor. Můžeme jej zapsat ve tvaru $Z = \frac{p}{v}$ jako analogii Ohmova zákona¹. Je to veličina charakteristická pro každé prostředí, ovlivňuje velikost energie odražené na každém rozhraní prostředí s různými hodnotami akustické impedance. Část energie zvukové vlny je

¹ Ohmův zákon $R = \frac{U}{I}$. Akustický tlak p je analogií střídavého napětí a akustická rychlost v je analogií střídavého proudu.

při průchodu prostředím absorbována, což se projeví zmenšením amplitudy a rychlosti šíření v , zachovává se však frekvence f . Se změnou prostředí se může měnit také vlnová délka λ . Na rozhraní dvou prostředí se může část energie zvukové vlny také odrazit a vytvořit ozvěnu, na překážkách dochází i k ohybu vlnění. [5]

Zdroj zvuku	Vzdálenost [m]	Hladina ak. tlaku [dB]
práh slyšení		0
tichý šepot, tikot hodinek u ucha	1	10
šepot	2	20
šum ve studovně, knihovně		30
tichý hovor	1	40
zpěv ptáků, déšť		45
šum v domácnosti		50
normální hovor	1	60
motor automobilu, vysavač	5,1	70
rušná ulice, chodník	5	80
hluk motorových vozidel	10	85
hudba na diskotéce, motorová pila	1	100
startující letadlo, rockový koncert	10	110
práh bolesti		130
proudový motor	50	140

Tabulka 1 - Různé hladiny akustického tlaku v obvyklých prostředích

1.2 Infrazvuk

Vlnění s nižším kmitočtem a větší vlnovou délkou nazýváme infrazvuk a člověk je běžně neslyší. Dokážeme je však vnímat, např. hmatem, a mohou mít na naše tělo i psychiku negativní vliv. Nebezpečné jsou pro člověka frekvence blízké frekvenci srdečního tepu a frekvence, při nichž rezonují tkáně, protože dochází k poškození svalových buněk a buněk nervového systému. Infrazvuk s velmi vysokou amplitudou, a tedy vysokou energií, může i zabít – infrazvukové zbraně. [2] Někteří živočichové však dokáží infrazvuk využívat ke komunikaci, například sloni, a to nikoli prostřednictvím uší, ale nohou.

1.3 Ultrazvuk

Ultrazvuk má frekvence od 16 kHz a menší vlnovou délku než zvuk, který slyšíme. Díky tomu je šíření ultrazvuku méně ovlivněno ohybem, ale výrazněji se odráží od překážek, navíc jej méně pohlcují kapaliny a pevné látky. [4] Ultrazvukové vlny mají mnohem větší intenzitu a energii než vlny zvukové. Intenzita a energie mechanických postupných vln roste se čtvercem jejich frekvence. Hojně se využívá

v lékařství, kdy se do těla vysílá signál, řádově v MHz, který se odráží od vnitřních orgánů, a je zaznamenán detektory, které jej dále zpracovávají. Podobný princip (odraz od překážek a nerovností) využívají sonary pro zkoumání mořského dna nebo ultrazvuková defektoskopie (odhalí skryté příměsi nebo dutinky v materiálu). Echolokaci kromě přístrojové techniky užívají ke komunikaci a orientaci také živočichové, savci, a to především letouni a kytovci. Známé jsou také ultrazvukové píšťalky pro psy, jejichž sluch je mnohem vyvinutější než u člověka a slyší i frekvence kolem 45 000 Hz, v závislosti na plemeni dokonce 70 000 Hz a víc. Kočky vnímají zvuky až kolem 65 000 Hz. Jiné využití je například pro ultrazvukové čištění a dezinfekci. Ultrazvuk však může přinášet nejen užitek, ale živým organismům také velké riziko. Kromě zdravotních obtíží by delší působení mohlo vést k ochrnutí nebo dokonce ke smrti. [2]

1.4 Zdroje zvuku

Zdrojem zvuku mohou být nejrůznější mechanické soustavy. Z vlastní zkušenosti víme, že zvuk vzniká například při prudkém pohybu (svištění, které doprovází pohyb švihadla či rychlé mávnutí proutku), při nárazu (tlesknutí dlaní, bouchnutí pytlíku), při chvění pevných těles (hlasivky, blána na bubnu, houslová struna) či při chvění pouhého vzduchu například ve varhanní píšťale. Na první pohled ale není jasné, co se vlastně odehrává při vibracích předmětu, protože je to obvykle neviditelné.

Rozkmitáme-li vidlici ladičky, pohybem vpřed a vzad stlačuje okolní vzduch a tím dochází ke zvětšení tlaku. Při zpětném pohybu se tlak naopak snižuje, a díky této změně vzniká tlaková (zvuková) vlna. [6]

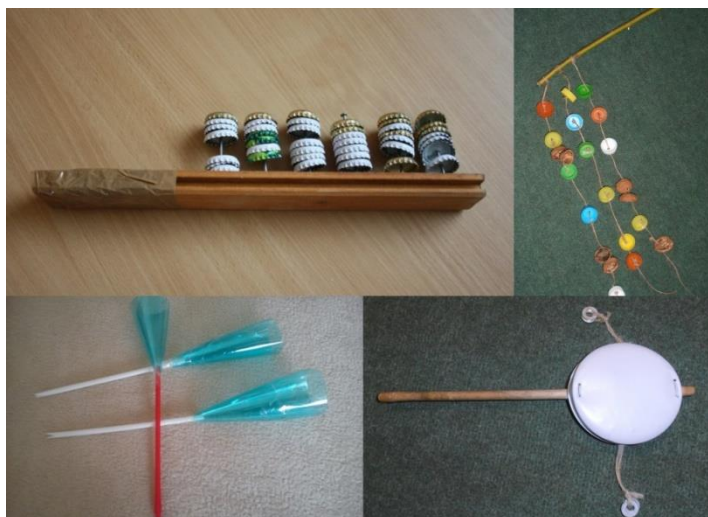
Vznik lidského hlasu zkoumá přírodní věda *fonetika*. Mezi oběma hlasivkami je hlasová štěrbina, která je otevřená při dýchání, za to při řeči nebo zpěvu se šířka hlasivkové štěrbině mění. Prouděním vydechovaného vzduchu hlasovou štěrbinou vzniká hlas. [2]

Jiným zdrojem zvuku může být například obyčejná sklenička na víno, kterou rozechvějeme přejetím prstu po jejím okraji (Obr. 3), megafon, husí krk (ohebná vroubkovaná plastová hadice), kterým točíme nad hlavou nebo do něj jednoduše foukáme.



Obrázek 3 - Chvění skleničky při přejetí vlhkým prstem po okraji

Dalšími zdroji nejrůznějších zvuků mohou být kromě tradičních hudebních nástrojů také podomácku vyrobené bubínky, hrkátka, zvonkohry, chrastidla apod. Ukázka některých z nich je na obrázku (Obr. 4).



Obrázek 4 - Netradiční hudební nástroje

Zdroj ultrazvuku je například již dříve uvedená ultrazvuková píšťalka nebo ultrazvuková siréna, které řadíme mezi mechanické zdroje. Ty jsou vhodné pro utváření ultrazvukových frekvencí od 16 kHz do 500 kHz v tekutinách. Elektrické zdroje ultrazvuku jsou založeny na piezoelektrickém² nebo magnetostrikčním³ jevu. Lze je využít jako vysílač i přijímač, přičemž v obou případech se jedná o přeměnu elektrické energie v akustickou a naopak. [7]

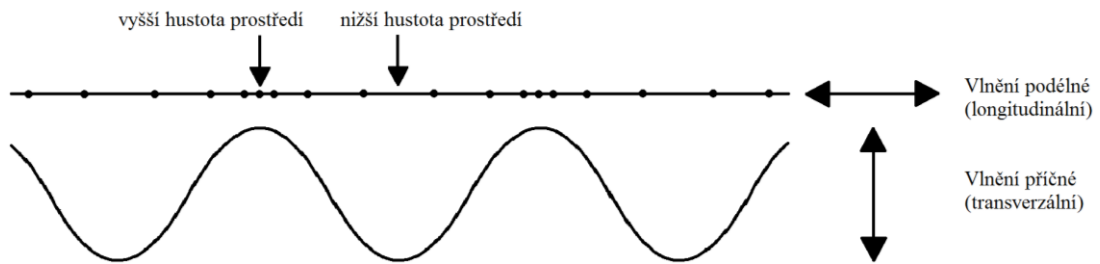
Zdrojem infrazvuku, který se dobře šíří zejména ve vodě, mohou být mořské vlny, jejichž příchod předem předpovídají někteří mořští živočichové citliví na toto vlnění (ryby, medúzy). Také bouřky, hurikány a další povětrnostní podmínky dávají vznik infrazvuku, stejně jako průmyslové stroje nebo výbuchy. [2]

1.5 Šíření zvuku

Zvukové vlny se šíří pevnými, kapalnými i plynnými látkami. V tekutém prostředí se šíří výhradně jako vlny podélné – *longitudinální* (kmitání částic prostředí ve směru vlnění, v kompaktní hmotě), v pevném prostředí také formou vlnění příčného – *transverzálního* (částice prostředí kmitají kolmo na směr šíření vlny, např. v tyči). [8]

² Deformací krystalu, který je velmi málo středově souměrný, vzniká na jeho povrchu elektrický náboj a elektrostatické pole, jehož intenzita (a napětí) závisí na plošné povrchové hustotě nábojů a na vzdálenosti nábojů uvnitř materiálu. Existuje také opačný piezoelektrický jev, kdy naopak vnější elektrické pole vyvolá deformaci krystalu. Střídavé napětí způsobí periodické změny tloušťky krystalu a tímto způsobem lze získat zdroj zvuku nebo ultrazvuku. [17]

³ Princip magnetostrikce spočívá ve změnách rozměrů feromagnetických látek v magnetickém poli. Ve střídavém elektromagnetickém poli dochází k periodickým změnám objemu materiálu (smrštění a roztahení) a ke vzniku mechanických kmitů. [17]



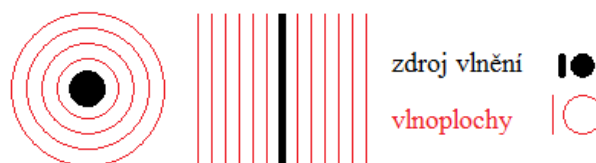
Obrázek 5 - Příčné a podélné vlnění

Šíření zvukových vln v prostoru je velmi složité, dochází k jejich skládání i tlumení, projevuje se také lom, ohyb a odraz vlnění na překážkách. Se vzdáleností zvukové vlny slábnou, mohou být pohlcovány některými látkami (molitan, textil nebo polystyren). Ve vakuu se zvuk nešíří (neobsahuje látkové prostředí), což lze snadno dokázat pokusem, kdy uzavřeme zvonící zvoněk do vývěvy. Zvuk zvonku, nebo v našem případě stopek, pomalu mizí s postupným odčerpáváním vzduchu (Obr. 6).



Obrázek 6 - Pokus se stopkami ve vakuu

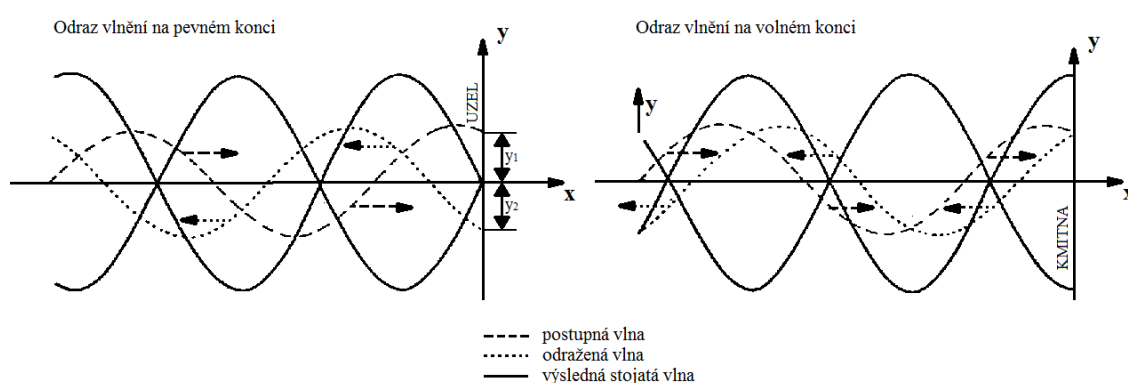
V prostoru se zvuk šíří všemi směry tzv. *vlnoplochami*, což jsou křivky spojující všechna místa zvukového pole se stejnou fází v daném okamžiku. V okolí bodového zdroje tvoří soustředné koule se středem ve zdroji. Pokud je zdroj ve tvaru rozměrné desky nebo je v dostatečné vzdálenosti od bodového zdroje, pak jsou vlnoplochy rovinné (Obr. 7).



Obrázek 7 - Vlnoplochy

Pokud se v prostoru setkají dvě nebo více vln, dochází k jejich *interferenci*. Při jejich skládání je výsledná proměnná výchylka v každém bodě vektorovým součtem výchylek jednotlivých vln (princip superpozice). Skládání dvou vln, které jsou ve fázi, vede k zesílení výchylek – konstruktivní interference. Destruktivní interference – zeslabení výchylek – je výsledkem skládání dvou vln, které nejsou ve fázi.

Odraz vlnění je změna směru vyvolaná dopadem vlny na rozhraní dvou prostředí. Průběh odražené vlny je závislý na vlastnostech překážky. Na volném konci se odrazí se stejnou fází (žádný fázový rozdíl), zatímco na pevné překážce se vlnění odráží s fázovým rozdílem π , neboli s opačnou fází. Dochází k interferenci odražené a postupné vlny. Výsledkem je stojaté vlnění (Obr. 8). [4]



Obrázek 8 - Odraz vlnění a stojatá vlna

Lom je změna směru zvukové vlny vyvolaná přechodem do jiného prostředí, v němž se mění rychlost pohybu vlny. Se změnou rychlosti se mění také vlnová délka, ale frekvence vlnění zůstává konstantní. Podíl rychlosti dopadající a lomené vlny v daných prostředích udává index lomu n . Přechod z řidšího do hustšího prostředí zvukové vlny zpomaluje, naopak vstup do řidšího prostředí vlnu zrychluje. Platí zákon lomu⁴. [2]

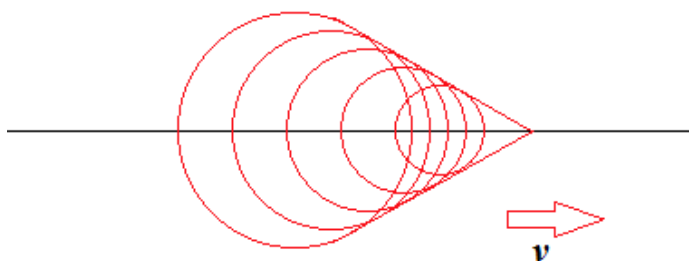
Narazí-li zvuková vlna na překážku nebo prochází otvorem, dochází k *ohybu vlny*. Míra ohybu závisí na velikosti překážky nebo otvoru v poměru k vlnové délce. Podstata tohoto jevu lze vysvětlit pomocí Huygensova principu⁵. Nejvýraznější ohyb nastává, pokud je velikost překážky nebo otvoru mnohem menší než vlnová

⁴ Poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí konstantní a rovná se poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.

⁵ Každý bod vlnoplochy, která dospěla k překážce, se sám stává zdrojem elementárního vlnění, které se šíří všemi směry, tedy i do prostoru za překážku. Tato vlnění vzájemně interferují, což vede ke zvětšení nebo zmenšení amplitudy výchylky výsledného vlnění v jednotlivých bodech.

délka. Například pro vytvoření protihlukové bariéry, musí být použita překážka větší než vlnová délka zvukového vlnění. Ohyb a lom mechanického vlnění není dobře pozorovatelný, mnohem patrnější je ohyb a lom světla v optice. [2]

Dopplerův jev popisuje změny frekvence v závislosti na vzájemném pohybu zdroje zvuku a přijímače, čím je rychlost větší, tím je jev výraznější. Zvláštní případ nastává, jestliže se rychlost pohybu zdroje zvuku přiblíží rychlosti zvuku v . Tato skutečnost nastává například u nadzvukových letadel. Obalová plocha vlnoploch vytvořených zvukem takového letadla (Obr. 9) vytvoří *rázovou vlnu*, v níž dochází k prudkému stlačení vzduchu a je soustředěna značná energie. Když dosáhne zemského povrchu, vnímáme ji jako silnou ránu – akustický třesk. [4]



Obrázek 9 - Rázová vlna vzniklá při pohybu nadzvukovou rychlostí

Ozvěna je speciální případ odrazu zvukového vlnění na rovinné překážce v rozlehlém a prázdném prostoru, která je řádově větší než vlnová délka a sluchem se jeví jako opakování slyšeného zvuku. Aby bylo možné oba zvuky odlišit, musí být překážka vzdálená od zdroje alespoň 17 metrů. Pak zvuk za 0,1 sekundy urazí vzdálenost 34 metrů a lidské ucho zaznamená dva různé zvuky. Jestliže je vzdálenost menší, není možné zásadně rozlišit sluchem jednotlivé odrazy a vzniká *dozvuk*.

1.5.1 Rychlost šíření zvuku v různých prostředích

Nejrychleji se zvuk šíří pevnou látkou, kde jsou molekuly nejvíce nahuštěné, pomaleji kapalinou a nejmenší rychlost má v plynech, kde jsou molekuly nejdál od sebe. Při pokojové teplotě je *rychlost zvuku ve vzduchu* přibližně $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tlak vzduchu ani frekvence vlnění na jeho rychlost vliv nemá. Z atmosférických podmínek rychlost zvuku nejvíce ovlivňuje teplota prostředí, s rostoucí teplotou rychlost zvuku roste přibližně lineárně. Rychlost zvuku v v závislosti na teplotě můžeme vyjádřit takto

$$v = (331,82 + 0,61 t) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

kde t je teplota prostředí v Celsiových stupních. [4]

Pro rychlost příčných vln v pevném prostředí platí vztah $v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$, kde G je modul pružnosti ve smyku a ρ je hustota prostředí. Pro rychlost podélných vln v pevných látkách tvaru tenké tyče, lze psát $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, kde E je modul pružnosti v tahu. Pro jiné tvary pevných těles je vztah pro rychlost vlnění složitější: $v = \sqrt{\frac{2G}{\rho} \frac{\mu-1}{2\mu-1}}$, kde μ značí Poissonovo číslo, které udává souvislost mezi poměrným podélným prodloužením a poměrným příčným zkrácením.

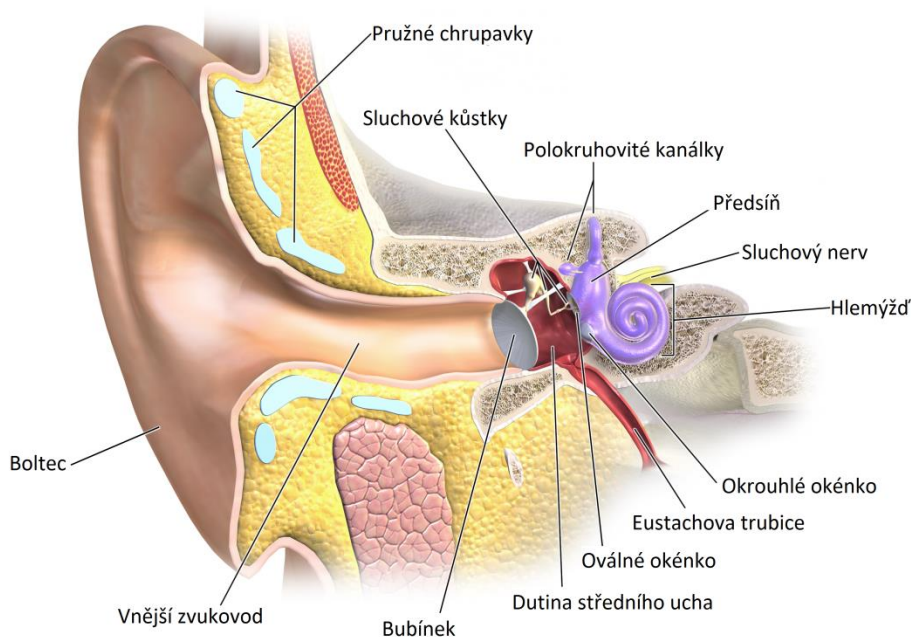
V tekutinách vzniká pouze vlnění podélné. Jeho rychlost v kapalinách je dána vztahem $v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$, kde K je modul objemové pružnosti kapalného prostředí, související s vnějším dodatečným tlakem Δp působícím na kapalinu. U plynů při adiabatických změnách (nedochází k výměně tepla) můžeme modul pružnosti nahradit součinem Poissonovy konstanty γ a tlaku p_0 v plynném prostředí. Rychlost vln v plynech tedy vypočítáme jako $v = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}}$. [9]

2 Lidský sluch

Slyšení, které představuje složitý proces detekce, přenosu a zpracování akustického signálu, využíváme hlavně při komunikaci (přeměna signálu ve zvukový počitek s určitou intenzitou a frekvencí) a orientaci. Jeho poškození nebo úplná ztráta omezuje naše komunikační a orientační schopnosti, a v neposlední řadě také způsobuje neslyšícímu psychickou zátěž. K poškození dochází vlivem stárnutí, nejrůznějšími onemocněními ucha (infekce vnějšího nebo středního zvukovodu, vpáčený nebo prasklý bubínek, nádorová onemocnění apod.) nebo vnějšími příčinami (hluk, úraz, léky, toxiny).

2.1 Anatomická stavba ucha

Lidské ucho (Obr. 10) je nesmírně složitý smyslový orgán, který je hluboko uložen a chráněn v lebeční kosti spánkové. Je nejen orgánem sluchu, ale také centrem rovnováhy. Skládá se ze tří částí – *zevního, středního a vnitřního ucha*. Vnější ucho funguje jako přijímač, radar, střední jako zesilovač. Do středního ucha také ústí *Eustachova trubice*, jež slouží k vyrovnání tlaku ve středním uchu. Struktura vnitřního ucha rozlišuje a zpracovává nejen zvuky, ale je také analyzátozem polohy hlavy a centrem rovnovážného ústrojí.

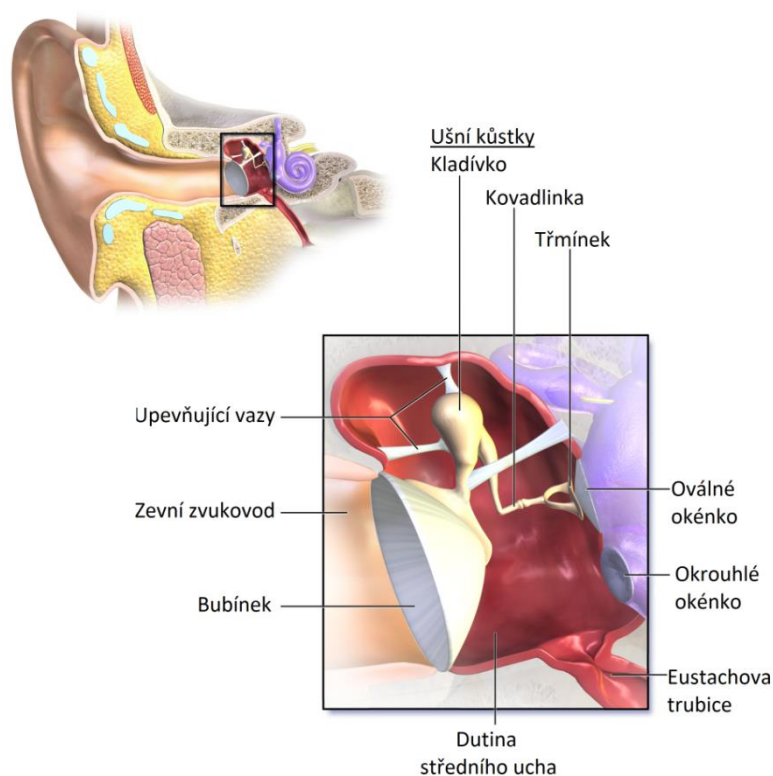


Obrázek 10 - Anatomie lidského ucha [21]

2.1.1 Příjem a zpracování zvuku lidským uchem

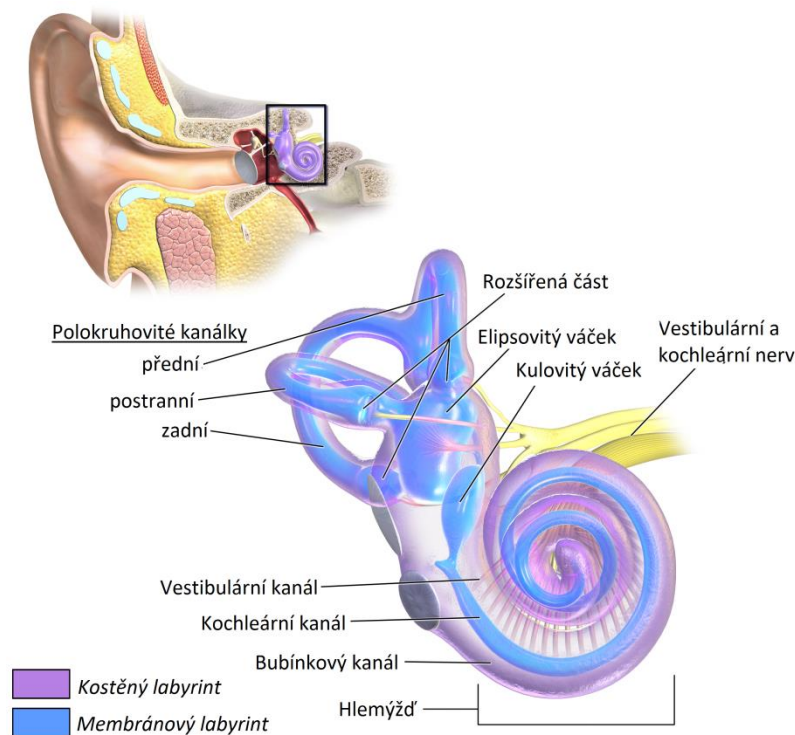
Zvuk je nejprve jedinou viditelnou částí ucha, ušním *boltcem*, nasměrován do *zvukovodu* o délce přibližně 2,5 centimetru. Na jeho konci je *ušní bubínek*, který ohraničuje vzduchem vyplněný prostor středního ucha, které slouží jako zesilovač zvukových vln – akustický rezonátor.

Blána bubínku se s příchodem vlnění rozkmitává. S vnitřním uchem je bubínek propojen třemi kůstkami: *kladívko* (malleus), *kovadlinka* (incus) a *třmínek* (stapes), které mechanicky vedou kmitání oválným okénkem na rozhraní středního a vnitřního ucha (Obr. 11, 12). [3]



Obrázek 11 - Anatomie středního ucha [21]

Vibrace jsou přes *oválné okénko* přivedeny do *hlemýždě* (cochlea), který je vyplněn tekutinou zvanou *endolymfa* a uložen v kostěném labyrintu. Kostěný labyrint tvoří schránku pro labyrint blanitý, který ukrývá receptory sluchu i rovnováhy. Hlemýžď je po celé délce rozdělen bazální membránou, z níž vyčnívají drobná nervová zakončení *Cortiho orgánu*. Slouží jako receptory vibrací endolymfy a vysílají nervové signály přes sluchový nerv (nervus cochlearis) do mozku. Rozvinutý Cortiho orgán má délku 32 mm a rozšiřuje se směrem od oválného okénka z 0,05 mm až na 0,5 mm. Následkem toho jsou blíže oválnému okénku vnímány tóny vysoké a na vzdálenějším konci tóny hluboké.



Obrázek 12 - Anatomie vnitřního ucha [21]

V ye popsan  proces nazývá Hlořek [3] *vzduřn  veden *. Jin  způsob je *kostní veden *, kdy dochází k rozechv n  kostního skeletu hlavy působením zvukov  vlny. Citlivost kostního veden  je oproti vzduřn mu podstatn  horř , rozdíl činí asi 40 dB. Fyziologicky se vyuřz v  například při slyřen  vlastního hlasu, jehoř nahrávka m  pro nás při poslechu jin  zabarven , neř kdyř se slyř me mluvit.

2.1.2 Rovnovázný  stroj 

Ucho vedle sluchového ústrojí skrývá také centrum rovnováhy. Orgány rovnováhy jsou ulořeny ve vnitřním uchu a jejich úkolem je zaznamenávat polohu hlavy. Jsou to *kulovit  a elipsovit  v  ek* a *polokruhov  kanálky*, kter  tvoří labyrint vypln n  tekutinou (endolymfou) a kařd  leř v jin  rovině a s odliřn m úhlem.

Kulovit  a elipsovit  v  ek, leřc  mezi hlem yřd m a polokruhovitými kan lkami, obsahuje vláskové buňky pokryt  rosolovitou hmotou obsahující krystalky uhličitanu vápenatého (otolity). Ty při naklon n  hlavy sklouznou k jedn  straně a tlač na rosol a vláskové buňky. Na tyto buňky navazují nervov  zakon en  (v b řky neuronů) a p en řej  do mozku informace o kývání nebo ot a en  hlavy. Polokruhovit  kanálky, v dolní časti rozř řen  v tzv. ampuly, jsou uvnitř vybaveny podobn  jako oba v  ky, buňkami citlivými na pohyb endolymfy při pohybech hlavy. [10]

2.2 Sluchový práh a pole

Sluchové pole (Obr. 13) je oblast sluchu zdola ohraničená *prahem slyšení*, který představuje nejmenší intenzitu zvuku, kterou může člověk sluchem zachytit, a *prahem bolesti*, což je hraniční intenzita zvuku, kdy sluchový vjem začíná způsobovat bolest. Zleva a zprava omezují sluchové pole kmitočty 20 a 20 000 Hz, konvenčně stanovené meze slyšitelnosti lidského ucha. Nejcitlivější je přitom ucho pro frekvenční pásmo lidské řeči, které se pohybuje přibližně mezi 500 a 4 000 Hz. Pro vyšší a nižší frekvence citlivost klesá. [2]

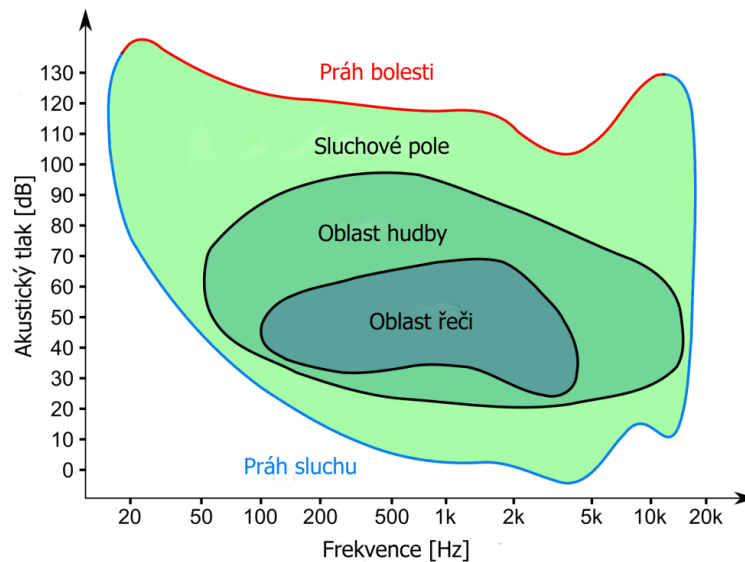
Zato někteří živočichové mají v porovnání s člověkem nesrovnatelně lepší sluch. Nejen z pohledu citlivosti, ale také v rozsahu frekvencí, které jejich ucho dokáže vnímat. U většiny z nich je rozsah posunut do vyšších frekvencí. Ve světě savců jsou rekordmany delfínovití, protože slyší frekvence až do neuvěřitelných 280 000 Hz. Netopýři a další letouni slyší frekvence od 2 000 až do 110 000 Hz a pomocí sluchu se orientují v prostoru a loví potravu. Tento princip zvaný echolokace využívají také kytovci, některé druhy hmyzu a ptáků. Kočka slyší frekvence až 70 000 Hz. V porovnání s jejím odvěkým rivalem – psem – slyší lépe, protože pes slyší frekvence „jen“ do 50 000 Hz. Ještě menší rozsah sluchu má kůň, který slyší frekvence až do 40 000 Hz. Výborný sluch mají také potkani nebo ježci.

Srnci a další popásající se býložravci dokáží slechy natáčet do stran, díky čemuž neslyší zvuky jen z jednoho směru. Mohou také natočit každé ucho jiným směrem, stejně jako psi. Psí boltec je totiž ovládán 17 uchohybnými svaly, člověk jich má pouze 8 a pohybovat s nimi umí málokdo. Vysoce citlivý sluch však může být i nevýhodou, hlasité zvuky mohou způsobovat našim čtyřnohým mazlíčkům dokonce bolest. [11]

U slona s jeho obrovskými ušními boltci bychom mohli očekávat, že bude mít výborný sluch. Mezi živočichy však patří k těm, jejichž rozsah slyšitelnosti je opravdu malý, slyší jen frekvence od 14 do 12 000 Hz. Jeho uši totiž slouží hlavně k ochlazení organismu. Za to má slon schopnost slyšet nohama, na nichž má polštářky citlivé na vibrace. Stáda tak mohou dupáním varovat osamocené jedince před predátorem, a to i na vzdálenost čtyř a více kilometrů. [12]

Sluchový práh (práh slyšení) není stejný pro všechny frekvence (v Obr. 13 označen modře). Binaurálně⁶ určený práh slyšení je o 5 – 10 dB nižší než práh určený monoaurálně⁷.

⁶ slyšení oběma ušima



Obrázek 13 - Akustika sluchového pole [22]

Sluchové pole není omezeno pouze frekvenčně, ale také akustickým tlakem 0 až 130 dB. Podle hladiny akustického tlaku můžeme sluchové pole rozdělit do pásem (Tab. 2). [13]

do	69	dB	fyzilogické pásmo	
70	-	94	dB	pásmo zátěže
95	-	119	dB	pásmo poškození
120	-	129	dB	pásmo hmatu
nad	130	dB	pásmo bolesti	
do	120	dB	působení specifické	
nad	120	dB	působení mechanické	
od	130	dB	hrubé strukturní změny ve vnitřním uchu	
od	170	dB	strukturní změny i v bubínku a sluchových kůstkách	

Tabulka 2 - Pásmo sluchového pole [13]

Hladina příjemné hlasitosti tónu, šumu nebo řeči se u normálně slyšících lidí pohybuje mezi 40 a 60 dB, 100 dB považujeme za práh nepříjemné hlasitosti. Překračují jej například některé průmyslové stroje nebo motory. Zvuk nad 130 dB je spojen především s tlakem a vibrací, způsobuje poruchy dýchání, vidění a motoriky. [13]

Lidské ucho má také schopnost adaptace na hlasité prostředí. Při silném zvuku se smrští středoušní svaly (napínač bubínku a třmínkový sval), čímž se zmenší

⁷ slyšení jedním uchem

pohyblivost středoušního mechanického systému (stapediální reflex). Na krátkou dobu dochází ke zvýšení prahu slyšení a snížení hlasitosti, což zabrání poškození vnitřního ucha. Po ukončení akustického dráždění dochází během několika sekund k úpravě prahu na normální hodnoty. Při normálním sluchu je tato restituce úplná. Po podráždění silným zvukem může dojít k přetrvání porušení funkce nebo k nevratnému poškození. [13]

2.3 Klasifikace sluchových vad

Nejčastějším projevem sluchových vad je omezení **sluchového pole**. Pokud je sluch skutečně poškozen, je třeba odhalit typ poškození a jeho závažnost. Sluchové vady je možné dělit podle různých kritérií, podle doby vzniku, typu a z hlediska stupně poškození sluchu. Zahrnují různé stupně nedoslýchavosti až po úplnou hluchotu a jejich společným znakem je snížení vnímání některých frekvenčních oblastí nebo celého rozsahu sluchu. Rozdělení vad a diagnostika poruch slouží ke správnému výběru typu léčby. [3]

2.3.1 Klasifikace postižení podle doby vzniku

Z tohoto hlediska sluchové vady dělíme na vrozené a získané. K **vrozeným vadám** dochází v důsledku dědičnosti nebo v období prenatálním a perinatálním. V prenatálním období jsou rizikovými faktory zejména v 1. trimestru těhotenství nemoci matky (např. zarděnky, spalničky, toxoplazmóza), a také rentgenové záření. V perinatálním období může sluch dítěte poškodit např. protrahovaný porod, nízká porodní hmotnost, inkompatibilita Rh krevního faktoru matky a dítěte, asfyxie nebo poporodní žloutenka. [14]

Získané vady vznikají až po narození dítěte. Právě zde je kritická doba vzniku, a to z hlediska možností rozvoje řeči. Ta rozhoduje o tom, zda je získaná vada prelingvální nebo postlingvální. Lidé, u nichž došlo k poškození sluchu perinatálně nebo před začátkem vývoje řeči v prvních měsících a letech života, trpí **prelingvální** sluchovou poruchou. Naopak u všech osob, u kterých došlo k náhlé nebo postupně vznikající ztrátě sluchu až po dokončení vývoje řeči, označujeme sluchovou ztrátu jako **postlingvální**. Hraničním obdobím bývá věk mezi 4 a 6 lety, do této skupiny však řadíme nejen sluchové ztráty u dětí, ale i dospělých a seniorů. [14]

2.3.2 Klasifikace postižení podle místa poškození

Podle typu dělí Hložek [3] sluchové vady na vady převodní, percepční a smíšené.

Převodní vady (hypacusis conductiva)

Jedná se o vady vnějšího a středního ucha, kdy jedinec špatně slyší, jde o kvantitativní postižení sluchu. Vada sluchu je způsobena poruchou převodu mechanické energie od zvukovodu a bubínku přes řetěz kůstek až po oválné okénko včetně. Samotná převodní porucha nemůže způsobit úplnou ztrátu sluchu, protože percepce (vnímání) je zajištěna kostním vedením a maximální pokles sluchu je 60 dB. Lze je většinou úspěšně zlepšit operačním zásahem.

Percepční vady (hypacusis perceptiva)

Vady vnitřního ucha a centrální nervové soustavy způsobují, že jedinec špatně rozumí, jde o kvalitativní poškození sluchu. Dělí se dále podle místa vzniku na kochleární, lokalizované v Cortiho orgánu, a suprakochleární, které mohou vzniknout kdekoliv v dalším průběhu sluchové dráhy. Percepční poruchy jsou většinou ireverzibilní a mohou být jedním z příznaků závažného onemocnění CNS. Včasná diagnostika však může přispět k úspěšné léčbě.

Smíšené vady (hypacusis mixta)

Smíšená porucha sluchu znamená kombinaci vad převodních i percepčních. [3]

2.3.3 Klasifikace podle stupně poškození sluchu

Jde o vyjádření kvality sluchu, pomocí hodnot měřených v decibelech zjišťujeme velikost ztráty slyšení. Hodnoty jsou měřeny pomocí vzdušné audiometrie. Světová zdravotnická organizace (WHO) stanovila mezinárodní škálu stupňů sluchových poruch, které jsou uvedené v následující tabulce (Tab. 3).

Průměrná ztráta sluchu	Slovní označení
0 až 25 dB	normální sluch
26 až 40 dB	lehká nedoslýchavost
41 až 55 dB	střední nedoslýchavost
56 až 70 dB	středně těžká vada sluchu
71 až 90 dB	těžká vada sluchu
více než 91 dB	velmi závažná vada sluchu

Tabulka 3 - Klasifikace nedoslýchavosti podle WHO [13]

2.4 Diagnostika sluchových vad

Specializované vyšetření sluchu je v kompetenci lékařského oboru otorhinolaryngologie (ORL)⁸. Jednotlivá vyšetření sluchu můžeme rozdělit mimo jiné na subjektivní a objektivní podle toho, zda jsou nebo nejsou závislé na aktivní spolupráci vyšetřovaného a jeho odpovědi na akustický podnět. Mezi subjektivní testy patří sluchové zkoušky hlasitou řečí a šepotem, ladičkami a zvukovými hračkami (u dětí), testy prahové (tónová audiometrie, VRA⁹) a nadprahové (kochleární a suprakochleární poruchy), slovní a řečová audiometrie. Objektivní testy zahrnují vyšetření OAE¹⁰, tympanometrie, impedancmetrie, a audiometrie z elektrické odezvy. [15]

2.4.1 Subjektivní sluchové testy

Klasické sluchové zkoušky

Klasické sluchové zkoušky jsou jinak nazývány také kvalitativní a slouží především k orientačnímu zjištění typu sluchové poruchy a její závažnosti. Patří mezi ně vyšetření hlasitou řečí, šepotem nebo vyšetření ladičkami a patří mezi nejstarší vyšetřovací postupy. Kvalita sluchu se vyšetřuje u každého ucha zvlášť.

Při klasické sluchové zkoušce vyšetřující předříkává vyšetřovanému slova nejdříve s hlubokými a poté s vysokými tóny, zvlášť na každé ucho, která má zopakovat. Ucho, které nechceme vyšetřovat, ohlušíme (maskujeme) širokopásmovým hlukem. K tomu slouží například *Barányho ohlušovač*, který vytváří hluk mechanicky rozechvíváním kovové nebo celuloidové membrány. Asistující sestra stíní pacientovi zrak, aby nemohl odezírat a nenarušilo to výsledek vyšetření. V případě vyšetření šepotem stačí ucpat zvukovod nevyšetřovaného ucha prstem. Do výsledků vyšetření se zapisuje také vzdálenost, na kterou pacient správně zopakuje většinu slov při vyšetření. [3] Pro toto vyšetření je výběr slov klíčový, podle něho je dokonce možné zjistit typ sluchové vady – převodní nebo percepční (zda je zhoršena slyšitelnost slov s hlubokými tóny jako „brouk“, „hůl“ nebo vysokými tóny „tisíc“ a „bílá“). [14]

K vyšetření ladičkami se používají ladičky do 500 Hz. Různé druhy zkoušky sluchu ladičkami se rozdělují podle toho, na jaké místo se pata ladičky přikládá. Rozezvučenou ladičku vyšetřující přikládá k uchu, na čelo, temeno nebo spánkovou kost pacienta, podle toho zda zkoumáme vzdušné nebo kostní vedení.

⁸ Chirurgický lékařský obor, který se specializuje na diagnózu a léčbu ušních, nosních a krčních chorob.

⁹ Visual Reinforcement Audiometry (vizuálně posílená audiometrie)

¹⁰ Otoacoustic emissions (evokované otoakustické emise)

Nevýhodou všech uvedených klasických zkoušek sluchu je, že neposkytují konstantní výsledky. Jsou silně ovlivněny akustikou prostředí, velikostí místnosti, ve které probíhá měření, její povrch a členění. Subjektivně je ovlivňuje i vyšetřující osoba, jejíž síla hlasu v průběhu dne kolísá, se vzrůstající vzdáleností se navíc podvědomě zesiluje hlas vyšetřující osoby. U ladičky způsobuje potíže s interpretací výsledků měření volba kmitočtu, na zvoleném kmitočtu nemusí být sluch postižen. To lze kompenzovat měřením s více ladičkami o různých frekvencích. [3]

Tónová audiometrie

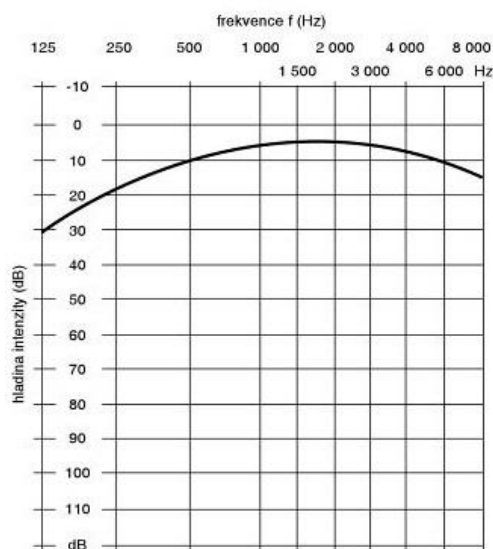
Tónová audiometrie patří mezi kvantitativní metody vyšetření, vyšetřuje sluchový práh vzdušného i kostního vedení pro čisté sinusové tóny. Vyšetřuje každé ucho zvlášť a provádí se ve speciálně zvukově upravených místnostech nebo odhlučněných kabinách. Pacientovi do sluchátek je nejprve puštěn přerušovaný tón o kmitočtu 1000 Hz, je postupně zesilován až do intenzity, kdy jej pacient slyší. Audiometr generuje postupně všech sedm základních frekvencí (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz a 8000 Hz). Do nevyšetřovaného ucha se může někdy použít šum, aby bylo vyřazeno z měření. Prahová intenzita pro každé ucho je pak v závislosti na frekvenci zaznamenána do audiogramu.

Kostní vedení je pomocí speciálního oscilátoru vyšetřováno na pěti základních frekvencích (250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz). Ten bývá umístěn buď za ušním boltcem, nebo na čele, aby ho od kosti dělilo co nejméně měkké tkáň. Zvuk se šíří přes rozvibrovanou kost přímo do vnitřního ucha a pro sluchový vjem tak není využíván bubínek a sluchové kůstky. Díky těmto dvěma typům vyšetření může lékař určit také příčinu nedoslýchavosti. Slyší-li pacient dobře zvuky vedené přes kost, ale špatně slyší zvuk ze sluchátek, jedná se o převodní poruchu, naopak při percepční poruše je porušen sluch při obou typech vyšetření a postihuje zejména vysoké tóny. Nevyšetřuje se celé zvukové pásmo 16 Hz – 20 kHz, protože hodnoty nad 5 kHz nejsou pro porozumění řeči podstatné. Vyšetřením sluchu pro kmitočty nad 10 kHz se zabývá vysokofrekvenční audiometrie. [3] Tónovou audiometrii lze provádět také ve volném poli, tedy zvuk pomocí reproduktorů přenášet do celé místnosti. Pak ale ztrácí toto vyšetření výhodu, že můžeme proměřit každé ucho zvlášť. [15]

U pacientů s asymetrickou poruchou sluchu dochází při vyšetřování hůře slyšícího ucha k přeslechu do lépe slyšícího ucha. To je způsobeno netěsností sluchátka, nebo přenosem zvuku kostním vedením přes skelet hlavy na protilehlé ucho. Lze mu zamezit ohlušením (maskováním) nevyšetřovaného ucha šumem.

Výsledky vyšetření se zaznamenávají do grafu závislosti velikosti ztráty sluchu na kmitočtu, audiogramu. Horizontální osa obvykle představuje kmitočty v rozsahu od 250 Hz do 8 kHz, vertikální osa ztrátu sluchu v decibelech. Ta je definována jako

20 log podílu akustického tlaku, jaký na daném kmitočtu zaslechne sluchově postižený člověk a akustického tlaku, jaký na daném kmitočtu slyší průměrně normálně slyšící jedinci. V audiogramu na obrázku (Obr. 14) je křivka ideálního ucha, určená prahy sluchu pro jednotlivé kmitočty. Čím hlouběji křivka v audiogramu leží, tím hůř vyšetřovaný slyší (nedoslýchavost). Na úplnou hluchotu upozorňuje šířka audiogramu. Audiogram hluchého člověka by ležel v levém dolním rohu. [16]



Obrázek 14 - Audiogram ideálního ucha [17]

Slovní audiometrie

Slovní audiometrie má velký význam při kontrole účelnosti sluchadel. Narozdíl od tónové audiometrie se zaměřuje na rozumění komplexnímu signálu – řeči, bývá proto obvykle doplněním vyšetření tónovou audiometrií. Pro vyšetření se využívá sada vybraných slov, které délkově i kmitočtově odpovídají normální řeči. Sestavy pro slovní audiometrii se liší pro různé země a jazyky, a to počtem slov i jejich skladbou. Pro český jazyk se používají sestavy o sto slovech, rozdělených do dekád. V dekádě jsou čtyři slova s převážně středními formanty¹¹, tři s hlubokými a tři s vysokými formanty. Sestavy musí být rovnoměrně srozumitelné a slova v nich obsažená musí být informačně srovnatelná. [3]

Pacient sedí v tiché komoře a slova jsou přehrávána sluchátky nebo reproduktory (volné pole). Pacient jednotlivá slova opakuje a zaznamenávají se správně

¹¹ Formant je tón tvořící akustický základ hlásky, akustika jej označuje jako oblast lokálního maxima (špičky) ve spektru složených tónů.

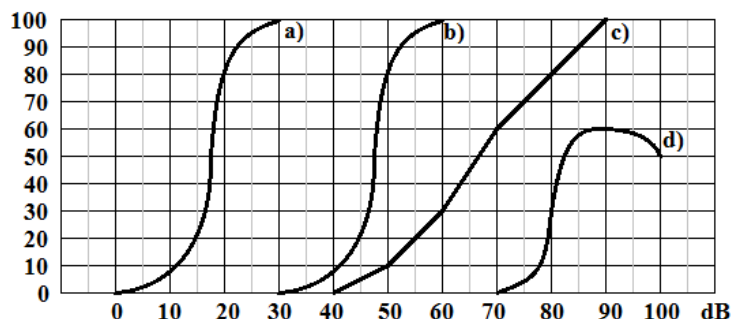
opakovaná slova a hladina intenzity. Při přechodu mezi dekadami se intenzity zesílí nebo zeslabí o 5 nebo 10 dB. Většinou se začíná s úrovní hlasitosti, která je vyšetřovanému příjemná a dobře rozumí. Postupně se hlasitost snižuje, takže vyšetřovaný slyší a rozumí stále méně slovům. Pokud pacient slovu nerozumí, řekne „nevím“, aby bylo možné rozlišit, kdy slovo vůbec neslyší.

Výsledky se zaznamenávají do grafu, kde horizontální osa představuje intenzitu v decibelech a osa vertikální procenta dosažené srozumitelnosti jednotlivých dekad. Označení pravého a levého ucha je stejné jako u tónové audiometrie. Procenta správně rozuměných slov určují na křivce významné body (Tab. 4). [3]

Práh slyšitelnosti	intenzita, kdy vyšetřovaný začíná slyšet slova jako slabé šumy, ale nerozumí
Práh percepce	hladina, při které se značnou námahou rozumí některým slovům
Práh srozumitelnosti	hladina, při níž dosáhne vyšetřovaný 50 % slovní srozumitelnosti
Práh 100 % srozumitelnosti	vyšetřovaný rozumí 100 % slov

Tabulka 4 - Významné body na křivce při slovní audiometrii [3]

Normální křivka má esovitý tvar (Obr. 15a)) a práh srozumitelnosti na hodnotě 18,5 dB. Převodní nedoslýchavost se projevuje posunutím křivky stejného tvaru doprava (Obr. 15b)), křivka pacienta s kochleární percepční nedoslýchavostí má větší sklon a je posunutá doprava (Obr. 15c)), někdy při dalším zvyšování intenzity dochází k poklesu srozumitelnosti, aniž by bylo dosaženo 100 % (Obr. 15d)).



Obrázek 15 - Typy křivek při slovní audiometrii [3]

2.4.2 Objektivní sluchové testy

OAE (evokované otoakustické emise)

OAE jsou emise zvuku produkované zevními vláskovými buňkami ve vnitřním uchu. Do zevního zvukovodu je pouštěn stimulující zvuk a jsou-li vláskové buňky nepoškozené, pak citlivý mikrofón zaznamená slabý zvuk emitovaný těmito

buňkami. Latence¹² odpovědi na tyto podněty se u člověka pohybuje mezi 5 a 20 milisekundami. Podmínkou vzniku emisí je neporušená funkce převodního aparátu, pacient musí být v klidu a v tiché místnosti. Pozitivním výsledkem jsou otoakustické emise výbavné, tedy jsou patrné emise zevních vláskových buněk. Tato metoda se používá také jako součást screeningu novorozenců¹³, díky časové nenáročnosti (asi 5 minut) a tónovým podnětům, které nejsou obtěžující (blízké sluchovému prahu). [3]

Tympanometrie

Tato metoda umožňuje vyšetřit funkci středního ucha a využívá odrazu části akustické energie od bubínku zpět do zvukovodu. Čím více energie se odráží zpět, tím méně projde až do hlemýždě a naopak. Při tomto vyšetření je ústí zvukovodu vzduchotěsně ucpáno měřicí sondou obsahující tři kanálky s reproduktorem, manometrem a měřícím mikrofonom. Podle frekvence měřícího tónu se rozlišuje tympanometrie nízkofrekvenční (do 260 Hz) a vysokofrekvenční (600 – 1000 Hz). Množství odražené akustické energie je závislé na celistvosti a tuhosti bubínkové membrány (volnější blána bubínku odráží více energie), pohyblivosti sluchových kůstek a obsahu středoušní dutiny (vzduch odráží minimum energie a tedy nejlépe vede). [16]

Vyšetření stapediálních reflexů

Stapediální reflex je změna impedance¹⁴ bubínku vyvolaná kontrakcí třmínkového svalu (musculus stapedius). Jedná se o reflex zkřížený, tedy jednostranný akustický podnět vyvolá kontrakci na obou stranách.

Audiometrie z elektrické odezvy (BERA, CERA)

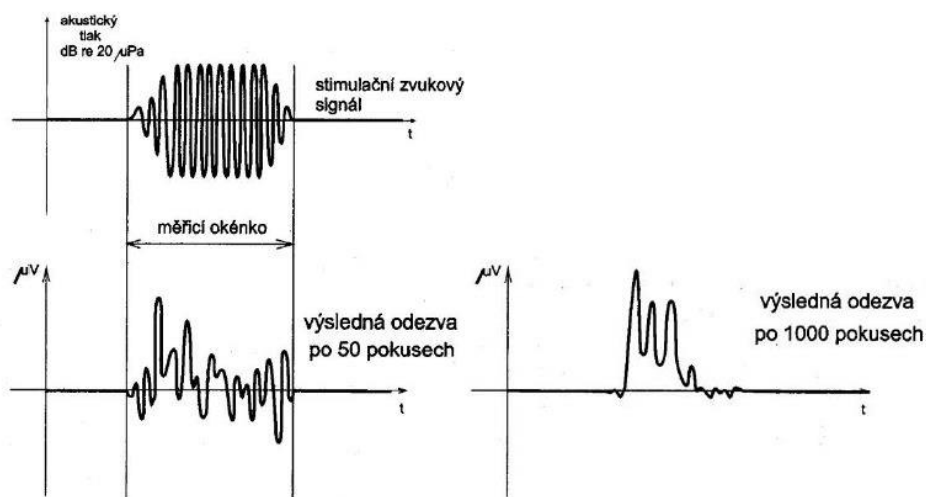
Tato vyšetření spočívají v měření změn elektrické aktivity nervové soustavy při zvukovém podnětu. Vyšetřovaný má obvykle na hlavě umístěny tři elektrody, jednu měřící na vrcholu hlavy, druhou měřící za jedním uchem a za druhým uchem elektrodu referenční, navíc má ještě audiometrická sluchátka. Měření probíhá obvykle od vysokých hlasitostí, které uslyší i nedoslýchavý pacient, a řídí jej počítač. Generátor testovacího zvuku pípne do sluchátek a zároveň s tím počítač otevře na zvolenou dobu vstup do měřícího diferenciálního zesilovače, na jehož výstupu se objeví EEG signál. Měření se opakuje zhruba 20krát za sekundu, při

¹² Vyjadřuje časovou prodlevu mezi iniciací jevu zvukovým podnětem a jeho pozorovatelným projevem.

¹³ Vyšetření vrozených či dědičných onemocnění, jehož cílem je včasná diagnostika a případná léčba. V ČR probíhá celoplošně. Existuje je také selektivní screening (probíhá jen v rizikové populaci).

¹⁴ Impedance = zdánlivý odpor. Převrácená hodnota impedance, poddajnost = compliance.

každé hlasitosti je provedeno 2000 – 4000 měření. Údaje z každého měření se sčítají se všemi předchozími a šum elektroencefalogramu se s každým dalším vyhlazuje (Obr. 16). Poté se hlasitost sníží o 10 dB a celý proces se opakuje, dokud se nedosáhne prahu slyšení konkrétního pacienta. [16]



Obrázek 16 - Postupné vyhlazování odezvy sečítáním pokusů [16]

Orgánové činnosti potenciály (EKG, EEG) detekujeme stále, zato evokované odpovědi na vyšetření např. BERA¹⁵, CERA¹⁶ jsou přítomny pouze v závislosti na stimulaci sluchového nervu. Tyto evokované odpovědi jsou řádově mnohem menší (10^{-9} V) než potenciály činnosti mozku – EEG (elektroencefalogram, řádově 10^{-6} V) nebo srdce – EKG (elektrokardiogram, řádově 10^{-3} V). Proto, aby byly tyto drobné odpovědi vůbec detekovány, je nutná pravidelně se opakující stimulace, která se projeví díky výkonnému zesilovači i přes veškerou aktivitu lidského těla. [13]

SSEP

Při vyšetření ustálených evokovaných potenciálů SSEP¹⁷ se snímají odpovědi z celé sluchové dráhy. Pomocí SSEP lze diagnostikovat jak převodní tak percepční poruchy sluchu. Probíhá v sedaci (utlumení) nebo celkové anestezii. Výsledkem vyšetření je rekonstrukce tónového audiogramu, v České republice se odpovědi měří na frekvencích 500 – 4000 Hz, v hladinách intenzity 10 – 125 dB. [15]

¹⁵ Brainstem Electric Response Audiometry (audiometrie z elektrické odezvy v mozkovém kmeni)

¹⁶ Cortex Electric Response Audiometry (audiometrie z elektrické odezvy mozkové kůry)

¹⁷ Steady state evoked potentials (ustálené evokované potenciály)

2.4.3 Vyšetřování sluchu nejmenších dětí

U nejmenších dětí, které nemohou vyšetřujícímu lékaři potvrdit, zda zvuk slyší či nikoliv, je vyšetření sluchu závislé na momentálním rozpoložení dítěte. **Orientační zkouška** spočívá v tom, že pediatr nepozorovaně vyloudí za dítětem nějaký zvuk (např. chrastítkem) a pozoruje, zda dítě nějak reaguje. Výsledek zkoušky může být zkreslen tím, že se dítě otočí náhodně nebo v důsledku reakce na pohyb vzduchu způsobený lékařem. Naopak může dítě v tu chvíli zaujmout něco jiného, takže na zvuk nereaguje i přesto, že slyší. Zásadou při tomto vyšetření, že se v okolí dítěte nesmí měnit nic jiného než právě zvuk. Sluchová ztráta je obvykle totiž nahrazena vysokou citlivostí na optické podněty a sebemenší pohyby vzduchu a vibrace. Tuto orientační zkoušku mohou provádět rodiče dítěte, povinně ji ve věku 3 až 5 měsíců a 8 měsíců provádí pediatr. Pokud dítě vykazuje negativní nebo nejisté výsledky, je třeba provést objektivní vyšetření na specializovaném pracovišti. [15]

Jednou z přístrojových metod používaných u dětí je použití **reaktometru**, což je elektronický tester sluchu. Skládá se z ovládací skříňky a dvou reproduktorů, které se připevňují na přebalovací stůl. Kojenec se položí mezi reproduktory. Sestra do jednoho z nich, aniž by se přibližovala k dítěti, zapne zvuk a dítě většinou spontánně reaguje. Slyšící dítě i při malé intenzitě zřetelně zpozorní, pak se opakuje zkouška z druhého reproduktoru. Jestliže dítě nereaguje ani na zesílený zvuk, může a nemusí to znamenat hluchotu. Obvykle se vyšetření opakuje například po týdnu, a pokud ani tak nebude reagovat, mělo by být vyšetřeno na odborném pracovišti. [16]

Mezi novější subjektivní testy patří **VRA** (*Visual Reinforcement Audiometry*) a využívá podmíněné reakce na současně produkovaný zvukový a optický podnět. Obvykle se provádí se sluchátky. Minimální možná hlasitost zvuku je 50 dB a u dětí, které při této hlasitosti reagují, je vhodné provést vyšetření bez sluchadel. Dítě si během vyšetření hraje s hračkou, které se rozsvítí oči při spuštění zvuku. Později jestliže dítě slyší zvuk, sleduje, zda se rozsvítí oči hračky.

Uvedené metody zkoumají sluch dítěte v obou uších naráz, pomocí nich není lékař schopen rozlišit ztráty sluchu na každém uchu.

Od věku dvou let může být dítě vyšetřeno **tónovou audiometrií**. Při zaznamenání zvuku ve sluchátkách reaguje naučeným způsobem, např. zvednutím ruky nebo zmáčknutím tlačítka. Tak může lékař poměrně přesně určit sluchové ztráty v závislosti na frekvenci. Lze použít i **slovní audiometrie** neboli obrázkový percepční test. Dítě však slova neopakuje, ale ukazuje na odpovídající obrázky. Podmínkou tohoto testu je, aby dítě všechna slova, která má slyšet, znalo. [15]

Jako první vyšetření sluchu po narození dítěte se obvykle dělá měření **otoakustických emisí**. Dítě se obvykle vyšetřuje 2. – 5. den po porodu, nejčastěji

ve spánku v klidné místnosti. Do ucha se mu vloží malá sonda, která vysílá zvuk a zaznamenává zpětné emise. Opakované negativní výsledky je nutné ověřit vyšetřením **BERA**. [15]

3 Měření mezí slyšitelnosti lidského ucha

3.1 Popis měření

Praktickým úkolem této bakalářské práce bylo ověřit na určitém vzorku osob různého věku a pohlaví meze slyšitelnosti lidského ucha. Bylo nutné naměřit nejen nejnižší a nejvyšší slyšitelnou frekvenci u daného člověka, ale naměřit zvláště pravé a levé ucho.

Samotné měření probíhalo od června 2014 do května 2015. Bylo naměřeno 210 dobrovolníků od 6 do 80 let. Použita byla běžně dostupná zařízení, notebook, sluchátka a volně šiřitelný software, aby bylo měření co nejjednodušší. Vyšetřovaný byl předem informován, jak bude měření probíhat. Zpočátku měření byli dobrovolníci proměřováni jak na mezní hodnotu slyšitelnosti při nízké frekvenci, tak při vysoké. Na dolní hranici slyšitelnosti však bylo měření za daných podmínek velmi nepřesné a naměřené hodnoty nebylo možné efektivně porovnat. Proto bylo ke konci průzkumu od jejich proměřování upuštěno.

Vyšetřování horní hranice probíhalo obvykle od 5 kHz, vyšetřovací frekvence stoupala zpočátku rychleji (po 2 kHz), postupně pomaleji (nejméně po 0,5 kHz). Hodnoty jsou tedy naměřeny s přesností na 0,5 kHz. Pokud vyšetřovaný na začátku neslyšel ani 5 kHz, začínalo měření na 1 kHz, s krokem 0,5 kHz.

Před měřením bylo také nutné se s vyšetřovaným domluvit, jak bude signalizovat, zda daný tón ještě slyší či nikoli (obvykle kýváním hlavy). Měření probíhalo tak, aby bylo co nejméně narušeno okolním šumem a vyšetřovaný neviděl na obrazovku počítače. I přesto jsou naměřené hodnoty pouze orientační, měření by mohlo probíhat profesionálněji. Zvukový výstup počítače i sluchátek je omezený, profesionální technika dává výsledky mnohem přesnější. Cílem však bylo pouze ověřit údaje o mezích slyšitelnosti, které poskytují učebnice fyziky a další literatura.

Pro měření mezí slyšitelnosti byl použit notebook Lenovo G500 a sluchátka Razer Kraken Pro (Obr. 17).

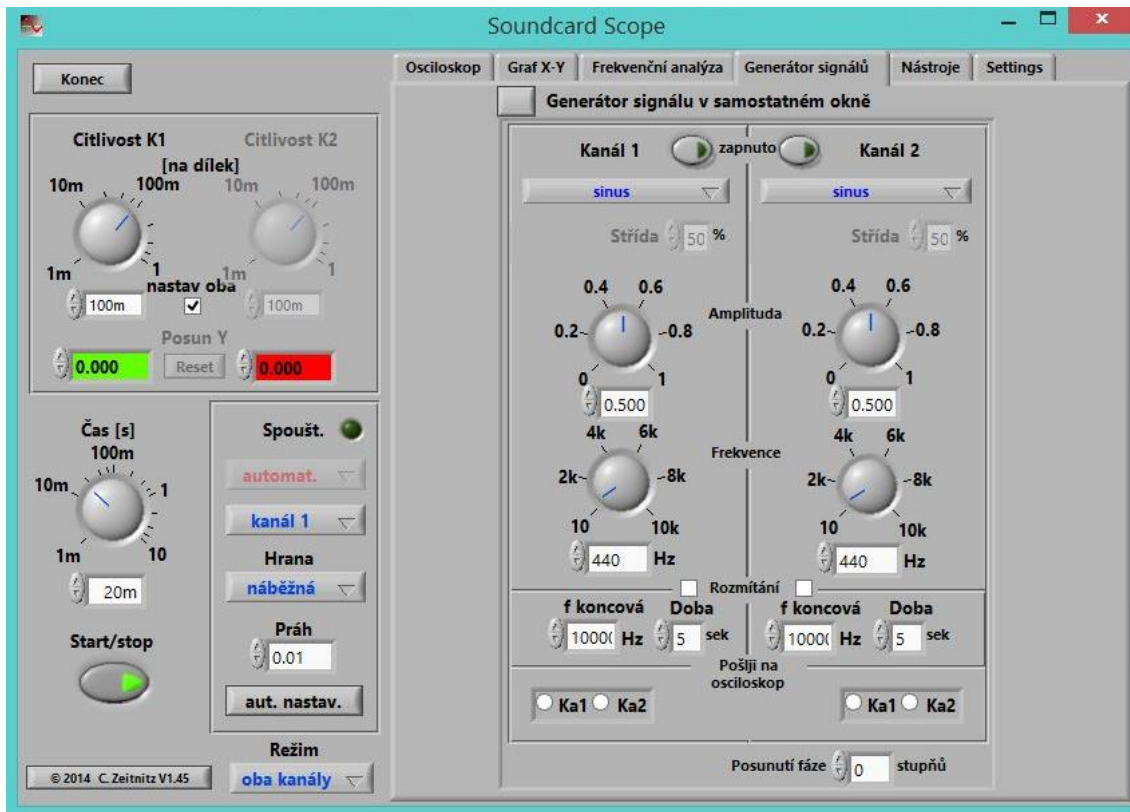
Technické údaje sluchátek uvedené výrobcem:

Frekvenční rozsah: 20 Hz – 20 kHz
Citlivost: 110 ± 4 dB / mW



Obrázek 17 - Sluchátka Razer Kraken Pro

Software použitý ke generaci signálů o zvolených frekvencích Scope (Obr. 18) umožňuje volbou kanálu 1 nebo 2 přenášet signál do levého nebo pravého sluchátka. Tím bylo možné proměřit každé ucho zvlášť. Frekvence byla měřena při konstantní amplitudě a hlasitosti zvuku počítače.



Obrázek 18 - Prostředí generátoru signálů Scope

3.2 Zpracování naměřených hodnot

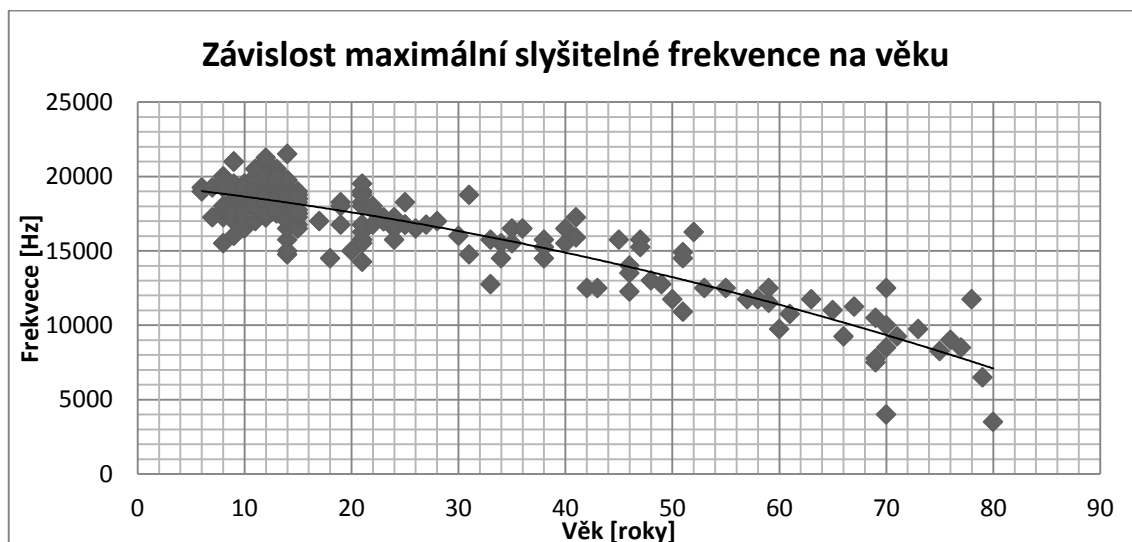
Zpracovávání naměřených hodnot probíhalo v prostředí MS Excel. Každý měřený dobrovolník uváděl věk, pravorukost či levorukost, zda poslouchá hlasitou hudbu do sluchátek a případně práci v hlučném prostředí nebo prodělané ušní nemoci (obvykle zánět zvukovodu, zánět středního ucha, prasklý bubínek). Ukázka naměřených a náhodně vybraných dat je v tabulce níže (Tab. 5), celá tabulka je uvedena v příloze.

pohlaví	věk	P/L	P - dolní	P - horní	L - dolní	L - horní	hl. hudba	poznámky
ž	15	P	25	16500	25	16500	ne	zánět L
ž	10	P	25	16500	25	16500	ne	zánět L
m	9	P	18	18000	18	18000	ne	zánět P
m	8	P	35	17500	30	18000	ano	
ž	51	P	25	10800	18	11000	ne	zánět střed. ucha
ž	8	P	30	15500	40	15500	ne	
m	11	L	20	18900	25	19800	ano	
ž	41	P	25	15600	30	16200	ne	
m	9	P	30	19000	20	18000	ano	zánět L
ž	21	P	35	18500	30	18000	ano	
m	19	L	35	17000	35	16500	ne	
m	21	L	20	15000	20	16000	občas	záněty opak, po dlouhé době 2x, obě
ž	43	L	20	13000	20	12000	občasně	v dětství možná jednou zánět
ž	7	P	30	19500	30	19000	ne	
ž	46	P	30	14000	35	14000	ne	
m	6	P	22	18500	25	19500	ne	
m	45	P	16	16500	22	15000	ne	opak. zánět stř. ucha, obě
ž	7	L	30	16500	30	18000	ne	zánět obě, L 1krát a P opak
ž	8	P	25	18500	30	17500	občas	
m	9	P	18	18000	18	18000	ne	zánět P
m	41	P	20	18000	20	16500	ne	
m	45	P	16	16500	22	15000	ne	opak. zánět střed. ucha, obě
ž	38	P	20	15500	20	16000	ne	
ž	13	P	20	18500	20	18500	ne	opakované záněty, neví které ucho
ž	15	P	25	16500	25	16500	ne	zánět L
m	27	P		17000		16500	ne	
ž	28	L		17000		17000	ano	zánět L
m	30	P	30	16000	25	16000	ne	
ž	50	P	30	12000	30	11500	ne	zánět
ž	51	P	25	12500	18	16500	ne	zánět obě
ž	71	P		9500		9000	ne	práce v hluku
ž	73	P		10500		9000	ne	
m	75	L		8000		8500	ne	práce v hluku

Tabulka 5 - Ukázka naměřených dat

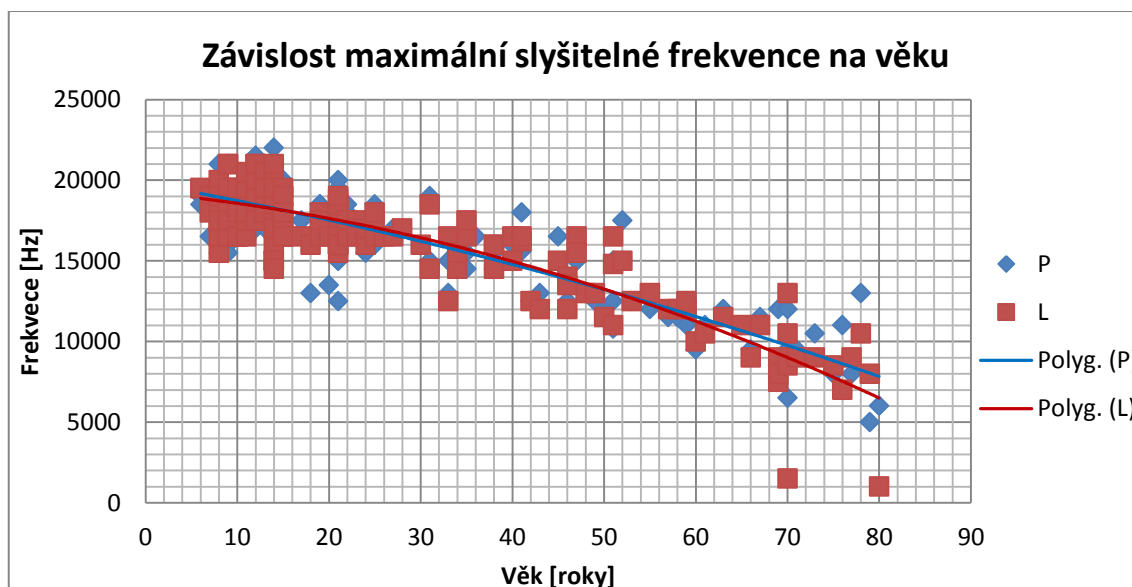
3.3 Výsledky měření

Prvotním cílem měření a této práce bylo ověřit na celkovém vzorku respondentů klesání mezí slyšitelnosti s věkem. Následující graf (Graf 1) tento pokles nesporně dokazuje. Hodnoty, které se výrazně liší od průměru, jsou způsobeny nejčastěji onemocněním uší nebo úrazem hlavy konkrétního respondenta apod.



Graf 1 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (průměr z obou uší)

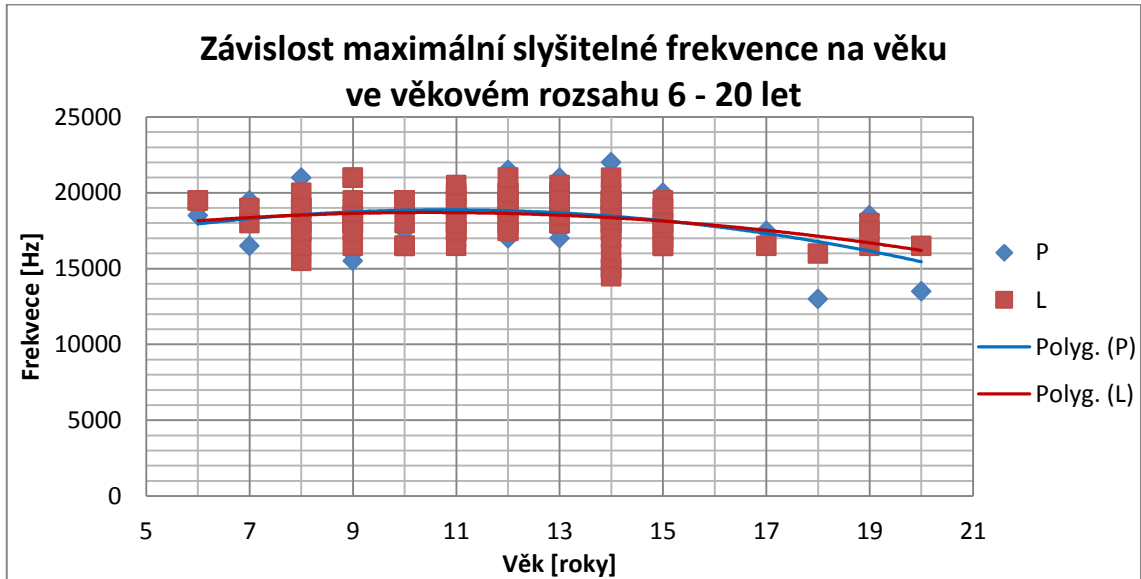
Na následujícím grafu (Graf 2) je stejná závislost, ale pro pravé a levé ucho zvlášť. Zde jsou lépe viditelné odchylky od regresní křivky. U těch nejvýraznějších lze možné příčiny obvykle dohledat z dat poskytnutých měřeními dobrovolníky.



Graf 2 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku pro pravé a levé ucho

Pro lepší názornost jsou v následujících grafech rozděleny horní meze slyšitelnosti podle věku do 4 kategorií.

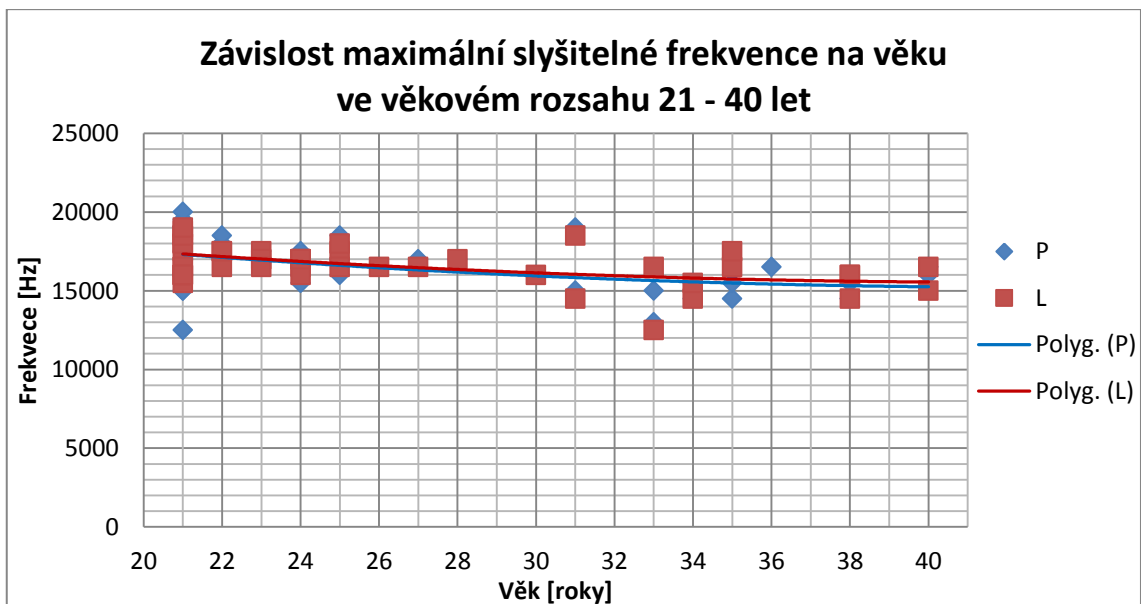
V první kategorii (Graf 3) jsou dobrovolníci od 6 do 20 let. Regresní křivka pravého i levého ucha není v tomto případě čistě klesající. Dětem do 10 let byla naměřena nižší horní mez slyšitelnosti než dětem starším. Může to být způsobeno tím, že nedokáží rozlišit, jestli ještě něco slyší.



Graf 3 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (6 - 20 let)

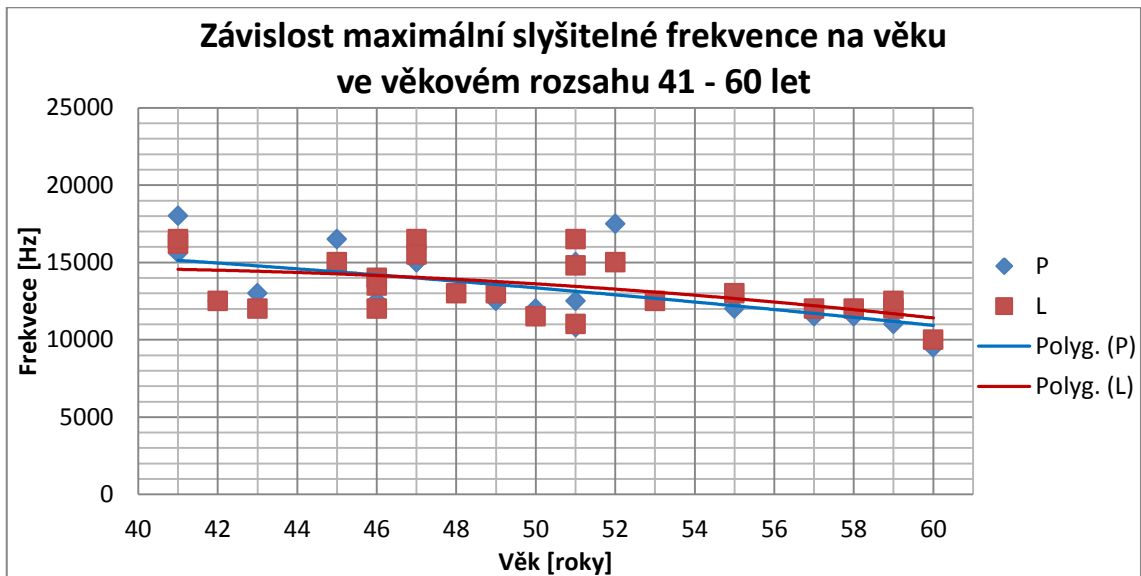
Například dvě modré značky mezi pravého ucha v 18 a 20 letech nepřevyšují hodnotu 14 kHz. V jednom případě bylo pravé ucho poškozeno zánětem středního ucha, ve druhém případě prasklým bubínkem.

V následujícím grafu (Graf 4) je znázorněna věková kategorie od 21 do 40 let. Klesání horní meze slyšitelnosti není strmé, což znamená, že v tomto věku se horní mez slyšitelnosti snižuje pomalu.



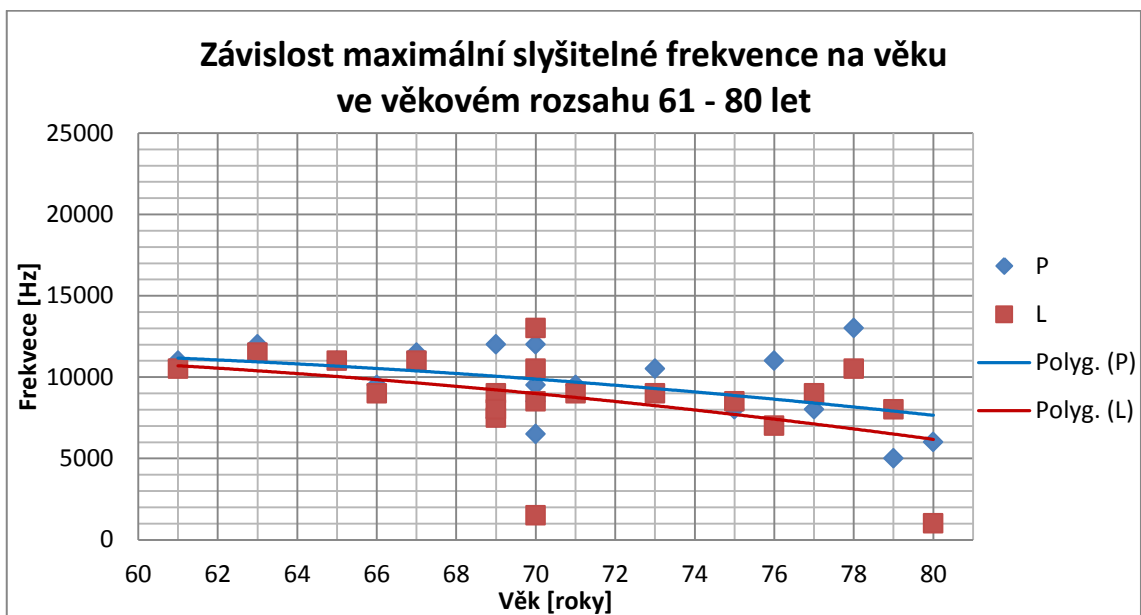
Graf 4 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (21 - 40 let)

Třetí věková kategorie představuje respondenty od 41 do 60 let (Graf 5). Regresní křivka pro tuto věkovou skupinu klesá výrazněji, tedy nejvyšší slyšitelná frekvence se v této věkové kategorii snižuje rychleji.



Graf 5 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (41 - 60 let)

Z grafu čtvrté věkové kategorie, od 61 do 80 let, je patrné, že má nejstrmější regresní křivku, ale také výrazné odchylky jednotlivců.



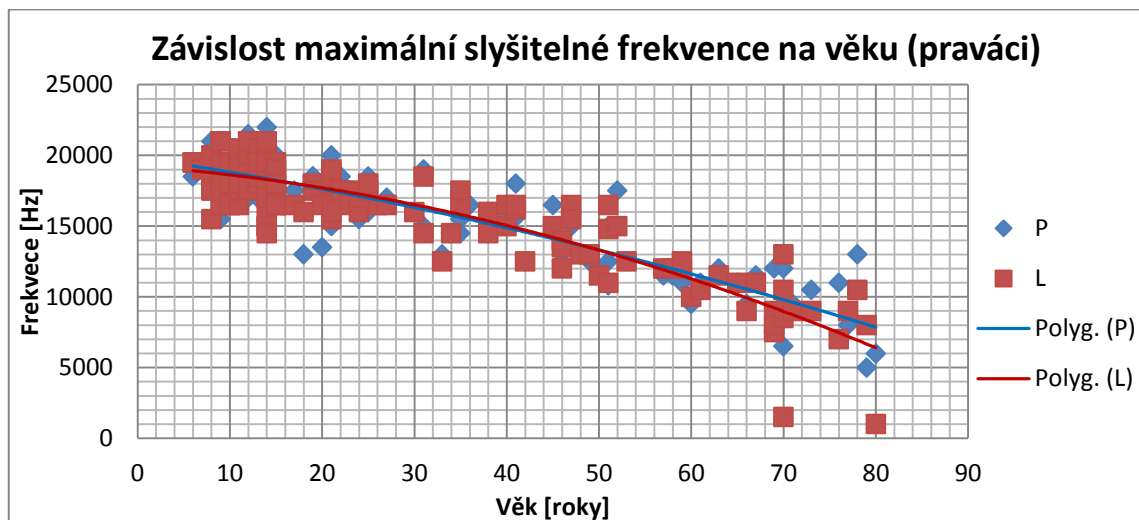
Graf 6 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (61 - 80 let)

Sedmdesátiletý respondent nevedl žádné informace, které by vysvětlovaly nízkou hodnotu maximální slyšitelné frekvence jeho levého ucha. Ani příčina velmi nízké meze levého ucha dobrovolníka ve věku 80 let nebyla vysvětlena. Jedná se o muže,

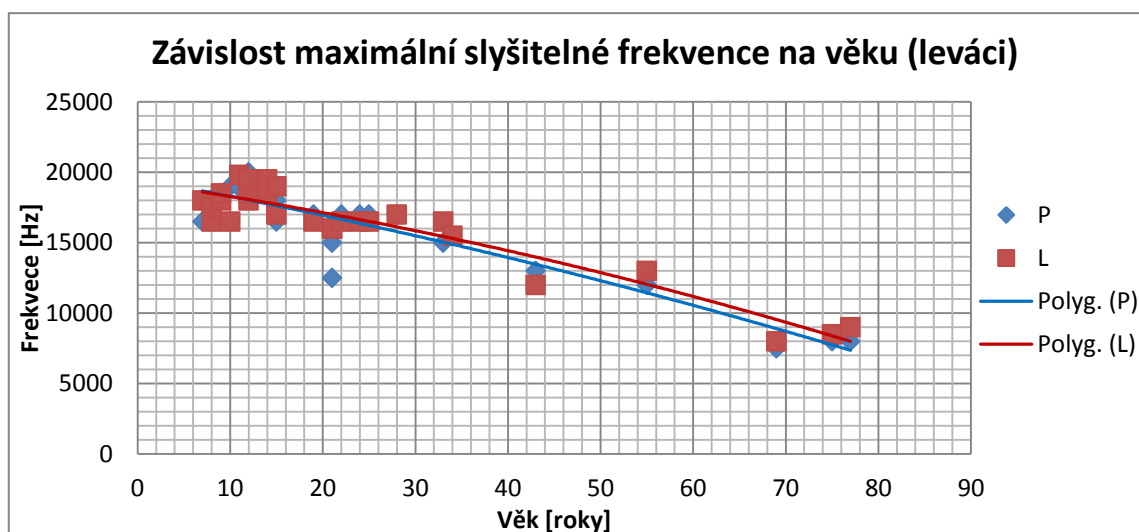
který na levé ucho neslyší od raného dětství, v okolí 1 kHz slyší jen velmi slabě. Proč tato částečná hluchota vznikla, nebylo zjištěno.

Naopak se v této věkové kategorii objevují také výjimky opačného charakteru, jejichž mezní frekvence je u obou uší nadprůměrná. A to i přes opakovaně prodělané záněty středouší.

Kromě celkových výsledků ze všech poskytnutých dat bylo také cílem práce porovnat závislosti nejvyšší slyšitelné frekvence pravého a levého ucha s ohledem na praváctví a leváctví konkrétního respondenta. Dílčí grafy (Graf 7 a 8) ukazují, že leváci opravdu převážně lépe slyší na levé ucho, ale tento rozdíl není extrémně výrazný. Průměrně činí 1 kHz. Praváci slyší lépe pravým uchem jen v některých věkových rozsazích. Z velké části se obě křivky překrývají, tedy slyšitelnost pravého a levého ucha praváků je srovnatelná.

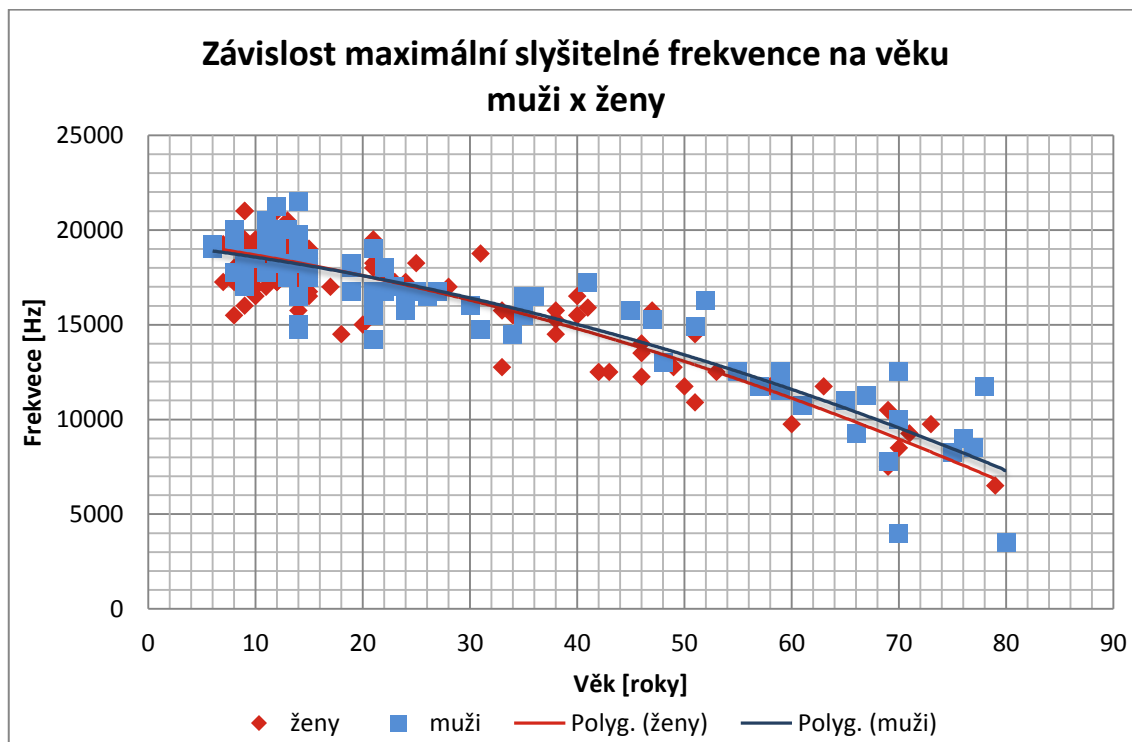


Graf 7 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku praváků



Graf 8 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku leváků

V některých publikacích se můžeme také setkat s porovnáním poklesu horní hranice slyšitelnosti mezi muži a ženami. Obvykle se uvádí, že práh slyšení pro zvuk o dané frekvenci u žen klesá pomaleji než u mužů. Při porovnání jejich maximální slyšitelné frekvence se však ukázalo, že klesá u mužů i žen srovnatelně. U žen je se zvyšujícím se věkem výraznější.



Graf 9 - Porovnání horní hranice slyšitelnosti u mužů a žen

Přesnost naměřených hodnot

Problémem tohoto měření je velká subjektivita. Naměřená hodnota vždy záleží na vůli dobrovolníka, zda podá pravdivou informaci o tom, že danou frekvenci slyší nebo neslyší, nebo že utrpěl nějaké poškození uší v průběhu života. V nejednom případě respondent uváděl, že tón slyší, přestože do sluchátek nebyl generován žádný zvuk. Případně nevěděl, jestli prodělal zánět středního ucha (resp. zvukovodu) v pravém uchu, levém uchu nebo vůbec. To byl případ převážně malých dětí, nebo naopak vyšších věkových skupin.

Při proměřování konkrétního ucha mohlo dojít rovněž k nepřesnostem způsobeným kostním vedením sluchu. Nevyšetřované ucho nebylo nijak maskováno, tudíž mohlo zachytit signál i v případě, že vyšetřované ucho jej neslyší.

Použitá technika také neumožňovala provést měření s velkou přesností. Stejně tak nebylo možné všechny dobrovolníky proměřit bez vlivu okolního šumu.

Závěr

V této práci jsme se zabývali měřením mezní frekvence, kterou je lidské ucho schopno zachytit v závislosti na podmínkách jako je věk, pohlaví nebo praváctví a leváctví. Od stanovení dolní meze bylo v průběhu měření upuštěno, protože použité pomůcky nedovolovaly získat výsledky, které by měly vypovídací hodnotu.

Základní poznatky z akustiky a fyziky mechanického vlnění, anatomie lidského ucha a audiometrie jsou shrnuty a stručně vysvětleny v teoretické části na základě uvedené literatury. Vlastní měření a údaje z něj získané jsou prezentovány ve třetí kapitole.

Hlavním cílem bylo jednoduchými metodami ověřit, že s věkem horní hranice slyšitelnosti klesá. Naměřené hodnoty tento pokles spolehlivě potvrdily pro všechny věkové kategorie. Pomocí dílčích grafů bylo ukázáno, že velikost poklesu není konstantní, ale s věkem se zrychluje. Dále se projevilo, že zhoršení sluchu a tím i snížení horní hranice sluchu bývá nejčastěji spojeno s prodělaným ušním onemocněním, zatímco vliv poslechu hlasité hudby nebyl prokázán.

Proměření pravého a levého ucha zvlášť bylo využito k porovnání mezi slyšitelností praváků a leváků. Leváci, kteří byli mezi naměřenými dobrovolníky stejně jako v naší populaci zastoupeni menšinově, vykazali vyšší mez slyšitelnosti levého ucha. Naproti tomu praváci slyší oběma ušima srovnatelně.

Mezi dobrovolníky, kteří si nechali proměřit meze slyšitelnosti, patřily častěji ženy než muži. Avšak v porovnání je nejvyšší slyšitelná frekvence mužů průměrně vyšší než měřených žen.

Seznam použité literatury a zdrojů

1. **VYBÍRAL, Bohumil.** *Kmitání a vlnění*. Hradec Králové: Gaudeamus, 2014. stránky 207-219. 246 s. ISBN 978-80-7435-379-6.
2. **REIJCHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin.** *Encyklopedie fyziky*. [online]. 2006 – 2015 [cit. 2015-02-20]. Dostupné na WWW <<http://fyzika.jreichl.com/>>.
3. **HLOŽEK, Zdeněk.** *Základy audiologie*. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého v Olomouci, 1995. stránky 3, 8, 13-16, 19, 29-41. 49 s. ISBN 80-7067-498-9.
4. **LEPIL, Oldřich.** *Fyzika pro gymnázia: mechanické kmitání a vlnění*. Praha: Prometheus, 2004. stránky 78-97. 3. přeprac. vyd. 129 s. ISBN 80-7196-216-3.
5. **VACKÁŘOVÁ, Jana, VACKÁŘ, Jiří a BLAŽEK, Tomáš.** Akustika. In NAVRÁTIL, Leoš; ROSINA, Jozef a kol. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada, 2005, stránky 270-303. 1. vyd. 524 s.
6. **LEWIN, Walter Hendrik Gustav a GOLDSTEIN, Warren.** *Z lásky k fyzice: od konce duhy až na okraj času - putování po divech fyziky*. Aliter. Praha: Argo, 2012. stránky 127-130. Sv. 50, 1. vyd. 329 s. ISBN 978-80-257-0704-3.
7. **POSPÍŠIL, Jaroslav.** *Mechanické a elektromagnetické kmity a vlny*. Olomouc: Univerzita Palackého, 1987. stránky 191-192. 1. vyd. 205 s. ISBN nevedeno.
8. **HRAZDIRA, Ivo a MORNSTEIN, Vojtěch.** *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. Brno: Neptun, 2001. str. 173. 1. vydání. 381 s. ISBN 80-902896-1-4.
9. **SCHAUER, Pavel.** *Vybrané statě z akustiky*. [on-line]. 2008 [cit. 2014-09-17]. stránky 3-4. Dostupné na WWW <http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf>.
10. **OXLADE, Chris, ed.** *Velká encyklopedie vědy: fyzika, chemie, biologie*. Praha: Fragment, 2012. stránky 344-345. 2. vyd. 384 s. ISBN 978-80-7200-809-4.
11. **VESELOVSKÝ, Zdeněk.** O dokonalosti zvířecích smyslů (3): Sluch. *Příroda*. [online]. 2000 [cit. 2015-05-02]. Prostřednictvím Český rozhlas. Dostupný na WWW: <http://www.rozhlas.cz/priroda/porady/_zprava/o-dokonalosti-zvirecich-smyslu-3-sluch--6011>.
12. **KELLY, Jeff.** Elephants Hear Through Their Feet. *KnowledgeNuts*. [online]. 2013 [cit. 2015-04-08]. Dostupné na WWW <<http://knowledgenuts.com/2013/11/27/elephants-hear-through-their-feet/>>.

13. **MRÁZKOVÁ, Eva, MRÁZEK, Jiří a LINDOVSKÁ, Marie.** *Základy audiologie a objektivní audiometrie: medicínské a sociální aspekty sluchových vad.* Ostrava: Ostravská univerzita, 2006. stránky 19-21, 27, 80. 1. vyd. 121 s. ISBN 80-7368-226-5.
14. **SLOWÍK, Josef.** *Speciální pedagogika.* Praha: Grada, 2007. stránky 73-75. 1. vyd. 160 s. ISBN 978-80-247-1733-3.
15. **MOTEJZÍKOVÁ, Jitka.** *Metody vyšetření sluchu. Info zpravodaj: magazín informačního centra o hluchotě FRPSP.* Zima 2009, stránky 8-10.
16. **HRUBÝ, Jaroslav.** *Velký ilustrovaný průvodce neslyšících a nedoslýchavých po jejich vlastním osudu 2. díl.* Praha: Septima, 1998. str. 48. 1. vyd. 328 s. ISBN 80-7216-075-3.
17. **ROSINA, Jozef et al.** *Biofyzika: pro zdravotnické a biomedicínské obory.* Praha: Grada, 2013. str. 82. 1. vyd. 224 s. ISBN 978-80-247-4237-3.
18. **WESTON, Trevor.** *Atlas lidského těla.* Praha: Levné knihy KMa, 2003. 156 s. ISBN 80-7309-987-X.
19. **WALKER, Richard, ed.** *Nový atlas anatomie člověka.* Praha: Columbus, 2003. Nové, rozš. vyd. 239 s. ISBN 80-7249-154-7.
20. **OARIH.** FletcherMunson ELC. [online]. 2005 [cit. 2015-04-27]. (Vlastní dílo) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)], prostřednictvím Wikimedia Commons. Dostupné na WWW <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FletcherMunson_ELC.svg#/media/File:FletcherMunson_ELC.svg>
21. **BLAUS, Bruce.** Blausen gallery 2014. *Wikiversity Journal of Medicine.* [online]. 2013 [cit. 2015-02-22]. DOI:10.15347/wjm/2014.010. ISSN 20018762. (Vlastní dílo) [CC BY 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>)], prostřednictvím Wikimedia Commons. Dostupné na WWW <https://en.wikiversity.org/wiki/Blausen_gallery_2014>
22. **THEHAPPYV.** Sluchové pole. [online]. 2013 [cit. 2015-04-08]. (Vlastní dílo) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)], prostřednictvím Wikimedia Commons. Dostupné na WWW <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sluchov%C3%A9_pole_-_Graf.png?uselang=cs>

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek 1 - Harmonická vlna a její parametry [zdroj: autorka].....	11
Obrázek 2 - Fletcherovy - Munsonovy křivky [20].....	13
Obrázek 3 - Chvění skleničky při přejetí vlhkým prstem po okraji [zdroj: autorka].....	15
Obrázek 4 - Netradiční hudební nástroje [zdroj: autorka]	16
Obrázek 5 - Příčné a podélné vlnění [zdroj: autorka]	17
Obrázek 6 - Pokus se stopkami ve vakuu [zdroj: autorka]	17
Obrázek 7 - Vlnoplochy [zdroj: autorka].....	17
Obrázek 8 - Odraz vlnění a stojatá vlna [zdroj: autorka].....	18
Obrázek 9 - Rázová vlna vzniklá při pohybu nadzvukovou rychlostí [zdroj: autorka]..	19
Obrázek 10 - Anatomie lidského ucha [21]	21
Obrázek 11 - Anatomie středního ucha [21].....	22
Obrázek 12 - Anatomie vnitřního ucha [21]	23
Obrázek 13 - Akustika sluchového pole [22]	25
Obrázek 14 - Audiogram ideálního ucha [17]	30
Obrázek 15 - Typy křivek při slovní audiometrii [3].....	31
Obrázek 16 - Postupné vyhlazování odezvy sečítáním pokusů [16]	33
Obrázek 17 - Sluchátka Razer Kraken Pro [zdroj: autorka]	36
Obrázek 18 - Prostředí generátoru signálů Scope [zdroj: autorka]	37

Tabulka 1 - Různé hladiny akustického tlaku v obvyklých prostředích [zdroj: autorka]14	
Tabulka 2 - Pásmo sluchového pole [13].....	25
Tabulka 3 - Klasifikace nedoslýchavosti podle WHO [13].....	27
Tabulka 4 - Významné body na křivce při slovní audiometrii [3].....	31
Tabulka 5 - Ukázka naměřených dat [zdroj: autorka]	38

Graf 1 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (průměr z obou uší).....	39
Graf 2 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku pro pravé a levé ucho	39
Graf 3 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (6 - 20 let).....	40
Graf 4 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (21 - 40 let).....	40
Graf 5 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (41 - 60 let).....	41
Graf 6 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku (61 - 80 let).....	41
Graf 7 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku praváků.....	42
Graf 8 - Závislost maximální slyšitelné frekvence na věku leváků	42
Graf 9 - Porovnání horní hranice slyšitelnosti u mužů a žen.....	43

Příloha

Příloha č. 1 - Tabulka naměřených hodnot a údajů uvedených respondenty

pohlaví	věk	P/L	pravé ucho		levé ucho		ano/ne	Poznámky
			dolní	horní	dolní	horní	hlasitá hudba	
ž	21	P	25	19100	25	18800	občas	
m	11	L	20	18900	25	19800	ano	
ž	41	P	25	15600	30	16200	ne	
m	41	P	20	18000	20	16500	ne	
ž	21	P	35	18500	30	18000	ano	
m	6	P	35	19000	40	19500	ne	
m	11	P	35	16500	35	19000	ano	
ž	11	P	35	19000	35	17500	ne	zánět P
m	12	L	30	18500	25	18000	ne	
ž	11	P	30	17500	35	16500	ne	
m	11	P	30	18000	35	17500	občas	
m	11	P	30	18000	30	17500	občas	
ž	15	L	25	16500	25	17000	ne	
ž	15	P	25	16500	25	16500	ne	zánět L
ž	10	P	25	16500	25	16500	ne	zánět L
ž	7	P	30	19500	30	19000	ne	
m	9	P	18	18000	18	18000	ne	zánět P
m	8	P	35	17500	30	18000	ano	
m	9	P	30	19000	20	18000	ano	zánět L
ž	8	P	30	15500	40	15500	ne	
ž	11	P	25	19000	25	18000	ne	
ž	8	L	35	18000	30	16500	ne	
m	11	P	20	20000	20	20000	ne	
ž	9	P	20	19500	30	19500	ne	
ž	22	P	20	18000	25	17500	občas	
ž	10	P	30	19000	35	19500	ne	zánět
ž	10	P	20	19000	20	19500	občas	
ž	9	L	30	18500	40	18000	ne	
ž	15	P	25	18000	30	19500	ano	
ž	15	P	25	19000	30	17500	ano	zánět P opak
ž	14	P	30	17500	25	18500	ano	
ž	11	P	25	18000	30	18000	ano	
ž	7	L	30	16500	30	18000	ne	zánět obě, L 1krát a P opak
m	9	L	35	18000	35	18500	občas	
ž	13	P	25	19000	25	19500	občas	
ž	12	P	35	20000	40	20000	občas	
ž	12	L	25	20000	30	18500	občas	zánět i prasklý bubínek
ž	12	P	30	20000	35	20000	ne	zánět
ž	12	L	35	18500	30	19500	ne	neví
ž	10	P	30	19500	35	19500	ne	
ž	10	P	35	19000	45	19500	ne	
ž	9	P	30	19500	35	18500	ne	zánět L
ž	33	P	30	13000	30	12500	ano	
m	15	P	30	18000	20	19000	ne	
ž	50	P	30	12000	30	11500	ne	zánět
ž	15	P	35	18000	30	16500	ano	

ž	15	P	35	18000	35	17500	ne	
ž	14	P	25	19500	18	20000	ne	
ž	20	P	25	13500	30	16500	ne	P zánět
ž	21	P	30	16000	35	15500	ne	
m	21	P	35	15000	35	16500	ano	
m	19	P	25	18500	30	18000	ano	
ž	18	P	30	13000	25	16000	ne	prasklé bubínky
m	19	L	35	17000	35	16500	ne	
ž	38	P	20	14500	25	14500	ano	zánět obě
ž	11	P	25	20000	30	19500	ano	
ž	13	P	35	18000	35	18000	ano	zánět
ž	14	P	25	16500	20	15000	ano	zánět obě
m	52	P	30	17500	35	15000	občas	
ž	51	P	25	12500	18	16500	ne	zánět obě
m	51	P	30	15000	25	14800	ne	zánět
ž	12	P	25	19500	30	19500	občas	zánět L 2krát
ž	12	P	45	17000	40	17500	ano	zánět P
ž	14	P	18	18500	25	18000	ne	zánět obě víckrát
ž	12	P	35	18500	30	17500	ano	
ž	12	P	35	19000	35	19000	občas	
m	14	P	35	17000	35	16000	ne	bubínek L
ž	14	P	25	18000	20	18000	občas	
ž	14	P	30	19000	30	19500	ne	
ž	12	L	30	19000	30	19500	ano	
ž	12	P	25	18000	20	18000	ne	
ž	46	P	30	14000	35	14000	ne	
m	13	P	20	20000	18	20000	ne	
ž	63	P	25	12000	25	11500	ne	
ž	42	P	30	12500	25	12500	ne	zánět opak
ž	23	P	25	17000	20	17500	občas	
ž	24	L	30	17000	30	16500	občas	
m	35	P	35	14500	30	16500	občas	
ž	24	P	25	16000	25	17000	ano	
m	12	P	20	19000	25	18500	ne	
m	14	P	30	14500	30	15000	ne	zánět
ž	14	P	30	19000	30	18500	ne	zánět
ž	15	P	30	20000	30	18000	ano	
ž	15	P	30	18500	30	16500	ano	
m	11	P	22	18500	22	19500	ne	
m	13	P	30	17000	30	18000	ne	zánět opak
m	12	P	22	19500	25	19500	ne	možná zánět
m	12	P	30	18500	30	18000	ne	
m	12	P	22	20000	30	20000	občas	
ž	12	P	30	17000	30	17500	ano	možná zánět
ž	12	P	25	20000	30	20000	ano	zánět neví
ž	60	P	25	9500	22	10000	ne	zánět P
m	9	P	35	16000	35	18000	občas	zánět obě
ž	14	P	30	16500	35	17500	občas	zánět P
ž	14	P	25	18500	30	19000	ano	
m	13	P	30	18000	30	18500	ne	zánět L
ž	13	P	22	19500	25	20000	ne	
ž	13	P	20	19500	25	19500	ne	
ž	13	P	30	21000	30	20000	ne	
ž	13	P	25	19000	30	18500	ne	zánět L

m	6	P	22	18500	25	19500	ne	
m	8	P	30	21000	30	19000	ne	
m	8	P	30	19500	35	19000	ne	
m	8	P	30	19500	30	20000	ne	
ž	9	P	25	15500	25	16500	ano	
ž	9	P	30	21000	25	21000	ne	zánět obě
ž	15	L	35	18000	35	19000	občas	
ž	8	L	30	18000	25	17500	ne	
ž	8	P	30	19500	25	19000	ne	zánět P
m	10	P	30	19000	30	18000	občas	
ž	12	P	30	21000	35	21000	občas	zánět
ž	10	P	25	17500	25	16500	ano	
m	11	P	30	20500	25	20500	ne	zánět obě opak
ž	8	P	25	18500	30	17500	občas	
ž	9	P	20	21000	25	21000	ne	
ž	9	P	35	18000	30	17500	ano	
m	15	P	30	17000	30	18000	ano	
m	14	P	30	19500	30	18500	ano	zánět L
ž	14	P	18	20000	40	18000	ano	
ž	12	P	35	18500	25	19000	občas	zánět asi obě
ž	12	P	25	20000	30	20000	ne	
ž	12	P	25	17500	30	17500	ano	
m	36	P	30	16500			už ne	zánět mozk. blan 2x; od dětství neslyší na L ucho, slyší na P to, co pouštím do L
m	12	P	25	21500	20	21000	ne	
ž	10	L	25	19000	35	16500	ne	zánět zvukovodu obě před 5 dny
m	30	P	30	16000	25	16000	ne	
ž	17	P	25	17500	30	16500	ano	
ž	51	P	25	10800	18	11000	ne	zánět střed ucha
m	45	P	16	16500	22	15000	ne	opak zánět střed. Ucha, obě
m	76	P	20	11000	30	7000	ne	
ž	69	P			40	7500	ne	možná zánět jako dítě, 17. 9. 2009 přestala slyšet na P ucho úplně, ráno po probuzení, příčina nevysvětlena
m	77	P	40	8000	30	9000	ne	přeucený levák
ž	70	P	30	8500	30	8500	ne	
m	66	P	25	9500	25	9000	ne	práce v hluku (dřlna)
m	80	P	20	6000	25	1000	ne	opakovaně v dospělosti zánět zvukovodu, celý život práce v hlučném prostředí; na 1000 Hz na L uchu slyší velmi slabě (od dětství) a jinak nic, na P velmi slabě frekvence mezi 25 a 6000
ž	69	P	20	12000	20	9000	v mládí	zánět stř. ucha jednou (ve 12 letech), práce v hluku (pila)
m	70	P	30	6500	30	1500	občasně	
m	14	P	20	15500	20	14500	ne	chlapec na křesle, zánět obě uši do tří let později ne
ž	43	L	20	13000	20	12000	občasně	v dětství možná jednou zánět
ž	46	P	20	12500	20	12000	ne	zánět
ž	25	P	20	16000	20	17500	ne	nic, ale okamžik před měřením ostrá rána na P ucho (lihová

								raketa)
m	14	P	20	20000	20	19500	ano, hodně	
m	14	P	20	18500	20	19000	občas	
m	14	P	20	19000	20	17500	moc ne	
ž	14	L	20	18500	20	19500	občas	neví
ž	13	P	20	17500	20	18000	ano, hodně	asi zánět st. Ucha
ž	13	L	20	18500	20	18500	ne	
ž	13	P	20	20000	20	20500	ne	jako malá obě uši zánět
ž	14	P	20	20000	20	19500	moc ne	pravé ucho jednou zánět
ž	13	P	20	18500	20	18500	ne	opakované záněty neví které ucho
ž	14	L	20	18500	20	18500	ani ne	
ž	14	P	20	17500	20	17000	ne	
m	14	P	20	22000	20	21000	občas	
m	14	P	20	18000	20	19500	ne	
ž	38	P	20	15500	20	16000	ne	
m	24	P	20	16500	20	17000	ano	
ž	53	P	20	12500	20	12500	ne	zánět jedno ucho
ž	25	P	20	18500	20	18000	ne	
ž	24	P	20	17500	20	17000	ne	
m	21	P	20	16000	20	17500	ne	2 x zánět P, práce v hluku
m	21	P	20	19500	20	18500	ano	
m	21	L	20	15000	20	16000	občas	záněty opak, teď v zimě po dlouhé době dvakrát, obě
m	21	P		16000		16500	ano	
m	23	P		17000		17000	ano	možná
m	59	P		11000		12000	ano	zánět
m	34	P		14500		14500	už ne	zánět opak v dětství
m	31	P		15000		14500	ne	
m	22	L		17000		16500	ne	
m	24	P		15500		16000	ne	
m	23	P		17500		16500	ano	
m	21	L		12500		16000	ne	P zánět
m	35	P		15500		17500	ano	neví
ž	21	P		18000		18000	ano	zánět obě
ž	21	P		19000		18500	ano	bubínek i zánět vše opak.
ž	21	P		17500		16000	ne	
ž	21	P		20000		19000	ne	
ž	47	P		15000		16500	ne	
ž	38	P		14500		16000	ne	možná
ž	24	P		16500		17000	ano	
ž	40	P		16000		15000	ne	
m	59	P		12500		12500	ne	
m	19	P		18500		17500	ne	
m	25	L		17000		16500	ne	v 10 letech obě zánět
m	69	obě		7500		8000	ne	
m	22	P		18500		17500	ano	neví
ž	79	P		5000		8000	ne	masér zmáčkł sluchový nerv, v 2001 ztráta sluchu na P ucho, poškození zároveň rovnováhy
m	78	P		13000		10500	ne	zánět v dětství v 8 letech, ve 36 letech a slabý před týdnem, L

								ucho zánět
m	55	L		12000		13000	ne	zánět možná v dětství
ž	58	P		11500		12000	ne	jednou oboustranný zánět zvukovodu v dospělosti
ž	40	P		16500		16500	ne	v dětství záněty
m	70	P		12000		13000	ne	zánět
m	67	P		11500		11000	ano	
m	70	P		9500		10500	ne	v mládí úraz pravé strany hlavy
ž	31	P		19000		18500	ano	
m	61	P		11000		10500	ne	
m	47	P		15000		15500	ne	
ž	34	L		15500		15500	ne	
ž	13	P		20500		19500	ano	
ž	46	P		13500		13500	ne	v dětství zánět středního ucha
m	48	P		13000		13000	ne	v dětství spalničky
ž	73	P		10500		9000	ne	
m	75	L		8000		8500	ne	práce v dílně
m	27	P		17000		16500	ne	
ž	33	L		15000		16500	ano	
ž	28	L		17000		17000	ano	zánět L
m	65	P		11000		11000	ne	
ž	71	P		9500		9000	ne	práce v hluku
m	57	P		11500		12000	ne	zánět P
m	26	P		16500		16500	ano	
ž	49	P		12500		13000	ne	

Význam zkratk použitých v příloze:

P pravorukost
L levorukost