

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra biofyziky



**Určení hlasitosti a hladin hlasitosti nejtisších fonací u zdravých osob**  
**Assessment of loudness and loudness levels for softest phonations in healthy subjects**

Vypracoval: Jan Mrštný

Studijní obor: Biofyzika

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jan G. Švec, Ph.D.

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, RNDr. Janu G. Švecovi, Ph.D., za pomoc a čas věnovaný mě a této práci.

Práce souvisí s řešením grantu GA16-01246S Počítačové a experimentální modelování samobuzených kmitů hlasivek a vliv jejich poškození na lidský hlas.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením RNDr. Jana G. Švece, Ph.D. a za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne 10. 5. 2016

.....

## Souhrn

Cílem této práce bylo stanovit hlasitost, hladinu hlasitosti a odpovídající frekvenčně vážené ekvivalentní hladiny akustického tlaku nejtišších fonací lidského hlasu. Ke stanovení hlasitosti a hladin hlasitosti byly použity existující metody pro výpočet hlasitosti definované v normách ISO 532 a ANSI S3.4. Konkrétně šlo o metodu Zwickera a Fastla pro stacionární zvuky a metodu Glasberga a Moora pro stacionární zvuky. Výsledné nejnižší hodnoty hlasitosti a hladin hlasitosti u žen spadají do intervalu 5% a 95% percentilu v rozmezí 2,2–6,4 sonu/51,1–66,7 fónu dle ISO 532 a 2,5–8,4 sonu/52,5–70,5 fónu dle ANSI S3.4. U mužů jsou tyto intervaly 1,3–6,9 sonu/43,3–69,8 fónu dle ISO 532 a 1,3–8,1 sonu/44,0–67,9 fónu dle ANSI S3.4. Kromě stanovení hlasitosti a hladin hlasitosti nejtišších fonací lidského hlasu ve vzdálenosti 30 centimetrů je přínosem práce také upozornění na nesoulad mezi hladinami hlasitosti a A-váženými ekvivalentními hladinami akustického tlaku.

## Summary

The purpose of this thesis was to assess loudness, loudness level and the corresponding frequency-weighted equivalent sound pressure levels in softest phonations of healthy human subjects. For this purpose, models for calculation of loudness were used as defined in the standard ISO 532 (Zwicker and Fastl model for stationary sounds) and in the standard ANSI S3.4 (Glasberg and Moore model for stationary sounds). Results of loudness and loudness level for females were found to be in the 5% – 95% quantile range of 2,2–6,4 sones/51,1–66,7 phons according to ISO 532 and 2,5–8,4 sones/52,5–70,5 phons according to ANSI S3.4. For men these ranges were 1,3–6,9 sones/43,3–69,8 phons according to ISO 532 and 1,3–8,1 sones/44,0–67,9 according to ANSI S3.4. Besides of determining the normative values of loudness and loudness level in softest phonations of human voice at 30 cm distance, the thesis also points out the differences between the A-weighted equivalent sound pressure levels and the loudness levels.

1.	ÚVOD.....	1
2.	PŘEHLED PROBLEMATIKY.....	2
2.1.	Základní akustické veličiny.....	2
2.2.	Frekvenční váhové filtry A, C, Z.....	6
2.3.	Časové vážení a průměrování.....	7
2.4.	Hlasové pole a dynamický rozsah hlasu.....	8
2.5.	Sluchové pole a dynamický rozsah zvuku.....	9
2.6.	Hladiny hlasitosti.....	10
2.7.	Hlasitost.....	11
2.8.	Normy zabývající se hlasitostí.....	12
2.9.	Modely pro výpočet hlasitosti.....	13
2.10.	Test normality dat.....	17
3.	CÍLE VÝZKUMNÉ ČÁSTI PRÁCE.....	18
4.	MATERIÁL A METODY.....	19
4.1.	Měřené osoby.....	19
4.2.	Vybavení.....	19
4.3.	Nahrávání.....	19
4.4.	Zpracování dat.....	20
4.5.	Detekce znělých fonací.....	20
4.1.	Detekce nejtišších fonací.....	21
4.2.	Stanovení hlasitosti.....	21
4.3.	Statistické zpracování dat.....	21
5.	VÝSLEDKY.....	22
6.	DISKUZE.....	29
7.	ZÁVĚR.....	32
8.	LITERATURA.....	33
9.	PŘÍLOHY.....	35

## 1. Úvod

Lidský hlas je základní prvek mezilidské komunikace a jeho dynamický rozsah je téměř 100 dB. Dosud však nebylo dobře popsáno, jak jsou tyto hodnoty vnímány lidským sluchem. Tato bakalářská práce se proto zabývá akustikou lidského hlasu, konkrétně stanovením hlasitosti a hladin hlasitosti nejtišších fonací zdravých osob.

Hlasitost je subjektivní vlastnost zvuku, díky které lze tóny seřadit od nejhlasitějších k nejtišším. Je závislá na základní frekvenci kmitání hlasivek stejně jako na hladině akustického tlaku a dalších parametrech, například době trvání zvuku.

Pro porovnávání hlasitosti zvuků slouží hladiny hlasitosti. Existují tzv. hladiny stejné hlasitosti, které jsou experimentálně zjištěny a zaznamenány v normách. Udávají parametry, které musí mít čisté zvuky, aby zněly lidskému sluchu stejně hlasitě.

Pro přiblížení vnímané hlasitosti lidským uchem u tichých zvuků se zavedlo frekvenční vážení hladin akustického tlaku pomocí filtru typu A a pro hlasité zvuky se zavedlo frekvenční vážení typu C. Ačkoliv jde pouze o přiblížení, je velice často používáno v praxi. Jedním z cílů této práce je porovnat jak dalece tyto frekvenčně vážené hladiny akustického tlaku odpovídají hladinám hlasitosti nejtišších fonací člověka.

V této bakalářské práci jsou analyzovány zvukové nahrávky 80 zdravých osob, zaznamenané v minulých letech v Hlasové laboratoři Katedry biofyziky Př.F. UP v Olomouci, za účelem stanovení hodnot hlasitosti v sonech, hladin hlasitosti ve fónech a hladin akustického tlaku vážených filtry A, C, tak aby bylo možno stanovit průměrnou nejnižší dosaženou hodnotu těchto veličin.

## 2. Přehled problematiky

### 2.1. Základní akustické veličiny

#### Zvuk

Podle Everesta (2001a) existují dvě definice zvuku. Ovšem každá se hodí pro popis jiného problému.

První definice zní, že zvuk je podélné mechanické vlnění pružného prostředí. Tato definice se týká fyzikálních problémů s tímto spojených. Například řešíme-li problém s vedením zvuku ve vzduchu, umožní nám tato definice dostatečné přiblížení k nalezení vhodného řešení.

Druhá definice říká, že zvuk je excitace sluchového mechanismu s důsledkem sluchového vjemu. Tato definice je spíš psychofyzikální a odkazuje na to, že vjem zvuku je u každého člověka individuální. Také je méně přesná, protože nezahrnuje ultrazvuk a infrazvuk nevyvolávající u lidí zvukový vjem.

Slyšitelným zvukem se myslí mechanické vlnění, jehož frekvence spadá do frekvenčního rozsahu lidského sluchu. Pro dospělého člověka je tento rozsah 16–16 000 Hz. Tyto hodnoty se v průběhu života mění. Děti mohou slyšet tóny o frekvenci až 20 kHz zatímco starší lidé mají horní hranici frekvenčního rozsahu jen okolo 11 kHz (Sedláček 1956).

#### Akustický tlak $p$

Podélným mechanickým vlněním v prostředí rozumíme zředňování a následné zhušťování částic prostředí, ve kterém se vlnění šíří. Podélné znamená, že částice kmitají ve stejném (nebo opačném) směru, jako je směr šíření tohoto vlnění. Zředňování a zhušťování vytváří v prostředí rychlé změny tlaku, které ve vzduchu oscilují okolo průměrné hodnoty, atmosférického tlaku. Dochází-li ke zhušťování vzduchu, tlak v prostředí se zvyšuje. Naopak dochází-li ke zředňování vzduchu, tlak v prostředí klesá (Sedláček 1956).

Porovnáme-li tyto změny tlaků s atmosférickým tlakem vzduchu, dostaneme akustický tlak. Z toho vyplývá, že okamžité hodnoty akustického tlaku mohou být kladné (v případě zhušťování), ale také záporné (v případě zředňování).

Obecně je tlak stanoven na základě druhého Newtonova pohybového zákona. Změny hybnosti částic tohoto prostředí vedou k impulsu síly a následně síla vztažená na jednotku plochy je definicí tlaku (Halliday a kol. 2008).

V případě, že chceme akustickým tlakem určit „velikost“ jeho změn, lze s výhodou použít tzv. efektivní hodnotu akustického tlaku  $p_{ef}$ . Efektivní hodnota akustického tlaku je definována podle Sedláčka (1956) jako

$$p_{ef} = \sqrt{\frac{\int_0^T p^2(t) dt}{T}}, \quad (1)$$

kde  $p$  jsou okamžité hodnoty akustického tlaku závislé na čase  $t$  a  $T$  je perioda kmitání, pro kterou platí, že je rovna převrácené hodnotě frekvence  $f$  (Halliday a kol. 2008), tedy

$$T = \frac{1}{f}. \quad (2)$$

V případě tónu, jehož průběh akustického tlaku je sinusový (takový tón označujeme jako tón čistý) se efektivní hodnota akustického tlaku vypočítá jako

$$p_{ef} = \frac{p_m}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

kde  $p_m$  je maximální hodnota okamžitého akustického tlaku (Everest 2001a).

### **Akustická intenzita $I$**

Akustická intenzita se někdy označuje také jako intenzita zvuku. Jde o akustický výkon zdroje naměřený na jednotce plochy. Jednotkou intenzity zvuku je z definice  $W \cdot m^{-2}$ . Podle Sedláčka (1956) je možné vypočítat akustickou intenzitu podle vztahu

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef}, \quad (4)$$

kde  $p_{ef}$  je efektivní hodnota akustického tlaku definovaná dříve a  $v_{ef}$  je efektivní hodnota rychlosti zvuku. V případě, že známe parametry prostředí, lze odvodit vztah

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} = \frac{p_{ef}^2}{\rho c}, \quad (5)$$

kde  $\rho$  je hustota prostředí, ve kterém se zvuk šíří a  $c$  je rychlost šíření (Sedláček 1956).

Rovnice č. 5 říká, že intenzita je přes konstanty prostředí přímo úměrná druhé mocnině efektivní hodnoty akustického tlaku, což potvrzuje i Fletcher (1940).

Podle Stevense (1955) není nulová hodnota hlasitosti (jejíž fyzikální podstatou je akustická intenzita) 0 sonů jak by se dalo předpokládat, ale nějaká hodnota nad

nulou. Stevens předpokládá, že tato nulová hodnota je stejná jako referenční, vůči které se měří. To je právě 0,06 sonu. Jde o jakousi nejnižší přirozenou hlasitost, která nás stále obklopuje. Této referenční hodnotě hlasitosti odpovídá prahová hodnota akustické intenzity  $10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (Fletcher 1940).

## Decibel

Ucho je schopné vnímat zvuky s akustickou intenzitou v rozmezí  $10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  až  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , což dělá rozdíl 13 řádů (Everest 2001a). Vypisování tolika nul za sebou by značně snížilo přehlednost a interpretaci dat a proto se zavádí pojem decibel. Jde o desetinu jednotky bel, kterou vymysleli pracovníci Bellových laboratoří (Fletcher 1940). Nejedná se o jednotku absolutní, ale pouze relativní, jelikož vyjadřuje poměr mezi dvěma hodnotami. Definice decibelu je:

$$B = 10 \log \frac{x_1}{x_2} \text{ [dB]}. \quad (6)$$

V případě kdy druhou proměnou  $x_2$  standardizujeme, stává se z jednotky relativní jednotka absolutní. Tuto novou jednotku poté označujeme jako hladinu původních jednotek  $x$  (Sedláček 1956).

## Hladina akustické intenzity

Pomocí prahové intenzity  $10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a intenzity, která podle Everesta (2001a) začíná pro člověka být bolestivá, může být vypočten rozsah vnímaných hladin akustické intenzity (z angličtiny Sound Intensity Level)

$$\text{SIL} = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10}{10^{-12}} = 130 \text{ dB}. \quad (7)$$

Hladina akustické intenzity (stejně jako hladina akustického tlaku) mohla být zavedena díky Fechner-Weberovu zákonu, který udává vztah mezi fyzikální intenzitou podnětu působícího na receptor a vjemem této intenzity. Tento vztah se podle Sedláčka (1956) dá matematicky vyjádřit

$$S = k \cdot \ln \frac{I}{I_0}, \quad (8)$$

kde  $S$  je intenzita daného subjektivního vjemu,  $k$  je konstanta úměrnosti vyjadřující přímou závislost,  $I$  je intenzita působící na daný receptor a  $I_0$  je prahová intenzita tohoto receptoru.

Tento zákon nám prakticky říká, že čím větší je intenzita působící na receptor, tím větší musí být její změna, abychom ji postřehli (Sedláček 1956).

## Hladina akustického tlaku

S obrovským rozsahem vnímaných intenzit zvuku souvisí i velký rozsah vnímaných tlaků. Protože platí, že akustická intenzita je přímo úměrná druhé mocnině akustického tlaku (Fletcher 1940), můžeme definovat hladinu akustického tlaku SPL (z angličtiny Sound Pressure Level)

$$\text{SPL} = 20 \log \frac{p}{p_0}. \quad (9)$$

Protože chceme jednotku absolutní, musíme určit prahovou hodnotu tlaku  $p_0$ . Ta je podle mezinárodní normy ISO 532 stanovena jako  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa (ČSN ISO 532 1993).

## Akustický výkon

Akustický výkon je střední hodnota energie přenesená vlněním za jednotku času (Halliday a kol. 2008). Podle Titzeho (2000) je intenzita vlnění závislá na výkonu zdroje vztahem

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (10)$$

kde  $P$  je výkon zdroje a  $r$  je vzdálenost od zdroje. Jde o šíření akustické energie prostorem ve vlnoplochách, o obsahu plochy koule o poloměru  $r$ , za jednotku času. Někdy však známe pouze hladinu akustického tlaku, ze které je třeba určit výkon zdroje. Ten může být v případě kulového vyzařování zvuku vypočítán ze vztahu

$$P = 4\pi r^2 \cdot 10^{\frac{\text{SPL}-120}{10}}, \quad (11)$$

kde  $P$  je hledaný akustický výkon a SPL je hladina akustického tlaku naměřená ve vzdálenosti  $r$  (Titze 2000).

## Zákon vzdálenosti

Uvažujeme bodový zdroj zvuku, ze kterého se zvuk šíří do prostoru o vlnoplochách tvaru koule, jejíž povrch bude přímo úměrný druhé mocnině vzdálenosti od zdroje zvuku. Pro povrch koule platí

$$S = 4\pi r^2, \quad (12)$$

kde  $r$  je vzdálenost od zdroje, ve které budeme měřit intenzitu zvuku. Protože s rostoucí vzdáleností se bude povrch koule zvětšovat a výkon vlnění je stále

konstantní, musí intenzita zvuku klesat. Podělíme-li intenzity zvuku ve dvou různých vzdálenostech, dostaneme

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{P}{4\pi r_1^2}}{\frac{P}{4\pi r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2}, \quad (13)$$

kde  $P$  je akustický výkon .

Protože platí

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{p_1^2}{p_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}, \quad (14)$$

můžeme napsat vztah

$$10 \log \frac{p_1^2}{p_2^2} = 10 \log \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (15)$$

Po finální úpravě dostaneme

$$\text{SPL}_1 - \text{SPL}_2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1}, \quad (16)$$

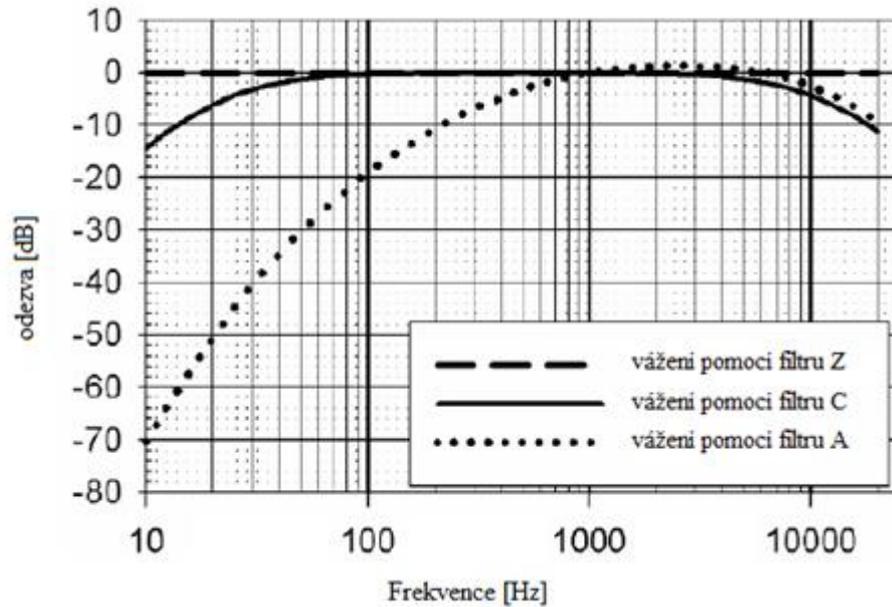
což je základní obecný vztah označovaný jako zákon vzdálenosti. Z něj mimo jiné plyne, že pokud zdvojnásobíme vzdálenost, ve které měříme SPL, naměříme hladinu akustického tlaku asi o 6 dB menší. Proto je vždy nutné udávat vzdálenost, ve které jsme danou hodnotu SPL při měření naměřili (Everest 2001a). Pro měření dynamického rozsahu hlasu byla Unií evropských foniatrů doporučena vzdálenost 30 cm (Schutte a Seidner 1983).

## 2.2. Frekvenční váhové filtry A, C, Z

Váhový filtr A byl zaveden tak, aby se přibližoval citlivosti lidského ucha na zvuky o hladinách hlasitosti asi 40 fónů. Tomuto odpovídají čisté zvuky o frekvenci 1 kHz a hladině akustického tlaku 40 dB. Na obrázku č. 1 lze vidět, že filtr zeslabuje vysoké a nízké frekvence, zatímco střední frekvence mírně zesílí či je ponechává neovlivněné. V této střední oblasti (asi 1–6 kHz) je lidské ucho nejcitlivější (ČSN EN 61672-1 2003).

Váhový filtr C také zeslabuje vysoké a nízké frekvence. Podle obrázku č. 1 je zřejmé, že tyto frekvence jsou směrem k nižším méně zeslabené než je tomu u filtru A. V rozmezí 50–4000 Hz, kde je přítomna většina energie hlasu, zde není patrné žádné ovlivnění.

Váhový filtr Z (někdy také nazýván jako nulový) je lineární filtr, který signál neovlivňuje (ČSN EN 61672-1 2003).



Obrázek č. 1: Odezva frekvenčních filtrů. Filtr Z – přerušovaná čára, filtr C – plná čára a filtr A – tečkovaná čára (Švec a Granqvist 2010, upraveno).

### 2.3. Časové vážení a průměrování

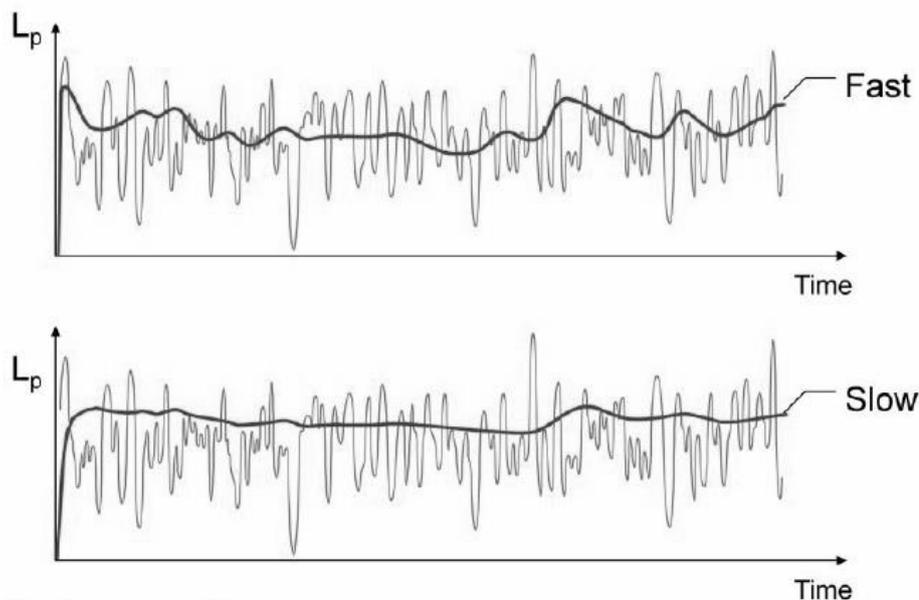
Obecná rovnice pro časově váženou hladinu akustického tlaku je (ČSN EN 61672-1 2003)

$$L_p(t) = 20 \log \left\{ \frac{\left[ \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t p^2(\xi) e^{-\frac{(t-\xi)}{\tau}} d\xi \right]^{\frac{1}{2}}}{p_0} \right\}, \quad (17)$$

kde  $\tau$  je časové konstanta a  $\xi$  je pomocná proměnná časové integrace.

V případě, že je použita časová konstanta  $\tau = 0,125$  s, mluví se o tzv. rychlém (fast) časovém vážení. V případě, že je použita časová konstanta  $\tau = 1$  s, mluví se o vážení pomalém (slow) (ČSN EN 61672-1 2003).

Zavádí se také pojem ekvivalentní hladina akustického tlaku. Značí se  $L_{eq,T}$  a je to hodnota, při které má stacionární zvuk o trvání  $T$  stejnou energii, jako původní zvuk za dobu  $T$ . Oba dva zvuky mají ve výsledku stejný vliv na člověka (Hellmuth a kol. 2013).

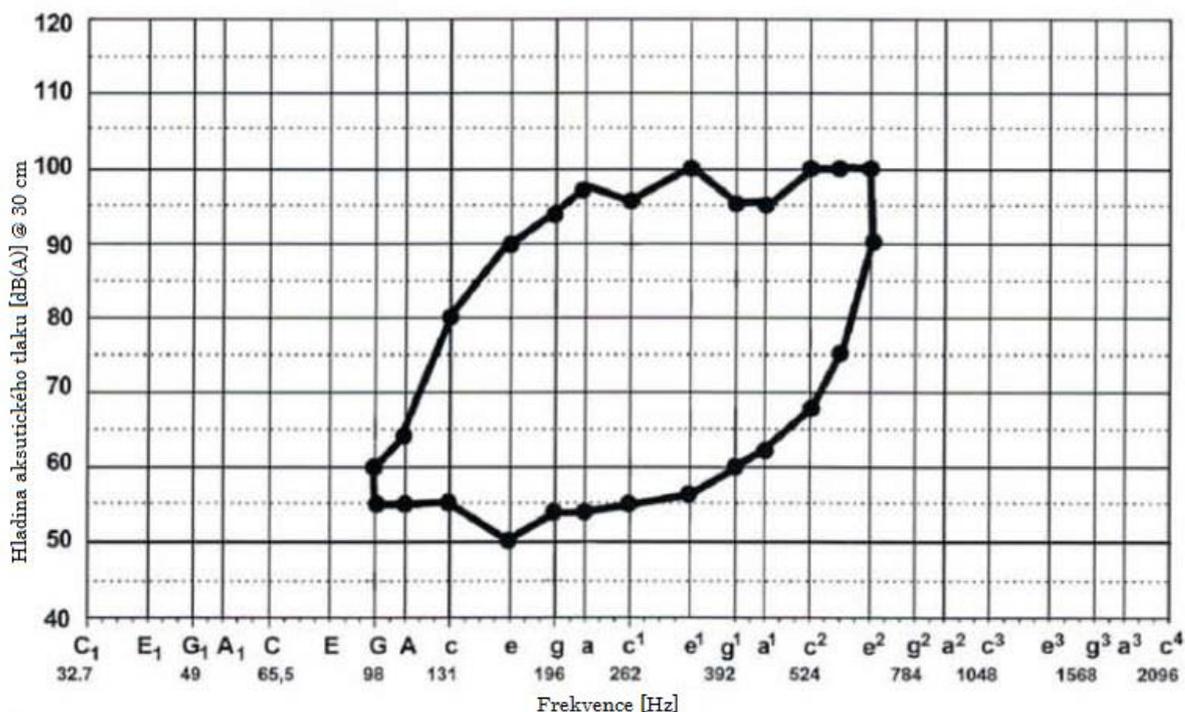


Obrázek č. 2: Porovnání vlivu rychlého a pomalého časového vážení na výsledný signál (Brüel & Kjaer 2013, upraveno).

## 2.4. Hlasové pole a dynamický rozsah hlasu

Hlasové pole slouží jako primární neinvazivní vyšetření při hlasových obtížích (Ma a Yiu 2011). Je to graf závislosti hladiny akustického tlaku nebo intenzity (zastupující hlasitost) na základní frekvenci kmitání hlasivek. Porovnáním s normativním polem změřeným na souboru zdravých osob lze určit oblast, ve které pacient tyto obtíže má (Sanchez a kol. 2014). Odchytky o 2–3 dB jsou podle Schutteho (2009) normální a odpovídají běžné variabilitě hlasu.

V některých případech se pro stanovení dynamického rozsahu člověka používá místo hlasového pole tzv. redukovaný protokol měření dynamického rozsahu hlasu. Jde o měření pouze nejtisší a nejhlasitější fonace bez závislosti na základní frekvenci kmitání hlasivek (Šrámková a kol. 2011).

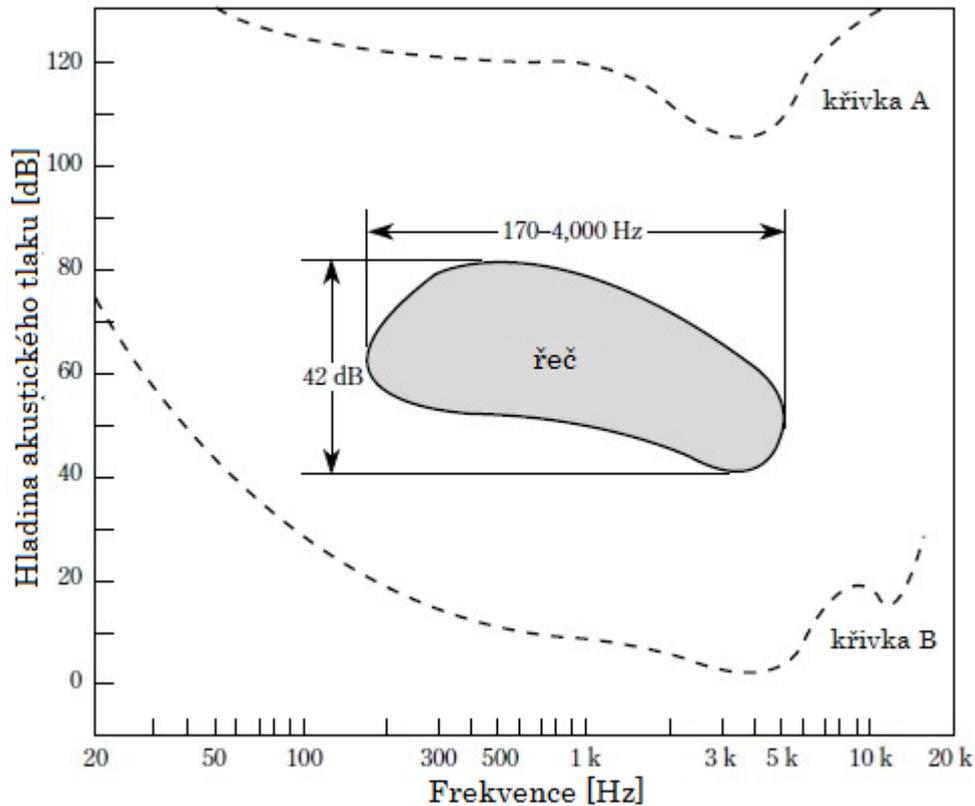


Obrázek č. 3: Hlasové pole netrévaného člověka bez hlasových obtíží (Schutte 2009, upraveno).

## 2.5. Sluchové pole a dynamický rozsah zvuku

Sluchové pole je graf závislosti hladiny akustického tlaku na frekvenci vnímaného zvuku. Je ohraničen křivkami *A* a *B* viz obrázek č. 4. Křivka *A* označuje práh bolesti, zatímco křivka *B* označuje práh slyšení. Tyto křivky byly vytvořeny průměrováním hodnot od skupiny posluchačů, která byla dotazována, jestli tón o daných parametrech ještě slyší či jeho vjem začíná být bolestivý (Everest 2001b). Sluchové pole zobrazuje, jaké frekvence v kombinaci s hladinami akustického tlaku je možné slyšet.

Dynamický rozsah zvuku je rozmezí nejvyšší a nejnižší hladiny akustického tlaku, jaké jsme schopni slyšet. Podle obrázku č. 4 vidíme, že dynamický rozsah závisí na frekvenci vnímaného zvuku (Everest 2001b).



Obrázek č. 4: Sluchové pole s vyznačenou oblastí řeči (Everest 2001b, upraveno). Oblast řeči je pouze orientační.

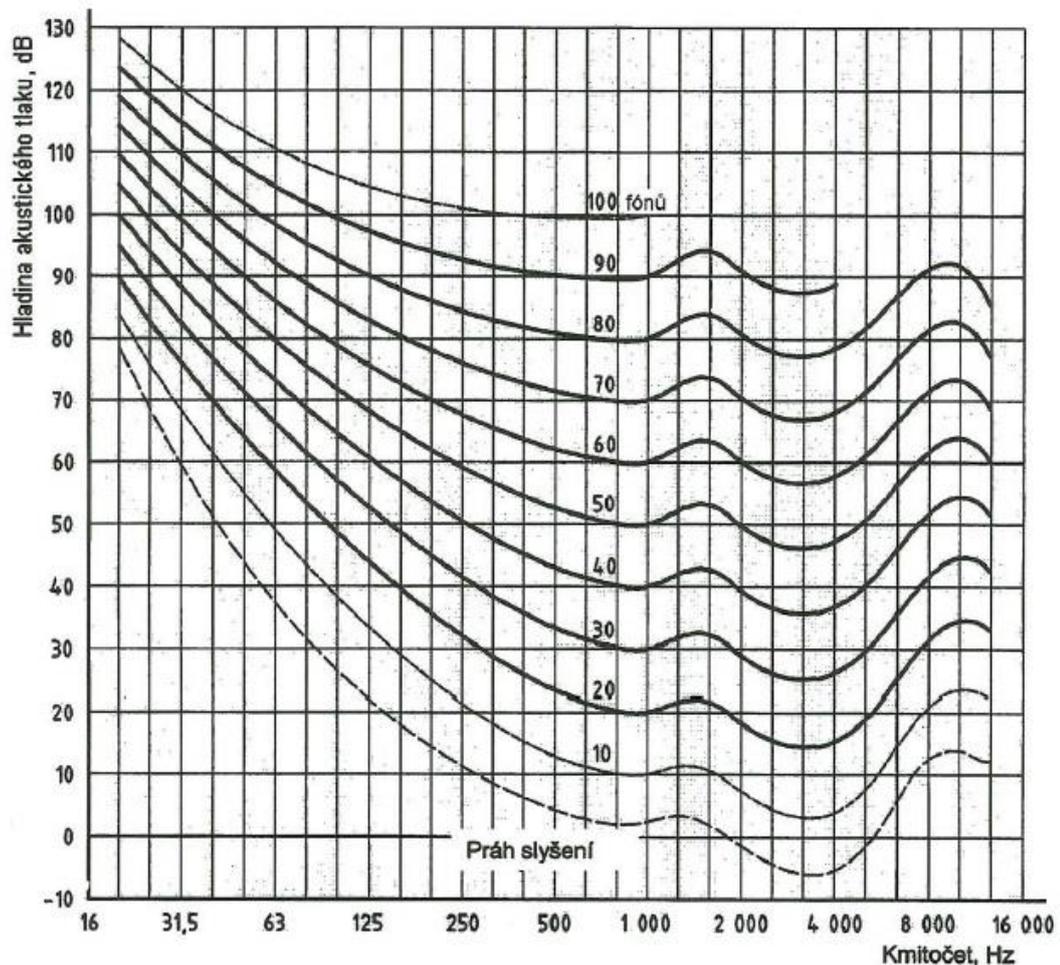
## 2.6. Hladiny hlasitosti

Pro porovnávání hlasitosti tónů je třeba definice referenčního tónu. Tím byl zvolen tón sinusového průběhu (čistý tón) o frekvenci 1000 Hz. Hladina hlasitosti tónu o frekvenci 1000 Hz je rovna jeho hladině akustického tlaku. Jednotkou hladiny hlasitosti je fón.

Hladiny hlasitosti slouží k nalezení hladiny akustického tlaku a frekvence tónů, které znějí stejně hlasitě. Například pokud určíme, že neznámý tón je stejně hlasitý jako referenční tón o hladině akustického tlaku 45 dB, mají oba hladinu hlasitosti 45 fónů (Moore 2007).

Hladiny hlasitosti jsou definovány v normě ISO 226. Tyto hladiny byly získány statistickým zpracováním výsledků dvanácti nezávislých experimentálních výsledků (ČSN ISO 226 2003). Testovaným posluchačům byl střídavě pouštěn referenční a zkoumaný tón o různých hladinách akustického tlaku, dokud se jim nezdály stejně hlasité.

Je nutné podotknout, že je rozdíl mezi hladinou hlasitosti a hlasitostí. Například tón o hladině hlasitosti 80 fónů zní více než dvakrát hlasitěji oproti tónu o hladině hlasitosti 40 fónů (Moore 2007).



Obrázek č. 5: Normované křivky stejné hlasitosti pro čisté tóny (ČSN ISO 226 2003).

## 2.7. Hlasitost

Hlasitosti odpovídá vjem „síly“ zvuku. Jde o vlastnost zvuku, díky které můžeme zvuky seřadit od tichých k hlasitým. Hlasitost jako vlastnost zvuku je subjektivní, a je proto velmi obtížné ji měřit (Moore 2007).

Podle Stevense (1955) je hlasitost svázána s intenzitou podle vztahu

$$L = k \cdot I^{0,3}, \quad (18)$$

kde  $L$  je vjem hlasitosti,  $I$  je intenzita zvuku a  $k$  je konstanta závisící na testované osobě a použitých jednotkách (Stevens 1955). Zjednodušeně lze říct, že vjem hlasitosti se zdvojnásobí v případě, že se intenzita zvětší desetkrát. Tomu odpovídá nárůst

hladiny akustické intenzity o 10 dB. V praxi toto přiblížení funguje jen pro tóny s vyšší hladinou akustického tlaku než 40 dB (Moore 2007).

Jednotkou hlasitosti je son. Dohodou bylo stanoveno, že čistý tón o frekvenci 1000 Hz a hladině akustického tlaku 40 dB má hlasitost jeden son (Moore 2007).

Podle mezinárodní normy ISO (ČSN ISO 532 1993) je převodní vztah mezi počtem sonů  $S$  a počtem fónů  $P$  vyjádřen rovnicí

$$S = 2^{\frac{P-40}{10}}. \quad (19)$$

Existují i další normy, které stanovují vztah mezi fony a sony; například norma ANSI (zkratka pro American National Standards Institute) S3.4 2007. V té je převod mezi fóny a sony řešen převodní tabulkou. Ta je zobrazena níže. Norma předpokládá, že přechod mezi uvedenými hodnotami je lineární vždy pro dvě sousední hodnoty.

**Tabulka č. 1: Vztah mezi fóny a sony podle American National Standards Institute). Hodnoty kurzívou nebyly dosud ověřeny či schváleny (ANSI S3.4 2007).**

Phons	Sones	Phons	Sones
0.0	0.0011	50.0	2.098
1.0	0.0018	55.0	2.970
2.0	0.0028	60.0	4.166
3.0	0.0044	65.0	5.813
4.0	0.0065	70.0	8.102
5.0	0.0088	75.0	11.326
7.5	0.017	80.0	15.980
10.0	0.029	85.0	22.929
15.0	0.070	90.0	33.216
20.0	0.142	95.0	48.242
25.0	0.255	100.0	70.362
30.0	0.422	105.0	103.274
35.0	0.662	110.0	152.776
40.0	0.997	115.0	227.855
45.0	1.461	120.0	341.982

Díky převodní tabulce lze vidět, že pokud dostaneme hodnotu v sonech větší než cca 342, pomocí ANSI převodu nebudeme schopni určit odpovídající počet fónů.

## 2.8. Normy zabývající se hlasitostí

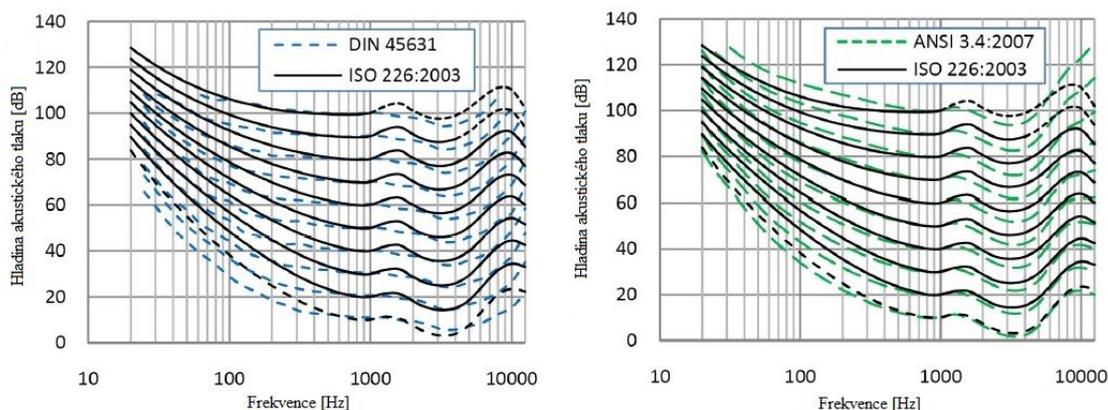
Norma ISO 226 z roku 1987 stanovila křivky stejné hlasitosti. Existuje její revize ISO 226 z roku 2003, která ruší a nahrazuje verzi z roku 1987 (ČSN ISO 226 2003). Tato revize by měla lépe odpovídat hodnotám získaným pomocí novějších

metod. Norma ISO 532 stanovuje postup, jakým je možné vypočítat hlasitost stacionárního zvuku (ČSN ISO 532 1993).

Německá norma DIN 45631, revidována v roce 2010, rozšiřuje ISO 532 stanovením postupu výpočtu hlasitosti i pro nestacionární typy zvuků.

Americká norma ANSI S3.4 z roku 2007 byla zavedena pro výpočet hlasitosti stacionárních zvuků se snahou odpovídat křivkám stejné hlasitosti definovaným v ISO 226 z roku 2003 (Scheuren 2014), ovšem pro výpočet hlasitosti používá jiný model než norma ISO 532.

Rozdíly mezi normami ISO 226, ANSI S3.4 a DIN 45631 jsou ukázány na obrázku č. 6. Z něj je patrné, že norma DIN 45631 dává hodnoty nižší než ISO 226. Norma ANSI S3.4 vykazuje vyšší hodnoty pro nízké a vysoké frekvence. U středních (cca 1–5 kHz) frekvencí, jsou zde viditelné nižší hodnoty než je tomu u ISO 226.



Obrázek č. 6: Porovnání křivek hladin hlasitosti pro normy DIN 45631, ISO 226 a ANSI S3.4 (Charbonneau 2009, upraveno).

## 2.9. Modely pro výpočet hlasitosti

V současnosti existují dvě základní normy pro výpočet hlasitosti stacionárních zvuků – mezinárodní norma ISO 532 z roku 1993 a americká norma ANSI S3.4 z roku 2007. Norma ISO 532 používá Zwickerův a Fastlův model (ČSN ISO 532 1993), zatímco norma ANSI S3.4 používá Glasbergův a Moorův model (ANSI S3.4 2007).

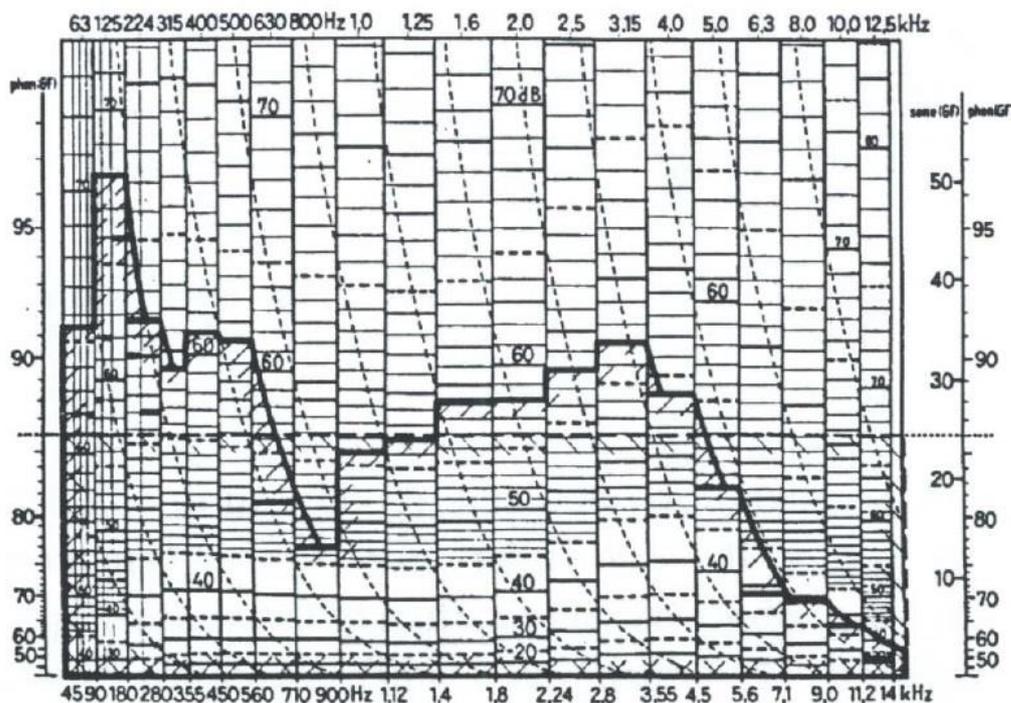
### Model pro výpočet hlasitosti podle Zwickera a Fastla pro stacionární zvuky

Metoda pro výpočet hlasitosti stacionárních zvuků od Zwickera a Fastla je používána v německé normě DIN 45631 (Scheuren 2014) a také v normě ISO 532, část B (ČSN ISO 532 1993).

Metoda využívá soubor přesně definovaných grafů v normě ISO 532, jejichž pomocí je možné určit hlasitost, kterou lze následně transformovat na hladinu hlasitosti. V podstatě se do grafů zanesou hladiny akustického tlaku tak, aby tyto hladiny odpovídaly číslům na ose y grafu a aby odpovídaly i mezní frekvence pásem na ose x viz obrázek č. 7.

Tam, kde je zakreslená hladina ve vedlejším frekvenčním pásmu nižší, je pokles specifické hlasitosti zaznamenán klesající interpolační křivkou, která začíná na konci levé strany. V případě, že je hodnota v dalším sloupci vyšší než v předchozím, dochází k maskování zvuku a do stanovení hlasitosti se započítává pouze vyšší hodnota. Takto uzavřená celková plocha v grafu je rovna celkové hlasitosti. Ukázkové určení hlasitosti pro hluk stroje je na obrázku č. 7.

Nyní stačí jen zobrazit obsah uzavřené plochy do podoby pravoúhelníku. Výška pravoúhelníku udává hladinu hlasitosti ve fónách (ČSN ISO 532 1993).



Obrázek č. 7: Příklad určení hlasitosti pomocí grafu normy ISO 532 jako funkce kritického pásma pro hluk stroje. Celková hlasitost je určena jako plocha pod tučnou křivkou, která odpovídá ploše pod přerušovanou čarou určující hladinu hlasitosti (zde cca 25 sonů a 86 fónů).

### Model pro výpočet hlasitosti podle Glasberga a Moora pro stacionární zvuky

Metodu pro výpočet hlasitosti podle Glasberga a Moora využívá americká norma ANSI S3.4. Metoda nejprve namodeluje zpracování zvuku vnějším a středním

uchem. V této části se také koriguje shoda výsledků této metody s mezinárodní normou ISO 226 pro hladiny stejné hlasitosti z roku 2003. Výsledkem je určení spektra tlakových změn působících v kochleě.

Další částí metody je převod tohoto spektra na tzv. excitační vzor, který reprezentuje excitaci vláskových buněk uvnitř kochleě. Kochleä je namodelována řadou filtrů s částečně se překrývajícími pásmy. Šířka pásem a tvar filtru závisí na energii zvuku a centrální frekvenci pásma. Dále je definován ERB (zkratka pro equivalent rectangular bandwidth). Jde o vzdálenost frekvencí, při které začne tón o centrální frekvenci tohoto pásma být maskován. Celková výstupní excitace je vypočtena součtem energií v závislosti na frekvenčním vstupu. Tuto excitaci vztáhneme na příslušný ERB.

Poslední částí je převod z excitačního modelu na tzv. specifickou hlasitost. Jedná se v podstatě o hustotu hlasitosti v jednotkách son/ERB. Výsledná hlasitost je rovna ploše pod křivkami přes jednotlivé dílčí ERB (ANSI S3.4 2007).

Níže jsou podrobněji popsány fáze zpracování zvuku pro výpočet hlasitosti podle obou modelů, tak jak jsou použity v Genesis Loudness Toolboxu (Genesis S. A. 2009a, Genesis S. A. 2009b), který byl použit v této práci.

### **Převod přes vnější a střední ucho**

Zwicker a Fastl definují převodní faktor  $a_0$ , který definuje vztah mezi zvukem ve volném poli a ve vnitřním uchu. Dále předpokládají, že převodní funkce má převrácený tvar vůči prahu sluchu pro frekvence nad 1 kHz a vnitřní ucho je zde stejně citlivé pro všechny frekvence. Pro frekvence nižší než 1 kHz je tato funkce konstantní (vzestup prahu sluchu pod touto frekvencí si Zwicker vysvětluje vlastním šumem ucha).

Glasberg a Moore předpokládají, že lidský sluch není přizpůsoben ke slyšení svého vlastního šumu, a proto jako převodní funkci využívají hladiny hlasitosti se dvěma předpoklady. Prvním předpokladem je, že pro všechny frekvence nad 1 kHz je vnitřní ucho stejně citlivé. Druhým předpokladem je, že pro frekvence pod 1 kHz má převodní funkce převrácený tvar k hladině hlasitosti sta fónů.

### **Modelování sluchových filtrů**

Zwickerův a Fastlův model napodobuje funkci bazilární membrány řadou filtrů. Tyto filtry jsou určeny tzv. kritickými pásmy. Tato kritická pásma jsou spektrálně

seřazena a jejich šířka odpovídá jednotce Bark. Ta je definována jako rozmezí frekvencí, při kterém se již dál nezvyšuje maskování tónu, jehož frekvence odpovídá centrální frekvenci daného pásma.

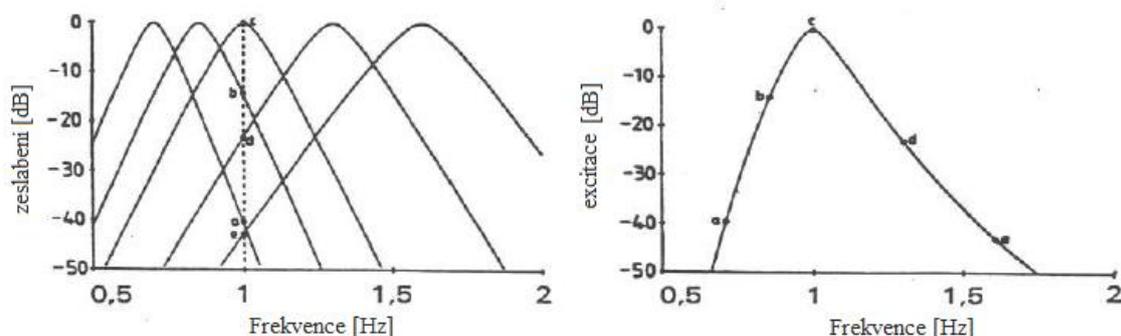
Moore a Glasberg používají místo kritických pásem tzv. equivalent rectangular bandwidth (ERB), které jsou podobné kritickým pásmům Zwickerova a Fastlova modelu.

### Výpočet excitačního vzoru

Excitačním vzorem (excitation pattern) se nazývá průměrná nervová aktivita v závislosti na frekvenci. Excitační vzor daný vnímaným zvukem se počítá z jeho hladiny akustického tlaku v každém frekvenčním pásmu (kritickém či ERB). V této části je potřeba vzít v úvahu jev maskování, který každý model řeší jinak. Maskováním se rozumí snížení slyšitelnosti zvuku (i pod práh slyšení) vlivem jiného zvuku.

U Zwickerova a Fastlova modelu se excitační vzor odvozuje od maskování čistého tónu spektrálně úzkým šumem. Předpokládá se, že křivka excitačního vzoru čistého tónu a detekčního práhu maskování tohoto tónu jsou totožného tvaru.

U Moora a Glasberga se excitační vzor vypočítává z výstupu sluchových filtrů pro frekvence, které jsou ve zvuku obsaženy. Průsečíky křivek jednotlivých čistých tónů se poté přenesou na centrální frekvenci daného pásma a vytvoří komplexní excitační vzor.



Obrázek č. 8: Ukázka excitačního vzoru pro čistý tón o frekvenci 1 kHz podle Glasberga a Moora. Vlevo je odezva filtrů v okolí dané frekvence. Vpravo výsledný excitační vzor (Genesis S. A. 2009b, upraveno).

### Specifická a celková hlasitost

Nejdříve je třeba vypočítat tzv. specifickou hlasitost  $N'$  pro každé frekvenční pásmo (kritické pásmo či ERB) zvlášť. K tomu se používá vztah

$$N' = c \cdot E^\alpha, \quad (20)$$

kde  $c$  a  $\alpha$  jsou konstanty zjištěné experimentálně a  $E$  je excitace určená z excitačního vzoru.

U Zwickera a Fastla se specifická hlasitost určuje přes tzv. primární hlasitost, kde se upravuje hlasitost bez šumu pozadí na hlasitost zahrnující šum pozadí. V normě ISO 532 je tato část řešena vzory grafu. Do nich se zanesou hladiny akustického tlaku v daném kritickém pásmu a sleduje se klesající křivka. V případě, že je specifická hlasitost v následujícím sloupci vyšší než v předchozím, je tzv. primární hlasitost maskována a v potaz se bere pouze vyšší specifická hlasitost předchozího sloupce, viz obrázek č. 7. Celková hlasitost je rovna součtu specifické hlasitosti přes všech 24 kritických pásem.

Moore a Glasberg předpokládají, že ucho není schopné slyšet svůj vlastní šum a proto se od specifické hlasitosti vnímaného zvuku odečte pouze specifická hlasitost odpovídající vnitřnímu šumu. Celková hlasitost je opět rovna součtu specifické hlasitosti přes všechny ERB.

## 2.10. Test normality dat

Normalita hodnot hlasitosti, hladin hlasitosti i vážených hladin akustického tlaku byla ověřena pomocí Jarque-Bera testu. K tomuto testu byl využit program Matlab pomocí příkazu  $[h, p] = \text{jbttest}(x)$ , kde  $x$  jsou naměřené hodnoty. Tento test dává za výsledek dva parametry.

Prvním z parametrů je  $h$ , který může nabývat hodnot 0 a 1. V případě, že  $h = 0$ , nelze hypotézu o normalitě dat zamítnout. To znamená, že data jsou skutečně normálního rozdělení a nebo je jen málo dat na zamítnutí této hypotézy. Pokud  $h = 1$ , hypotézu o normálním rozdělení dat zamítáme.

Druhým parametrem je tzv.  $p$ -hodnota. Ta odpovídá pravděpodobnosti, s jakou naměříme data ještě více vzdálená normalitě, než ta co máme. Čím menší je tato hodnota  $p$ , tím méně pravděpodobné je, že data skutečně jsou normálního rozdělení. Za hraniční hodnotu se považuje  $p = 0,05$  (Šrámková 2010).

### **3. Cíle výzkumné části práce**

Cílem této práce je odpovědět na tři následující otázky:

- A. Jaké jsou nejtišší hladiny hlasitosti pro lidský hlas ve vzdálenosti 30 cm?
- B. Jak moc se tyto hladiny liší od A-vážených a C-vážených hladin akustického tlaku?
- C. Jak moc se od sebe liší hlasitosti a hladiny hlasitosti nejtišších fonací určených podle dvou současných existujících norem ISO 532 a ANSI S3.4?

## **4. Materiál a metody**

Pro účely této práce byly využity zvukové záznamy, které byly pořízeny v minulých letech v Hlasové laboratoři na Katedře biofyziky Př.F. UP v Olomouci a jejichž analýza byla publikována v článku (Šrámková a kol. 2015). Níže jsou uvedeny pouze základní informace, další podrobnosti lze nalézt v publikacích (Šrámková 2010, Šrámková a kol. 2015).

### **4.1. Měřené osoby**

Měření bylo provedeno na 80 nahrávkách zdravých osob. Z tohoto počtu bylo 40 mužů (průměrný věk 28 let) a 40 žen (průměrný věk 23 let). Z celkového počtu účastníků bylo 20 osob členy amatérského pěveckého sboru. Zbylých 60 osob bylo studenty či zaměstnanci Univerzity Palackého v Olomouci. Všichni účastníci vyplnili dotazník VHI (Voice Handicap Index) ohledně normality jejich hlasu.

### **4.2. Vybavení**

Nahrávání probíhalo v odhlučněných místnostech s A-váženou hladinou šumu menší než 23 dB. Pro nahrávání byl použit všesměrový hlavový mikrofon (DPA, typ 4066) ve vzdálenosti 5–10 cm od úst, připojený na předzesilovač (DPA, typ MMA 6000). Ve vzdálenosti 30 cm od úst byl umístěn zvukoměr (Brüel & Kjaer, typ Mediator 2238) sloužící k současné kalibraci. Zvukoměr byl nakalibrován odpovídajícím generátorem (Brüel & Kjaer, typ 4231) kalibračního tónu. Výsledné signály byly uloženy se vzorkovací frekvencí 48 kHz a 24bitovou hloubkou. Pro podrobnější specifikace přístrojů viz článek Šrámkové a kolektivu (2015), část II. B.

### **4.3. Nahrávání**

Před nahráváním došlo ke kontrole vyplněného dotazníku VHI. K nahrávání byly připuštěny pouze osoby, u kterých se neprokázaly závažné hlasové obtíže. Při samotném nahrávání byl nejdříve nakalibrován zvukoměr kalibračním tónem o známé frekvenci a hladině akustického tlaku. Po té došlo k držené vokalizaci samohlásky [a:] o pohodlné hlasitosti a výšce. Následovalo nahrávání asi pěti sekund ticha. Poté proběhlo nahrávání nejtišší možné fonace samohlásky [a:] na pohodlné výšce tónu. Účastníci byli instruováni začít fonaci tichým hlasem na pohodlné výšce tónu a hlas postupně ztlumovat až do situace, kdy hlas přestane znít a fonace přejde v neznělou.

Tento přechod byl před samotným nahráváním předveden instruktory, kteří byli přítomni po celou dobu nahrávání a kontrolovali jeho správný průběh. V případě, že instruktoři nebyli s fonací spokojeni, byli účastníci požádáni, aby daný postup zopakovali.

#### **4.4. Zpracování dat**

Nejprve musely být jednotlivé nahrávky nastříhány na části. V první části byl zachycen kalibrační tón a ve druhé držená samohláska [a:]. Ve třetí části byla zachycena fonace s nejtišší dosaženou hlasitostí.

Takto uložené signály byly zpracovány programem MatLab, verzí R2012b společnosti MathWorks. Nejprve byly tyto signály zkalibrovány. To znamená přiřadit oběma mikrofonům (hlavovému i zvukoměrovému) odpovídající absolutní hodnotu akustického tlaku. Vzhledem k rozdílným vzdálenostem hlavového a zvukoměrového mikrofonu od zdroje kalibračního tónu byly i naměřené hladiny různé. Díky znalosti hladiny akustického tlaku, kterou daný zvuk měl, lze najít konstantu, kterou když vynásobíme celý signál, získáme absolutní hladiny akustického tlaku daného zvuku. U hlavového mikrofonu bylo ještě třeba upravit signál tak, aby měl stejnou hodnotu, jako by byl měřen ve vzdálenosti 30 cm. Tedy ve stejné vzdálenosti jako byl umístěn zvukoměr od úst.

Po té byl tento signál upraven pomocí frekvenčního vážení A, jehož hodnoty by se měly přibližovat hodnotám hladin hlasitosti tichých tónů. Navíc bylo použito i frekvenční vážení pomocí filtru C.

Při časovém průměrování byly použity ekvivalentní hladiny akustického tlaku za jednu sekundu, které vystihují průměrnou energii měřeného zvuku. Pro tento postup (zahrnující i následující kapitoly) byl využit skript programu MatLab, který byl použit v předchozí práci Šrámkovou a kolektivem (2015) pro zjištění hladin akustického tlaku nejtišších fonací. Pro potřeby této práce byl tento skript upraven a doplněn moduly pro výpočet hlasitosti a hladin hlasitosti. Tuto upravenou verzi lze najít v příloze č. 1.

#### **4.5. Detekce znělých fonací**

K rozlišení znělých a neznělých fonací byl použit program Praat (Boersma a Weenink 2013). Toto rozlišení probíhalo pomocí autokorelačního algoritmu, který je

vedlejším produktem při určení základní frekvence. Nastavení parametrů pro detekci neznělé fonace bylo stejné jako v práci Šrámková a kol. (2015).

Výsledkem byly odpovídající detekované frekvence kmitů hlasivek v závislosti na čase. V případě, že byl autokorelační koeficient nižší, než prahová hodnota, byla frekvence určena jako „--undefined--“ a později nahrazena mínus jedničkou. Důležité bylo určit tyto parametry pouze ze signálu hlavového mikrofonu, který měl hladinu šumu nižší než signál z mikrofonu zvukoměru ve vzdálenosti 30 cm. Tím se zamezilo špatnému určení znělých a neznělých částí z důvodu zašumění signálu. Podrobnosti lze nalézt v práci Šrámková a kol. (2015).

#### **4.1. Detekce nejnižších fonací**

Pouze znělé části fonace byly zahrnuty do určení nejnižší hlasitosti. Byl nalezen segment znělé fonace v trvání 1 sekundy, který měl nejnižší ekvivalentní hladinu akustického tlaku (váhový filtr A). Tento segment byl poté použit pro určení nejnižší hlasitosti hlasu.

#### **4.2. Stanovení hlasitosti**

Stanovení hlasitosti proběhlo pomocí doplňku k MatLabu společnosti Genesis S. A. (2009a) Genesis Loudness Toolboxu. Ten poskytuje předepsané kódy, podle kterých se stanovuje hlasitost dle norem ISO 532 a ANSI S3.4 (Genesis S. A. 2009b), které využívají jak model Zwicker a Fastla, tak i model Glasberga a Moora. Technické specifikace a návod na použití jsou definovány v Genesis S. A. (2009c).

#### **4.3. Statistické zpracování dat**

Pro deskriptivní statistiku dat byl použit program společnosti OriginLab (2016) OriginPro. Jako primární parametry byly určeny průměr, směrodatná odchylka (SD), minimum, maximum a 5% a 95% percentil (P5 a P95). Zároveň byl z těchto parametrů vytvořen přehledný krabicový graf. Normalita dat byla ověřena Jarque-Bera testem v programu MatLab.

## 5. Výsledky

V tabulce č. 2 jsou uvedeny nejnižší naměřené hodnoty hlasitosti, hladin hlasitosti a ekvivalentních vážených hladin akustického tlaku pro každého z účastníků kromě účastnice č. 7. U té nebylo možné tyto hodnoty určit z důvodu absence znělé fonace delší než jedna sekunda, což byla námi zvolená podmínka stacionarity zvuku.

**Tabulka č. 2: Zjištěné nejnižší hodnoty hlasitosti a hladiny hlasitosti podle normy ISO 532 a ANSI S3.4, a odpovídající frekvenčně vážené ekvivalentní hladiny akustického tlaku pro ženy. Vše ve vzdálenosti 30 cm.**

Subjekt č.	Hlasitost		Hladina hlasitosti		Hl. akustického tlaku	
	dle ANSI S3.4 [sony]	dle ISO 532 [sony]	dle ANSI S3.4 [fóny]	dle ISO 532 [fóny]	A-vážení [dB]	C-vážení [dB]
1	5,2	4,2	63,1	60,8	47,5	56,8
2	8,4	6,4	70,5	66,7	52,0	59,4
3	5,2	4,5	63,1	61,8	51,8	57,7
4	3,8	3,1	58,5	56,3	47,2	53,2
5	6,1	4,9	65,6	62,9	48,9	55,2
6	7,0	5,6	67,6	64,8	52,2	57,1
7	nenalezena znělá fonace delší než 1 sekunda					
8	4,1	4,0	59,6	60,1	52,3	60,6
9	4,0	3,4	59,4	57,5	44,1	50,7
10	10,2	9,3	73,3	72,2	60,9	65,5
11	5,2	4,3	63,1	61,0	47,9	57,6
12	4,5	4,1	60,9	60,2	50,1	58,4
13	5,0	4,2	62,4	60,8	47,6	56,2
14	3,8	3,8	58,7	59,1	48,8	57,9
15	5,6	4,8	64,3	62,5	49,8	56,0
16	3,7	3,1	58,1	56,3	43,6	52,0
17	2,8	2,3	54,2	52,2	41,2	48,4
18	3,0	3,1	55,1	56,4	49,8	58,0
19	3,2	2,7	56,0	54,1	42,3	51,8
20	3,3	3,0	56,3	56,0	45,7	54,5
21	3,9	3,4	58,9	57,8	50,1	58,0
22	3,9	3,2	59,0	56,9	44,7	53,1
23	2,5	2,4	52,5	52,7	43,7	52,8
24	3,2	2,5	56,1	53,4	41,5	50,5
25	4,3	3,8	60,3	59,2	50,2	58,3
26	3,9	3,4	59,1	57,8	47,2	54,3
27	4,3	3,5	60,3	58,0	45,8	52,2
28	5,4	4,5	63,8	61,7	50,3	56,4
29	6,5	5,8	66,6	65,3	52,0	60,7
30	4,9	3,9	62,3	59,6	45,4	52,9
31	4,6	3,6	61,2	58,6	45,5	54,4
32	4,5	3,7	61,0	58,8	44,6	54,5
33	6,7	5,3	66,9	64,1	49,4	55,8
34	4,6	3,8	61,4	59,2	46,6	55,9
35	3,7	3,2	58,2	56,8	46,2	54,0
36	3,8	3,8	58,4	59,3	49,7	58,7
37	7,3	6,0	68,2	65,8	52,7	60,5
38	5,2	4,7	63,3	62,2	49,1	56,5
39	1,4	1,5	44,2	45,6	32,9	43,8
40	2,5	2,2	52,5	51,1	41,4	51,1
<b>průměr</b>	<b>4,6</b>	<b>4,0</b>	<b>60,6</b>	<b>59,1</b>	<b>47,5</b>	<b>55,4</b>
<b>SD</b>	<b>1,7</b>	<b>1,4</b>	<b>5,4</b>	<b>4,8</b>	<b>4,6</b>	<b>3,9</b>
<b>medián</b>	<b>4,3</b>	<b>3,8</b>	<b>60,3</b>	<b>59,2</b>	<b>47,6</b>	<b>55,9</b>
<b>min</b>	<b>1,4</b>	<b>1,5</b>	<b>44,2</b>	<b>45,6</b>	<b>32,9</b>	<b>43,8</b>
<b>P5</b>	<b>2,5</b>	<b>2,2</b>	<b>52,5</b>	<b>51,1</b>	<b>41,2</b>	<b>48,4</b>
<b>P95</b>	<b>8,4</b>	<b>6,4</b>	<b>70,5</b>	<b>66,7</b>	<b>52,7</b>	<b>60,7</b>
<b>max</b>	<b>10,2</b>	<b>9,3</b>	<b>73,3</b>	<b>72,2</b>	<b>60,9</b>	<b>65,5</b>

V tabulce č. 3 se analogicky nacházejí nejnižší naměřené hodnoty hlasitosti, hladin hlasitosti a ekvivalentních vážených hladin akustického tlaku pro muže. U mužů nenastal žádný problém s délkou znělých částí fonace.

**Tabulka č. 3: Zjištěné nejnižší hodnoty hlasitosti a hladiny hlasitosti podle normy ISO 532 a ANSI S3.4, a odpovídající vážené hladiny akustického tlaku pro muže. Vše ve vzdálenosti 30 cm.**

Subjekt č.	Hlasitost		Hladina hlasitosti		Hl. akustického tlaku	
	dle ANSI S3.4 [sony]	dle ISO 532 [sony]	dle ANSI S3.4 [fóny]	dle ISO 532 [fóny]	A-vážení [dB]	C-vážení [dB]
1	2,2	2,2	50,9	51,1	38,8	51,3
2	5,2	5,1	63,2	63,6	49,9	62,8
3	3,4	2,7	56,8	54,2	40,5	56,9
4	3,4	3,1	56,8	56,2	42,6	58,9
5	3,1	2,7	55,6	54,4	40,7	58,4
6	2,9	2,3	54,3	52,2	39,1	55,9
7	1,0	1,3	40,4	44,0	36,0	49,5
8	5,5	4,6	63,9	61,9	47,7	55,1
9	5,1	4,3	62,9	61,2	45,9	56,9
10	1,9	1,5	48,5	45,9	34,8	51,8
11	2,3	2,1	51,2	50,5	38,5	53,1
12	1,2	1,3	42,4	43,8	35,1	50,0
13	1,4	1,3	44,2	44,1	34,6	48,8
14	5,3	4,0	63,5	60,1	44,4	54,4
15	7,2	6,0	68,0	65,9	51,6	60,9
16	1,7	1,3	46,8	44,0	31,8	44,2
17	2,8	2,3	54,3	52,0	40,3	53,1
18	2,9	2,5	54,7	53,5	38,8	53,3
19	5,8	5,3	64,9	64,0	48,9	60,1
20	4,8	3,5	61,8	58,2	43,2	51,6
21	7,6	6,4	68,9	66,9	50,0	63,5
22	5,8	4,6	64,9	61,9	45,9	55,7
23	3,5	3,2	57,3	56,9	43,1	55,2
24	3,4	2,8	56,8	55,1	40,6	51,7
25	4,5	3,6	61,0	58,7	44,9	57,4
26	3,5	2,8	57,3	54,8	39,1	54,3
27	8,5	7,4	70,7	68,8	54,0	63,6
28	4,2	3,4	60,0	57,8	42,7	55,9
29	3,9	3,1	58,7	56,1	40,5	54,3
30	3,1	2,5	55,6	53,5	38,6	49,1
31	5,6	4,4	64,4	61,3	46,9	56,5
32	4,0	3,2	59,4	57,1	43,9	57,7
33	9,5	8,8	72,1	71,4	54,5	69,3
34	4,4	3,6	60,8	58,4	42,7	53,9
35	5,2	3,9	63,3	59,6	45,0	52,1
36	1,7	1,6	47,2	46,4	34,7	49,5
37	2,5	2,1	52,2	51,0	36,9	54,0
38	6,5	5,2	66,6	63,8	45,7	60,3
39	3,7	3,0	57,9	55,9	41,6	52,9
40	2,3	2,3	51,1	52,1	38,7	53,9
<b>průměr</b>	<b>4,1</b>	<b>3,4</b>	<b>57,8</b>	<b>56,2</b>	<b>42,3</b>	<b>55,2</b>
<b>SD</b>	<b>2,0</b>	<b>1,7</b>	<b>7,6</b>	<b>7,0</b>	<b>5,4</b>	<b>4,8</b>
<b>medián</b>	<b>3,6</b>	<b>3,1</b>	<b>57,6</b>	<b>56,2</b>	<b>42,1</b>	<b>54,3</b>
<b>min</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	<b>40,4</b>	<b>43,8</b>	<b>31,8</b>	<b>44,2</b>
<b>P5</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>43,3</b>	<b>44,0</b>	<b>34,6</b>	<b>49,0</b>
<b>P95</b>	<b>8,1</b>	<b>6,9</b>	<b>69,8</b>	<b>67,9</b>	<b>52,8</b>	<b>63,6</b>
<b>max</b>	<b>9,5</b>	<b>8,8</b>	<b>72,1</b>	<b>71,4</b>	<b>54,5</b>	<b>69,3</b>

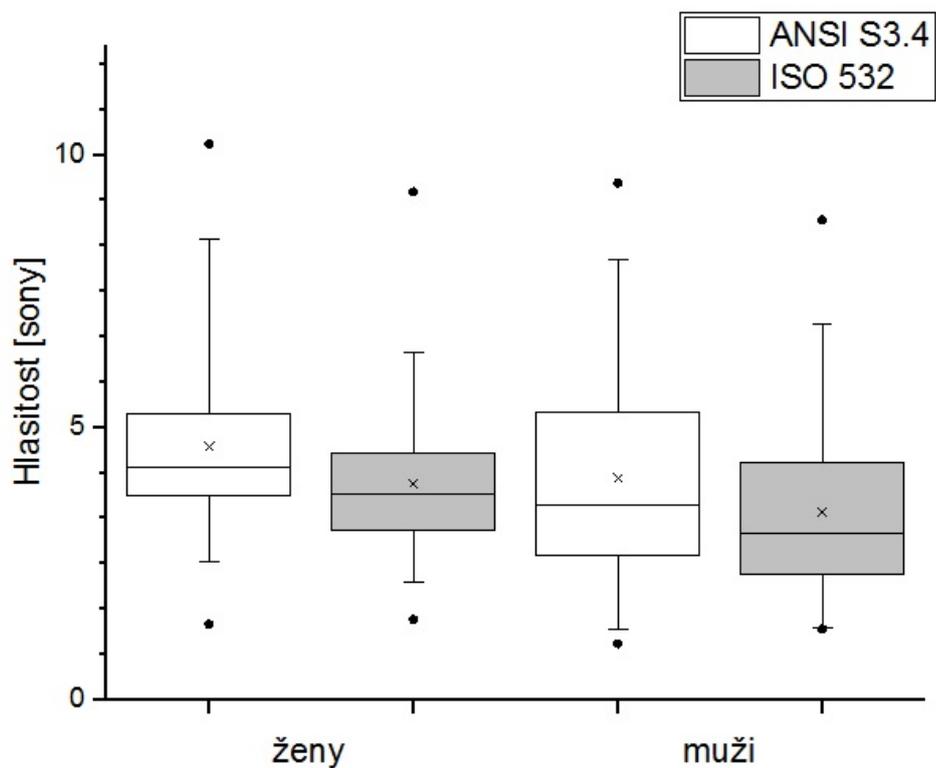
V tabulce č. 4 se nachází výsledky testu normality pro jednotlivé sloupce tabulek č. 1 a č. 2. Parametr  $h = 1$  znamená, že hodnoty nenabývají normálního rozlišení. Parametr  $h = 0$  znamená, že hodnoty nabývají normálního rozložení a nebo je k dispozici málo dat k zamítnutí hypotézy o jejich normálním rozložení.

Lze vidět, že podmínku normality dat u žen nesplnily hodnoty hlasitosti dle normy ANSI S3.4 i ISO 532 a také hodnoty A-vážených hladin akustického tlaku. U mužů podmínku normality dat nesplnily pouze hodnoty hlasitosti dle ISO 532. Z tohoto důvodu byly u všech hodnot spočítány mediány a percentily, které v těchto případech lépe popisují variabilitu dat, než průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

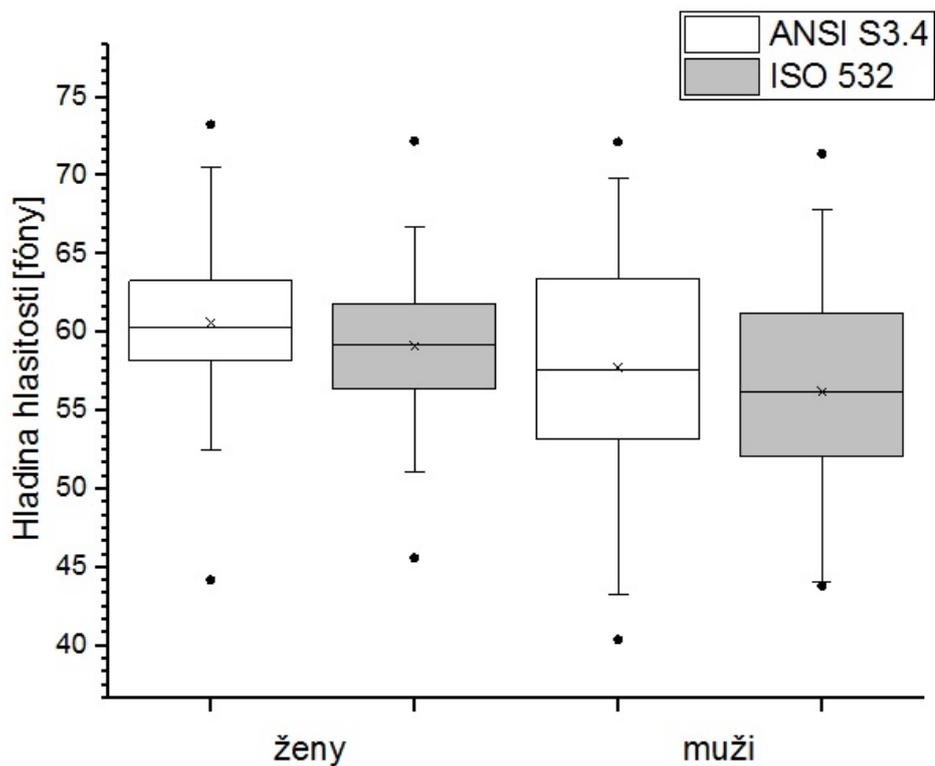
**Tabulka č. 4: Výsledky Jarque-Bera testu normality dat.**

		Hlasitost		Hladina hlasitosti		Hl. akustického tlaku	
		dle ANSI S3.4	dle ISO 532	dle ANSI S3.4	dle ISO 532	A-vážení	C-vážení
<i>ženy</i>	<i>h</i>	1	1	0	0	1	0
	<i>p</i>	0,0080	0,0010	0,0879	0,1581	0,0145	0,0958
<i>muži</i>	<i>h</i>	0	1	0	0	0	0
	<i>p</i>	0,0574	0,0043	0,5000	0,5000	0,4458	0,0595

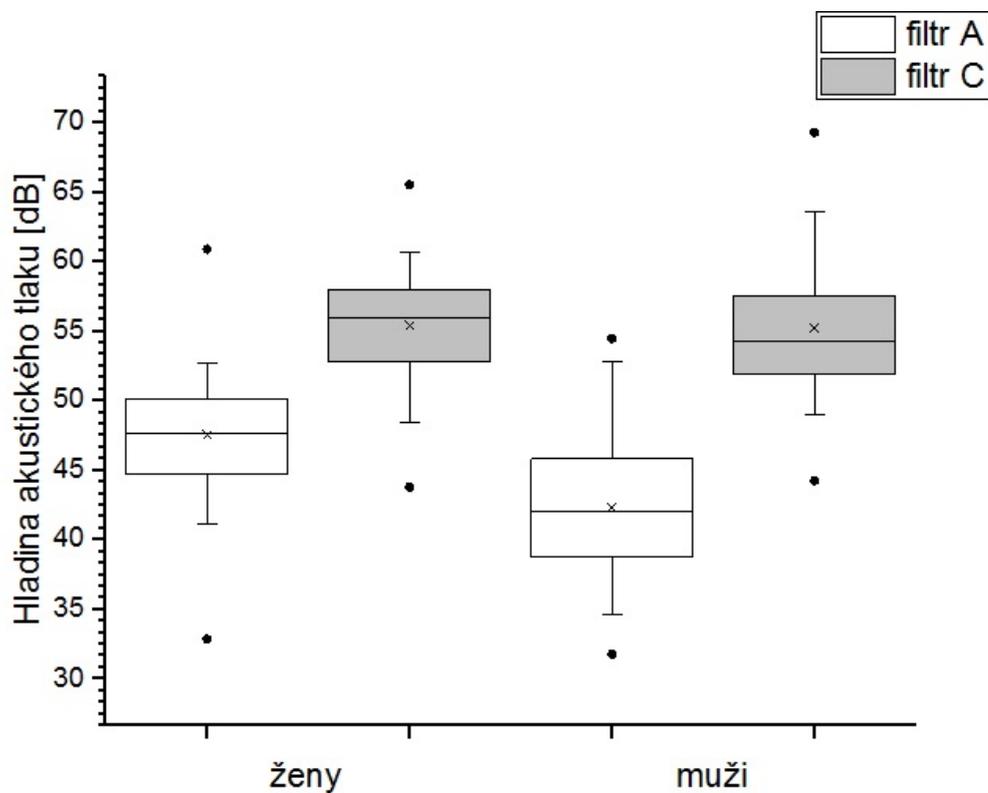
Na obrázcích č. 9, č. 10 a č. 11 lze najít graficky znázorněné deskriptivní statistiky výsledných hodnot. Konkrétně jde o hlasitosti podle jednotlivých norem, hladiny hlasitosti podle jednotlivých norem a A-vážené a C-vážené hladiny akustického tlaku. V každém obrázku jsou zobrazeny hodnoty pro obě pohlaví.



Obrázek č. 9: Statistické parametry hlasitosti zakreslené do krabicového grafu. Minimum a maximum je vyznačeno tečkou. 5% a 95% percentil jsou vyznačeny krátkými horizontálními čarami. Hranice boxu značí první a třetí kvartil (nebo také 25% a 75% percentil). Dlouhá horizontální čára značí medián a křížek aritmetický průměr. Hodnoty platí pro vzdálenost 30 cm.



Obrázek č. 10: Statistické parametry hladin hlasitosti zakreslené do krabicového grafu. Zobrazené parametry jsou stejné jako na obrázku č. 8 a také platí pro vzdálenost 30 cm.



Obrázek č. 11: Statistické parametry frekvenčně vážených ekvivalentních hladin akustického tlaku zakreslené do krabicového grafu. Zobrazené parametry jsou stejné jako na obrázku č. 8 a také platí pro vzdálenost 30 cm.

V tabulce č. 5 jsou zobrazeny průměrné rozdíly mezi jednotlivými zjištěnými veličinami u žen. V prvním sloupci můžeme vidět rozdíly mezi hlasitostí stanovenou podle normy ISO 532 a ANSI S3.4. V druhém sloupci rozdíly mezi těmito normami pro hladiny hlasitosti. Ve třetím a čtvrtém sloupci se nachází rozdíly hladin hlasitosti podle ANSI S3.4 a frekvenčně vážených ekvivalentních hladin akustického tlaku. V posledních dvou sloupcích jsou analogicky k předchozím dvěma sloupcům zobrazeny rozdíly pro normu ISO 532 a frekvenčně vážené ekvivalentní hladiny akustického tlaku

**Tabulka č. 5: Deskriptivní statistika rozdílů mezi veličinami pro ženy.**

	hlasitost ANSI S3.4 vs. ISO 532 [sony]	hl. hlasitosti ANSI S3.4 vs. ISO 532 [fóny]	hl. hlasitosti ANSI S3.4 vs. vážení A [fóny vs. dB]	hl. hlasitosti ANSI S3.4 vs. vážení C [fóny vs. dB]	hl. hlasitosti ISO 532 vs. vážení A [fóny vs. dB]	hl. hlasitosti ISO 532 vs. vážení C [fóny vs. dB]
<b>průměr</b>	<b>0,7</b>	<b>1,5</b>	<b>13,1</b>	<b>5,2</b>	<b>11,6</b>	<b>3,7</b>
<b>SD</b>	<b>0,4</b>	<b>1,2</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>2,1</b>	<b>2,5</b>
<b>medián</b>	<b>0,7</b>	<b>1,8</b>	<b>14,2</b>	<b>5,8</b>	<b>12,2</b>	<b>3,8</b>
<b>min</b>	<b>-0,1</b>	<b>-1,4</b>	<b>5,3</b>	<b>-2,9</b>	<b>6,6</b>	<b>-1,6</b>
<b>P5</b>	<b>0,0</b>	<b>-1,0</b>	<b>8,5</b>	<b>-0,4</b>	<b>7,8</b>	<b>-0,2</b>
<b>P95</b>	<b>1,4</b>	<b>2,8</b>	<b>16,9</b>	<b>10,6</b>	<b>14,3</b>	<b>7,7</b>
<b>max</b>	<b>2,1</b>	<b>3,8</b>	<b>18,5</b>	<b>11,2</b>	<b>14,7</b>	<b>8,3</b>

V tabulce č. 6 vidíme analogické hodnoty tabulky č. 5, zde pro muže.

**Tabulka č. 6: Deskriptivní statistika rozdílů mezi veličinami pro muže.**

	hlasitost ANSI S3.4 vs. ISO 532 [sony]	hl. hlasitosti ANSI S3.4 vs. ISO 532 [fóny]	hl. hlasitosti ANSI S3.4 vs. vážení A [fóny vs. dB]	hl. hlasitosti ANSI S3.4 vs. vážení C [fóny vs. dB]	hl. hlasitosti ISO 532 vs. vážení A [fóny vs. dB]	hl. hlasitosti ISO 532 vs. vážení C [fóny vs. dB]
<b>průměr</b>	<b>0,6</b>	<b>1,6</b>	<b>15,5</b>	<b>2,6</b>	<b>13,9</b>	<b>1,0</b>
<b>SD</b>	<b>0,4</b>	<b>1,5</b>	<b>3,2</b>	<b>4,9</b>	<b>2,1</b>	<b>3,9</b>
<b>medián</b>	<b>0,6</b>	<b>2,0</b>	<b>16,2</b>	<b>2,9</b>	<b>14,3</b>	<b>1,5</b>
<b>min</b>	<b>-0,3</b>	<b>-3,7</b>	<b>4,4</b>	<b>-9,1</b>	<b>8,1</b>	<b>-6,2</b>
<b>P5</b>	<b>0,0</b>	<b>-1,0</b>	<b>9,5</b>	<b>-4,8</b>	<b>9,5</b>	<b>-5,4</b>
<b>P95</b>	<b>1,3</b>	<b>3,5</b>	<b>19,0</b>	<b>9,3</b>	<b>16,9</b>	<b>6,6</b>
<b>max</b>	<b>1,4</b>	<b>3,7</b>	<b>20,8</b>	<b>11,2</b>	<b>18,1</b>	<b>7,5</b>

Z tabulky č. 5 a č. 6 vyplývá, že průměrný rozdíl v hlasitosti podle norem ANSI S3.4 a ISO 532 je pro muže 0,6 sonu a pro ženy 0,7 sonu. Průměrný rozdíl v hladinách hlasitosti podle těchto norem je 1,5 fónu pro ženy a 1,6 fónu pro muže.

Mimo jiné lze také vidět, že A-vážené hodnoty akustického tlaku, které se používají jako přiblížení vnímané hlasitosti tichých zvuků se od hladin hlasitosti obou norem liší o více než 10 jednotek. U hladin hlasitosti podle ANSI S3.4 je to 13,1 jednotek pro ženy a 15,5 jednotek pro muže. U hladin hlasitosti dle normy ISO 532 je to 11,6 jednotek pro ženy a 13,9 jednotek pro muže. Pro C-vážené hodnoty je tento rozdíl výrazně menší. Podle normy ANSI S3.4 je to 5,2 jednotek pro ženy a 2,6 jednotek pro muže a podle normy ISO 532 pouze 3,7 jednotek pro ženy a 1,0 jednotek pro muže.

## 6. Diskuze

Pro stanovení hlasitosti nejtišších fonací zdravých osob byly použity dva různé modely. Jednalo se o Zwickerův a Fastlův model pro stacionární zvuky definovaný v normě ISO 532 a Moorův a Glasbergův model pro stacionární zvuky definovaný v normě ANSI S3.4. Modely pro stacionární zvuky byly použity proto, neboť nás zajímalo stanovení hlasitosti pro nejtišší fonace v trvání jedné sekundy, které byly považovány za přibližně stacionární.

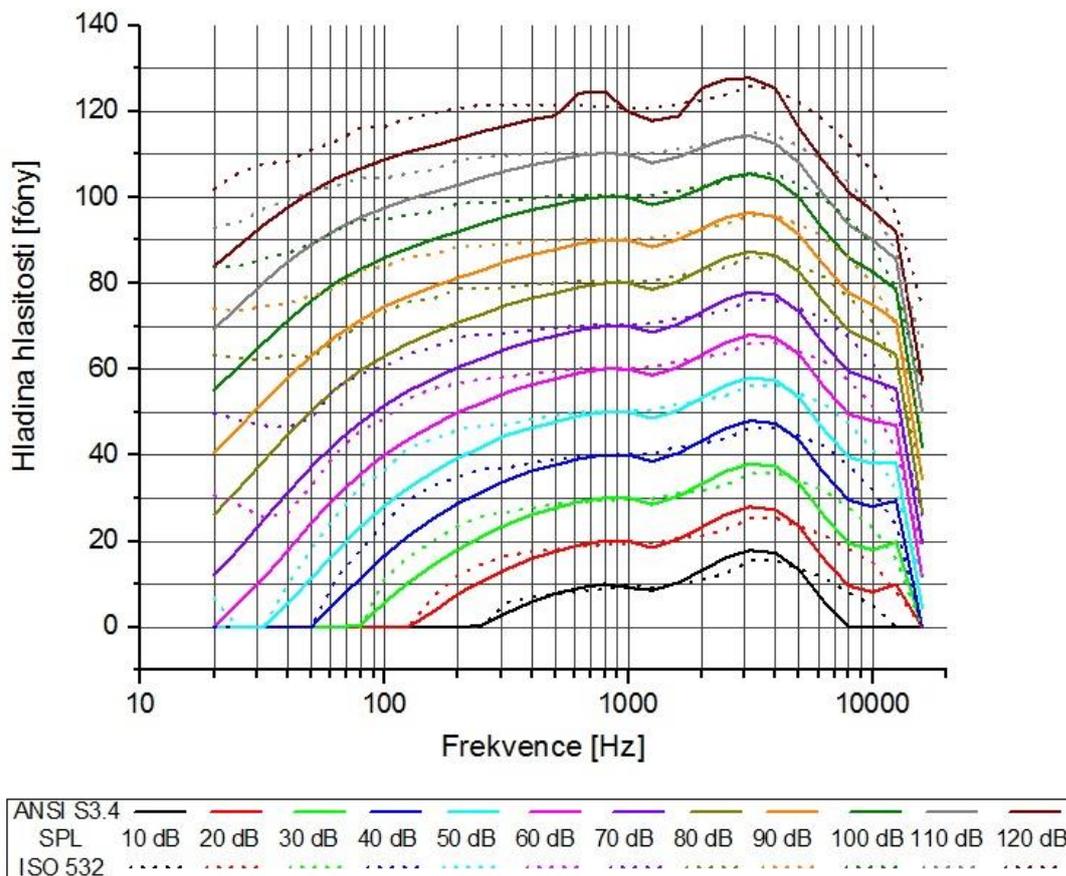
Podle normy ISO 532 jsou obecně výsledné průměrné hodnoty hlasitosti nižší než průměrné hodnoty určené dle normy ANSI S3.4 viz obrázek č. 9. Pro ženy je medián nejnižších hodnot hlasitosti 4,3 sonu (5% a 95 % percentil je 2,5 a 8,4 sonu) podle ANSI S3.4 a 3,8 sonu (5% a 95 % percentil je 2,2 a 6,4 sonu) podle ISO 532. U mužů jsou hodnoty nižší než u žen, a to  $4,1 \pm 2,0$  sonu podle ANSI S3.4 a podle ISO 532 je medián 3,1 sonu (5% a 95 % percentil je 1,3 a 8,8 sonu). Přesto, že jsou průměrné hodnoty hlasitosti u mužů nižší než u žen, minimální a maximální hodnoty jsou téměř totožné (dle ANSI S3.4 u žen 1,4 a 10,2 sonu; u mužů 1,0 a 9,5 sonu; dle ISO 532 u žen 1,5 a 9,3 sonu; u mužů 1,3 a 8,8 sonu).

Na obrázku č. 10 můžeme vidět statistické parametry hladin hlasitosti nejtišších fonací. Nejnižší průměrné hodnoty hladin hlasitosti u žen jsou  $60,6 \pm 5,4$  fónu podle ANSI S3.4 a  $59,1 \pm 4,8$  fónu podle ISO 532. U mužů jsou výsledné nejnižší průměrné hodnoty hladin hlasitosti  $57,8 \pm 7,6$  fónu podle ANSI S3.4 a  $56,2 \pm 7,0$  fónu podle ISO 532.

Pokud porovnáme hodnoty hladin hlasitosti u jednotlivých subjektů pro každou z norem, můžeme vidět, že se jejich hodnoty liší v průměru o méně než 2 fóny (viz tabulka č. 5 a č. 6). U žen je to 1,5 fónu a u mužů 1,6 fónu.

Abychom poodhalili možnou příčinu těchto rozdílů, je vhodné se podívat na podobnost, nebo spíše rozdílnost hladin hlasitosti různých norem pro čisté tóny (viz obrázek č. 12). Na tomto obrázku lze vidět rozdíly mezi hladinami hlasitosti jednotlivých norem stejně jako změnu hladin hlasitost při frekvenčním posuvu ze 100 Hz na 200 Hz. Tyto rozdíly dosahují téměř 10 fónů. Čisté tóny se používají jen k upřesnění frekvenční citlivosti ucha. U hlasu ale nejde pouze o čisté tóny – jsou zde i vyšší harmonické, které mohly způsobit rozdíly s tímto obrázkem.

Hlavním důvodem rozdílů hodnot hladin hlasitosti mezi pohlavími je však zřejmě rozdílná základní frekvenci kmitání hlasivek. Průměrná nejnižší základní frekvence u nahrávek mužů totiž byla 120 Hz zatímco u žen 236 Hz. Proto se dají očekávat rozdíly asi 8 fónů mezi pohlavími a z tohoto důvodu byly nahrávky mužů a žen analyzovány zvlášť.



Obrázek č. 12: Graf závislosti hladiny hlasitosti pro vybrané hladiny akustického tlaku a frekvence pro normy ISO 532 a ANSI S3.4. Vzhledem k tomu, že norma ANSI S3.4 umožňuje převod hodnot pouze do 342 sonů, jsou zde hodnoty pro hladinu akustického tlaku 130 dB a frekvence 0,8 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 2,5 kHz, 3,125 kHz a 4 kHz převedeny na hladiny hlasitosti pomocí vzorce 10, a ne pomocí tabulky č. 1.

Vážení pomocí frekvenčního filtru A bylo zavedeno jako přiblížení vnímané hlasitosti. Proto by se hodnoty hladin hlasitosti měly blížit hodnotám vážených hladin akustického tlaku pomocí filtru A. Z tabulek č. 5 a č. 6 lze ale vidět, že hledané přiblížení v těchto výsledcích není ani u hodnot stanovených pomocí normy ANSI S3.4, ani u hodnot stanovených pomocí ISO 532. Jedním z vysvětlení těchto rozdílů

může být skutečnost, že váhový filtr A byl odvozen od hladin stejné hlasitosti vytvořených před normami ISO 532, ISO 226 i ANSI S3.4.

Výsledky této práce indikují, že A-vážené hodnoty akustického tlaku nelze brát jako přibližné hodnoty hladin hlasitosti tichých fonací – průměrná hodnota rozdílu mezi decibely a fóny je přibližně 12 jednotek u žen a přibližně 14 jednotek pro muže.

Překvapivě, C-vážené hodnoty akustického tlaku vykázaly bližší hodnoty k hladinám hlasitosti, než hodnoty A-vážené. Zde je rozdíl mezi decibely a fóny přibližně 4 jednotky pro ženy a přibližně 2 pro muže.

V této práci byly zpracovávány stejné nahrávky, jako analyzovala ve své práci Šrámková a kolektiv (2015). Výsledné průměrné hodnoty vážených hladin akustického tlaku v této práci jsou u žen  $55,4 \pm 3,9$  dB pro vážení C. Medián pro vážení A je 47,6 dB a 5% a 95 % percentil je 41,2 a 52,7 dB. U mužů jsou výsledné hodnoty  $42,3 \pm 5,4$  dB pro vážení A,  $55,2 \pm 4,8$  dB pro vážení C. Tyto hodnoty jsou v souladu s výsledky publikovanými Šrámkovou a kolektivem (2015) a to včetně mediánu, minima, maxima a 5% a 95% percentilem. Dá se proto předpokládat, že stanovený postup v této práci dává správné výsledky.

Vzhledem k závislosti výsledků na použité normě by bylo vhodné stanovit, která z nich lépe vystihuje a odpovídá lidskému vjemu. To však nelze jednoduše zjistit, jak tvrdí Webster a Jiříček (2014). Podle nich by k takovému stanovení bylo třeba provést rozsáhlý psychoakustický výzkum, aby bylo možné veškeré výsledky porovnat a rozhodnout.

Vzhledem ke zjištěným rozdílům se však dá říct, že hlasitost tichých fonací stanovená podle normy ANSI S3.4 bude ve většině případů vyšší než podle normy ISO 532. V této práci je to v průměru až o 1 son. Hladina hlasitosti převedená z hlasitosti potom bude rovněž vyšší podle ANSI S3.4 a to průměrně o 1,6 fónu.

Webster a Jiříček (2014) také udávají informaci, že Mezinárodní organizace pro normalizaci chystá revizi své normy ISO 532. Předpokládá se, že tato norma bude rozdělena na dvě části, z nichž každá bude používat jiný model pro výpočet hlasitosti (Zwickerův a Moorův model). Ačkoliv se toto řešení nezdá optimální, neboť oba modely vedou k jiným výsledkům, je toto řešení odrazem současného stavu psychoakustických poznatků. Lze očekávat, že v budoucnu bude docházet k upřesňování těchto modelů, které však vyžadují ještě nemalé výzkumné úsilí.

## 7. Závěr

Z obdržených výsledků, lze na otázky stanové v cílech práce odpovědět následovně:

A. Jaké jsou nejnižší hladiny hlasitosti pro lidský hlas ve vzdálenosti 30 cm?

Nejnižší hladiny hlasitosti závisí na použitém modelu pro výpočet hlasitosti. Podle modelu Zwickera a Fastla definovaném v normě ISO 532 jsou nejnižší hladiny hlasitosti pro ženy  $59,1 \pm 4,8$  fónu a pro muže  $56,2 \pm 7,0$  fónu. Podle modelu Glasberga a Moora definovaném v normě ANSI S3.4 jsou tyto nejnižší hladiny hlasitosti pro ženy  $60,6 \pm 5,4$  fónu a pro muže  $57,8 \pm 7,6$  fónu.

B. Jak moc se tyto hladiny liší od A-vážených a C-vážených hladin akustického tlaku?

Výsledky této práce značí, že A-vážené ekvivalentní hladiny akustického tlaku v dB jsou výrazně nižší než hodnoty ve fónech. Jejich rozdíl je více než 12 jednotek pro ženy a více než 14 jednotek pro muže. Z toho vyplývá, že A-vážené ekvivalentní hladiny akustického tlaku nelze brát jako přibližné hodnoty hladin hlasitosti. U C-vážených hladin hlasitosti je tento rozdíl menší – přibližně 4 jednotky pro ženy a 2 pro muže.

C. Jak moc se od sebe liší hlasitosti a hladiny hlasitosti nejnižších fonací určených podle dvou současných existujících norem ISO 532 a ANSI S3.4?

Hlasitost stejně jako hladina hlasitosti stanovená pomocí normy ISO 532 je ve velké většině případů nižší než hlasitosti a hladina hlasitosti stanovená pomocí normy ANSI S3.4. Průměrně se od sebe liší hlasitosti jednotlivých norem u žen o 0,7 sonu a u mužů o 0,6 sonu. U hladin hlasitosti jednotlivých jsou průměrné rozdíly u žen 1,5 fónu a u mužů 1,6 fónu.

## 8. Literatura

1. ANSI S3.4 (2007) American National Standard: Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds. Acoustical Society of America. New York.
2. Boersma P, Weenink D (2013) Praat: doing phonetics by computer 6.0.03 [software] [cit. 11. 4. 2016] Dostupné z: <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>
3. Brüel & Kjaer (2013) Measuring sound: Lecture Note. Brüel & Kjaer. Naerum, Denmark.
4. ČSN EN 61672-1 (2003) Elektroakustika – Zvukoměry - Část 1: Technické požadavky. Český normalizační institut. Praha.
5. ČSN ISO 226 (2003) Akustika – Normované křivky stejné hlasitosti. Český normalizační institut. Praha.
6. ČSN ISO 532 (1993) Metóda pre výpočet hlasitosti. Český normalizační institut. Praha.
7. Everest FA (2001a) Fundamental of Sounds and Sound Levels and the Decibel. In: The Master Handbook Of Acoustics. 4th ed. Str. 1–39. McGraw-Hill, New York.
8. Everest FA (2001b) Speech, Music and Noise. In: The Master Handbook Of Acoustics. 4th ed. Str. 89–114. McGraw-Hill, New York.
9. Fletcher H (1940) Auditory Patterns. Reviews of Modern Physics 12, str. 47–65.
10. Genesis S. A. (2009a) Genesis Loudness Toolbox [software] [cit. 29. 3. 2016] Dostupné z: <http://genesis-acoustics.com/en/index.php?page=33>
11. Genesis S. A. (2009b) Loudness\_indicators\_description-LoudnessToolbox.pdf [online][cit. 29. 3. 2016] Dostupné z: <http://genesis-acoustics.com/en/index.php?page=33>
12. Genesis S. A. (2009c) UsersGuide\_LoudnessToolbox.pdf [online] [cit. 29. 3. 2016] Dostupné z: <http://genesis-acoustics.com/en/index.php?page=33>
13. Halliday D, Resnick R, Walker J (2008) Vlny I a II. In: Fyzika I. 2. Vydání. Str. 431-483. Vutium, Brno.
14. Hellmuth T, Michal J, Potužníková D (2013) Hluk v komunálním prostředí: Ekvivalentní hladina akustického tlaku [online] [cit. 5. 4. 2016]. Dostupné z: [http://www.khshk.cz/e-learning/kurs2a/kapitola\\_17\\_\\_ekvivalentn\\_hladina\\_akustickho\\_tlaku.html](http://www.khshk.cz/e-learning/kurs2a/kapitola_17__ekvivalentn_hladina_akustickho_tlaku.html)

15. Charbonneau J, Novak C, Ule H (2009) Loudness Prediction Model Comparison Using The Equal Loudness Contours. *Canadian Acoustics* 37-3, str. 64–65.
16. Ma EPM, Yiu EML (2011) Voice Range Profile: Phog. In: *Handbook of Voice Assessments*. Str. 253–267. Plural Publishing, San Diego.
17. Moore BCJ (2007) Psychoacoustics. In: Rossing TD (ed): *Springer Handbook of Acoustics*. str. 459–501. Springer, New York.
18. Sanchez K, Oates J, Dacakis G, Holmberg EB (2014) Speech and voice range profiles of adults with untrained normal voices: Methodological implications. *Logopedics Phoniatics Vocology* 39, str. 62–71.
19. Sedláček K (1956) *Základy audiologie*. Státní zdravotnické nakladatelství, Praha.
20. Scheuren J (2014) ISO 532 – Living and working with alternative loudness standards presented at Inter.noise 2014, Melbourne, Australia.
21. Schutte HK (2009) The Phonetogram: Measurement and interpretation. In: Fried MP, Ferlito A (eds): *The Larynx*. Str. 245–251. Plural Publishing, San Diego.
22. Schutte HK, Seidner W (1983) Recommendation by the Union of European Phoniaticians (UEP): Standardizing Voice Area Measurement/Phonetography. *Folia phoniatica* 35-6, str. 286–288.
23. Stevens SS (1955) The Measurement of Loudness, *The Journal of the Acoustical Society of America* 27, str. 815–829.
24. Šrámková H (2010) *Vyšetření dynamického rozsahu akustického tlaku u lidského hlasu*. Diplomová práce, Univerzita Palackého v Olomouci.
25. Šrámková H, Granqvist S, Fürst T, Švec JG (2011) Měření dynamického rozsahu lidského hlasu. *Akustické listy* 17-3, str. 11–18.
26. Šrámková H, Granqvist S, Herbst CT, Švec JG (2015) The softest sound levels of the human voice in normal subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America* 137-1, str. 407–418.
27. Švec JG, Granqvist S (2010) Guidelines for selecting microphones for human voice production research. *American Journal of Speech-Language Pathology* 19-4, str. 356–368.
28. Titze IR (2000) Control of Vocal Intensity and Efficiency. In: *Principles of voice production*. str. 243–251. National Center for Voice and Speech. Iowa City.
29. Webster P, Jiříček O (2014) A Brief Comparison of Loudness Evaluation Models. *Akustické listy* 20-2, str. 8–11.

## 9. Přílohy

### Příloha č. 1: Skript programu MatLab použitý ke zpracování nahrávek.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FINDING MINIMUM OF TIME-WEIGHTED FILTERED SPL FROM VOICED SEGMENTS
% needs:
% 2-channel audio recording in wav file
% Channel 1 - head-mounted mic signal
% Channel 2 - signal from mic at 30 cm (sound level meter microphone)
% calculation of calibration constants c1/c2 for head-mounted mic/SLM
% twice filtration of original record (reducing noise) - (A, C, Z and hp(S) filters)
% calculation of pressure p (from amplitude y) and doing time-weighting (fast)
% calculation of SPL from p
% finding voiced/unvoiced segments with using file of frequencies (f0.txt) from Praat
% in this file (f0.txt) the undefined frequencies were replaced by the value -1
% adding constant 0.375 sec to each beginning of voiced segment (slope for
% time-weighting) - this part made also unvoiced (=-1)
% finding of corresponding indexes for voiced parts in record
% finding the minimum from all SPLs
% 1.12.2015 correction for the case when no unvoiced part is present
% 26.1.-11.3.2016 adding Loudness analysis using the Genesis Loudness Toolbox
% Added a sinusoid signal possibility

close all
clear all
clc
% close all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% choose case 1 }sinusoid} or case 2 (calibrated signals)
sg = 1

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% define weighting
weighting1='A'; %type of filtration
weighting2='Z';
pref=2*10^-5;

if sg == 1
    % define sinusoid - case sg == 1
    dBL = 110 %dB
    fq = 1600 %Hz
    dur = 5.01 %duration in s
    fs = 44100 %sampling rate Hz
    os = 0.005 %onset and offset duration in s
elseif sg == 2;
    % define case sg == 2
    filenameC1 = 'c1.wav'; %record of calibration tone on second channel
    filenameC2 = 'c2.wav'; %record of vowel [a:] (1.channel = head/mounted mic, 2.channel =
    SLM)
    filenameNT = 'nejt.wav'; %original 2-channels record of softest voice
    Lr = 94; %calibration level
    %END DEFINE
else
    error('wrong sg')
end

%-----
if sg==1
    c1=1; %calibration constant (needed for later)
    %Lp = 20*log10(prms/pref) = 20*log10(A/(pref*sqrt(2)))
    Am= (10^(dBL/20))*sqrt(2);
    len = round(dur*fs);
    t = (1:len)/fs;
```

```

A(1:len)=Am;
A(1:(os*fs))=(1:(os*fs)).*Am./(os*fs);
A(len-(0:(os*fs-1)))=(1:os*fs).*Am/(os*fs);
y = A.*sin(2*pi*fq*t);
end

```

```

if sg ==2
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%===== 1. calibration
    [y, fs, nbits] = wavread(filenameC1);
    y = y(:,2);
    N = length(y);
    rms = sqrt(sum(y.^2)/N);

```

```

c2 = 10^(Lr/20)/rms;
clear y

```

```

[y, fs, nbits] = wavread(filenameC2);
N = length(y(:,2));
rms2 = sqrt(sum(y(:,2).^2)/N);

```

```

N = length(y(:,1));
rms1 = sqrt(sum(y(:,1).^2)/N);

```

```

c1 = c2*rms2/rms1;
clear y

```

```

[y, fs, nbits] = wavread(filenameNT);
y = y(:,1);
N = length(y);
t=1:length(y);
t=t/fs;

```

```
end
```

```

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%===== 2.filtration
%%%%%% filtration no.1

```

```

if (weighting1=='A')
    [B,A] = adsgn(fs);
    yf = filter(B,A,y);
elseif (weighting1=='C')
    [B,A] = cdsgn(fs);
    yf = filter(B,A,y);
elseif (weighting1=='S')
    [B,A]=butter(5,70/(fs/2),'high');
    yf=filter(B,A,y);
    yf=flipud(yf);
    yf=filter(B,A,yf);
    yf=flipud(yf);
elseif (weighting1=='Z')
    yf = y;
end

```

```

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%===== 2.filtration no.2
if (weighting2=='A')
    [B,A] = adsgn(fs);
    yff = filter(B,A,yf);
elseif (weighting2=='C')
    [B,A] = cdsgn(fs);
    yff = filter(B,A,yf);
elseif (weighting2=='S')
    [B,A]=butter(5,70/(fs/2),'high');
    yff=filter(B,A,yf);
    yff=flipud(yff);

```

```

        yff=filter(B,A,yff);
        yff=flipud(yff);
elseif (weighting2=='Z')
        yff = yf;
end

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%===== 3.time averaging
pACrelff = c1.*yff;          %relative AC pressure pACrel = pAC/pref
T=0.125;
[B,A]=butter(1,1/(2*pi*T*(fs/2)), 'low');
p=sqrt(filter(B,A,pACrelff.*pACrelff));

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%=====4. calculating SPL
LpF=20*log10(p);

if sg==2
    %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%=====5.choosing voiced segments
    %a = load('f0.txt');      % file from Praat - voiced/unvoiced segments
    F0 = load('f0.txt');      % file from Praat
        t2=F0(:,1);          % Praat time
        f0=F0(:,2);          % Praat frequency

    f01=f0(1:(end-1));
    f02=f0(2:end);

    % define variables for time and frequency to be manipulated
    n=t2;                    % time
    m=f0;                    % frequency (to be made -1 at times when Lp should not be analyzed)
    m1=f01;
    m2=f02;

    u = find((m1== -1)&(m2~-1));
    if numel(u)==0;          % no unvoiced part is present in the recording
        u = 0;
    end
    o=u+1;                  % TD = indexes 1.value after -1

    K = n(o) + 0.375;        % 0.375 s - time delay during time-weighting (= unvoiced part)

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%=====
    % finding of corresponding index of first sample after unvoiced segment (from Praat time to
    record time)
    k=1;
    while k<=(length(K));
        [oo,kki]=min(abs(K(k)-n));
        v(k)= kki;          % v - index of 1. sample after -1 (first voiced sample in each voiced
segment)
        k=k+1;
    end

    i=1;                    % interval between 1. sample after -1 and K -> replacement frequencies by
-1
    while i<=(length(K));
        mm=o(i):v(i);
        m(mm)=-1;
        i=i+1;
    end

    figure
    subplot(2,1,1)

```

```

plot(t2,f0)
title('original: noise is -1')
xlabel('time[s]');
ylabel('frequency [Hz]')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(n,m)
title('noise + to K is -1')
xlabel('time [s]');
ylabel('frequency [Hz]')
grid on
clear i
%
% _____
% finding of indexes at the beginning =(aa) and at the end = (bb) in time
% when m =-1 (frequency = -1 ... unvoiced segments)

% _____ ?record starts with m = -1 of not
ab=find(m==-1);

% if numel(ab)~=0; %no unvoiced part is present in the recording

if ab(1)==1; %if m begins by -1
    aa(1)=1;
    disp ('begins -1')
else
    aa(1)=ab(1); %if not
end

mm1=m(1:(end-1));
mm2=m(2:end);

ac=find((mm1~= -1)&(mm2==-1)); %ac = index of last sample before m = -1
ac=ac+1; %ac = index of first m = -1 after a number

if aa(1)==ac(1);
    aa= ac; % aa = index of first m=-1
else
    aa=[aa;ac];
end

% _____ ?record ends with m=-1 of not
ba=find((mm1== -1)&(mm2~= -1));
if m(end)~-1;
    bb=ba;
else
    bb=[ba;length(m)]; %%%%% bb - index of last -1
    disp ('ends -1')
end

AA=n(aa)-n(1); % times of first m = -1 (correction on the time of 1.sample)
% i.e. times of first unvoiced sample
BB=n(bb)-n(1); % times of last m = -1 (correction on the time of 1.sample)
% i.e. times of last unvoiced sample

% _____
%finding of indexes (from (n)) of closest value for Lp in time

i=1;
while i<=(length(AA));
    [oo(i),ll(i)]=min(abs(AA(i)-t));
    i=i+1;
end

```

```

i=1;
while i<=(length(BB));
    [oo(i),uu(i)]=min(abs(BB(i)-t));
    i=i+1;
end
%
% _____
% Defining the Lp values for unvoiced segments

LpFx=LpF;           % SPL where unvoiced segments are 200
% LpFy=LpF;         % SPL where unvoiced segments stay on the level of last voiced value SPL
LpFy=LpF;           % SPL where unvoiced segments are undefined NaN

i=1;
while i<=(length(uu));
    ii=ll(i):uu(i);
    iii=ii(1)-1;    % index of last sample before unvoiced segment
    if iii~=0
        Lsil=LpFy(iii); % value of last number before unvoiced segment
        Lsil=NaN;
        LpFy(ii)=Lsil;
    end
    LpFx(ii)=200;
    i=i+1;
end

LpFx1=LpFx(1:(end-1));
LpFx2=LpFx(2:end);

% _____ problem : sampling of time in Praat and in Matlab
if n(end)<t(end) & m(end)==-1;
    azz=find((LpFx1==200) & (LpFx2~=200)); % when time(praat) < time(matlab)
    azz=azz(end); % last value = 200
    LpFx(azz:end)=200;
    LpFy(azz:end)=LpFy(azz-1);
    disp('end was changed')
end
end
if sg == 1
    LpFx = LpF;
    LpFy = LpF;
end

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,LpF)
title('original')
xlabel('time [s]');
ylabel('LpF[dB]')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(t,LpFx)
title('unvoiced = 200')
xlabel('time[s]');
ylabel('LpFx[dB]')
grid on

if sg==2
    figure
    subplot(2,1,1)
    plot(n,m)
    title('comparison of changes')
    xlabel('time[s]');
    ylabel('frequency [Hz]')
    grid on

```

```

        subplot(2,1,2)
        plot(t,LpFx)
        xlabel('time [s]');
        ylabel('LpFx [dB]')
grid on
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%===== 6. finding minimum
                                % the first 0.5 s is not taken into account
is=ceil(0.500*fs);           %index at 0.5s
[Lpmin,imin]=min(LpFx(is:end));
Lpmin
imin=is+imin-1;

% %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%===== graphs of results
ccl = c1*pref;
pAC = ccl.*y; %calibrated pressure

figure
subplot(2,1,1);
plot(t,pAC,'b');
xlabel('time [s]'),
ylabel('pressure [Pa]')
hold on
grid on

LpFy(1:round(0.375*fs))= NaN;           %inaccurate values of Lp at the beginning made undefined

subplot(2,1,2)
plot(t,LpF,'b:',t,LpFy,'r','LineWidth',2);
xlabel('time [s]'), ylabel(strcat('L_A_F [dB]')); %ylabel needs to be changed to respect the
weighting
%ylim([30 60])
grid on
hold on
plot (t(imin),Lpmin,'ro','LineWidth',2)
legend('L_A_F without voicing detection','L_A_F with voicing detection', 'minimal value' )

if sg ==2
    v = 0; %v index of 1.value after -1

    ab=find(f0==-1);
    if ab(1)~=1;           %1. value m = -1
        FN(1)=1;           %FN: index of the First Number
        FN(2:length(v)+1)=v(1:end);
    else FN=v;
        disp ('begins -1')
    end

    LN =find((f01~= -1)&(f02==-1)); %LN index of the Last Number
    if ab(end)==length(f0);
        disp ('ends -1')
        LN(end)=LN(end); % Not needed? /SG
    else LN(end)=length(F0);
    end

    A=t2(FN); %% times of 1.number
    B=t2(LN); %% times of last number

    FNt=round(A.*fs);
    LNT=round(B.*fs);

```

```

        %Fnt - indexes of the closest values for first number in segment of phonation in time t
        %Lnt - indexes of the closest values for last number in segment of phonation in time t
    end

    if sg ==1
        Fnt=1;
        Lnt=length(pACrelff);
    end
    %
    %rms
    % clearvars -except pACrelff pref Fnt Lnt t y cl fs LpF LpFy Lpmin imin
    y2=pACrelff.^2;          % for calculation of sum

    Lef1(1:length(t)) = NaN; %predefine the Lef values

    %figure
    for i2=1:length(Lnt);    %Lnt = number of voiced segments
        i1=1;
        clear yy tt
        yy=y2(Fnt(i2):Lnt(i2));
        tt=t(Fnt(i2):Lnt(i2));
        if length(yy)>=fs;    %condition for segments longer than 1 sec
            %preparation of the 1st second sum of the segment
            S=sum(yy(i1:fs))-yy(fs)+yy(i1);
            for i1=1:(length(yy)-fs);
                S=S+yy(fs+i1)-yy(i1);
                R(i1)=sqrt(S/fs);    %rms
                Lef(i1)=20*log10(R(i1));
                Lef1(Fnt(i2)+i1+fs-1)= Lef(i1);
                i1=i1+1;
            end
            Lefmin(i2)=min(Lef)          %minimum from SPLs
            t2(i2)=find(Lefmin(i2)==Lef); %where the minimum is? index
            tt2(i2)=tt(t2(i2)+fs);    %rms value at the end of the second
        else
            disp ('shorter than 1 sec')
            Lefmin(i2)=NaN            %minimum from SPLs
            tt2(i2)=tt(1);          %rms value at the end of the second
        end
        clear tt Lef
        i2=i2+1;
    end

    figure
    plot(t,LpFy,'b:',t,Lef1,'r','LineWidth',2);
    [Lefmn1, iLeftmn1] = min(Lef1)
    hold on
    grid on
    hold on
    plot (t(imin),Lpmin,'bo','LineWidth',2)
    plot (t(iLeftmn1),Lefmn1,'ro','LineWidth',2) %minimum of the Lprms
    legend('L_F without voicing detection','L_e_q_1_s with voicing detection', 'L_F minimum', 'L_e_q_1_s
    minimum' )
    xlabel('time[s]');
    ylabel('Sound levels [dB]')

    %
    % LOUDNESS CALCULATION ANSI
    % Loudness of steady sounds
    cc1 = cl*pref;
    pAC1s = cc1.*y((iLeftmn1-fs+1):iLeftmn1); %instantaneous pressure - calibrated
        % 1 second of the softest tone when Lpefls in at minimum

    % Use the Genesis Loudness Toolbox
    Sig = pAC1s;          %:signal (Pascal)
    fe=fs;              %: sampling freq of the signal (Hz)

```

```

field_type = 0;          %: field type (0: free field, 1: diffuse field)
rec_type = 'mic';       % 'mic' or 'head', depending on the measure (microphone or dummy head)
show = 'off';          % 'on' or 'off' to enable or disable some figures display
[Loudness, Specific_loudness, fc, LoudnessLevel] = Loudness_ANSI_S34_2007(Sig, fe, field_type,
rec_type, show);

% LOUDNESS CALCULATION ISO
% Computation of loudness (Zwicker model) according to ISO 532B / DIN 45631 norms.
% This model is valid for steady sounds.
% "Program for calculating loudness according to DIN 45 631 (ISO 532B)",
% E.Zwicker and H.Fastl, J.A.S.J (E) 12, 1 (1991).
FieldType = 0; %: sound field type (0: free field (default value), 1: diffuse field)
[N_tot, N_specif, BarkAxis, LN] = Loudness_ISO532B_from_sound(Sig, fe, FieldType);
%
% OUTPUT:
%      N_tot      : total loudness, in sone
%      N_specif   : specific loudness, in sone/bark
%      BarkAxis   : vector of Bark band numbers used for N_specif computation
%      LN         : loudness level, in phon
%

%Print the results on the screen
LoudnessANSI_sones = Loudness
LoudnessISO_sones = N_tot
LoudnessLevelANSI_phones = LoudnessLevel
LoudnessLevelISO_phones = LN
minLAeq1s_dBA = Lefmn1

```